

Evaluación del compromiso entre distorsión armónica y eficiencia energética en los sistemas de mejoramiento del factor de potencia de los alimentadores Zeta, Luo y Cuk para motores de DC sin escobillas

Evaluation of the compromise between harmonic distortion and energy efficiency in the power factor improvement systems of the Zeta, Luo and Cuk feeders for brushless DC motors

Msc. Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa
Universidad del Cauca / Colombia
sersarzosa@unicauca.edu.co

PhD. Carlos Felipe Rengifo Rodas
Universidad del Cauca / Colombia
caferen@unicauca.edu.co

PhD. Édinson Franco Mejía
Universidad del Valle / Colombia
edinson.franco@correounivalle.edu.co

Fecha Recepción: 08/08/17 - Fecha Aprobación: 07/11/17

Resumen: El objetivo del presente artículo es evaluar el compromiso existente entre la distorsión armónica y la eficiencia energética de los manejadores para motores de DC sin escobillas, basados en los convertidores Zeta, Luo y Cuk aislados para determinar las ventajas y contribuciones de cada convertidor respecto a la eficiencia energética. Así mismo, la relación que tiene dicha eficiencia con la calidad de la energía eléctrica. Para realizar la evaluación planteada se han utilizado los modelos de los convertidores encontrados en la literatura, como también los modelos de simulación del inversor y del motor encontrados en la herramienta *Simscape Electronics* del software Matlab. La investigación se centró en comparar el factor de potencia, la distorsión armónica total (THD) y la eficiencia energética (entendida como el cociente entre la energía activa consumida por el motor y la energía activa entregada por la red de AC) de un sistema alimentador para un motor BLDC. Para efectuar la comparación se definieron dos criterios de desempeño basados, respectivamente, en la simulación del sistema con los convertidores en modo ideal y en modo real. De las pruebas experimentales se observó que conforme aumenta la eficiencia energética del sistema aumenta la THD y disminuye el factor de potencia visto por la red de AC. Del trabajo se concluyó que el convertidor Luo es el que presenta el mejor compromiso entre distorsión armónica y eficiencia energética.

Palabras clave: Calidad de energía, convertidor Cuk, convertidor Luo, convertidor Zeta, eficiencia energética

Abstract: The objective of this article is to evaluate the existing compromise between the harmonic distortion and the energy efficiency of the drivers for brushless DC motors based on the isolated Zeta, Luo and Cuk converters to determine the advantages and contributions of each converter with respect to the energetic efficiency, also, the relation that has this efficiency with the quality of the electrical energy. In order to carry out the proposed evaluation, the inverter models found in the literature were used, as well as the inverter and motor simulation models found in the *Simscape Electronics* tool of the Matlab software. The research focused on comparing the power factor, total harmonic distortion (THD) and energy efficiency (understood as the quotient between the active energy consumed by the motor and the active energy delivered by the AC network) of a feeder system for a BLDC motor. To make the comparison, two performance criteria were defined based on the simulation of the system with the converters in ideal mode and in real mode. From the experimental tests it was observed that as the energy efficiency of the system increases, the THD increases and the power factor seen by the AC network decreases. From the work it was concluded that the Luo converter is the one that presents the best compromise between harmonic distortion and energy efficiency.

Keywords: Power quality, Cuk converter, Luo converter, Zeta converter, energy efficiency

1. Introducción

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés BrushLess DC motor) están adquiriendo cada vez más fuerza en aplicaciones de baja y media potencia [1], hasta el punto de desplazar casi en su totalidad a los motores de inducción [2] debido a su alta eficiencia de trabajo [3, 4], pérdidas energéticas mínimas [5], buena relación costo/beneficio [6]-[8], gran robustez [9, 10], baja demanda en mantenimiento [11], entre otras. Los motores BLDC se utilizan en gran variedad de aplicaciones robóticas [12]-[14] y aeroespaciales [15]-[17], en el ámbito industrial [18, 19], automatización [20]-[22], equipos y dispositivos médicos [23], sistemas de control [24, 25], dispositivos para vehículos [26]-[29] y para el hogar [30], entre otros.

Estos motores generalmente se alimentan a través de un puente rectificador de diodos y un condensador DC de enlace [31], lo cual genera gran distorsión por componentes armónicos y, en consecuencia, presentan factores de potencia muy bajos. En los últimos años se ha venido corrigiendo este problema con los avances de la electrónica de potencia, logrando alcanzar mayor calidad al sustituir el puente rectificador y el condensador por convertidores con aislamiento de alta frecuencia [32], lo que ha contribuido a obtener baja distorsión armónica total y un factor de potencia cercano a la unidad.

Ahora bien, con el afán por cumplir la normatividad respecto a contenido armónico permitido por cargas individuales hacia la red eléctrica [33], se han venido perfeccionando diferentes alimentadores para los motores de DC sin escobillas, que mejoran la calidad de la energía, sin tener en cuenta el consumo energético extra que demandan dichos convertidores cuando son adicionados al sistema.

Teniendo en cuenta los anteriores aspectos, es evidente que hay un conflicto de objetivos entre calidad de energía eléctrica y eficiencia energética, por esta razón, es conveniente determinar cuál de los convertidores utilizados para alimentar motores BLDC ofrece el mejor compromiso en cuanto a los intereses expuestos (calidad de energía eléctrica y eficiencia energética).

2. Marco Teórico

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos necesarios para abordar el proyecto, así mismo,

se presentan los convertidores Zeta, Luo y Cuk y, finalmente, se exponen los medidores de factor de potencia monofásico y trifásico, implementados y simulados con la herramienta Simulink de MATLAB.

2.1. Factor de potencia en sistemas con cargas no lineales.

En la última década se ha incrementado considerablemente la preocupación por el máximo aprovechamiento de la energía eléctrica, tanto por parte de los productores como de los usuarios. Si bien los avances en áreas como la electrónica de potencia han permitido aumentar la eficiencia de los equipos eléctricos, éstos representan cargas no lineales que pueden deteriorar la calidad de la energía entregada por las compañías generadoras de electricidad. A pesar de que también distorsionan la onda fundamental de voltaje de 60Hz, la principal característica por la cual se les denomina cargas no lineales es la gran distorsión que producen sobre la corriente que le demandan a la línea de alimentación alterna, debido a la generación inherente de armónicos. En este sentido, las cargas resistivas, inductivas y capacitivas se consideran cargas lineales, ya que demandan una corriente prácticamente sinusoidal.

La eficiencia en el suministro de potencia desde la fuente hacia la carga se reduce típicamente debido al desplazamiento de fase entre tensión y corriente a la frecuencia fundamental. El cambio de fase se produce, en gran medida, debido a los flujos de energía que caracterizan, por ejemplo, a los motores eléctricos que se denominan carga agregada, entonces es aquí donde el factor de potencia entra a desempeñar su importante papel. Actualmente coexisten tres definiciones de factor de potencia [34, 35, 36]. Una de ellas, la cual está consignada en el estándar IEEE Std 1459 – 2010, consiste en el cociente entre la integral del producto punto del voltaje y la corriente sobre el producto de la norma del voltaje por la norma de la corriente, como se muestra en la ecuación (1).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\langle v_s, i_s \rangle}{\|v_s\| \|i_s\|} \quad (1)$$

Donde FP es el factor de potencia; v_s e i_s son funciones de valor vectorial (de \mathbb{R} en \mathbb{R}^3) con los valores instantáneos de los voltajes/corrientes en cada una de las fases. $\langle v_s, i_s \rangle$ equivale a la potencia activa, definida en la ecuación (2):

$$P = \langle v_s(t), i_s(t) \rangle = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v_s^T(t) i_s(t) dt \quad (2)$$

y $\|v_s\|$ y $\|i_s\|$ representan respectivamente las normas euclidianas de las señales $v_s(t)$ e $i_s(t)$

$$\|v_s(t)\| = \sqrt{\langle v_s(t), v_s(t) \rangle} \quad (3)$$

$\|v_s\|$ y $\|i_s\|$ y P es la potencia aparente.

Cabe destacar que la medición del factor de potencia es controversial y continúa en estudio por su complejidad. Ninguna de las tres definiciones ha logrado aceptación total por parte de la comunidad científica, por ende, se ha utilizado la definición actual del estándar IEEE Std 1459 – 2010 [36] para medirlo.

2.2. Sistemas electrónicos para el control del factor de potencia.

En esta subsección se hará una revisión bibliográfica sobre los convertidores electrónicos para el control del factor de potencia percibido por la red de AC que alimenta al sistema de rectificación en los motores BLDC.

- Convertidor Zeta aislado

En [37] se propone el control de velocidad y posición con corrección del factor de potencia para un motor

BLDC con alimentación monofásica, seguida por un puente rectificador de diodos y un convertidor Zeta con aislamiento de alta frecuencia (ver Figura 1), esto propuesto como una solución rentable para aplicaciones de baja potencia. La estrategia de control implementada corresponde a un controlador proporcional - integral (PI).

- Convertidor Luo

En [38] se busca garantizar la máxima transferencia de energía con óptimo rendimiento, basándose en un convertidor Luo con aislamiento de alta frecuencia con mejoras de calidad de energía en la red de AC. En este esquema (ver Figura 2) se utiliza el cambio a baja frecuencia de conmutación para reducir pérdidas asociadas a los seis interruptores de estado sólido del inversor.

- Convertidor Cuk aislado sin puente rectificador

A diferencia de los trabajos anteriores, en [32] se presenta la corrección del factor de potencia, mediante un convertidor Cuk aislado sin puente rectificador para el control de velocidad del motor de DC sin escobillas (ver Figura 3). Esto permite el funcionamiento de los interruptores del inversor a la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación lo que reduce las pérdidas por conmutación.

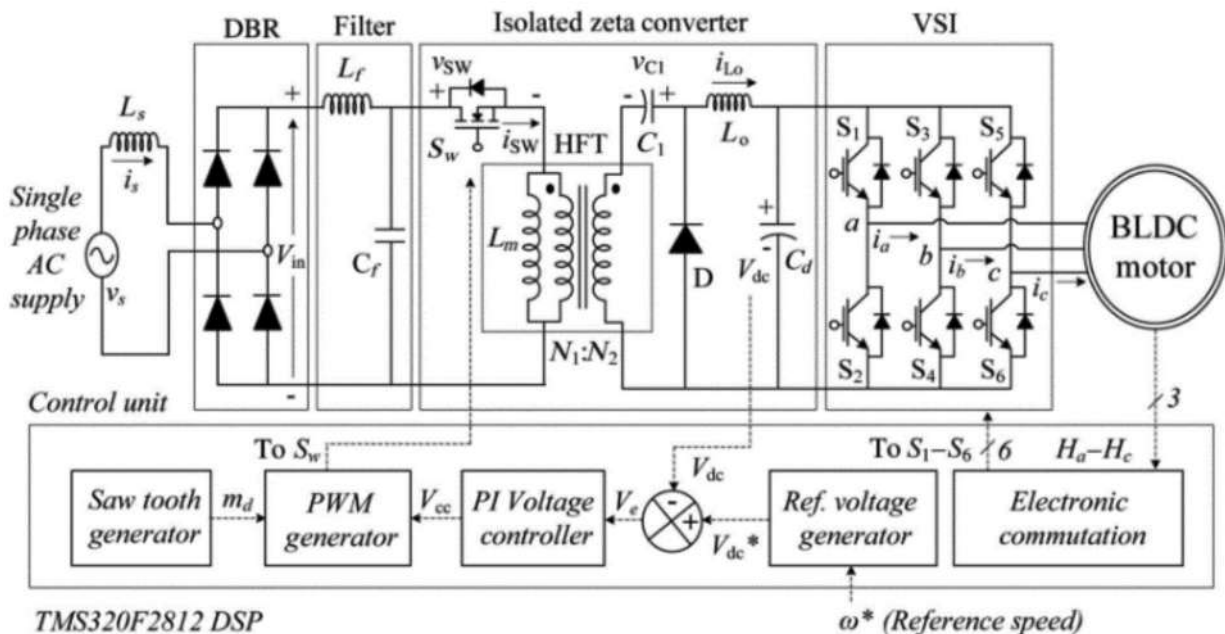


Figura 1. Propuesta de accionamiento del motor BLDC basada en un Convertidor Zeta aislado (Tomada de [37])

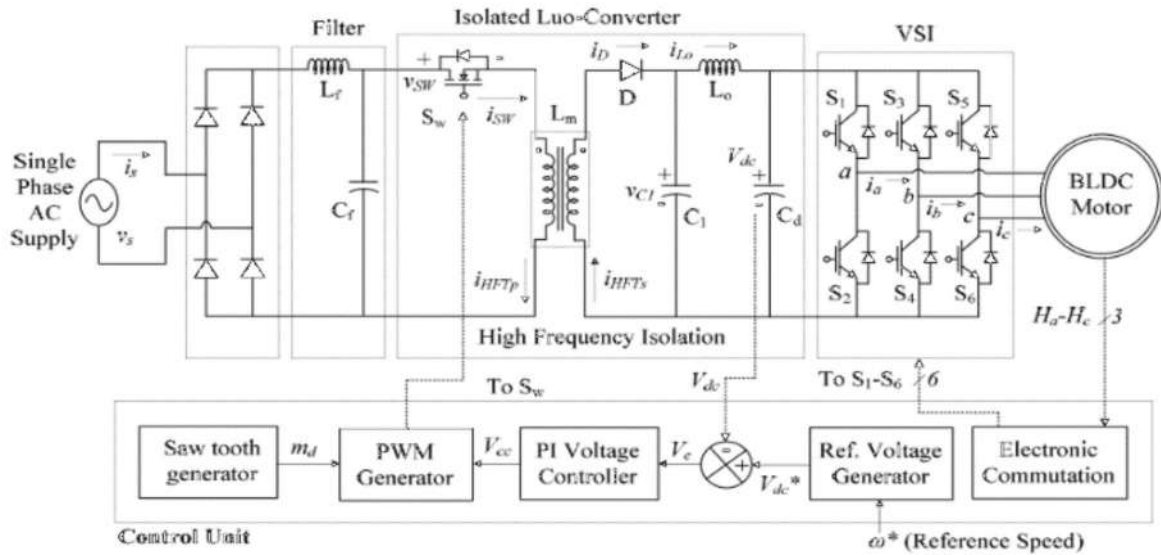


Figura 2. Propuesta de accionamiento del motor BLDC basada en un Convertidor Luo con aislamiento de alta frecuencia (Tomada de [38]).

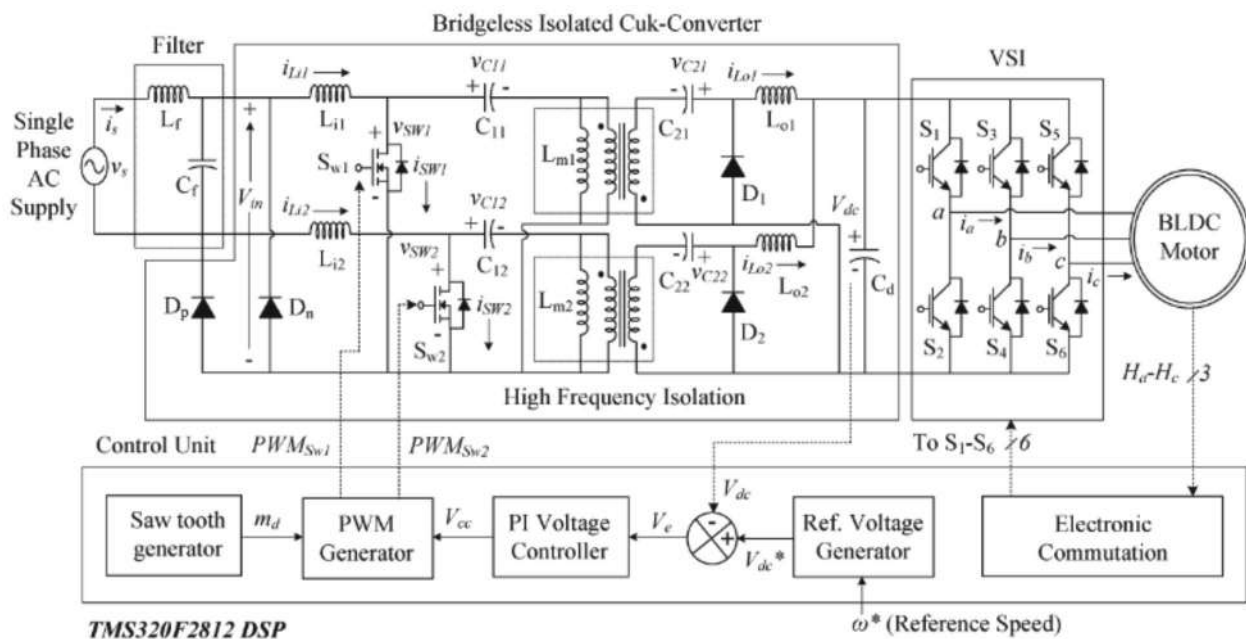


Figura 3. Propuesta de accionamiento del motor BLDC basada en un Convertidor CUK (Tomada de [32])

3. Simulación del Sistema Basado en los Convertidores Zeta, Luo y Cuk.

En esta sección se presenta la simulación del sistema de alimentación de un motor BLDC basado en los convertidores Zeta, Luo y Cuk, mediante la herramienta software *Simulink* de *MATLAB*.

La tensión de alimentación se ajusta a 220V (60 Hz). El convertidor regula este voltaje a 175V para la alimentación del motor de DC sin escobillas. Los parámetros del motor se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del motor BLDC

Voltaje (V)	175
Velocidad (rpm)	1900
Resistencia (Ω)	0.7
Inductancia (mH)	2.72
Inercia (Kg.m ²)	0.8e-3
Par nominal (N.m)	0.84

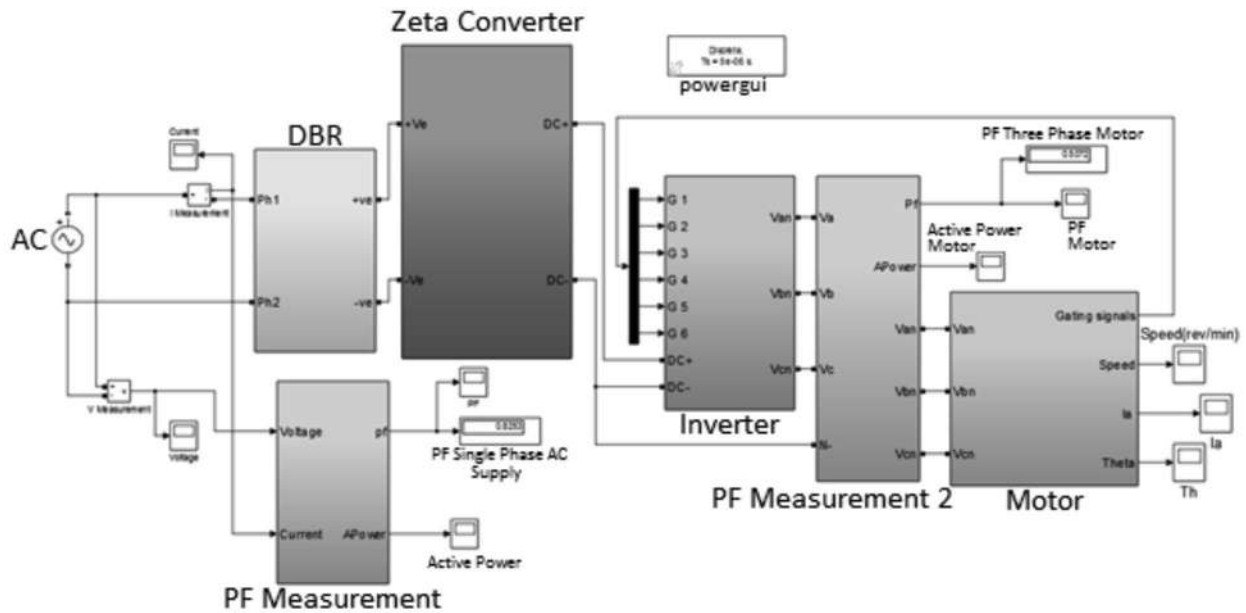


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema caso de estudio con corrección de factor de potencia, basado en un convertidor Zeta con aislamiento de alta frecuencia.

3.1. Simulación basada en un convertidor Zeta con aislamiento de alta frecuencia.

En la Figura 4 se presenta el diagrama de bloques del sistema.

Los valores de los parámetros del convertidor Zeta son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del convertidor Zeta aislado y filtro LC.

Lf	37.7 μ H
Cf	330 η F
Lm	13.3mH
C1	0.1mF
Lo	15mH
Cd	1mF

Los valores de los parámetros del controlador PID del lazo de control de voltaje son: $K_p = 0.03$; $K_i = 0.01$ y $K_d = 0.001$.

A continuación se presentan los resultados de las variables de interés analizadas en estado estacionario.

En la figura 5 se puede observar que el promedio de la potencia activa total del sistema en estado estacionario es de 288 W y la consumida por el motor es de 237 W, lo que significa que el alimentador del motor DC sin escobillas consume aproximadamente 51 W (17.7%)

de la energía total del sistema. En la figura 6 se aprecia el factor de potencia percibido por la red de AC, el cual alcanza un valor estacionario después de asimilar el cambio de torque aplicado en 0.5 segundos.

A continuación, haciendo uso de la herramienta 'Powergui FFT Analysis' de Simulink, se procede a calcular la distorsión armónica total (THD) en dos ciclos del estado estacionario para el tiempo de simulación, de la señal de interés.

3.2. Simulación basada en un convertidor Luo con aislamiento de alta frecuencia.

Los esquemas de simulación basados en Luo y Cuk no aislado solo difieren, con respecto al esquema basado en el convertidor Zeta, en el bloque de alimentación para el motor BLDC. Los valores de los parámetros del convertidor Luo son presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del convertidor Luo aislado y filtro LC.

Lf	3.77 μ H
Cf	0.1 η F
Lm	13.3mH
C1	1mF
Lo	0.9mH
Cd	995 μ F

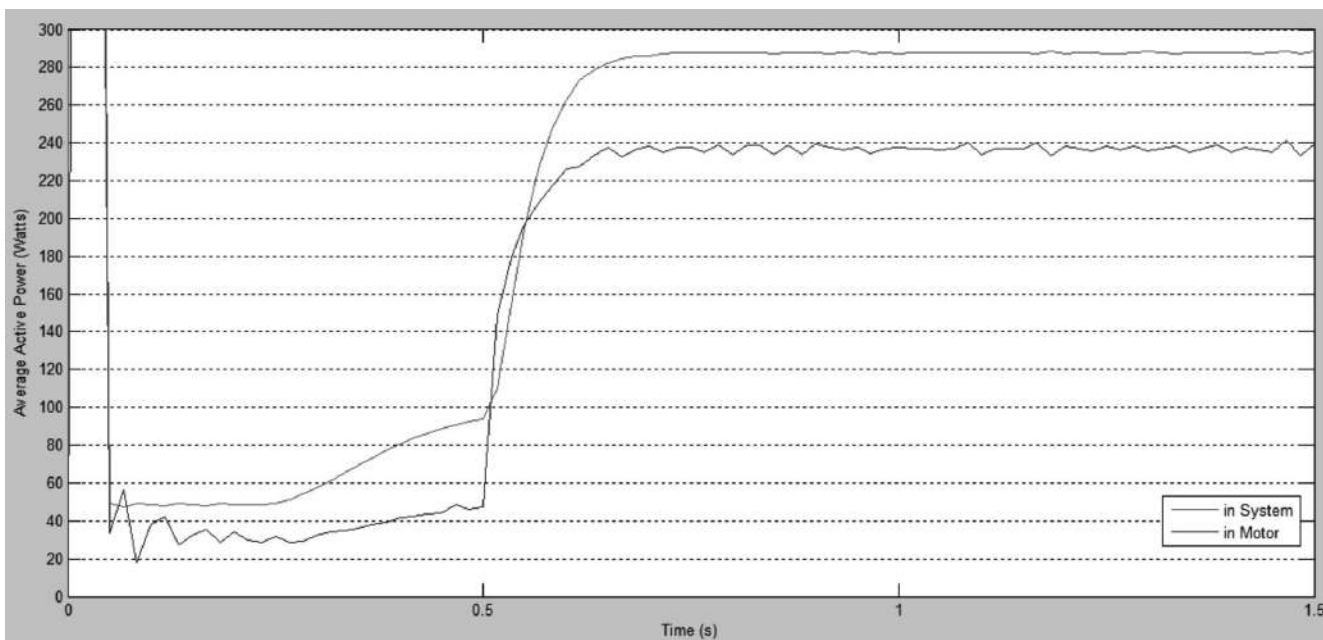


Figura 5. Potencia activa promedio en la entrada del sistema - Potencia activa promedio en la entrada del motor

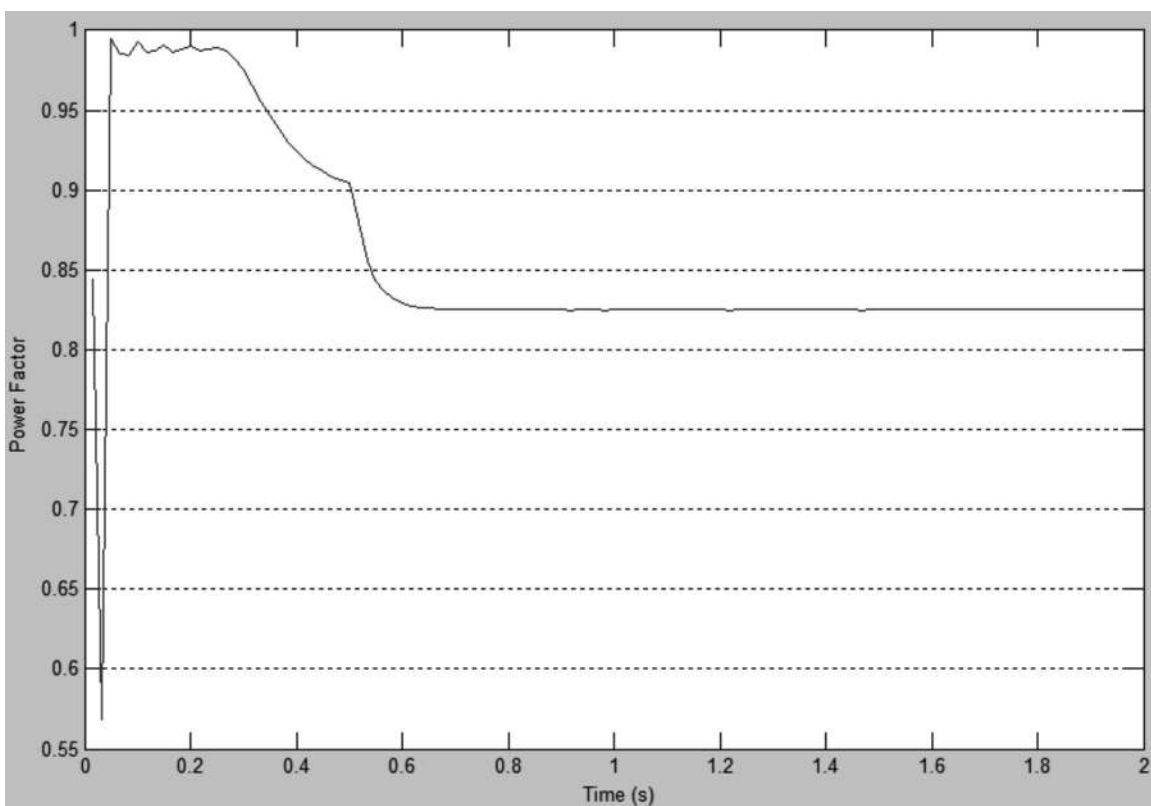


Figura 6. Factor de potencia percibido por la red de AC

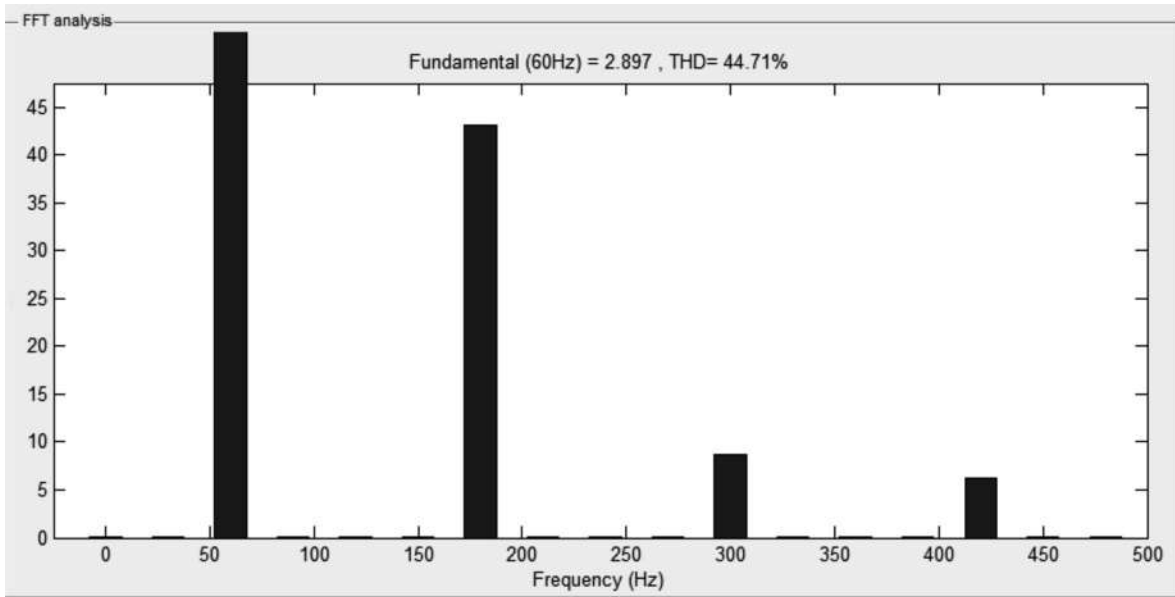


Figura 7. Distorsión armónica total de la señal de corriente de la fuente.

Los valores de los parámetros del controlador PID del lazo de control de voltaje son: $K_p = 0.03$; $K_i = 0.01$ y $K_d = 0.001$.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en simulación de las variables de interés en estado estacionario.

El promedio de la potencia activa total en estado estacionario del sistema es de 250 W y la consumida por el motor es de 204 W, lo que significa que el alimentador del motor DC sin escobillas consume aproximadamente 46 W (18.4%) de la energía total del sistema.

3.3 Simulación basada en un convertidor Cuk no aislado con puente rectificador.

Los valores de los parámetros del convertidor Cuk no aislado son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros del convertidor Cuk no aislado

L1	1mH
C1	470 μ F
L2	1mH
C2	47 μ F

Los valores de los parámetros del controlador PID del lazo de control de voltaje son: $K_p = 0.0005$; $K_i = 0.05$ y $K_d = 0.01$.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en simulación de las variables de interés en estado estacionario.

El promedio de la potencia activa total del sistema es de 285 W y la consumida por el motor es de 260 W, lo que significa que el alimentador del motor DC sin escobillas consume aproximadamente 35 W (8.8%) de la energía total del sistema.

Tabla 4. Valores de las variables de interés en estado estacionario

Potencia activa promedio en la entrada del sistema	Potencia activa promedio en la entrada del motor	Factor de potencia percibido por la red de AC	Distorsión armónica total de la señal de corriente de la fuente
250W	204W	0.82	36.29%

Tabla 6. Valores de las variables de interés en estado estacionario

Potencia activa promedio en la entrada del sistema	Potencia activa promedio en la entrada del motor	Factor de potencia percibido por la red de AC	Distorsión armónica total de la señal de corriente de la fuente
285W	260W	0.77	89.25%

3.4. Simulación basada en un convertidor Cuk aislado sin puente rectificador.

En la Figura 8 se presenta el diagrama de bloques del sistema.

Los valores de los parámetros de este convertidor son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros del convertidor Cuk aislado y filtro LC.

Lf	82mH
Cf	10mF
L1 y L2	1μH
C11 y C12	40μF
C21 y C22	75μF
Lo1 y Lo2	45μH
Lm1 y Lm2	500mH
Cd	2000μF

Los valores de los parámetros del controlador PID del lazo de control de voltaje son: $K_p = 0.0005$; $K_i = 0.05$ y $K_d = 0.001$.

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos en simulación de las variables de interés en estado estacionario.

El promedio de la potencia activa total del sistema es de 1500 W y la consumida por el motor es de 177 W, lo que significa que el alimentador del motor de DC sin escobillas consume aproximadamente 1323 W (88.2%) de la energía total del sistema. En la Figura 10 se aprecia cierta oscilación en la onda del factor de potencia percibido por la red de AC, esto debido al problema de "zona muerta" [39] producido durante los cambios de modo de operación del convertidor Cuk específicamente. Como resultado se produce también, mala regulación, inestabilidad y distorsión en la onda de tensión, lo cual repercute en la respuesta del factor de potencia.

A continuación, se presenta la distorsión armónica total (THD), en dos ciclos del estado estacionario para el tiempo de simulación de la señal de corriente de la red de AC (ver Figura 7).

En la Figura 7 se observa la presencia de sub-armónicos en la señal de la corriente de la red de AC, esto debido al problema de "zona muerta" [39] producido durante los cambios de modo de operación del convertidor Cuk específicamente. Como resultado se produce también mala regulación, inestabilidad y distorsión en la onda de tensión.

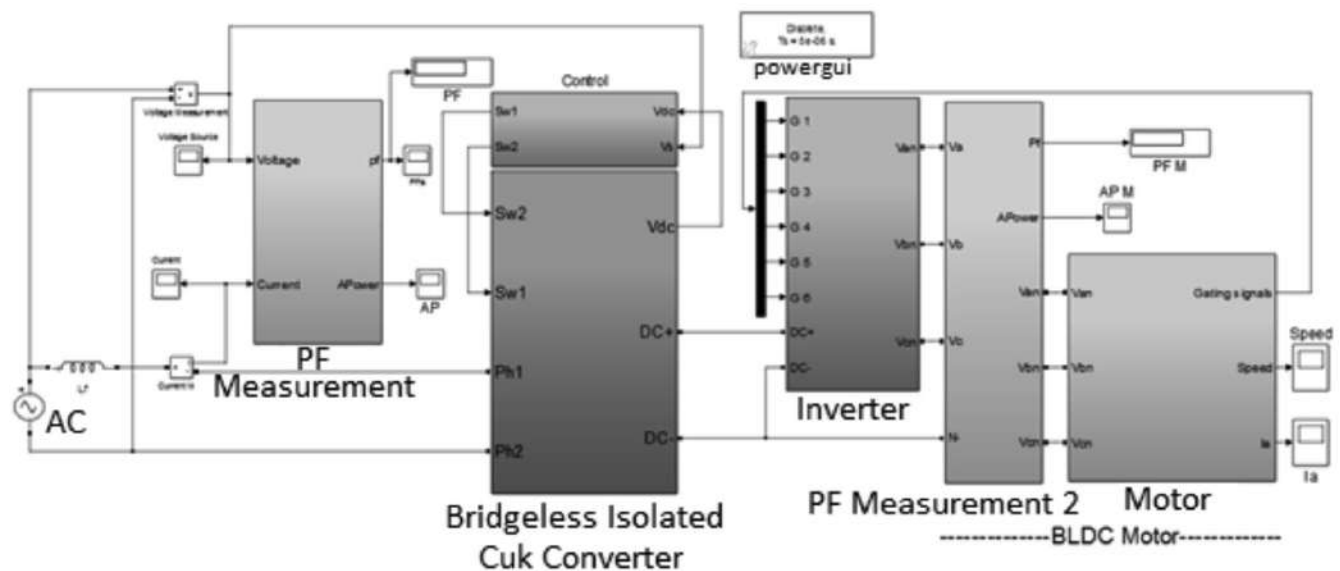


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema caso de estudio con corrección de factor de potencia, basado en un convertidor Cuk aislado sin puente rectificador.

Tabla 8. Valores de las variables de interés en estado estacionario

Potencia activa promedio en la entrada del sistema	Potencia activa promedio en la entrada del motor	Factor de potencia percibido por la red de AC	Distorsión armónica total de la señal de corriente de la fuente
250W	204W	0.82	36.29%

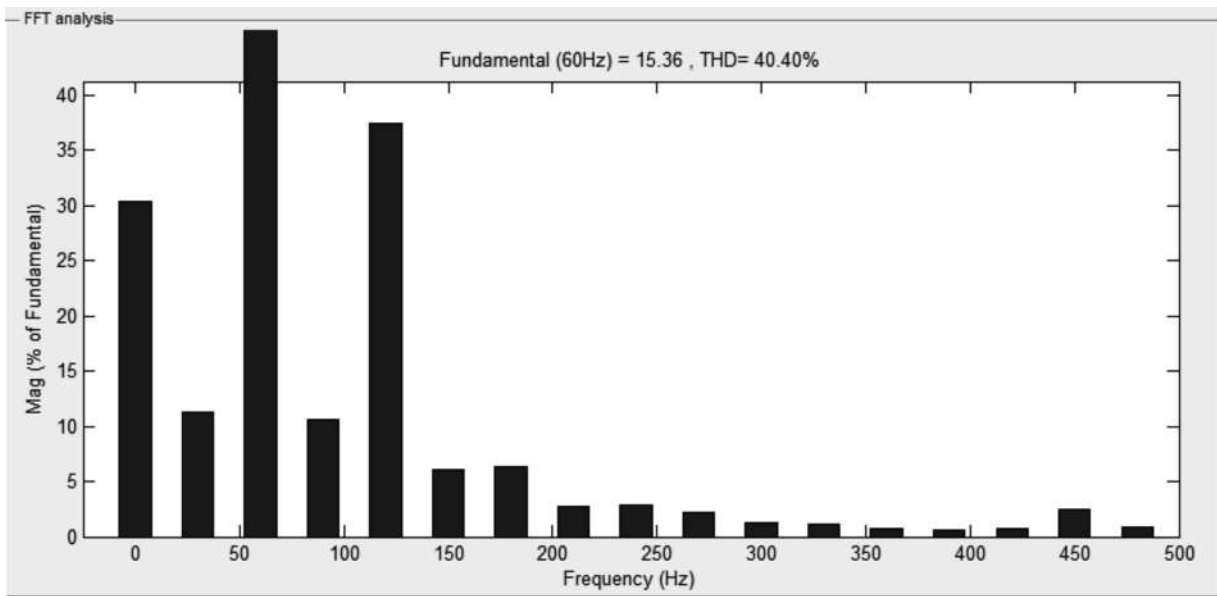


Figura 9. Distorsión armónica total de la señal de corriente de la fuente.

4. Estudio del Comportamiento del Sistema Considerando Dispositivos Semiconductores Ideales.

En esta sección se desea verificar si la principal fuente de pérdida de eficiencia energética es debida a las no linealidades de los elementos activos. De esta manera, se hace necesario considerar un estudio con dispositivos semiconductores en modo ideal y así determinar su influencia en las conclusiones según el número de elementos activos presentes en el convertidor. Este estudio ha sido realizado únicamente en el convertidor Cuk sin aislamiento de alta frecuencia dada su simplicidad; para los demás convertidores se intentó realizar, sin embargo, la ley de control no se cumplía. Se ha concluido que es por su complejidad y alta sensibilidad en la interrupción de los Mosfet lo que imposibilita realizar grandes cambios en los parámetros.

Para este estudio se ha realizado el cálculo de la eficiencia energética haciendo uso de la ecuación (4), así:

$$EE = \frac{\overline{AP}_m}{\overline{AP}_s} \quad (4)$$

Donde, EE es la eficiencia energética, \overline{AP}_m es la potencia activa promedio consumida por el motor y \overline{AP}_s es la potencia activa promedio entregada por la red de AC.

De esta manera, teniendo en cuenta los valores de potencia activa promedio en estado estacionario de la

Figura 7, y haciendo uso de la ecuación (4), la eficiencia energética será:

$$EE = \frac{280w}{288w}$$

$$EE = 97,22$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en términos de eficiencia energética con los dispositivos semiconductores reales (ver Tabla 9), se puede comprobar que la principal pérdida de eficiencia energética es debida a las no linealidades de los elementos activos, que corresponden a voltajes de ruptura y por corrientes parásitas asociadas a los semiconductores que se producen en los dispositivos reales del convertidor.

5. Comparación de los Parámetros de Interés Obtenidos para los Convertidores Zeta, Luo y Cuk.

A continuación, se presenta el cuadro comparativo de los parámetros de interés obtenidos en cada caso para los esquemas utilizados a partir de la sintonización realizada en la sección 3.

Para determinar el mejor compromiso entre eficiencia energética y calidad de energía se ha propuesto un índice, dado en la ecuación (5):

$$I = \frac{FP * EE}{THD} \quad (5)$$

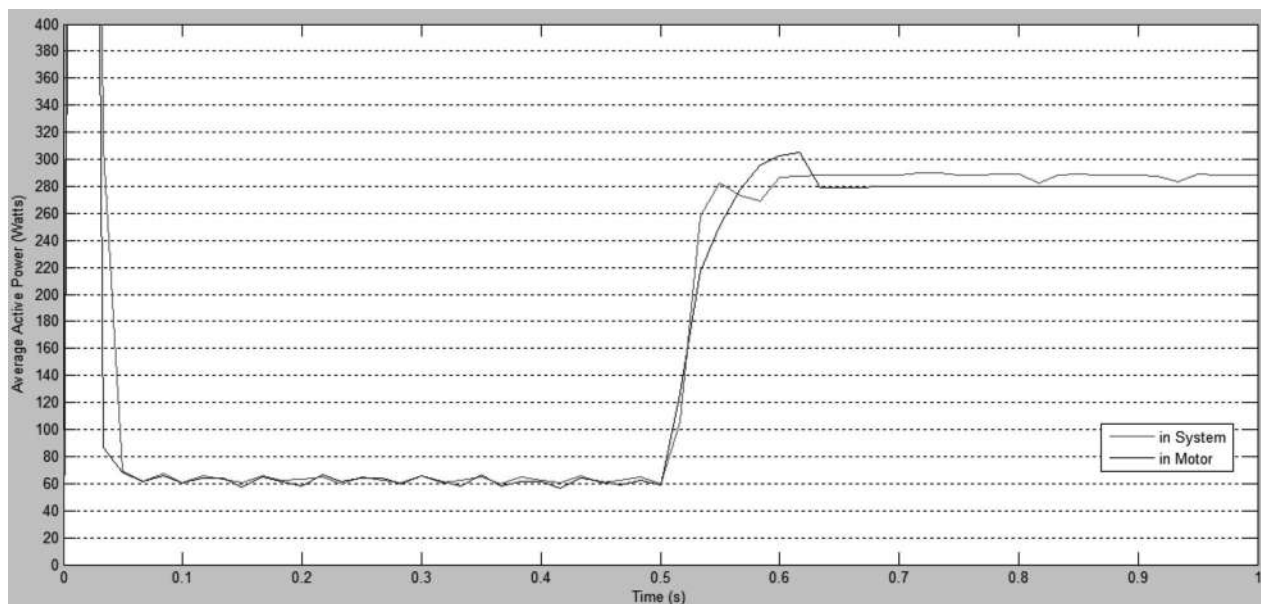


Figura 10. Potencia activa promedio entregada por la red de AC - Potencia activa promedio consumida por el motor (Wattios)

Tabla 9. Comparación de los parámetros de interés obtenidos para los convertidores Zeta, Luo y Cuk

Convertidores	Factor de potencia	Eficiencia energética (%)	THD de la corriente de la red de AC (%)	Índice de correlación entre E.E. y Calidad.
Zeta	0.82	82.3	44.71	1.5094
Luo	0.81	81.6	36.29	1.8213
Cuk no aislado	0.77	91.2	89.25	0.7868
Cuk no aislado ideal	0.69	97.2	-	-
Cuk aislado	0.79	11.8	40.40	0,2307

Donde, FP (Factor de potencia) es multiplicado por la EE (Eficiencia Energética), y esto dividido entre la THD (Distorsión Armónica Total) para cada convertidor. De esta manera, se ha podido determinar que la mejor correlación entre los parámetros de interés es la del convertidor Luo cuyo índice es de 1.8213 (ver Tabla 9).

Por otro lado, La THD de la corriente de la red de AC para el convertidor Cuk no aislado en modo "ideal switch" es mayor al 100% por lo que se descarta como un valor serio a considerar, así mismo, el cálculo del índice de correlación solo aplica para los convertidores con elementos reales.

6. Variación de los Parámetros de los Filtros de Entrada y Salida de los Convertidores (Zeta, Luo y Cuk).

En esta sección se estudiará el efecto que produce el cambio en los parámetros de los filtros de entrada y

salida de los convertidores Zeta, Luo y Cuk, en: (i) el factor de potencia visto por la red de AC, (ii) el contenido armónico de la corriente suministrada por la red de AC y (iii) la eficiencia energética. El rango de variación se hará alrededor de los valores nominales de los parámetros del filtro (Casillas en gris), los cuales fueron hallados teniendo en cuenta los parámetros del motor (ver Tabla 1), a partir de la respectiva sintonización como se realiza en [32], [37, 38]. Con los resultados obtenidos se establecerán dos curvas. La primera relacionará la eficiencia con el factor de potencia y la segunda la THD con la eficiencia energética.

6.1 Variación de los parámetros del filtro LC en la entrada del convertidor Zeta aislado.

Para la realización de esta prueba se variará el parámetro del inductor L_f y se mantendrá constante el parámetro del condensador C_f .

En la Tabla 10 se puede observar que la variación del parámetro de la inductancia del filtro LC de entrada del convertidor Zeta prácticamente no tiene ninguna influencia en las variables del estudio.

Ahora, se variará el parámetro del condensador Cf y se mantendrá constante el parámetro del inductor Lf.

En la Tabla 11 se puede observar que al variar el parámetro del condensador del filtro de entrada del convertidor Zeta ($0.1e^{-9}$ a $1e^{-6}$), la eficiencia energética va aumentando a medida que el factor de potencia aumenta, sin embargo, hay un límite de incremento proporcional. Por otra parte, se puede observar un mínimo de THD de 40.89%, cuando el inductor del filtro está en $1e^{-9}$ H.

6.2 Variación de los parámetros del filtro LC en la entrada del convertidor Luo aislado.

Para la realización de esta prueba se variará el parámetro del inductor Lf y se mantendrá constante el parámetro del condensador Cf.

En la Tabla 12, al variar el parámetro del filtro de entrada del convertidor Luo ($1e^{-6}$ a $100e^{-6}$) H, se puede observar un máximo en el factor de potencia de 0,81 cuando el filtro está en $3.77e^{-6}$ H. Se puede evidenciar

también una relación inversamente proporcional entre la THD de la corriente suministrada por la red de AC y la eficiencia energética, es decir, mientras mejora la eficiencia energética, la THD disminuye. Hay un mínimo de THD de 36.29%, cuando el inductor del filtro está en $3.77e^{-6}$ H.

Ahora, se variará el parámetro del condensador Cf y se mantendrá constante el parámetro del inductor Lf.

En la Tabla 13, al variar el parámetro del condensador del filtro de entrada del convertidor Luo ($0.01e^{-9}$ a $50e^{-9}$) F se puede observar que, al aumentar la eficiencia energética disminuye el factor de potencia. Se puede evidenciar también una relación directamente proporcional entre la THD de la corriente suministrada por la red de AC y la eficiencia energética, es decir, mientras mejora la eficiencia energética, la THD se incrementa perjudicialmente en la corriente del sistema.

6.3 Variación de los parámetros de los filtros de entrada del convertidor Cuk aislado.

Para la realización de esta prueba se variarán los parámetros L1 y L2 y se mantendrán constantes los demás parámetros del convertidor.

Tabla 10. Variación del parámetro del inductor del filtro LC de entrada del convertidor Zeta aislado.

Inductor Lf (H)	Factor de potencia visto por la red de AC	THD de la corriente suministrada por la red de AC (%)	Eficiencia energética (%)
$1e^{-6}$	0.824	44.77	82.58
$10e^{-6}$	0.825	44.75	82.17
$37.7e^{-6}$	0.825	44.71	82.57
$50e^{-6}$	0.825	44.73	82.16
$100e^{-6}$	0.825	44.74	82.26

Tabla 11. Variación del parámetro del condensador del filtro de entrada del convertidor Zeta aislado.

Condensador Cf (F)	Factor de potencia visto por la red de AC	THD de la corriente suministrada por la red de AC (%)	Eficiencia energética (%)
$0.1e^{-9}$	0.783	47.77	81.14
$1e^{-9}$	0.821	40.89	82.08
$100e^{-9}$	0.822	44.64	82.43
$330e^{-9}$	0.825	44.71	82.57
$1000e^{-9}$	0.830	44.72	82.64

Tabla 12. Variación del parámetro del inductor del filtro LC de entrada del convertidor Luo aislado

Inductor Lf (H)	Factor de potencia visto por la red de AC	THD de la corriente suministrada por la red de AC (%)	Eficiencia energética (%)
1e-6	0.782	52.29	80.25
3.77 e-6	0.81	36.29	81.60
10 e-6	0.795	36.78	81.37
20 e-6	0.793	36.37	81.78
50 e-6	0.792	36.30	81.78
100 e-6	0.792	36.30	81.78

Tabla 13. Variación del parámetro del condensador del filtro de entrada del convertidor Luo aislado

Condensador Cf (F)	Factor de potencia visto por la red de AC	THD de la corriente suministrada por la red de AC (%)	Eficiencia energética (%)
0.001e-9	0.89	49.56	76.00
0.1e-9	0.81	36.29	81.60
1e-9	0.84	59.76	83.54
10e-9	0.81	72.14	84.52
50e-9	0.73	92.77	84.59

Tabla 14. Variación de los parámetros de los filtros de entrada del convertidor Cuk aislado

Filtro de entrada L1 y L2 (H)	Factor de potencia visto por la red de AC	THD de la corriente suministrada por la red de AC (%)	Eficiencia energética (%)
1e-4	0.780	46.48	11.80
10e-4	0.788	45.77	11.55
20e-4	0.791	45.00	11.45
50e-4	0.796	42.91	11.18
100e-4	0.793	39.80	10.22
200e-4	0.755	33.71	9.80

En la Tabla 14, al variar los parámetros del filtro de entrada del convertidor Cuk aislado ($1e^{-4}$ a $200e^{-4}$) H se puede observar un máximo en el factor de potencia de 0,796 cuando el filtro está en $50e^{-4}$ H. Por otro lado, se puede evidenciar una relación directamente proporcional entre la THD de la corriente suministrada por la red de AC y la eficiencia energética, es decir, mientras mejora la eficiencia energética, la THD se incrementa en la corriente del sistema.

7. Conclusiones y Recomendaciones

En la sección 5 se ha podido determinar que la mejor correlación entre los parámetros de interés analizados en este estudio es la del convertidor Luo, teniendo en cuenta el compromiso existente entre la distorsión

armónica y la eficiencia energética de los manejadores para motores de DC sin escobillas basados en los convertidores Zeta, Luo y Cuk.

De acuerdo con la información presentada en las tablas de la sección 6, hay un evidente compromiso entre distorsión armónica y eficiencia energética en los sistemas de mejoramiento del factor de potencia de los alimentadores Zeta, Luo y Cuk para motores de DC sin escobillas.

En casi la totalidad de los casos al aumentar la eficiencia energética se degrada la calidad de la energía entregada por la red AC, lo cual se manifiesta en el aumento de la THD y en la disminución del factor de potencia total.

El mejoramiento de la distorsión armónica total de la corriente de la red AC es notable cuando hay aislamiento de alta frecuencia. Por otra parte, los esquemas basados en los convertidores Cuk presentan sub-armónicos debido a las "zonas muertas" derivadas de la transición entre los regímenes de Buck y Boost del convertidor.

Se ha podido evidenciar en la sección 6 el efecto que produce el cambio en los parámetros del filtro LC a la entrada de los convertidores Zeta, Luo y Cuk, los cuales afectan considerablemente las variables de interés asociadas con calidad y eficiencia energética. Se recomienda realizar un estudio exhaustivo para encontrar la mejor relación de dichos parámetros.

Referencias

- [1] V. Bist y B. Singh, «An Adjustable-Speed PFC Bridgeless Buck-Boost Converter-Fed BLDC Motor Drive» IEEETOIE, vol.61, n° 6, pp. 2665 - 2677, 2014.
- [2] V. Bist, y B. Singh, «Reduced sensor configuration of a power factor correction based single-ended primary inductance converter fed brushless DC motor drive», Power Electronics, IET, vol.8, n° 9, pp. 1606-1615, 2015.
- [3] M. El-Sharkawi, et al., «High performance drive of DC brushless motors using neural network», IEEETEC, vol. 9, n° 2, pp. 317-322, 1994.
- [4] S. Hesari y M. Sistani, «Efficiency improvement by timely controlling power factor in permanent magnet synchronous motor using PSO algorithm», Technology, Communication and Knowledge, ICTCK, 2014, pp. 1-4.
- [5] B. A. Bhatia, «Power Factor in Electrical Energy Management», PDH Center, 2012.
- [6] H. Azazi, et al., «Review of passive and active circuits for power factor correction in single phase, low power AC-DC converters», 14th International Middle East Power System Conference, Egypt, 2010, pp. 217-224.
- [7] H. Fang, et al., «Position servo control of brushless DC motor based on the second discrete filter», Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on, 2007.
- [8] H. Tze-yee, et al., «The design of a PMSM motor drive with active power factor correction», Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on, 2011.
- [9] C. Xia, et al., «Robust speed controller design for brushless motor drive», Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, vol. 21, n° 3, pp. 5-8, 2002.
- [10] C. Xia, et al., «A Speed Observer for Brushless DC Motor», Micromotors. servo Technique, vol. 6, p. 6, 2001.
- [11] C. Lee y N. Kwok, «A variable structure controller with adaptive switching surfaces [brushless DC motor]», American Control Conference, Proceedings of the 1995, 1995, pp. 1033-1034.
- [12] M. Yksel, et al., «BLDC wheel hub motor and motor controller performance test of a concept electric robotic vehicle in HIL according to real driving characteristics», the 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2015.
- [13] A. Gmerek y E. Jezierski, «Admittance control of a 1-DoF robotic arm actuated by BLDC motor», Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2012 17th International Conference on, 2012.
- [14] R. Letchmanan, et al., «Notice of Violation of IEEE Publication Principles "Design of ARM-Based Inverter Electrostatic Dehydrator for Crude Oil Emulsions" Fault Evaluation of Relative-Coupled BLDC Drives for Multi-Facet Mobile Robot with Distributed Speed Factors», the 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006.
- [15] T. P. Banerjee, et al., «Hybrid Intelligent Predictive Control System for High Speed BLDC Motor in Aerospace Application», Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2010 3rd International Conference on, 2010.
- [16] S. Swarnakar, et al., «Inverter Fault Tolerance in BLDC Drives for Electromechanical Aerospace Actuators», the Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, 2006.
- [17] V. Hubik, et al., «On the development of BLDC motor control run-up algorithms for aerospace application», the Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th, 2008.
- [18] H. Y. Kanaan y K. Al-Haddad, «Boost Preregulators for Power Factor Correction in Single-Phase Rectifiers», Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, pp. 503-533, 2014.
- [19] N. Kim, et al., «BLDC Motor Control Algorithm for Low-Cost Industrial Applications», the APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2007, pp. 1400-1405.

- [20] Z. Li y C. Xia, «Speed Control of Brushless DC Motor Based on CMAC and PID Controller», *Intelligent Control and Automation*, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on, 2006.
- [21] X. Changliang, et al., «Variable structure control of BLDCM based on extended state observer», *Mechatronics and Automation*, 2005 IEEE International Conference, 2005.
- [22] L. Guohai y Z. Hongtao, «Design and analysis on permanent-magnet BLDC motor for automatic door», *Electrical Machines and Systems*, 2008. ICEMS 2008. International Conference on, 2008.
- [23] N. Parspour y R. Hanitsch, «Fuzzy controlled brushless DC motor for medical applications», *the Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1994. IECON '94., 20th International Conference on, 1994.
- [24] B. X. Xiao, et al., «Application of adaptive control on brushless DC motor speed control system», *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, vol. 22, nº 6, p. 94-97, 1999.
- [25] P. Pumira y M. Konghirun, «Digital control of sensorless brushless DC motor drive system with power factor correction for air conditioners», *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011 International Conference on, 2011.
- [26] Q. V. Tran, et al., «Simple starting-up method of BLDC sensorless control system for vehicle fuel pump», *de Power Electronics Conference (IPEC)*, 2010 International, 2010.
- [27] A. Tashakori y M. Ektesabi, «Stability analysis of sensorless BLDC motor drive using digital PWM technique for electric vehicles», *de IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012.
- [28] B. K. Lee y M. Ehsani, «Advanced BLDC motor drive for low cost and high performance propulsion system in electric and hybrid vehicles», *Electric Machines and Drives Conference*, 2001. IEMDC 2001. IEEE International, pp. 246-251, 2001.
- [29] M. Gougani, et al., «Hall sensor-based Locking Electric Differential System for BLDC motor driven electric vehicles», *Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2012 IEEE International, pp. 1-7, 2012.
- [30] S. H. Kam, et al., «A study of voltage control method for torque pulsation factor reduction for home applications integrated BLDC motor drive», *de Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2015 18th International Conference on, 2015.
- [31] C. Xia, «Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls», Tianjin: Science Press, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., China, 2012.
- [32] V. Bist y B. Singh, «A Unity Power Factor Bridgeless Isolated Cuk Converter-Fed Brushless DC Motor Drive», *IEEETOIE*, vol. 62, nº 7, pp. 4118-4129, 2015.
- [33] IEEE Std 519 - 2014, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», IEEE Power & Energy Society, New York, 2014.
- [34] L. S. Czarnecki, «Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality». *Electrical Engineering* 82, pp.119-126, 2000.
- [35] M. Castro-Núñez, et al., «the conservative power quantity based on the flow of energy», *IET, The Journal of Engineering*, 2016.
- [36] IEEE Std 1459 - 2010, «IEEE Estandard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions», IEEE Power & Energy Society, 2010.
- [37] V. Bist y B. Singh, «A Brushless DC Motor Drive with Power Factor Correction Using Isolated Zeta Converter», *IEEETOII*, vol. 10, nº 4, pp. 2064-2072, 2014.
- [38] V. Bist y B. Singh, «Power factor correction in a brushless DC motor drive using an isolated-Luo converter», *the Power India International Conference (PIICON)*, 2014 6th IEEE, 2014.
- [39] J. Ramki y S. Sundhar, «A Cuk Converter with Hysteretic Transition Method for Avoiding Dead-Zone Effect and Sub Harmonics», *International Journal on Applications in Engineering and Technology*, vol. 1, Issue 3, pp. 30-35, 2015.