



## “ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR) BASADO EN UN CONVERTIDOR TRIFÁSICO PWM CON MODULACION SINUSOIDAL CONTROLADO POR UN DSP”

J. Acosta, C. Rodríguez, A. Romero, 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  
jacosta@espol.edu.ec, clrodrig@espol.edu.ec, lromero@fiec.espol.edu.ec, sixifo@espol.edu.ec

### Resumen

*Entre las principales variaciones de voltajes que afectan a las industrias se encuentran las elevaciones de voltaje o swells, y depresiones de voltaje o sags. Este proyecto se enfoca en la compensación de un sag y swell del 50% del voltaje nominal mediante el restaurador dinámico de voltaje (DVR). El DVR es un compensador serie que inyecta un voltaje de compensación a través de un transformador trifásico; su devanado secundario se conecta en serie con la línea de alimentación y el devanado primario a un convertidor trifásico. El convertidor trifásico usa un módulo de interruptores de electrónica de potencia de estado sólido IGBT de la serie IRAMY20UP60B del fabricante International Rectifier que es controlado por un procesador digital de señales (DSP), modelo TMS320F2812 del fabricante Texas Instrument. La técnica usada para el control de disparos del módulo IGBT es la modulación sinusoidal por ancho de pulsos. Se presenta la simulación en lazo cerrado con un controlador proporcional integral (PI) y los resultados de la compensación en la implementación física del DVR.*

**Palabras Claves:** DVR, sag, swell, Convertidor Trifásico, DSP, MATLAB, SISOTOOL, SPWM

### Abstract

*Among the main voltage disturbances affect industries are sags or voltage drops and swells or voltage increase. This project focuses on compensation for sag and swell of 50 percent from nominal voltage, using a dynamic voltage restorer (DVR). DVR is a series compensator that injects a voltage through a three phase transformer; its secondary winding connects to distribution line and its primary winding connects to three phase converter. This converter employs IGBT solid state power electronic switches module, series IRAMY20UP60B from International Rectifier which is controlled by a Digital Signal Processor (DSP), model TMS320F2812 from Texas Instrument. The Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) is the chosen technique for trigger control of IGBT module. Simulations with closed loop control are shown by using Proportional Integral controller (PI) and the results of the DVR implementation during sag and swell compensation.*

**Key Words:** DVR, sag, swell, Three-phase Converter, DSP, MATLAB, SISOTOOL, SPWM

### 1. Introducción

La competencia creciente en el mercado y las ganancias cadentes han hecho pertinente a las industrias comprender la importancia de calidad de energía. Las variaciones cortas de voltaje afectan muy poco a usuarios finales, si éstas son temporales causan daño especialmente a los clientes industriales y comerciales. Si las depresiones y elevaciones de

tensión de corta duración (sags y swells) exceden dos a tres ciclos, las plantas industriales que usan equipos electrónicos sensibles se ven afectados en su proceso representando grandes pérdidas financieras.

Las utilidades eléctricas están buscando soluciones para asegurar el suministro constante de energía. El Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR) es una solución para este caso, minimizando los sags y swells

que afectan a los equipos electrónicos sensibles.

El DVR juega un papel importante en sofisticados equipos electrónicos sensibles asegurando su continuo funcionamiento. Reduce el tiempo de apagado o interrupción de los equipos, ahorrando tiempo y dinero. La efectividad del DVR se refleja en la eliminación de sags y swells, mejorando la calidad de energía.

## 2. Funcionamiento de un DVR

### 2.1 Descripción de Operación

El DVR es un compensador serie basado en un convertidor electrónico de potencia que protege cargas críticas de disturbios en el voltaje de alimentación. El DVR compensa depresiones y elevaciones de tensión inyectando un voltaje serie mediante un transformador de inyección de voltaje. La amplitud y fase de este voltaje es determinado por la comparación entre una señal de voltaje de referencia y el voltaje sentido en la alimentación. El voltaje serie es generado por un inversor de voltaje y sintetizado por medio de modulación de ancho de pulsos. Cierta cantidad de energía reactiva y real requiere el DVR para inyectar un apropiado voltaje serie. [1] En la figura 1 se muestra un diagrama unifilar que representa la operación simplificada del DVR.

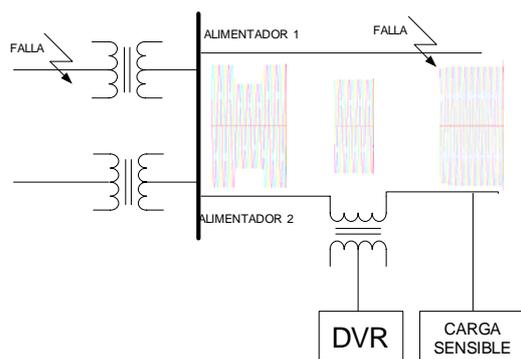


Figura 1. Operación del DVR

El voltaje del DVR se inyecta con un transformador trifásico en serie con la línea de distribución. El voltaje generado por el inversor pasa por el filtro pasivo LC y se conecta al devanado de alta tensión. El devanado de baja tensión es conectado en serie con la línea de distribución. Por lo tanto, por el DVR circulara la máxima corriente que se produzca en la línea.

### 2.2 Elementos constitutivos

El DVR se ha dividido en bloques para diferenciar cuales son los elementos que lo constituyen, a continuación se detalla las siguientes partes:

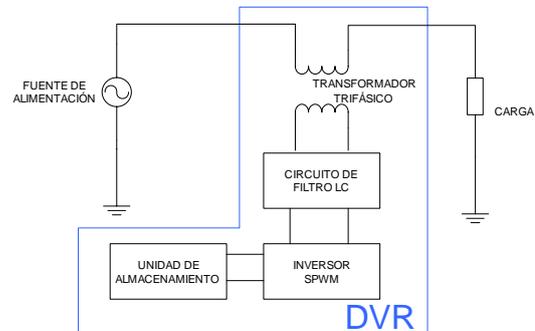


Figura 2. Elementos que forman un DVR

- 1.) Dispositivo o unidad de almacenamiento de energía.
- 2.) Inversor trifásico de voltaje PWM.
- 3.) Circuito de filtro pasivo.
- 4.) Transformador trifásico de inyección de voltaje.

**Dispositivo o unidad de almacenamiento de energía.-** Son dispositivos externos conectados en los terminales DC del inversor, esencialmente son la fuente de generación de potencia activa al momento de compensar sags de larga duración. Entre estos dispositivos se encuentran circuitos de conversión de voltaje DC y bancos de capacitores; para el caso de esta investigación se ha usado seis baterías de 12 Vdc en serie.

**Inversor trifásico de voltaje PWM.-** El DVR emplea interruptores de electrónica de potencia de estado sólido IGBT (insulated gate bipolar transistors) en una estructura de inversor trifásico de voltaje modulado por ancho de pulso (PWM). De acuerdo a la modulación empleada, ya que existen varias técnicas, se tiene diferentes ventajas en lo que respecta a controlar la salida del inversor.

En este proyecto se ha usado la técnica de modulación sinusoidal por ancho de pulsos, el rango del índice de modulación permisible para no llegar a distorsionar la forma de onda de salida del voltaje del inversor, no debe exceder de 1 aunque para trabajar en buenas condiciones se debe trabajar hasta un máximo de 0,9. Otra de las desventajas del uso de la técnica sinusoidal es ejercer un tipo de control para cada pierna del inversor conformadas por un par de IGBT en cada una; un inversor trifásico tiene tres piernas, una para cada fase. La técnica de modulación por

espacio vectorial brinda mejores condiciones que superan a la tradicional técnica de modulación sinusoidal.

**Circuito de filtro pasivo.-** Consiste en un circuito formado por inductores y capacitores llamado LC, y su principal objetivo es remover altas frecuencias de componentes en el voltaje de salida del inversor. Sin embargo, una evaluación de la inmunidad del filtro frente armónicos de las corrientes de la carga debe ser tomado en cuenta debido a que éstas pueden distorsionar el voltaje de salida del filtro. El uso de grandes capacitancias incrementa la inmunidad del filtro. De esta manera a grandes capacitancias del filtro será necesario grandes corrientes reactivas quienes aumentan la tasa de potencia requerida de los interruptores del convertidor.

**Transformador trifásico de inyección de voltaje.-** Es un transformador trifásico cuyo devanado de baja tensión es conectado en serie con la línea, mientras que el de alta es conectado a la salida del filtro LC que viene del inversor trifásico. El devanado de baja tensión se lo coloca en serie con la línea. Hay que considerar que el transformador posee resistencias series en sus devanados que producen caídas de voltajes cuando se calcula el voltaje deseado de compensación.

### 2.3 Principio de Operación

El principio de operación del DVR es controlar el voltaje aplicado a la carga, inyectando o absorbiendo un voltaje que compensa la amplitud y ángulo de fase a la línea de distribución. [2]

En la figura 3 se muestra el principio de operación. El DVR genera un voltaje trifásico AC (fasor  $V_{DVR}$ ) que es controlado en fase y magnitud. Este fasor es inyectado para mantener el voltaje deseado en la carga (fasor  $V_{carga}$ ) sin que ésta sufra por desbalances o distorsiones que provengan del voltaje de alimentación (fasor  $V_{in}$ ). El fasor  $V_{DVR}$  estará en fase o desfasado  $180^\circ$  con respecto al de la alimentación para que sume o reste voltaje respectivamente.

A continuación se muestra un circuito que representa al DVR con sus elementos constitutivos y respectivas ecuaciones que ayudan a comprender el funcionamiento de este compensador con un control de lazo abierto.

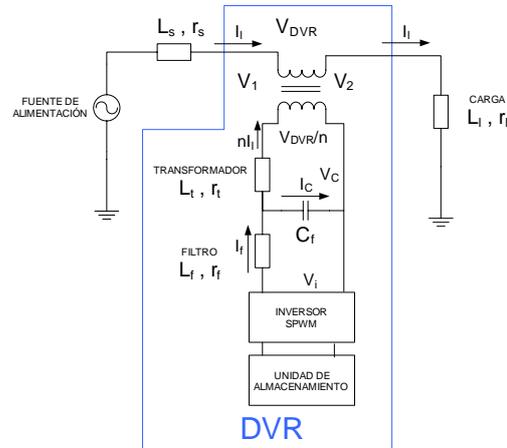


Figura 3. Representación del DVR en operación

Al asumir una carga de impedancia constante, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$V_i = V_c + I_f r_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (1)$$

$$(2)$$

$$I_f = I_c + nI_l \quad (3)$$

$$(4)$$

$$V_{DVR} = \left( V_c - n \left( nI_l r_t + L_t \frac{dI_l}{dt} \right) \right) \quad (5)$$

$$V_2 = I_l r_L + L_l \frac{dI_l}{dt} \quad (6)$$

- $V_i$  = voltaje del inversor
- $V_c$  = voltaje del capacitor (filtro)
- $I_f$  = Corriente que pasa por los inductores del filtro
- $I_c$  = Corriente que pasa por el capacitor del filtro
- $I_l$  = Corriente que pasa por la carga
- $V_1$  = Voltaje de alimentación
- $V_2$  = Voltaje en la carga
- $V_{DVR}$  = Voltaje de compensación DVR
- $L_f+r_f$  = impedancia del inductor del filtro
- $L_t+r_t$  = impedancia del devanado del transformador
- $C_f$  = capacitancia del filtro
- $n$  = relación de vueltas del transformador

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones obtenidas se tiene lo siguiente:

$$V_i(s) = V_C(s) + I_f(s)(r_f + sL_f) \quad (7)$$

$$I_f(s) = I_C(s) + nI_l(s) \quad (8)$$

$$I_C(s) = sC_f V_C(s) \quad (9)$$

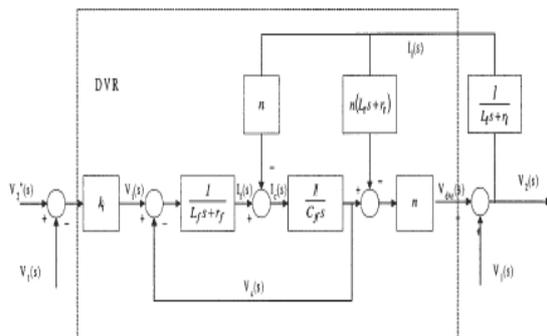
$$V_2(s) = V_1(s) + V_{DVR}(s) \quad (10)$$

$$V_{DVR}(s) = n(V_C(s) - nI_l(s)(r_f + sL_f)) \quad (11)$$

$$V_2(s) = I_l(s)r_f + sL_f I_l(s) \quad (12)$$

Con estas ecuaciones en el dominio de la frecuencia se ha construido el diagrama de bloques (figura 4) que representa un control de lazo abierto del DVR.

Una de las desventajas de usar el control de lazo abierto es no compensar al valor deseado de voltaje debido a las pérdidas de voltaje a través de la impedancia del transformador y del filtro. Para corregir este problema se cita para futuros proyectos emplear control de lazo cerrado llamado de realimentación o feedback. [3]



**Figura 4.** Representación del DVR en operación

## 2.4 Aplicación específica del DVR diseñado

El DVR se ha diseñado para que corrija un sag y un swell del 50% con respecto al voltaje nominal con una carga totalmente resistiva.

### ○ Mitigación de SAG

Para mitigar un sag o depresión de voltaje, el DVR inyecta un voltaje de compensación de magnitud precalculada en fase con el voltaje de la alimentación. De esta manera, se suman ambos voltajes obteniendo el voltaje deseado que debe mantener siempre la carga.

### ○ Mitigación de SWELL

Para mitigar un swell o elevación de voltaje, el DVR realiza una función parecida cuando mitiga un sag con la diferencia que el voltaje a inyectarse debe estar desfasado 180° con respecto al voltaje de la alimentación. Al sumarse ambos voltajes se produce una resta, disminuyendo la elevación del voltaje hasta obtener el voltaje nominal.

## 3. Diseño e Implementación de un DVR

### 3.1 Diseño del DVR

Para el diseño del Restaurador Dinámico de Tensión es usado un convertidor trifásico de 6 elementos conmutadores internos y 3 vías de salida. Para su alimentación será usada una batería de 100 V dc. Además se contempla la utilización de un filtro pasa bajas y un banco de tres transformadores monofásicos. Los valores de los parámetros de los elementos anteriormente mencionados se detallan en la siguiente sección.

#### 3.1.1 Cálculo de componentes

Para filtrar correctamente el voltaje alterno generado es ideal trabajar con valores pequeños de inductancia y capacitancia. Esto implica que la frecuencia de corte del filtro es alta, exigiendo frecuencias de conmutación mayores ó que no son factibles para convertidores de potencia elevada.

### ○ Inductancia

Considerando que la caída de tensión en el inductor es del 1%, el valor de la reactancia inductiva viene dado por:

$$kV_{LN\ base} = 0.120V$$

$$kVA_{\phi\ base} = 0.120kVA$$

$$X_L = 0.01 \cdot Z_B = 1.2\Omega$$

$$Z_B = \frac{kV_{LN\ base}^2 * 1000}{kVA_{\phi\ base}} = \frac{0.120^2 * 1000}{0.120} = 120\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1.2}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 3.1831\ mH$$

○ **Capacitancia**

Considerando que la corriente drenada por el capacitor es igual a 10 veces el valor base, el valor de la reactancia capacitiva viene dado por:

$$X_C = 10 \cdot Z_B = 1200\Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1200} = 2.2105 \mu F$$

El valor del capacitor lo tomamos fijando el valor de la inductancia y asumiendo que la frecuencia de resonancia del filtro es igual a  $f_r=1\text{kHz}$ :

$$C = \frac{1}{L \cdot \omega_r^2} = \frac{1}{3.1831 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot 1 \cdot 10^6} = 7.9577 \mu F$$

○ **Switch semiconductor**



**Figura 5.** Vista del IRAMY20UP60B (International Rectifier)

El IRAMY20UP60B está diseñado para manejar un voltaje de IGBT/diodo de 600V con una frecuencia portadora PWM de 20kHz.

**3.2 Simulación de Control de Lazo Cerrado**

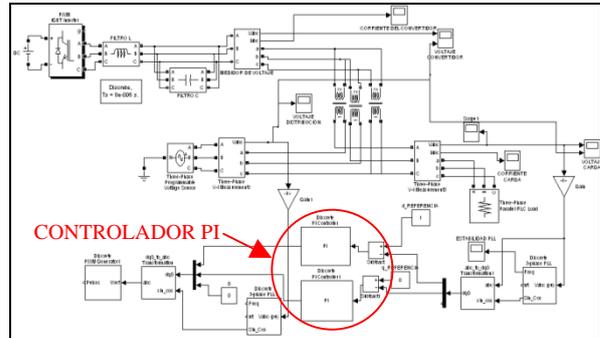
Para la simulación de lazo cerrado se realizó la identificación del sistema, un modelo aproximado que tenga el mismo comportamiento que el DVR, de esta manera calcular el controlador PI que permita un control y una respuesta estable ante cualquier variación de voltaje.

$$\text{Sistema identificado} = \frac{1.369e04 s + 3.453e09}{s^2 + 6723 s + 8.686e07}$$

En la figura 6 se aprecia el esquema del DVR que se usó para realizar la simulación, el controlador PI

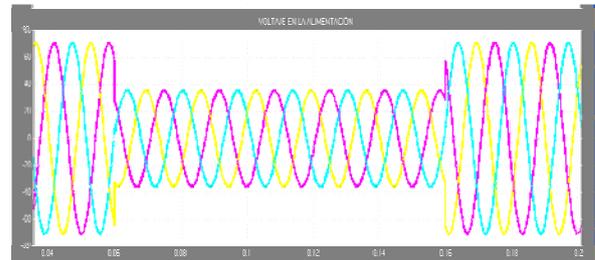
obtenido con la herramienta SISOTOOL de Matlab es el siguiente:

$$\text{Controlador PI} = 494.78 \times \frac{(1 + 0.00013s)}{s}$$

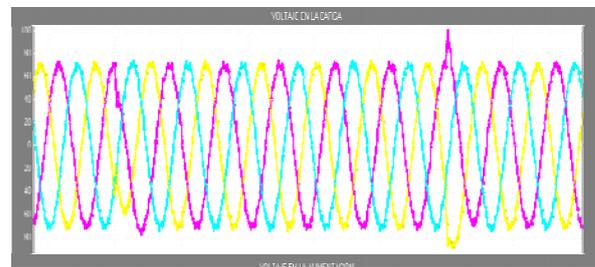


**Figura 6.** Esquema del DVR con retroalimentación

La variación de voltaje se simula en un lapso de 100 ms. La figura 7 corresponde al voltaje de la alimentación que sufre un sag. La figura 8 corresponde al voltaje compensado en la carga ante una depresión de voltaje.

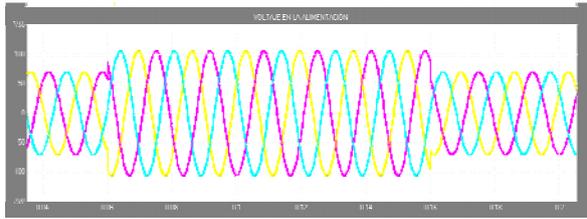


**Figura 7.** Voltaje en la alimentación con depresión

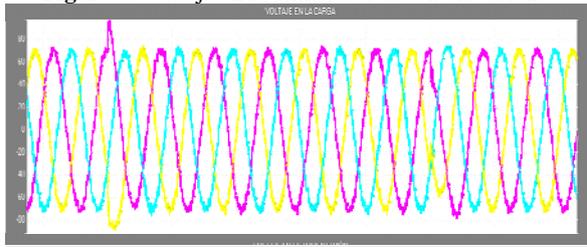


**Figura 8.** Voltaje compensado en la carga

La figura 9 corresponde al voltaje de la alimentación que sufre un swell. La figura 10 corresponde al voltaje compensado en la carga ante una elevación de voltaje.



**Figura 9.** Voltaje en la alimentación con elevación



**Figura 10.** Voltaje compensado en la carga

## 4. Resultados

En la figura 11 se presenta la conexión física e implementación del DVR para compensar sag y swell. En la siguiente tabla 1 se encuentran las especificaciones con las que se trabajó durante la compensación para elevación y depresión de voltaje.



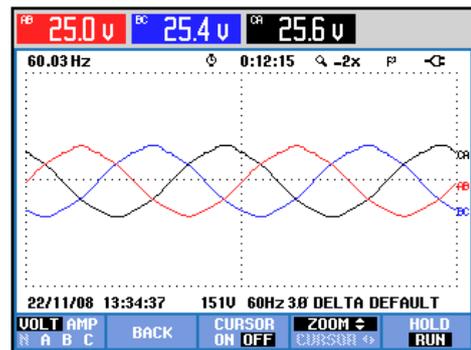
**Fig. 11** Conexión física del DVR para compensar sag y swell

Elementos	Valores
Voltaje de alimentación	50 [V]
Voltaje Sag	25 [V]
Voltaje swell	75 [V]
Voltaje de Baterías DC	100 [Vdc]
Carga	200 [W]
Inductancia	3.3 [mH]
Capacitancia	19 [uF]
Relación de vueltas transformador	2 : 1
Módulo de IGBT's	IRAMY20UP60B
Frecuencia	60 [Hz]

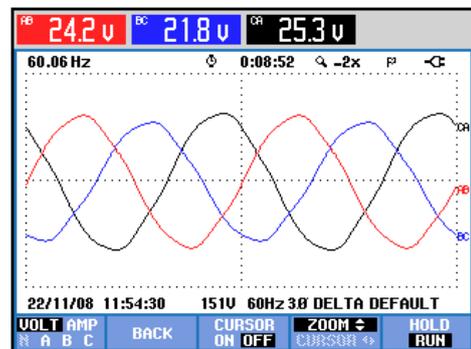
**Tabla 1.** Principales elementos en la simulación, diseño e implementación del DVR

A continuación se muestra los resultados obtenidos durante la compensación; las mediciones se realizaron con el Analizador de Energía Fluke 435.

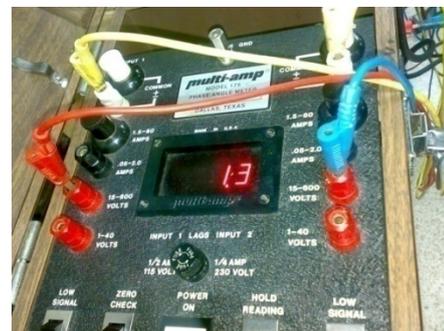
- **Compensando sag del 50% del voltaje nominal**



**Fig. 12** Voltaje sag en la fuente de alimentación



**Fig. 13** Voltaje en la carga antes de compensar el sag



**Fig. 14** Medición de fase del voltaje DVR con respecto al voltaje de alimentación al compensar el sag

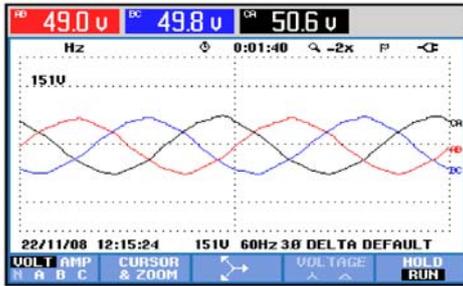


Fig. 15 Voltaje compensado en la carga

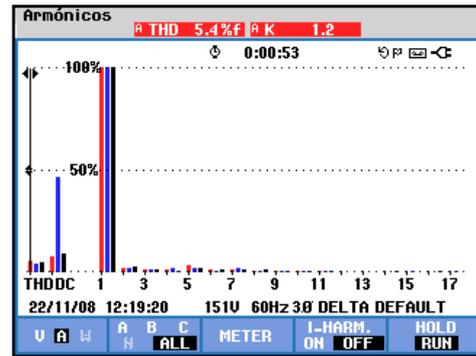


Fig. 19 Distorsión Armónica Total de la corriente durante la compensación del voltaje sag

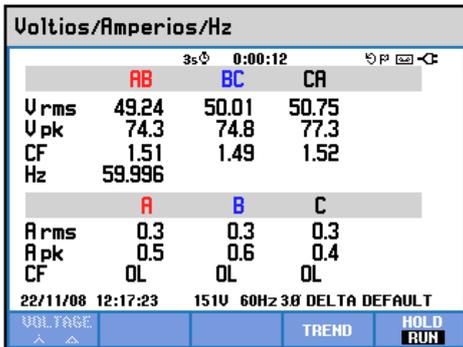


Fig. 16 Voltaje, corriente y frecuencia durante la compensación del sag

- Compensando swell del 50% del voltaje nominal

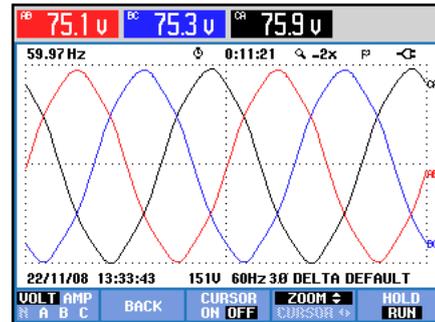


Fig. 20 Voltaje swell en la fuente de alimentación



Fig. 17 Potencia y energía durante la compensación del voltaje sag

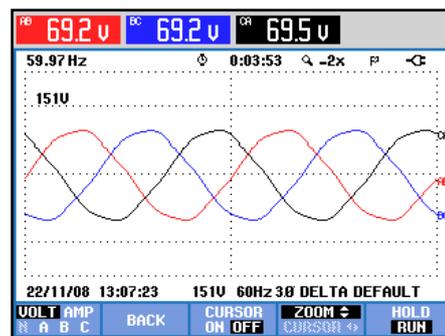


Fig. 21 Voltaje en la carga antes de compensar el swell

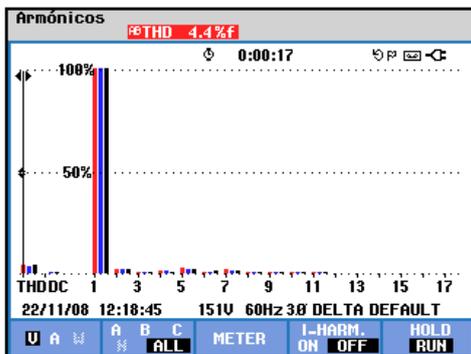


Fig. 18 Distorsión Armónica Total del voltaje durante la compensación del voltaje sag

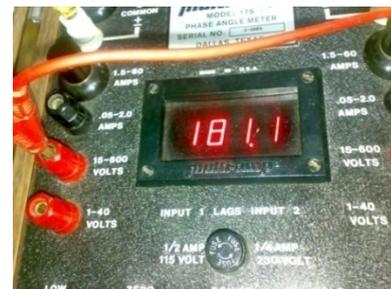


Fig. 22 Medición de fase del voltaje DVR con respecto al voltaje de alimentación al compensar el swell

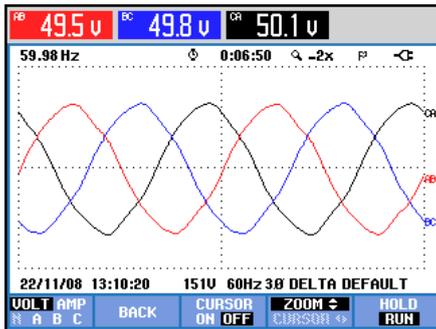


Fig. 23 Voltaje compensado en la carga

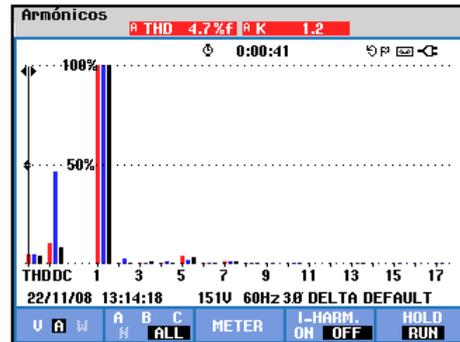


Fig. 27 Distorsión Armónica Total de la corriente durante la compensación del voltaje swell

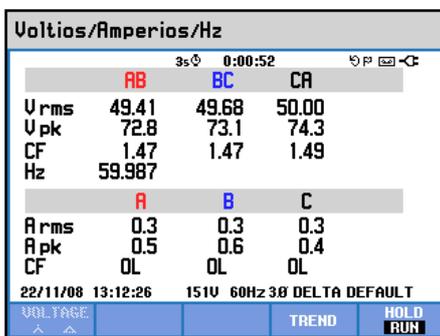


Fig. 24 Voltaje, corriente y frecuencia medidas con el analizador trifásico durante la compensación del swell



Fig. 25 Potencia y energía durante la compensación del voltaje swell

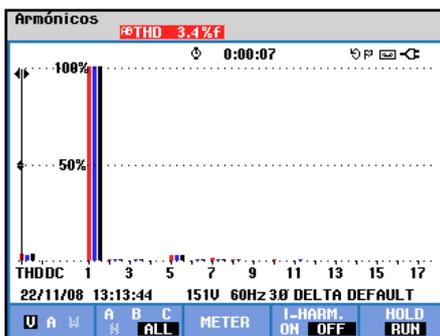


Fig. 26 Distorsión Armónica Total del voltaje durante la compensación del voltaje swell

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

- La capacidad de la unidad de almacenamiento de energía es un factor limitante durante la compensación de sags y swells, especialmente de sags de larga duración.
- La compatibilidad del DSP TMS320C2812 de Texas Instrument con MATLAB permite que la programación del control sea simplificada y de forma gráfica.
- Para reducir los problemas de ruidos (Interferencias Electromagnéticas), fue necesario:
  1. Aislar los circuitos de Fuerza y Control.
  2. Utilizar fuentes independientes que incluyan por diseño un Filtro LC.
  3. Implementar un chasis Metálico que contenga a los inductores y capacitores y realizar una adecuada conexión de puesta a tierra.
- Los máximos valores de distorsión armónica obtenidos durante la compensación en el DVR son  $THD_{Tmáx} = 4.4\%$  y  $THD_{Tmáx} = 5.4\%$ . Estos valores están dentro del rango que permite la norma IEEE 519-1992.
- En control de lazo abierto, el voltaje serie de compensación necesario para mantener el voltaje en la carga no es exacto, debido a las caídas de voltaje presentes en las resistencias series del transformador y del filtro LC.



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



Se recomienda:

- Tener precaución con las señales de entrada analógicas que ingresan al DSP, éste solo resiste hasta 3 V.
- No utilizar tiempos de muestreo menores a **20µs** para evitar la recarga del DSP en el procesamiento y adquisición de señales.
- Revisar los voltajes de polarización de las tarjetas usadas en la implementación.
- Revisar las conexiones de todo el proyecto para evitar que se produzcan fallas.
- La puesta a tierra de los elementos es necesaria para evitar ruido y la propagación de éste.
- Al realizar la implementación del proyecto se realiza los siguientes pasos para el encendido de los elementos del DVR, para así evitar cualquier riesgo de daños:
  1. Energizar las tarjetas de los módulos de acondicionamiento, aislamiento y fuerza.
  2. Energizar el DSP.
  3. Accionar el breaker trifásico que habilita el convertidor.
  4. Accionar el breaker que habilita las baterías.

POWER DEVICES”, Kluwer Academic Publishes.

- [3] Mahinda Vilathgamuwa, A. D. Ranjith Perera and S.S. Choi “Performance Improvement of the Dynamic Voltage Restorer with Closed-Loop Load Voltage and Current-Mode Control” IEEE transactions on power electronics, vol 17, no 5, pp 824-833 september 2002.

## 6. Proyecto Futuro

Implementación y diseño de un controlador en lazo cerrado para el DVR.

## 7. Agradecimientos

A todas las personas que ayudaron a que este proyecto se realice sin ningún percance, facilitando los medios y recursos para su desarrollo.

## 8. Referencias

- [1] Suresh Kumar “Dynamic Voltage Restorers (DVR) and their control” Articles in Electrical Engineering from Suresh Kumar.  
[2] Arindha Ghosh and Gerard Ledwich, “POWER QUALITY ENHANCEMENT USING CUSTOM