ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

"Análisis, Diseño e Implementación de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS) Basado en un Convertidor Trifásico Mediante Modulación por Ancho de Pulso con la Técnica Sinusoidal PWM (SPWM) Controlado por un Procesador Digital de Señales (DSP)"

F. Garzón, M. Mejía, R. Padilla, S. Falcones
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral, 09-015863
Guayaquil, Ecuador
fgarzón@espol.edu.ec, mrmejia@espol.edu.ec, rpadilla@espol.edu.ec, sixifo@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo esta constituido por dos partes principales. La primera, consiste en la implementación de un Modelo Didáctico de la operación de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI ó UPS) de Línea Interactiva, en función de sus dos modos de operación Inversor y Rectificador, implementados de forma independiente, utilizando como convertidor trifásico un Módulo de IGBT de la serie IRAMY20UP60B del fabricante International Rectifier, y para el control, un Procesador Digital de Señales (DSP), modelo TMS320F2812 del fabricante Texas Instrument. La segunda parte consiste en la obtención y simulación de la operación de un control de lazo cerrado basándonos en la modelación matemática del mismo UPS, para lo cual se utilizó la herramienta SISOTOOL de MATLAB. La técnica del control de disparos escogida para ambas partes corresponde a la Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM).

Palabras Claves: *UPS, Convertidor Trifásico, DSP, MATLAB, SISOTOOL, SPWM*

Abstract

The present work has two principal parts: the first one, is the implementation of a didactic model for the operation of a Line Interactive Uninterruptible Power Supply (UPS), based on its two modes of operation, Inverter and Rectifier, implemented independently; as a three-phase converter we have used an IGBT module from the series IRAMY20UP60B from International Rectifier, and for control, a Digital Signal Processor (DSP), model TMS320F2812 from Texas Instrument. The second part consists in the obtainment and simulation of the operation of a closed loop control based on the mathematical modelling of the same UPS, for which it was used the SISOTOOL feature from MATLAB. The trigger control technique chosen for both parts is the Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM).

Key Words: *UPS, Three –phase Converter, DSP, MATLAB, SISOTOOL, SPWM*

1. Introducción

Hoy en día, los estándares de calidad son cada vez más exigentes, y un mercado globalizado demanda: bajos costos, alta rentabilidad, calidad y eficiencia. Curiosamente la Calidad de Energía guarda una estrecha relación con cada una de estas características, ya que la continuidad, confiabilidad y calidad del servicio eléctrico son decisivos, al poder ocasionar: la interrupción de un proceso de producción, el daño en equipos sensibles y tiempos de inactividad, que se traducen en pérdidas: económicas, de calidad y tiempo.

Por lo tanto, en la actualidad existen una serie de medidas correctivas y preventivas que se basan en un conjunto de equipos y técnicas que permiten asegurar la calidad de energía en el lado del consumidor. Una de las medidas correctivas es el Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS), que garantiza un suministro de electricidad en el evento de una falla en el suministro habitual, pudiendo también regular el flujo de electricidad, controlando las subidas y bajadas de tensión y corriente existentes en la red eléctrica, resultando especialmente útil ante cargas críticas, que requieran de una alimentación continua y limpia.

2. Marco teórico

2.1 Antecedentes

La producción en masa de los UPS, como equipo para mitigar problemas por calidad de energía, se dio por primera vez en el Mercado en los años 1970´s, esencialmente para resolver la necesidad de grandes sistemas computacionales, de modo que garantizaran continuidad y calidad en la fuente de alimentación eléctrica.

Eventualmente, y al comprobarse su funcionalidad, los modelos de UPS fueron evolucionando para extender su utilización. Como resultado, los UPS se modificaron hasta satisfacer las necesidades más complejas para la protección de equipos críticos inmersos en diversos procesos, que no toleran problemas de calidad de energía, tales como SWELL´s, SAG´s e interrupciones. Estos dos últimos, los de mayor importancia, por la frecuencia con que se presentan (el 98% de los problemas guardan relación con los SAG´s de Tensión e interrupciones con una duración de menos de 15 segundos). [1]

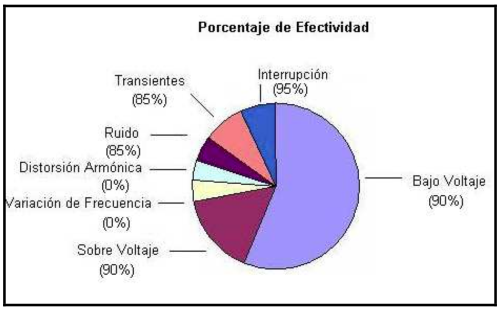

Figura 1. Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Línea Interactiva

2.2 Funcionamiento UPS

Los UPS son dispositivos compensadores de tensión gracias a una fuente DC con la que pueden proporcionar energía AC a la red o a la carga, a través de un convertidor de DC a AC.

Su funcionamiento se divide en tres etapas:

- BATERÍA: Almacena energía mientras hay voltaje en la línea para compensar la energía en el evento de una pérdida en la alimentación.
- CONVERTIDOR DC-AC: Llamado Inversor, cambia el voltaje de la batería en un voltaje AC, el cual va a ser recibido por la carga del sistema.
- CONVERTIDOR AC-DC: También llamado Rectificador, es el responsable de la recarga de la batería.

Los fabricantes producen modelos con diseños o topologías similares, pero con características de desempeño muy diferentes, uno de los más utilizados en la industria es el de Línea Interactiva, que se caracteriza por tener el convertidor a la salida, en paralelo a la carga, de modo que en el evento de una falla en la alimentación, el UPS entrega energía a la carga, mientras que, cuando la energía es restituida, recarga la batería en su totalidad y queda en modo Stand By hasta una nueva falla. [2]

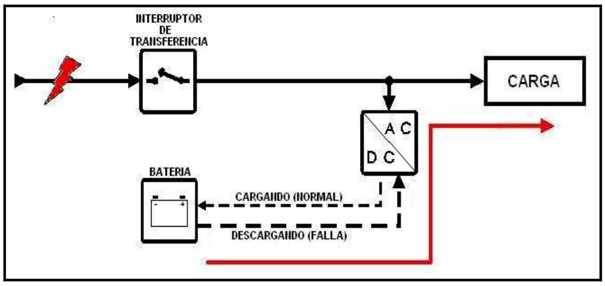

Figura 2. UPS Línea Interactiva – Operación en Falla

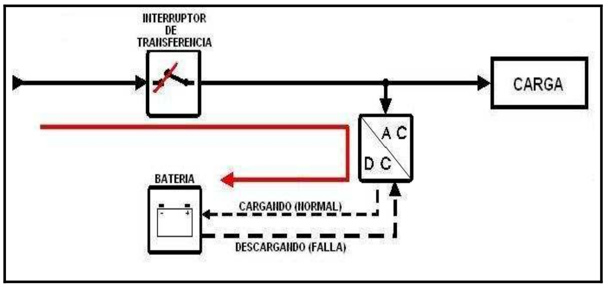

Figura 3. UPS Línea Interactiva – Recarga de Batería

2.3 Convertidores Trifásicos

Se puede considerar a un convertidor trifásico como la unión de tres convertidores DC-DC con señales de referencias (moduladoras) alternas con un nivel DC.

La diferencia entre los voltajes de salida resulta puramente alterna. Existen diferentes técnicas de modulación siendo de particular interés la de PWM (Modulación por Ancho de Pulso) por permitir la operación a frecuencia constante y variable.

Por lo anteriormente expuesto resulta de particular interés los convertidores DC – AC y AC – DC. [3]

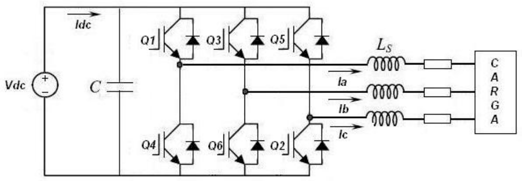

Figura 4. Inversor Trifásico

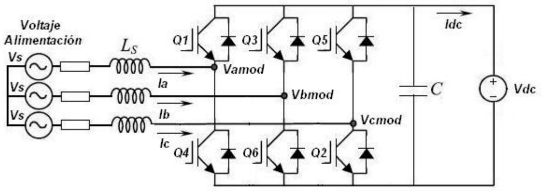

Figura 5. Rectificador Trifásico

2.4 DSP TMS320F2812

El DSP TMS320F2812, del fabricante Texas Instrument, opera junto con la tarjeta eZdspTMF2812, que es la que permite la conectividad y alimentación para realizar aplicaciones experimentales, desarrollar y correr programas.

Figura 6. Foto TMS320F2816

Figura 7. Foto eZdspTMF2816

La plataforma para programar el DSP es SIMULINK / MATLAB, el cual posee un librería especifica con bloque optimizados para aplicaciones con el DSP de la Texas Instrument.

3. Diseño e Implementación de un UPS de Línea Interactiva

3.1 Modelo Didáctico

Para el diseño del UPS de Línea Interactiva fue necesario establecer sus etapas de operación y tipos de conexión.

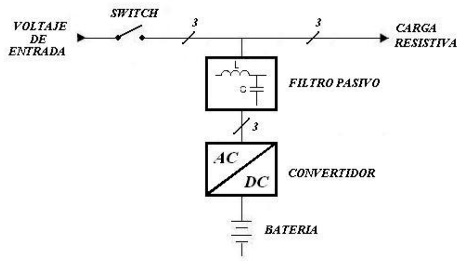

Figura 8. Diagrama Unifilar del UPS de Línea Interactiva

El convertidor Trifásico utilizado para esta aplicación fue el Modulo de IGBT de la International Rectifier IRAMY20UP60B. Para la implementación fue necesaria la integración del circuito de fuerza (Modulo IGBT) y el de control (DSP).

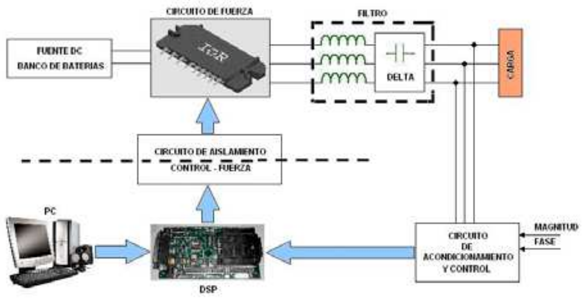

Figura 9. Diseño Global de Conexiones de Sistemas

Entonces, se diseñaron y dimensionaron las siguientes etapas del modelo:

- **Circuito de Acondicionamiento y Control**: Tiene como finalidad cumplir con las especificaciones de entrada del DSP: Nivel AC: Relación 100V→1V (Máxima entrada 110V), Nivel DC: 0→1.5V. Está conformado por configuraciones de OPAMP y un grupo de transformadores con la relación de 110V→6V.
- **Circuito de Aislamiento Control – Fuerza**: Cumple con la función de aislar el circuito de Fuerza del de Control, mediante la utilización de opto-acopladores digitales evitando la presencia de ruido en las señales de control. Incluye también, un buffer a la salida del opto-acoplador para generar una señal PWM de un nivel de 5V, aumentando la corriente y acondicionando la señal para la entrada del bloque de Fuerza
- **Circuito de Fuerza**: Constituido básicamente por el modulo de IGBT. También fue necesaria la inclusión de varios filtros capacitivos en el lado DC para eliminar la distorsión en la señal.
- **Filtro**: Es un Banco de Inductores y Capacitores.

Para complementar el modelo se adquirió:

- Fuentes de Voltaje: Etapa de Control y Fuerza
- Fuente DC (Banco de Baterías)

Para la programación del DSP se deben separaron los dos modos de operación del UPS de forma que permita la implementación del Modelo Didáctico.

MODO INVERSOR:

El programa cargado para el Modo Inversor es el que se presenta en la figura 10. Los bloques que constituyen el programa son:

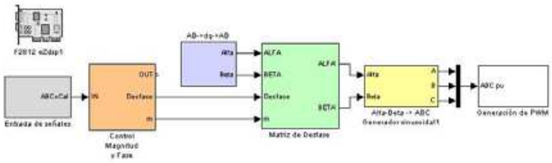

Figura 10. Programa MODO INVERSOR

- **Entrada de Señales**: Constituido por un bloque convertidor ADC, luego un bloque de adecuación matemática de los datos adquiridos.
- **Control de Magnitud y Fase**: Ajusta Matemáticamente la señal adquirida a los valores referenciales preestablecidos.
- **Señal de Referencia**: Propone una señal en el Sistema Ortogonal α y β de referencia.
- **Matriz de Desfase**: Realiza el desfase y cambio de magnitud de las señales del Sistema Ortogonal al nivel previamente establecido.
- **Generador Sinusoidal**: Realiza el cambio del sistema Ortogonal α, β a un Sistema Trifásico A, B, C, mediante la técnica Sinusoidal.
- **Generación PWM**: Adecua la señal trifásica y luego la pasa por un bloque de generación PWM.

Los Bloques ADC y PWM, son herramientas para configurar los periféricos de Entrada/Salida del DSP.

MODO RECTIFICADOR:

El programa cargado para el Modo Rectificador es el que se presenta a continuación

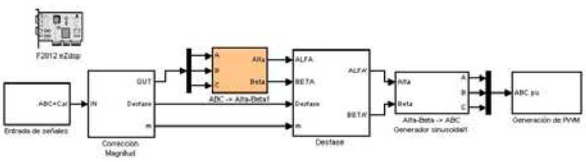

Figura 11. Programa MODO RECTIFICADOR

Para este programa se utiliza el mismo esquema que el MODO INVERSOR, cambiando el bloque de Señal de Referencia por un bloque de Transformación ABC → α, β

- **Entrada de Señales**
- **Control de Magnitud y Fase**
- **Bloque ABC → α β**: Transforma la señal Trifásica adquirida A, B, C en un sistema ortogonal α y β.
- **Matriz de Desfase**
- **Generador Sinusoidal**
- **Generación PWM**

3.2 Simulación de Control de Lazo Cerrado

Para la simulación del lazo de control se obtuvo el modelo matemático del convertidor a controlar, cuyo esquemático se muestra en la figura 12.

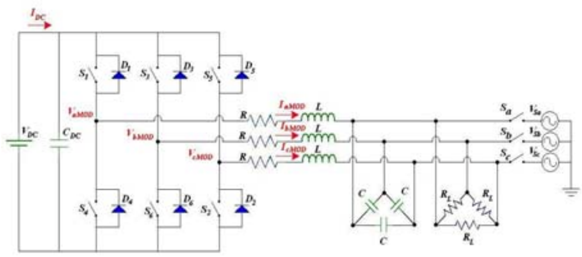

Figura 12. Esquemático de un UPS Línea Interactiva

Para facilitar el control se realizó la conversión de la corriente de un sistema trifásico sinusoidal a un sistema de dos fases ortogonales de señales constantes, para lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones.

$$\frac{I_{dMOD}}{V_{dMOD}} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \qquad \frac{I_{qMOD}}{V_{qMOD}} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}}$$

$$\frac{I_{dMOD}}{I_{DC}} \approx \frac{2}{3}\frac{V_{DC}}{V_S}$$

Y de acuerdo al dimensionamiento del filtro, Voltaje DC de entrada y tipo de carga se obtienen

$$L = 1.160[mH];\ R = 0.102[\Omega];\ V_{DC} = 96[V];\ V_s = 50[V_{RMS}]$$

$$\frac{I_{dMOD}}{V_{dMOD}} = \frac{862.1}{s + 87.93}$$

$$\frac{I_{qMOD}}{V_{qMOD}} = \frac{862.1}{s + 87.93}$$

Para la obtención del compensador se utilizó la herramienta SISOTOOL de MATLAB, estableciendo como parámetros una frecuencia de control de 1KHz, tiempo de estabilización de 8.87ms y un Margen de Fase de 90º.

$$G_c(S) = 658.84\frac{1 + 0.011S}{S}$$

La simulación del convertidor aplicando el compensador de lazo cerrado se lo describe a continuación.

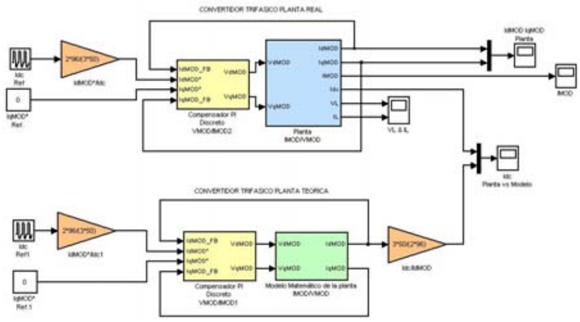

Figura 13. Simulación del UPS de Línea Interactiva

La simulación esta constituida principalmente por el bloque del compensador y la planta.

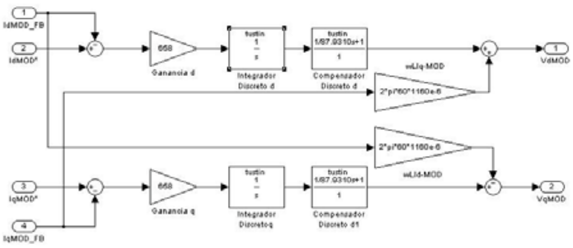

Figura 14. Compensador

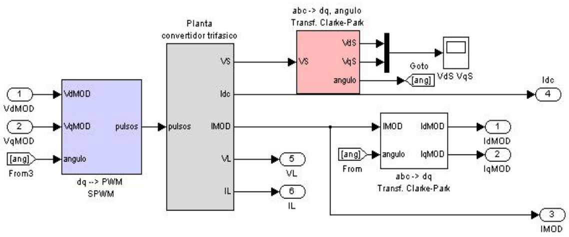

Figura 15. Planta Real del UPS

La planta del UPS esta conformada por:

- **<u>Bloque SPWM (dq→PWM)</u>:** Está conformado por los Bloques: Inversa de Transformada de Park (dq→αβ), Generador Sinusoidal (αβ→abc) y Generador PWM (abc→PWM).
- **<u>Convertidor Trifásico</u>:** Define el Convertidor Trifásico según las especificaciones del esquema del UPS.
- **<u>Transformada Clark/Park (abc→dq)</u>:** Conformado por los Bloques: Transformada de Clark (abc→αβ) y Transformada de Park (αβ→dq). Existe también un bloque detector de frecuencia y fase, que servirá de referencia para todas las transformadas.

4. Resultados

Para el caso del modelo didáctico se presentará para los dos Modos de Operación las señales obtenidas de Voltaje y Corriente AC, Voltaje y Corriente DC, Potencias, Armónicos de Voltaje y Corriente.

<u>MODO INVERSOR:</u>

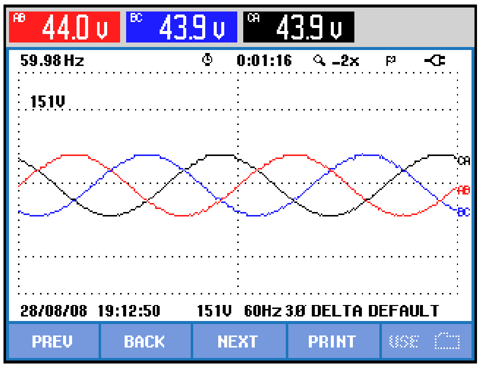

Figura 16. Voltaje AC (MODO INVERSOR)

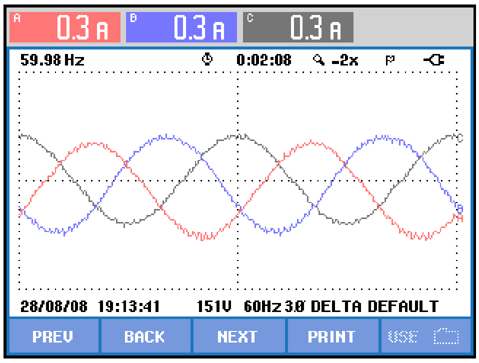

Figura 17. Corriente AC (MODO INVERSOR)

Figura 18. Voltaje y Corriente DC (MODO INVERSOR)

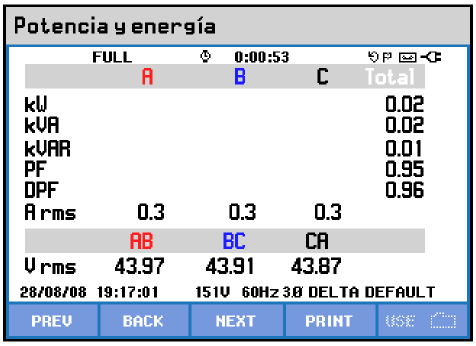

Figura 19. Potencias (MODO INVERSOR)

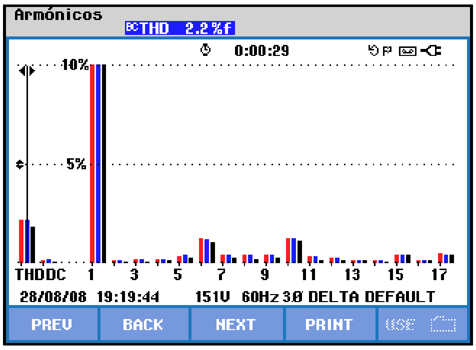

Figura 20. Armónicos de Voltaje (MODO INVERSOR)

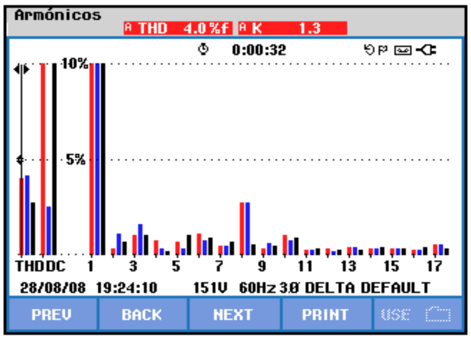

Figura 21. Armónicos de Corriente (MODO INVERSOR)

MODO RECTIFICADOR:

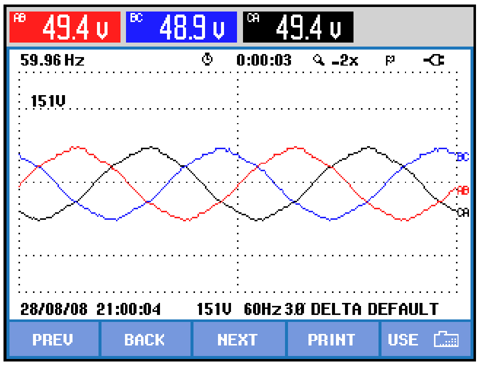

Figura 22. Voltaje AC (MODO RECTIFICADOR)

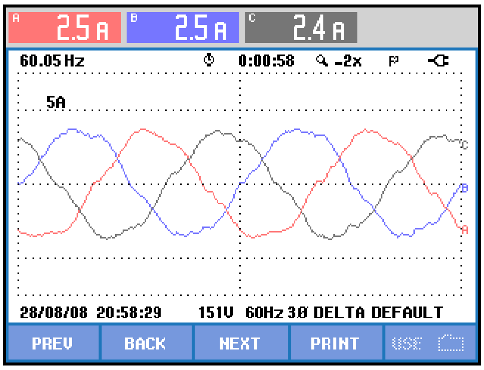

Figura 23. Corriente AC (MODO RECTIFICADOR)

Figura 24. Voltaje y Corriente AC (RECTIFICADOR)

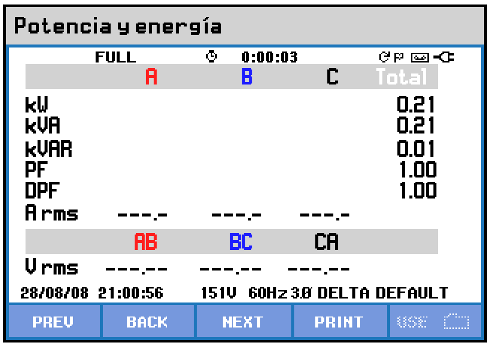

Figura 25. Potencias (MODO RECTIFICADOR)

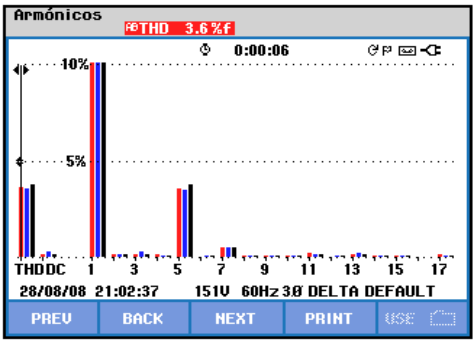

Figura 26. Armónicos de Voltaje (RECTIFICADOR)

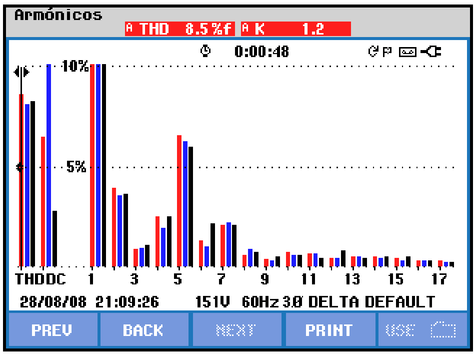

Figura 27. Armónicos de Corriente (RECTIFICADOR)

Los resultados de la simulación del lazo de control se consideraron los eventos de falla (Inversor) y restauración de Energía (Rectificador). Se mostrarán las corrientes DC y Modulada, Voltaje y Corriente Trifásico en la carga

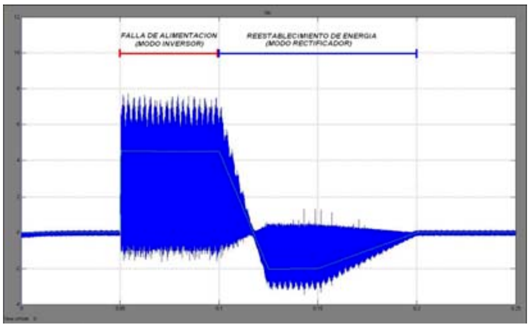

Figura 28. Corriente DC

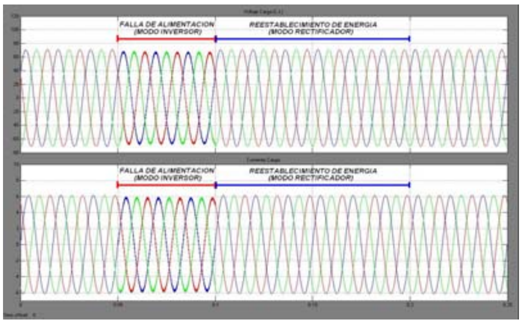

Figura 29. Voltaje y Corriente en la Carga

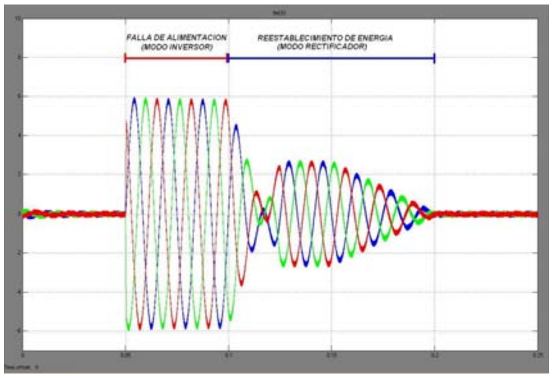

Figura 30. Corriente en los Inductores

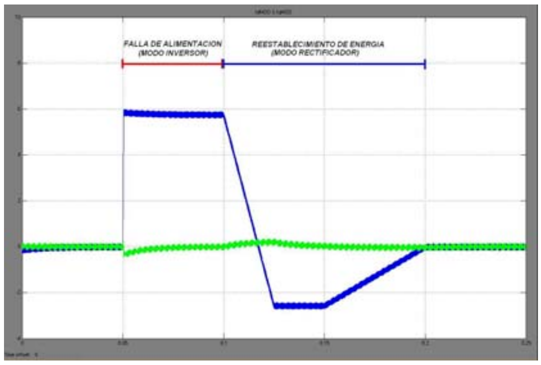

Figura 31. Corriente en los Inductores (Vectores dq)

5. Conclusiones y Recomendaciones

Luego del diseño e implementación del UPS se puede concluir lo siguiente:

- La adecuada selección del UPS está sujeta a los problemas de calidad de energía que se requieran resolver y al tipo de carga a proteger (Crítica). De esta selección depende la complejidad del diseño.
- El tipo de control a escoger, Analógico o Digital, debe permitir un procesamiento de señales de forma versátil, siendo este último el más indicado.
- La utilización del DSP TMS320C2812 de la Texas Instrument fue acertada por contar con un bloque se salidas PWM que faciliten el control del convertidor. Sin embargo, la adquisición de datos análogos se dificultó, por necesitar señales libres de distorsión para su correcto procesamiento.
- Otro de los aciertos de la elección del DSP TMS320C2812 fue la compatibilidad que éste tiene con el MATLAB/SIMULINK, lo cual simplificó la programación.
- El modulo de IGBT IRAMY20UP60B por su diseñó, está orientado a trabajar en MODO INVERSOR ya que su funcionalidad se enfoca al

control de Motores. sin embargo, para aplicaciones de control de velocidad en donde se aplica un frenado regenerativo, trabaja también en MODO RECTIFICADOR.

- Para evitar los problemas causados por ruidos (Interferencias Electromagnéticas), fue necesario: Aislar los circuitos de Fuerza y Control, Utilizar fuentes independientes que incluyan por diseño un Filtro LC, Implementar un Chasis Metálico que contenga a los inductores y Capacitores y realizar una adecuada conexión de puesta a Tierra.
- La norma IEEE 519-1992, establece que los límites máximos permitidos de Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente, son $THD_{VMAX} = 5\%$ y $THD_{IMAX} = 30\%$, por lo que, por los valores obtenidos, el UPS implementado cumple con la Norma.

Se recomienda:

- No utilizar tiempos de muestreo menores a $20\mu s$ para evitar la recarga del DSP en el procesamiento y adquisición de señales.
- Tomar las medidas necesarias para que las señales que ingresen al DSP no superen los 3V, y que sean lo más puras posibles.
- Realizar correctamente las conexiones del modulo de IGBT y revisarlas previo al encendido
- Las señales PWM que controlan al IGBT deben tener el nivel de voltaje necesario para su encendido y apagado.
- Para evitar anomalías en la operación de los circuitos el orden de encendido de los mismos debe ser: DSP, Interfaz de Programación, Acondicionamiento de señales y circuito de Fuerza (Primero parte AC y luego DC). Para su apagado se debe realizar la secuencia inversa.
- Se debe realizar una buena conexión de puesta a tierra para evitar ruido en la red.

6. Proyecto Futuro

Implementación y diseño de un controlador que permita realizar la transición entre las etapas de operación del UPS

7. Agradecimientos

A nuestras familias, seres queridos, amigos y a todos quienes de alguna u otra manera nos brindaron su apoyo incondicional, e hicieron que esto sea posible.

8. Referencias

[1] http://209.85.165.104/search?q=cache:oS2yWS4_GrcJ:www.mgeups.com/techinfo/techpap/articles/0248-e.pdf+%22ups+first+ appeared %22+-zznited&hl=es&ct=clnk&cd=2&gl=ec

[2] http://www.buchmann.ca/Article7-Page1.asp

[3]Rashid Muhammad H., "ELECTRÓNICA DE POTENCIA",3a__ Edición, Pearson Education, México 2004