



TESIS DE GRADO:

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

PRESENTADA POR:

JOSÉ ACOSTA VÉLIZ
CÉSAR RODRÍGUEZ EUGENIO
ALEX ROMERO VERA

OBJETIVOS

- Comprender el principio de operación y funcionamiento del compensador serie (DVR) al mitigar una depresión y elevación de tensión.
- Diseñar e implementar un control para el DVR en lazo abierto para la mitigación de sag y swell del 50% del voltaje nominal.
- Diseñar y simular un controlador en lazo cerrado con la técnica SPWM para el DVR, como alternativa para una implementación futura.

Se ha dividido en:

⇒ MARCO TEÓRICO: ANTECEDENTES

⇒ DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DVR CON CONTROL EN LAZO ABIERTO PARA MITIGAR SAG Y SWELL DEL 50 %

⇒ DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN DVR CON CONTROL EN LAZO CERRADO PARA MITIGAR SAG Y SWELL

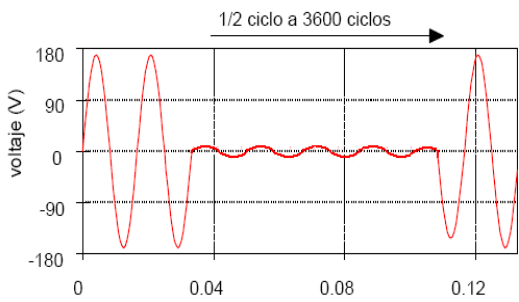
⇒ CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PROYECTO FUTURO

- ✓ MARCO TEÓRICO: ANTECEDENTES
- ✓ PROBLEMAS CALIDAD DE ENERGIA.
- ✓ RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE Y CONVERTIDORES TRIFÁSICOS.
- ✓ PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES: DSP.

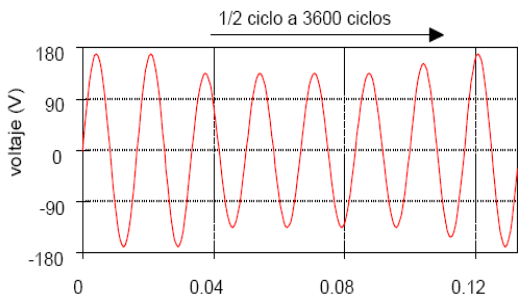
PROBLEMAS DE CALIDAD DE ENERGÍA

CATEGORIA	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD TÍPICA DE VOLTAJE
1. TRANSITORIOS		
1.1 Transitorio Impulsivo	< 0,5 ciclos	
1.2 Transitorio Oscilatorio	< 0,5 ciclos	0 - 8 p.u.
2. CORTA DURACIÓN		
2.1 Interrupción	0,5 ciclos - 1 min	< 0,1 p.u.
2.2 Depresión de Tensión (SAG)	0,5 ciclos - 1 min	0.1 - 0.9 p.u.
2.3 Salto de Tensión (SWELL)	0,5 ciclos - 1 min	1.1 - 1.8 p.u.
3. LARGA DURACIÓN		
3.1 Interrupción Sostenida	> 1 min	0 p.u.
3.2 Subtensión	> 1 min	0.8 - 0.9 p.u.
3.3 Sobretensión	> 1 min	1.1 - 1.2 p.u.
4. DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN	Estado Estable	0.5 - 2%
5. DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA		
5.1 Armónicos	Estado Estable	0 - 20%
5.2 Corte	Estado Estable	
5.3 Ruido	Estado Estable	0 - 1%
6. FLUCTUACIONES DE TENSIÓN (FLICKER)	Intermitente	0.1 - 7%

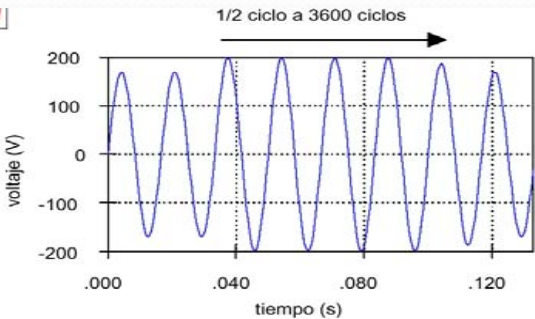
INTERRUPCIONES



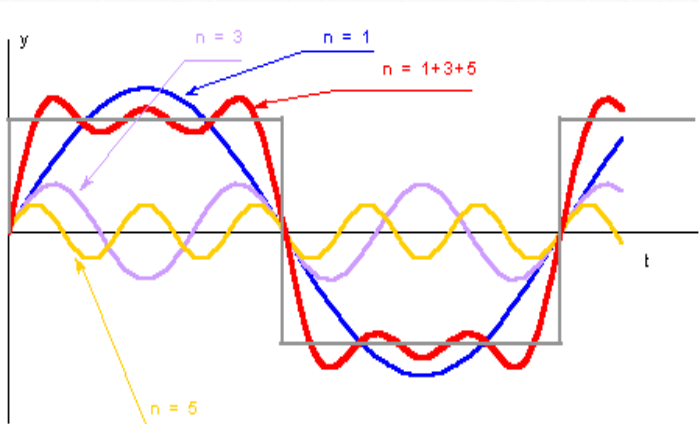
DEPRESION DE TENSION (SAG)



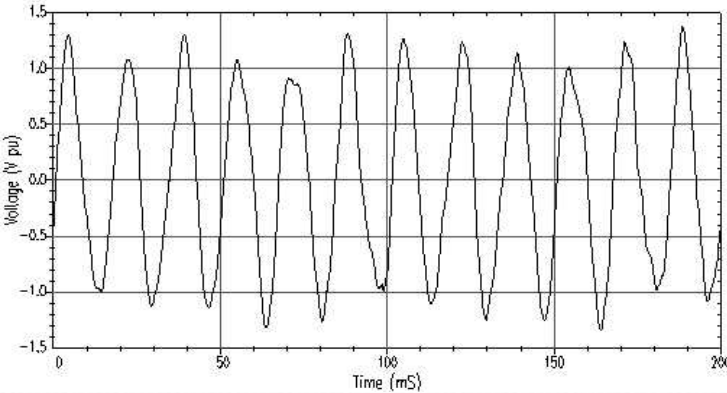
INCREMENTO DE TENSION (SWELL)



ARMÓNICOS



FLICKER



COMPENSADORES

DSTATCOM: Conectado en paralelo a una red de distribución. Absorbe o genera Potencia Activa o Reactiva de forma Controlada, mejorando el Factor de Potencia. Regula SAG y SWELL.

DVR: Conectado en serie a la red de distribución, protege a las cargas contra Depresiones y Sobretensiones y problemas de Armónicos.

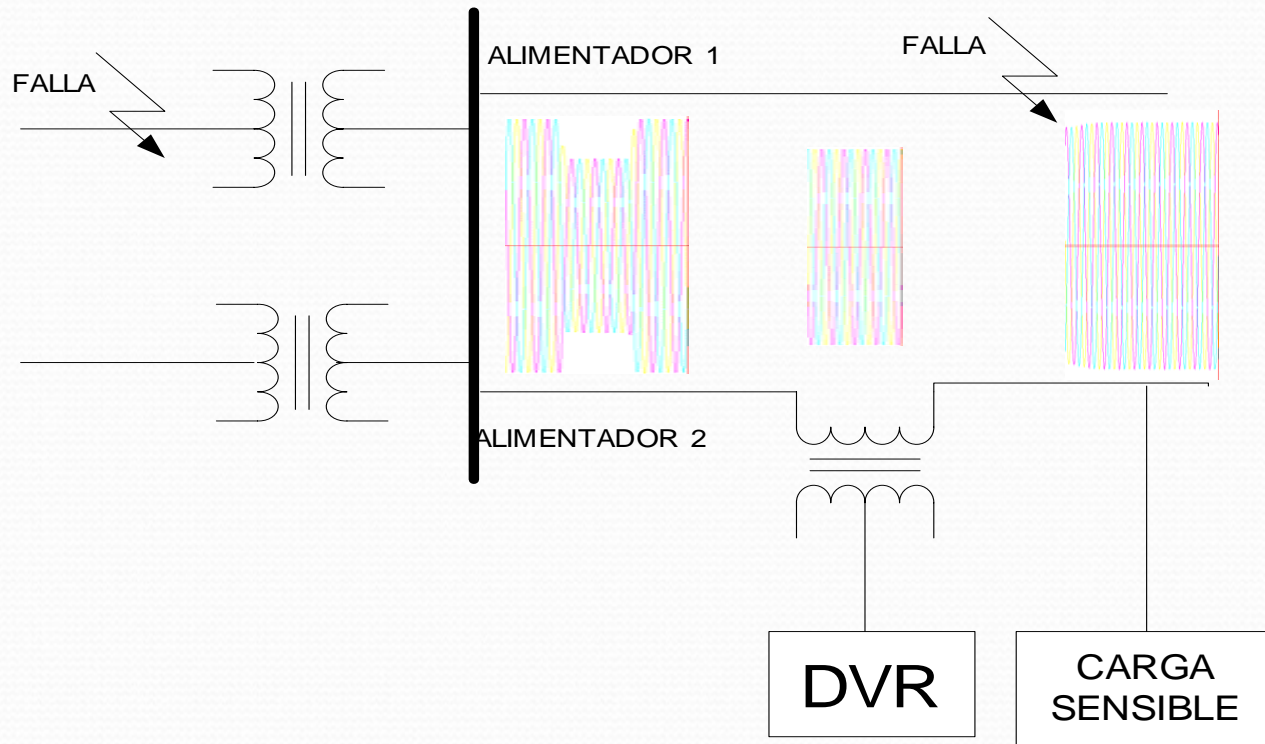
UPS: Conectado en paralelo a la red de distribución, proporciona alimentación continua a Cargas Sensibles. Elimina casi todos los problemas de Calidad de Energía.



RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE

- ✓ Es un compensador serie basado en un convertidor electrónico de potencia que protege cargas críticas de disturbios en el voltaje de alimentación.
- ✓ 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.
- ✓ El grado de exactitud del voltaje de salida del DVR depende del comportamiento dinámico y cuan exacto sea el esquema de la síntesis del voltaje por modulación de ancho de pulsos y el sistema de control adoptado.

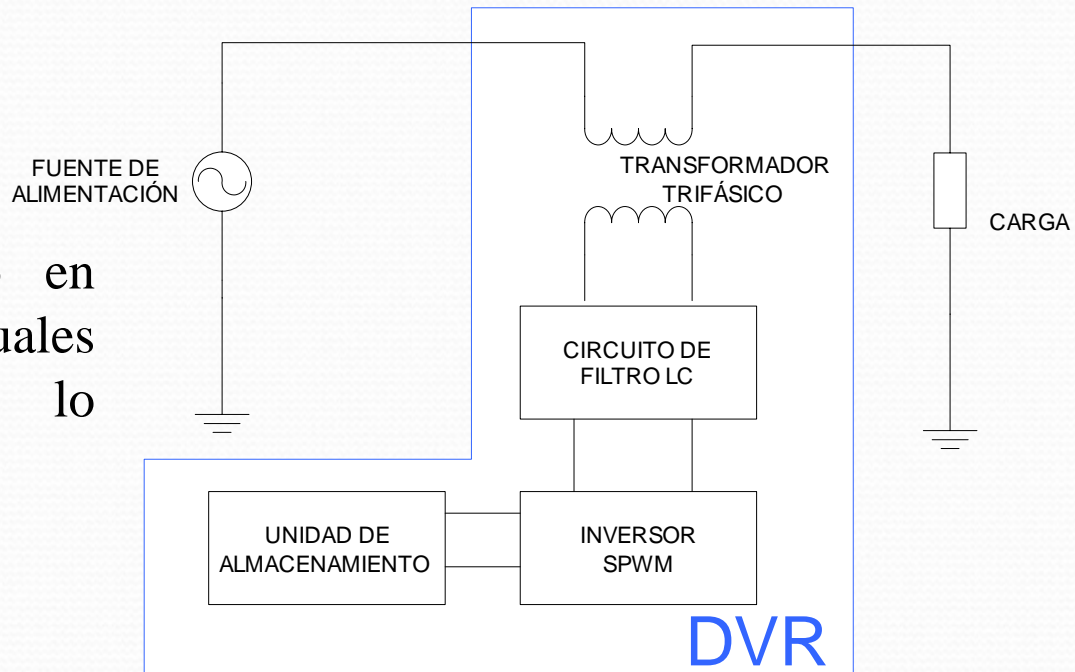
DIAGRAMA UNIFILAR QUE REPRESENTA LA OPERACIÓN SIMPLIFICADA DEL DVR



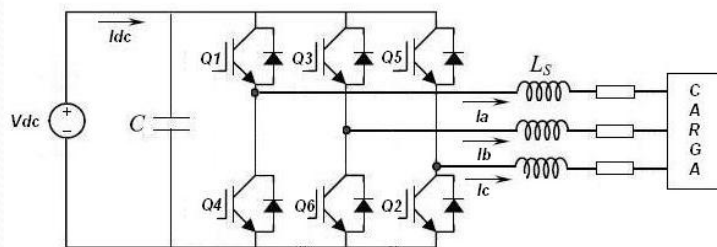
ELEMENTOS QUE FORMAN UN DVR

El DVR se ha dividido en bloques para diferenciar cuales son los elementos que lo constituyen:

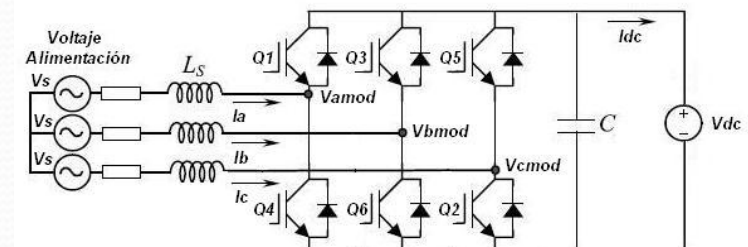
1. Dispositivo o unidad de almacenamiento de energía.
2. Inversor trifásico de voltaje PWM.
3. Circuito de filtro pasivo.
4. Transformador trifásico de inyección de voltaje.



- Son dispositivos electrónicos, que cambian voltaje o corriente DC en AC trifásico y viceversa.
- Los convertidores con técnica PWM pueden operar a frecuencia constante o variable, y controlar las magnitudes.
- El convertidor utilizado está basado en un Módulo Trifásico de IGBT de la International Rectifier IRAMY20UP60B.



MODO INVERSOR (DC - AC)



MODO RECTIFICADOR (AC - DC)



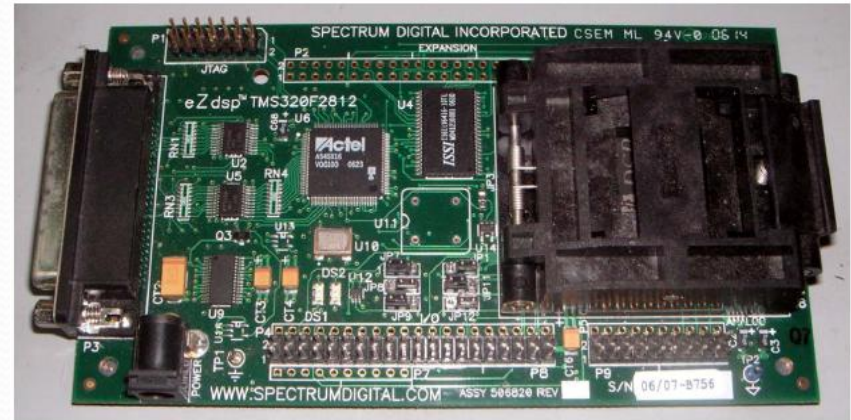
La funcionalidad de un DSP radica en el procesamiento de datos de forma digital, lo que simplifica los cálculos enormemente. De acuerdo al fabricante, los periféricos que permiten esta funcionalidad varían, pudiendo ser: ADC, Salidas PWM, etc.

- VENTAJAS: Mayor Confiabilidad, Flexibilidad, Rapidez de procesamiento y Escalabilidad. Optimización de procesos y disminución de pérdidas de datos. Utilizan plataformas de programación sencillas con instrucciones ya definidas (Ejemplo: Lenguaje C, Ensamblador)

- DESVENTAJAS: Se requiere una señal de entrada pura para alcanzar precisión y exactitud. Diferencia entre la señal adquirida y la procesada.

FAMILIA TMS320C2000

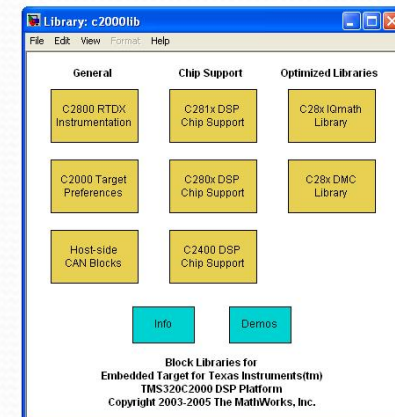
- Dos modos de programación: Lenguaje C y Plataforma MATLAB, lo que permite realizar una programación en modo Gráfico.
- Presenta periféricos de entrada análogas y salidas PWM.



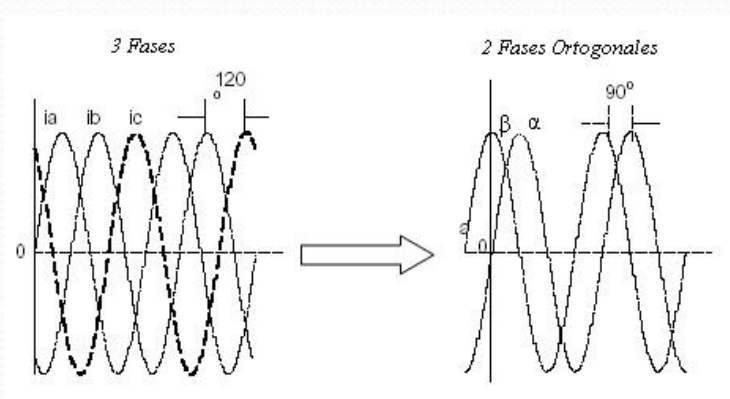
eZdsp TMF2812

TARGET FOR TI C2000

- Es una librería creada por la Texas Instrument para funcionar en aplicaciones en Simulink (MATLAB), permitiendo programar el DSP.
- Para la programación, es necesario tener el Software Code Composer Studio, el cual realiza la codificación del Modelo en Lenguaje C.

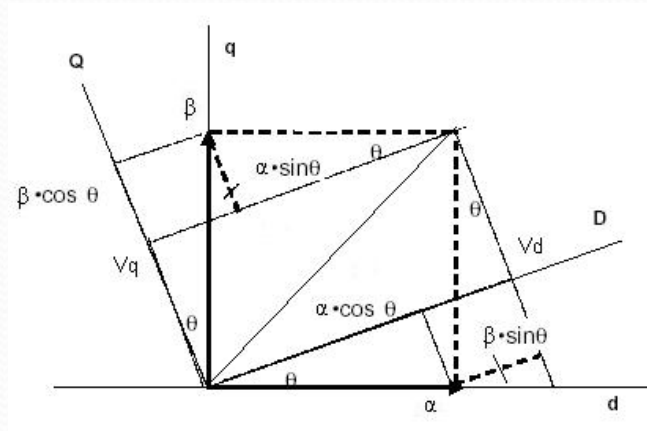


TRANSFORMADA DE PARK Y CLARK



$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

TRANSFORMADA DE CLARK



$$V_d = \alpha \cos(\theta) + \beta \sin(\theta)$$

$$V_q = -\alpha \sin(\theta) + \beta \cos(\theta)$$

TRANSFORMADA DE PARK

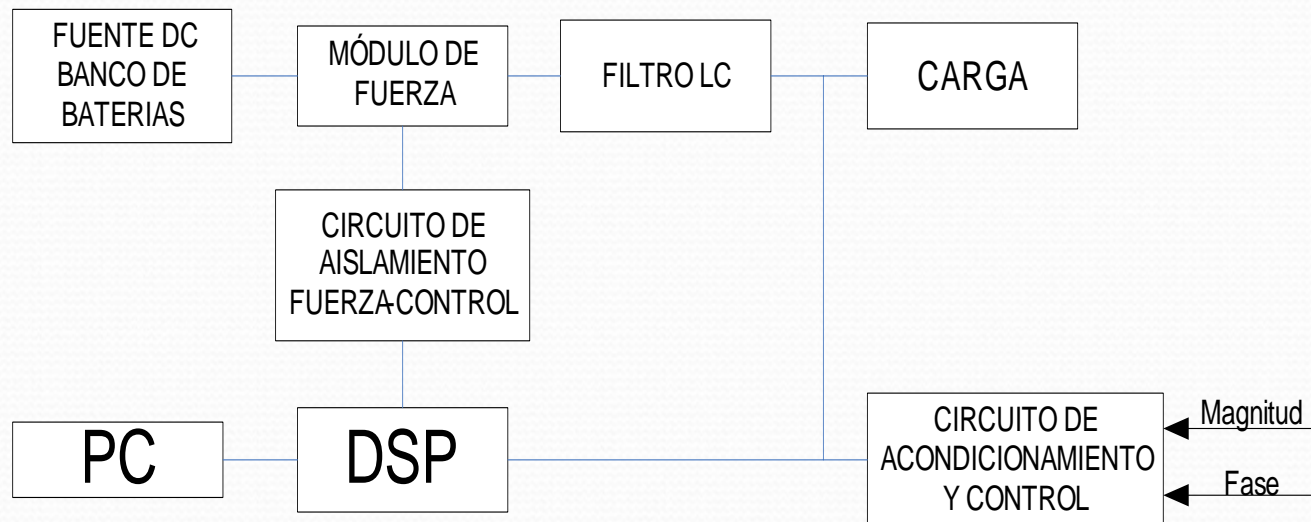


DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DVR CON
CONTROL EN LAZO ABIERTO PARA MITIGAR
SAG Y SWELL DEL 50 %

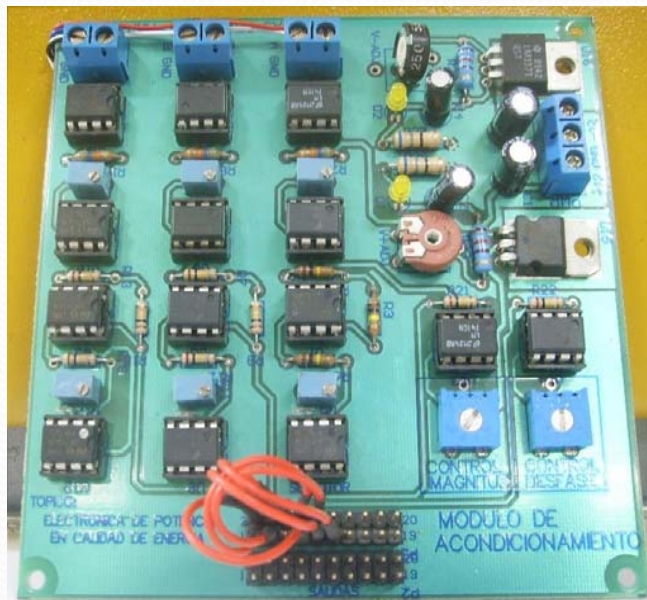
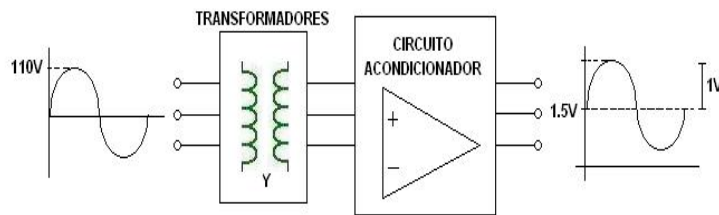
Especificaciones

Elementos	Valores
Voltaje de alimentación	50 [V]
Voltaje Sag	25 [V]
Voltaje swell	75 [V]
Voltaje de Baterías DC	96 [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]

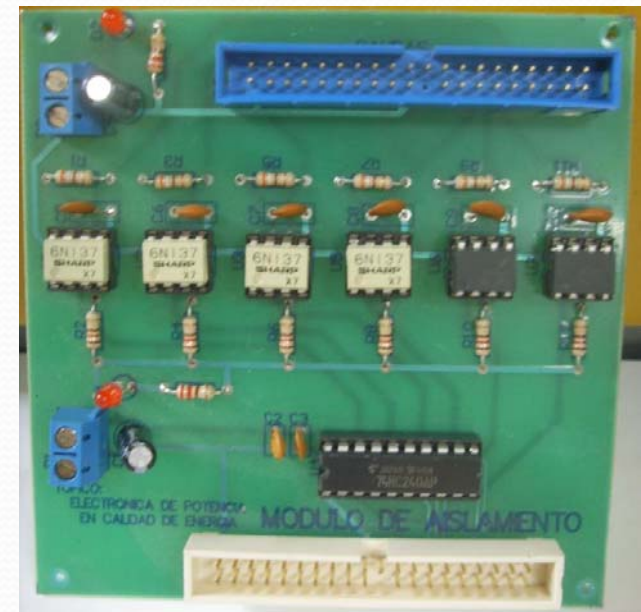
DISEÑO GLOBAL DE CONEXIONES DE SISTEMAS



CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL



CIRCUITO DE AISLAMIENTO CONTROL - FUERZA



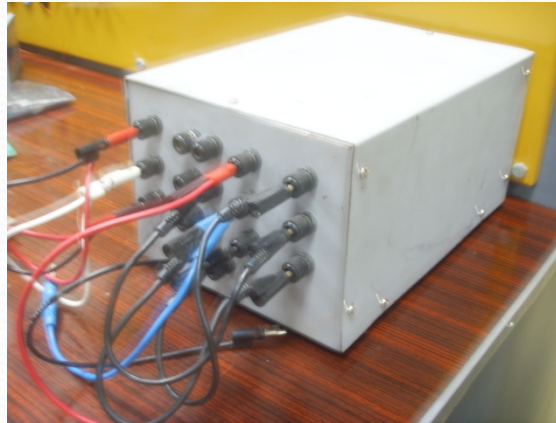
CIRCUITO DE FUERZA



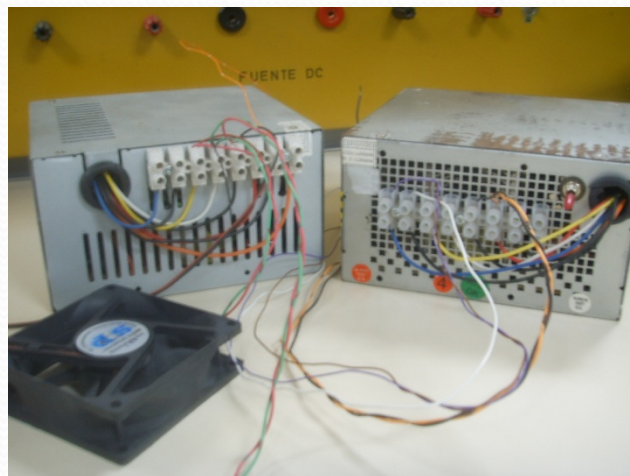
MÓDULO DE IGBT IRAMY20UP60B



**8 BATERIAS:
12 VOLTIOS, 7 AMPERIOS**

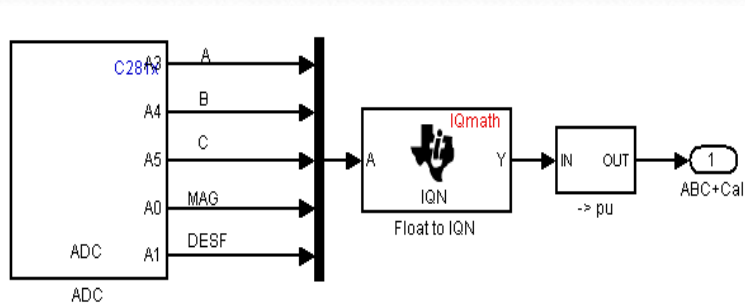
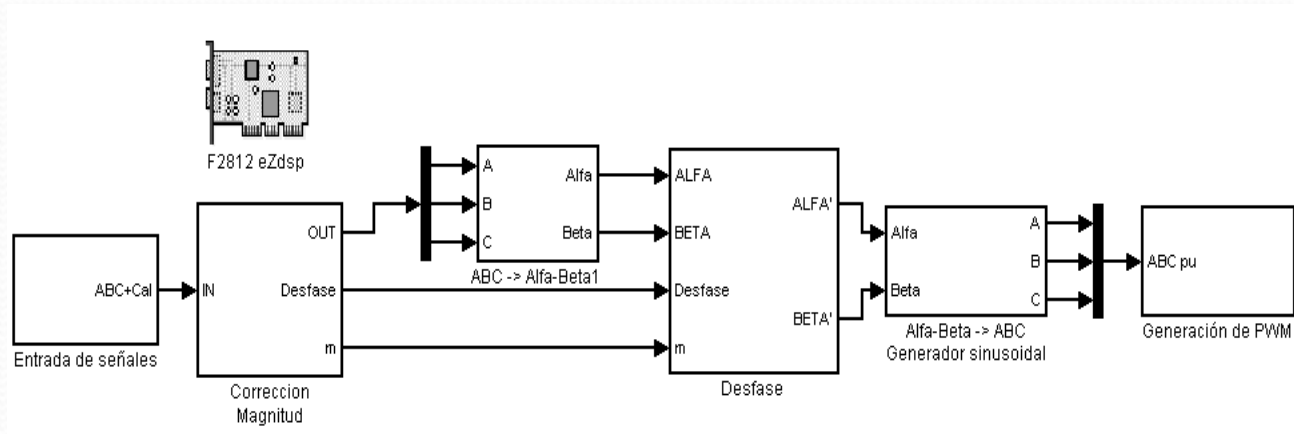


FILTRO INDUCTIVO Y CAPACITIVO TRIFÁSICO

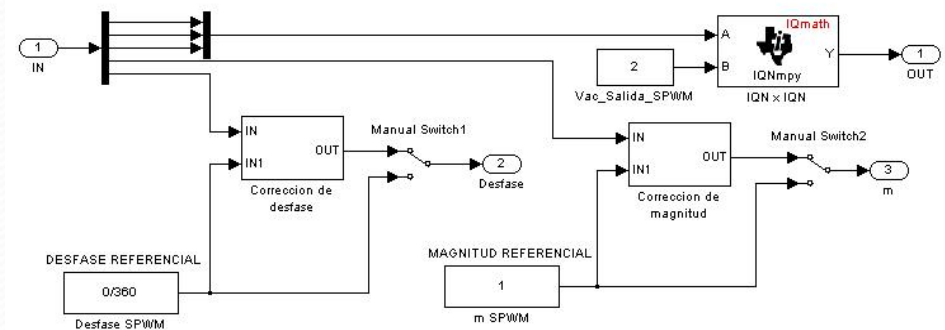


FUENTES DE PODER CIRCUITO DE FUERZA Y CONTROL

PROGRAMACION EN EL DSP

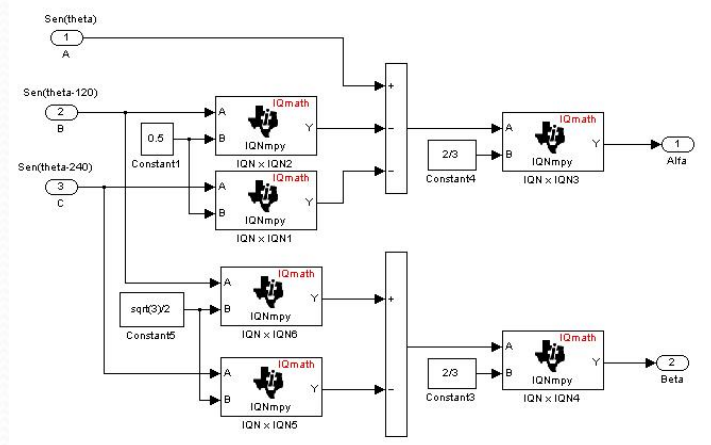
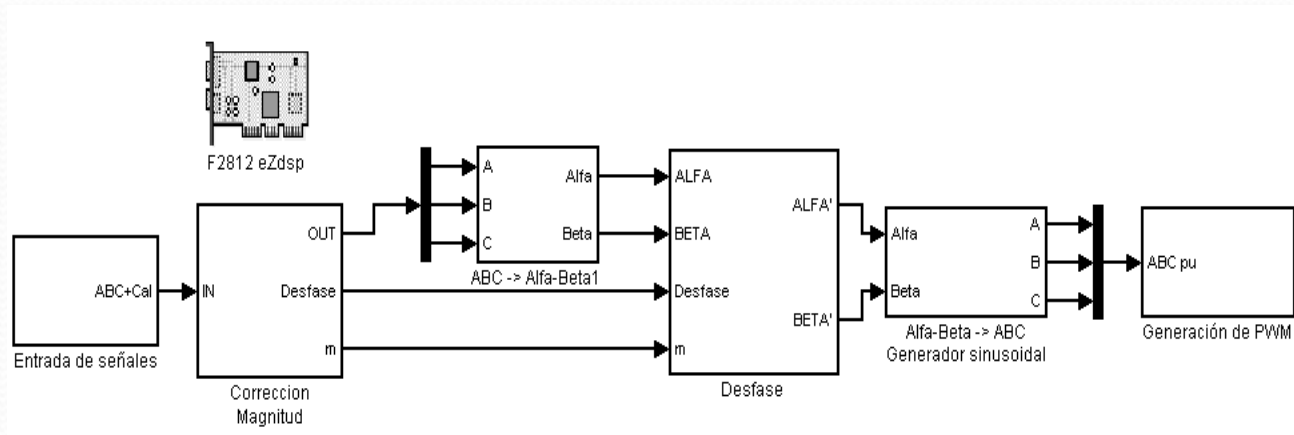


Entradas de Señales



Control de Magnitud y Fase

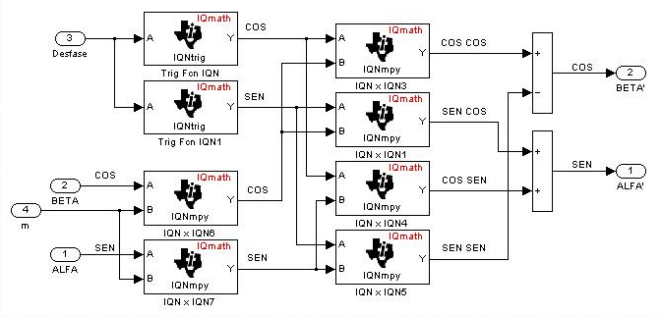
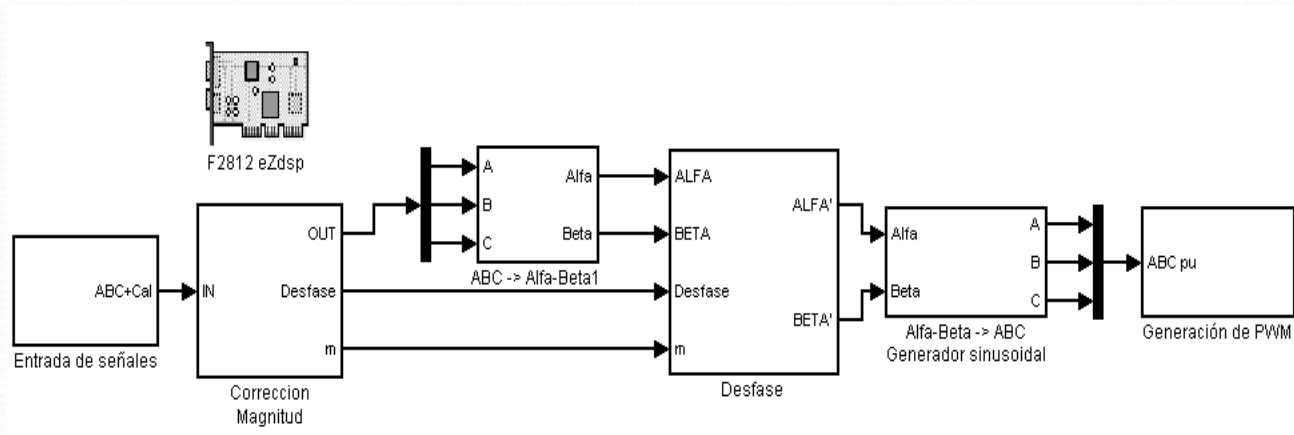
PROGRAMACION EN EL DSP



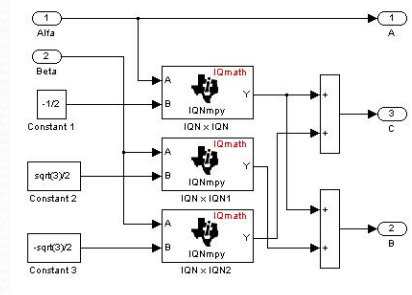
Transformada de Clark

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

PROGRAMACION EN EL DSP



Matriz de Desfase

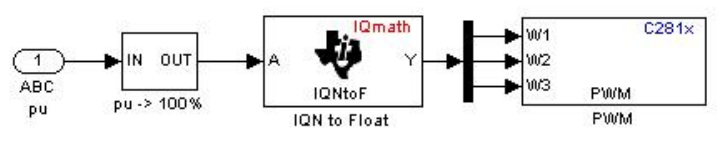


$$A = \text{Sen}(\theta)$$

$$B = \text{Sen}(\theta + 120^\circ) = -\frac{1}{2} \text{Sen}(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Cos}(\theta)$$

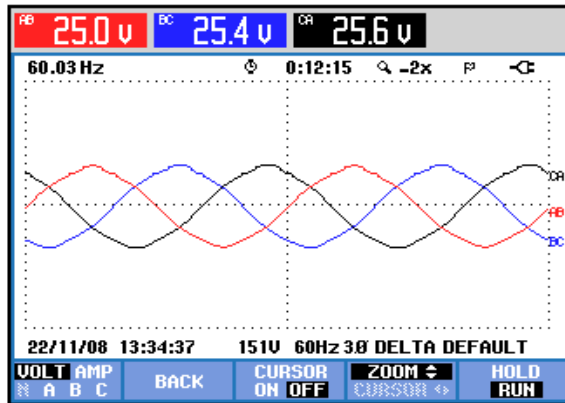
$$C = \text{Sen}(\theta + 240^\circ) = -\frac{1}{2} \text{Sen}(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Cos}(\theta)$$

Generador Sinusoidal

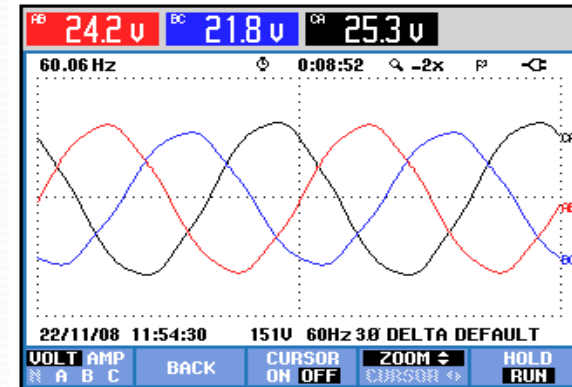


Generación PWM

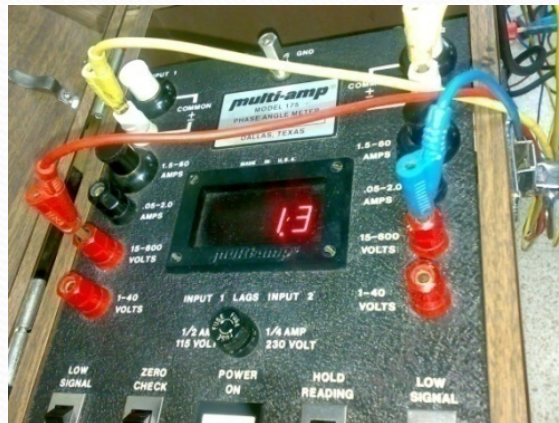
MUESTRA DE RESULTADOS



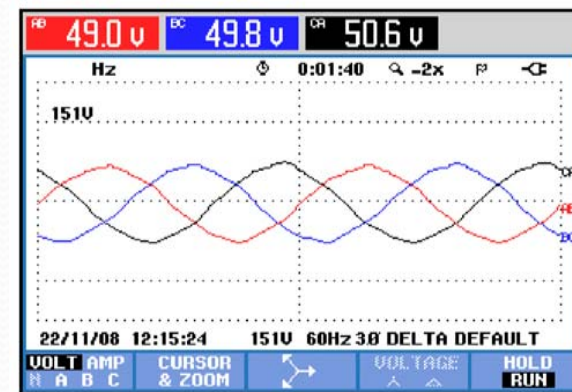
Voltaje sag en la fuente de alimentación



Voltaje en la carga antes de compensar el sag

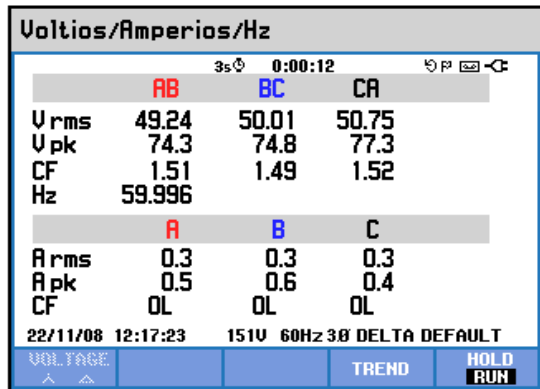


Medición de fase del voltaje DVR con respecto al voltaje de alimentación

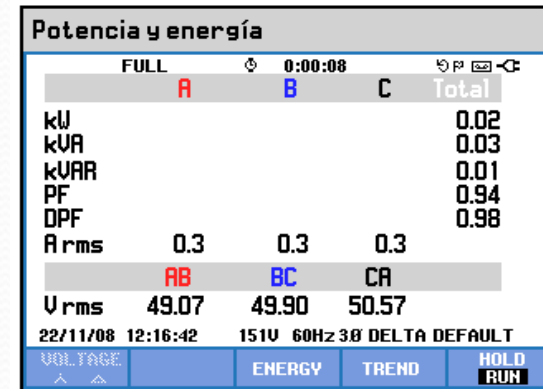


Voltaje compensado en la carga

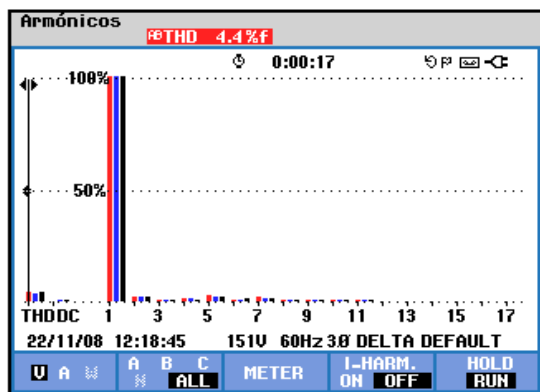
MUESTRA DE RESULTADOS



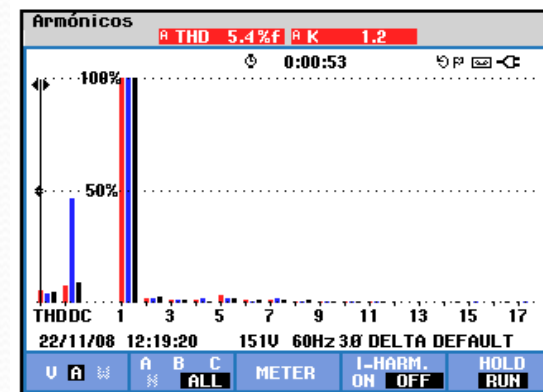
Voltaje, corriente y frecuencia durante la compensación del sag



Potencia y energía durante la compensación del voltaje sag

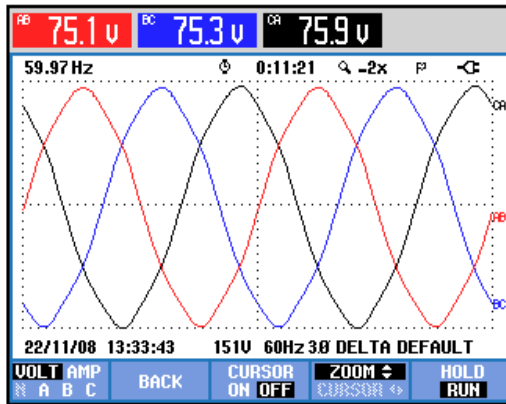


THD del voltaje durante la compensación del voltaje sag

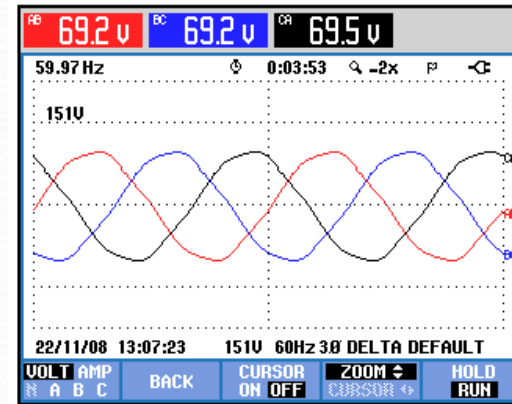


THD de la corriente durante la compensación del voltaje sag

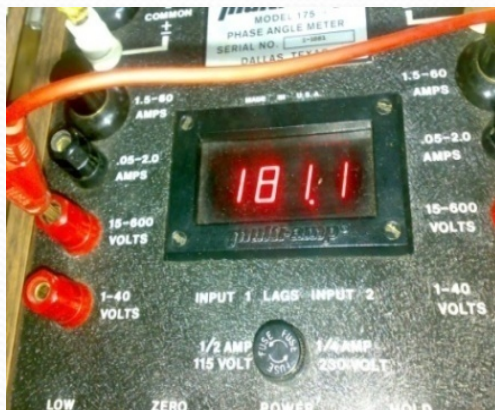
MUESTRA DE RESULTADOS



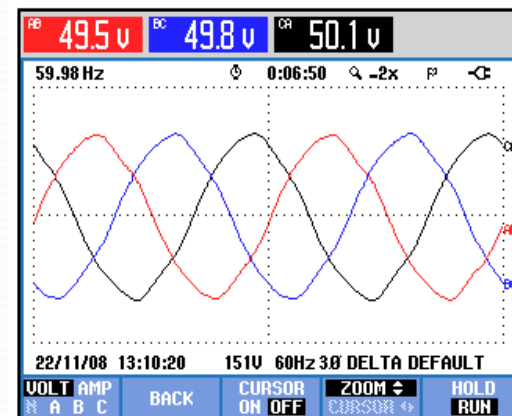
Voltaje swell en la fuente de alimentación



Voltaje en la carga antes de compensar el swell

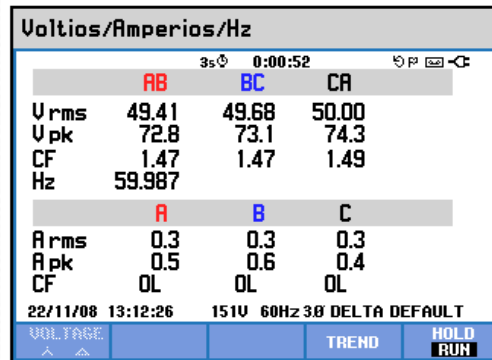


Medición de fase del voltaje DVR con respecto al voltaje de alimentación

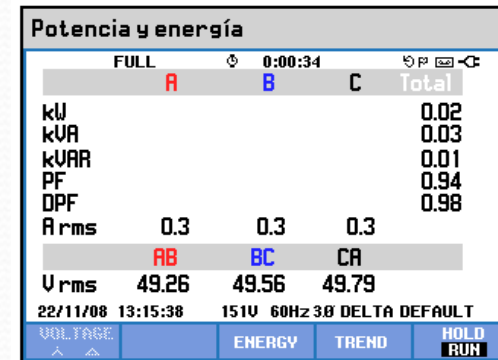


Voltaje compensado en la carga

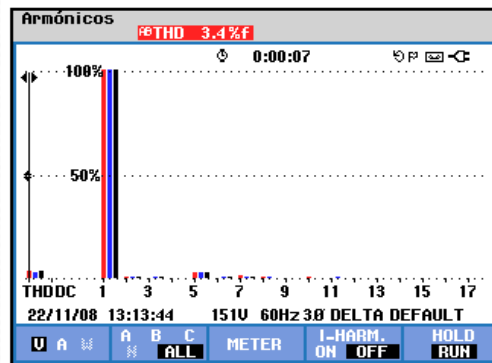
MUESTRA DE RESULTADOS



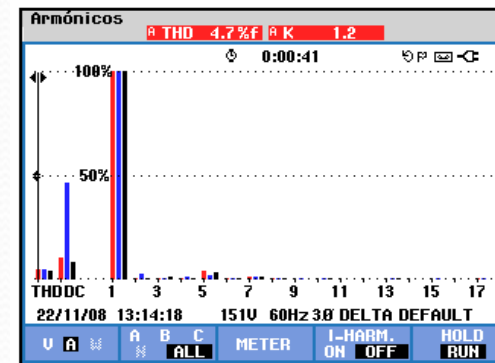
Voltaje, corriente y frecuencia medidas con el analizador trifásico durante la compensación del swell



Potencia y energía durante la compensación del voltaje swell



THD del voltaje durante la compensación del voltaje swell



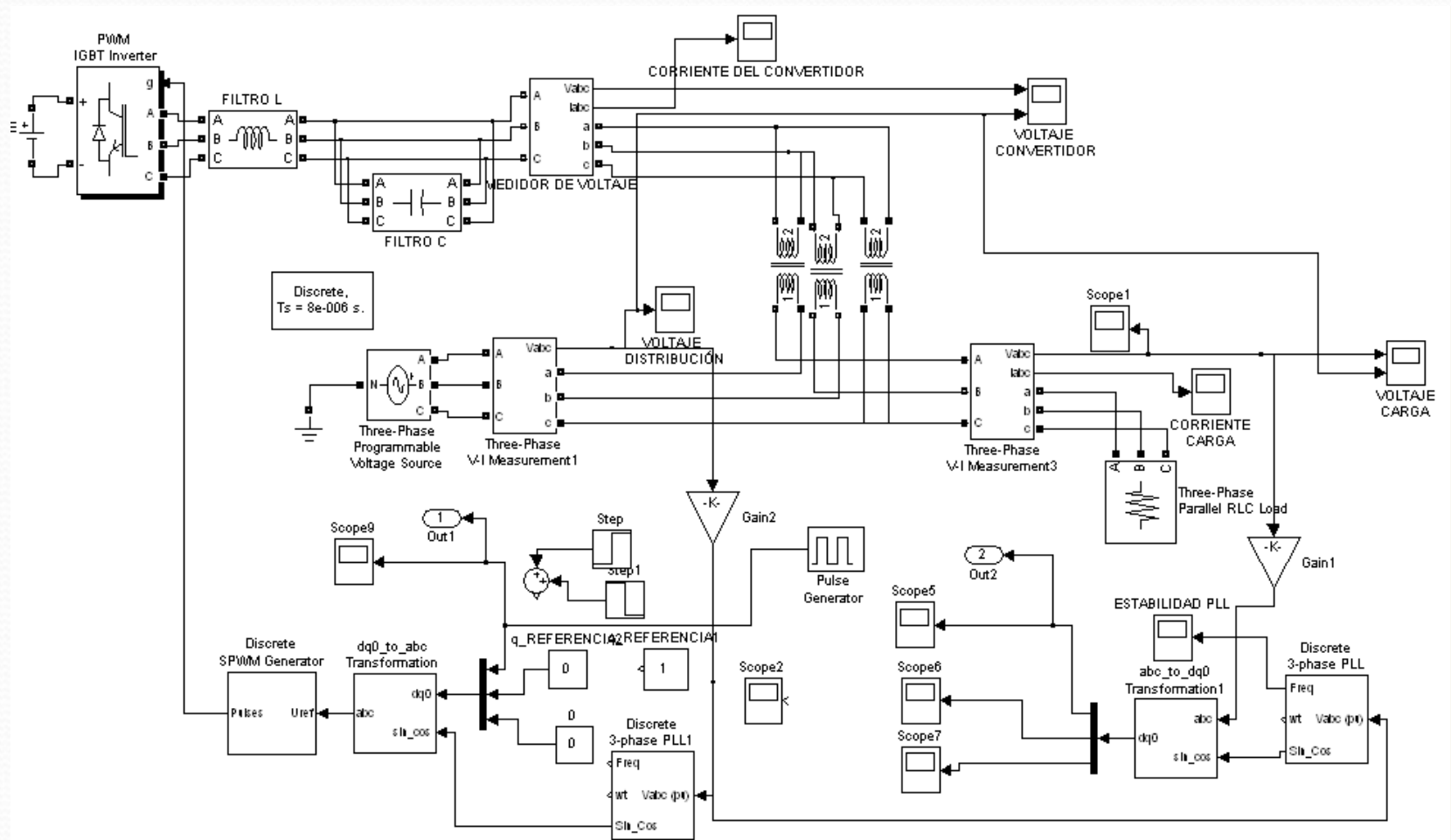
THD de la corriente durante la compensación del voltaje swell

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN DVR CON
CONTROL EN LAZO CERRADO PARA MITIGAR
SAG Y SWELL**

• Especificaciones

Elementos	Valores
Voltaje de alimentación	50 [V]
Voltaje Sag	25 [V]
Voltaje swell	75 [V]
Voltaje de Baterías DC	96 [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]

Simulación con variaciones periódicas para identificar la planta DVR

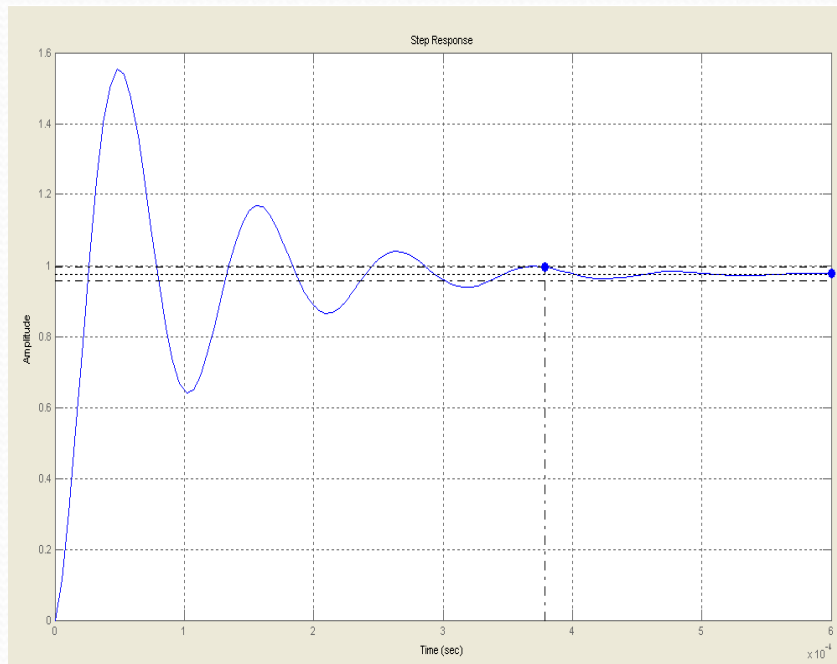


IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

```
Command Window
>> model=tf(d2c(oe121))

Transfer function from input "u1" to output "y1":
1.369e004 s + 3.453e009
-----
s^2 + 6723 s + 8.686e007
```

← Función de transferencia obtenida con la herramienta *ident*



← Respuesta de la planta identificada en lazo abierto ante un escalón

Entre las opciones rápidas que brinda SISOTOOL para diseñar compensadores está el *Automated Tuning*. El método de diseño usado es *PID tuning* para el que se seleccionó un controlador tipo PI mediante el algoritmo de *Ziegler – Nichols open loop*

Architecture Compensator Editor Graphical Tuning Analysis Plots Automated Tuning

Design Method: PID tuning

Compensator

C = 494.78 x $\frac{(1 + 0.00013s)}{s}$ **Controlador**

The process model contains 2 pole(s) and 1 zero(s).

Specifications

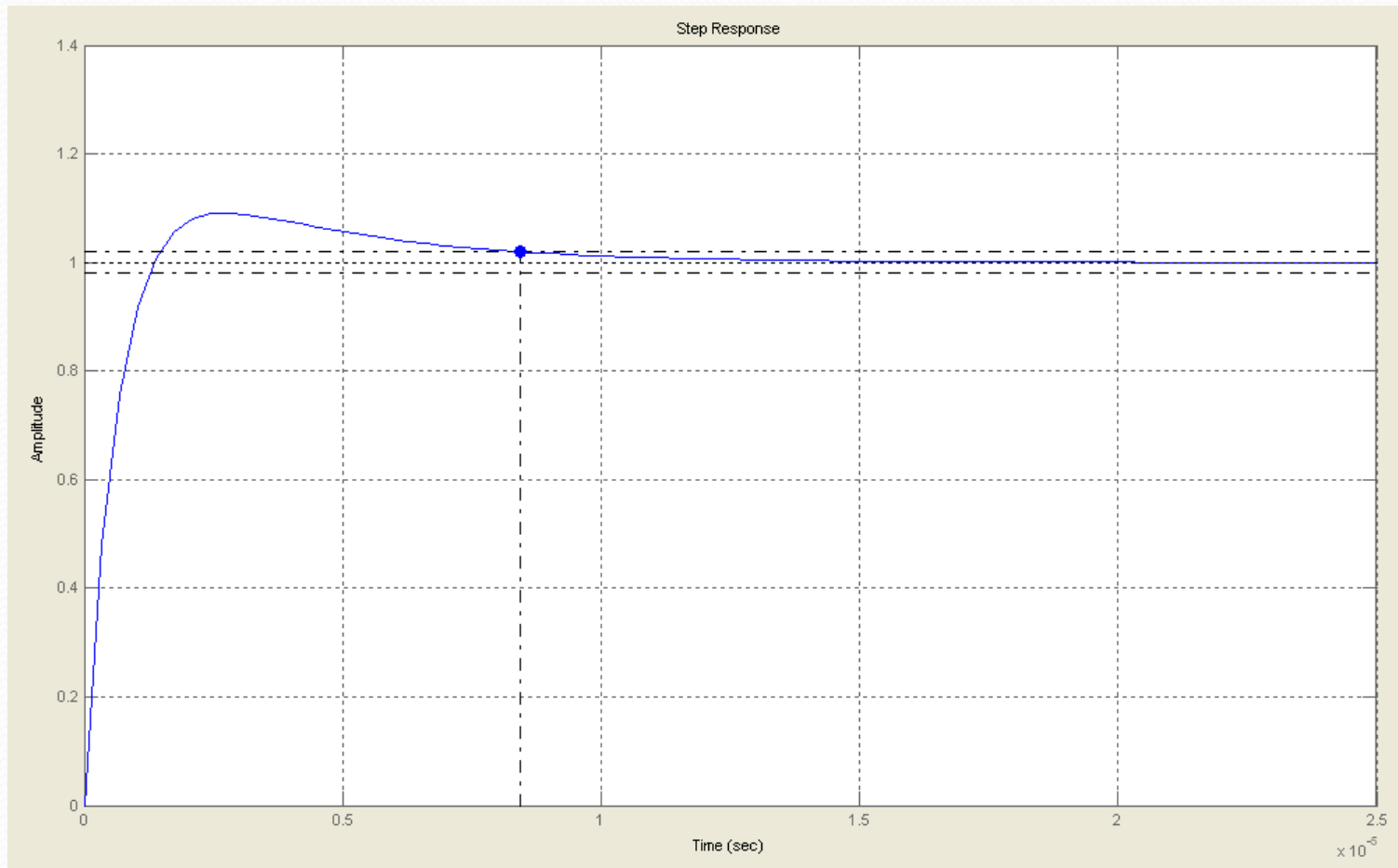
Select a controller type: P PI PID PID with filtered derivative

Select a tuning algorithm: Ziegler-Nichols open loop

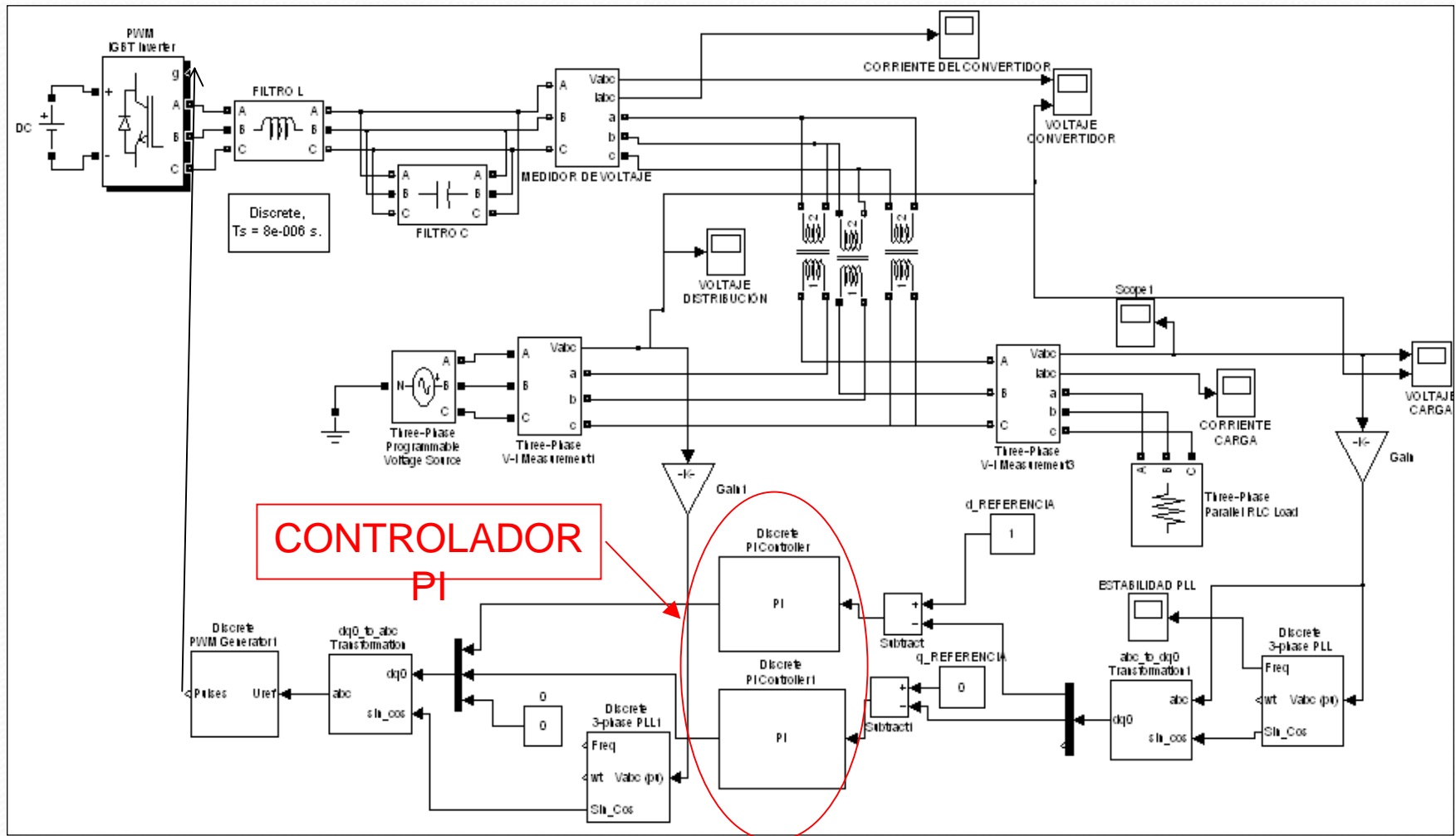
Select a tuning preference: Set-Point Tracking Load Disturbance Rejection

DISEÑO E IMPLEMENTACION
SIMULACION DE CONTROL DE LAZO CERRADO

$$G_c(s) = 494.78 \times \frac{(1 + 0.000013s)}{s}$$

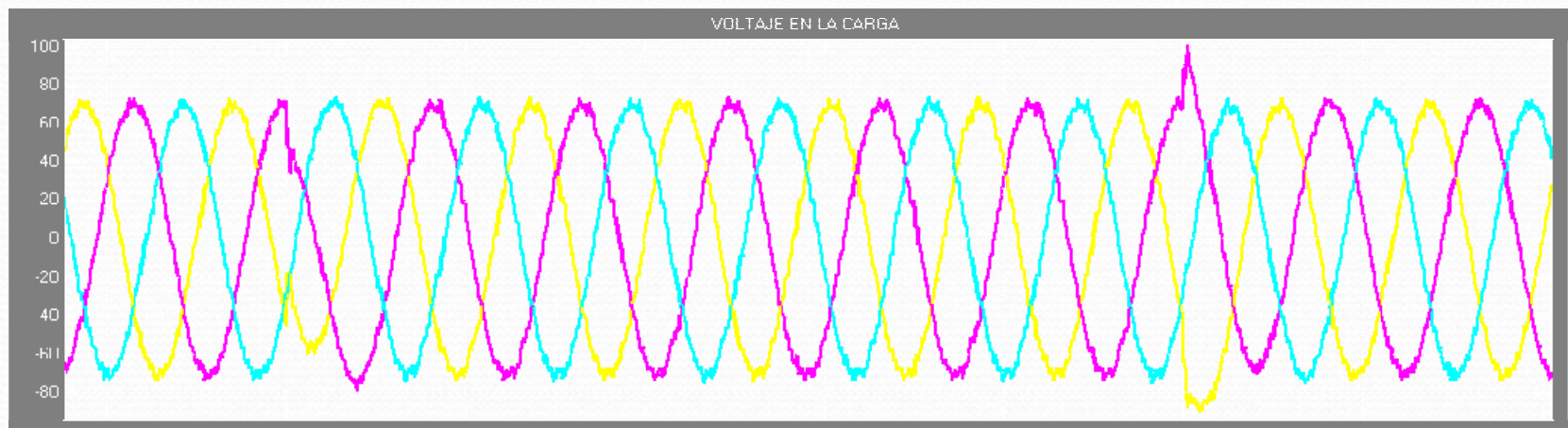
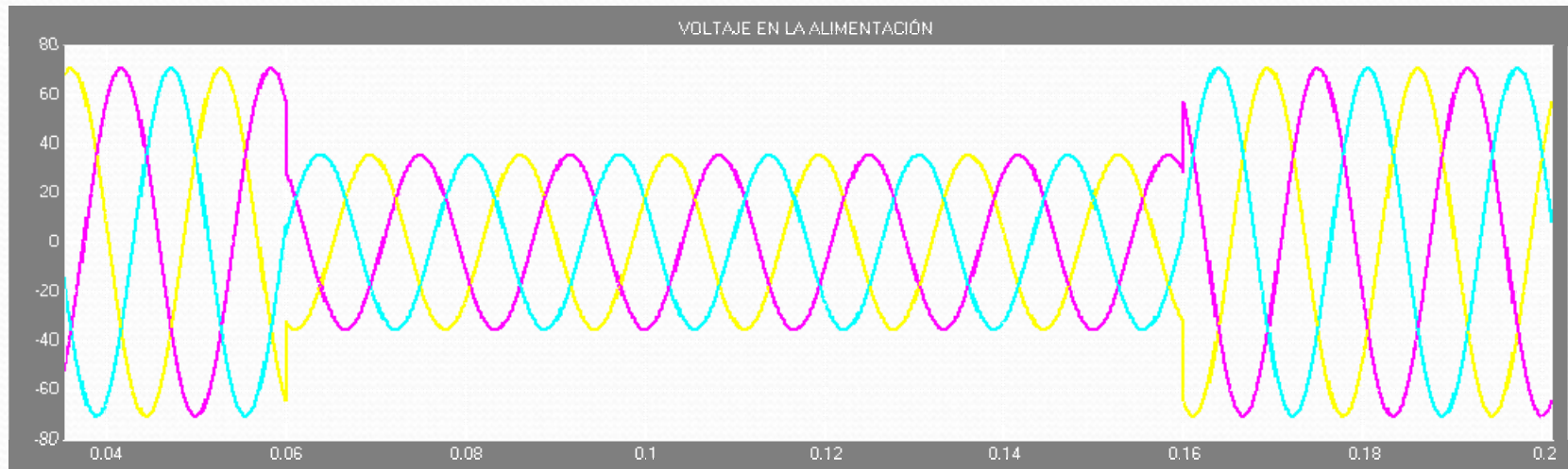


SIMULACIÓN DE LAZO CERRADO

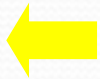
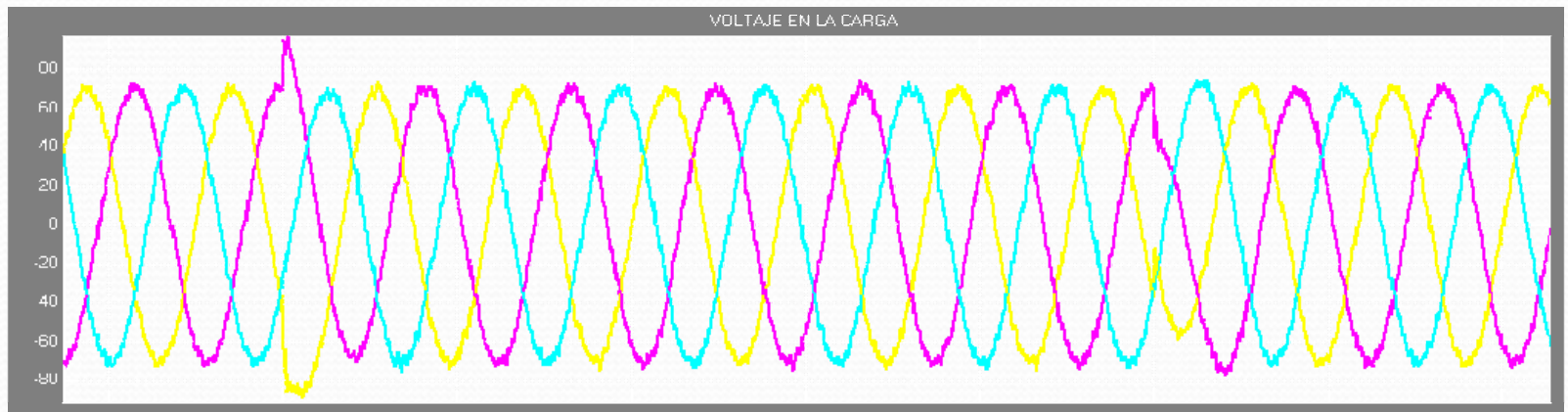
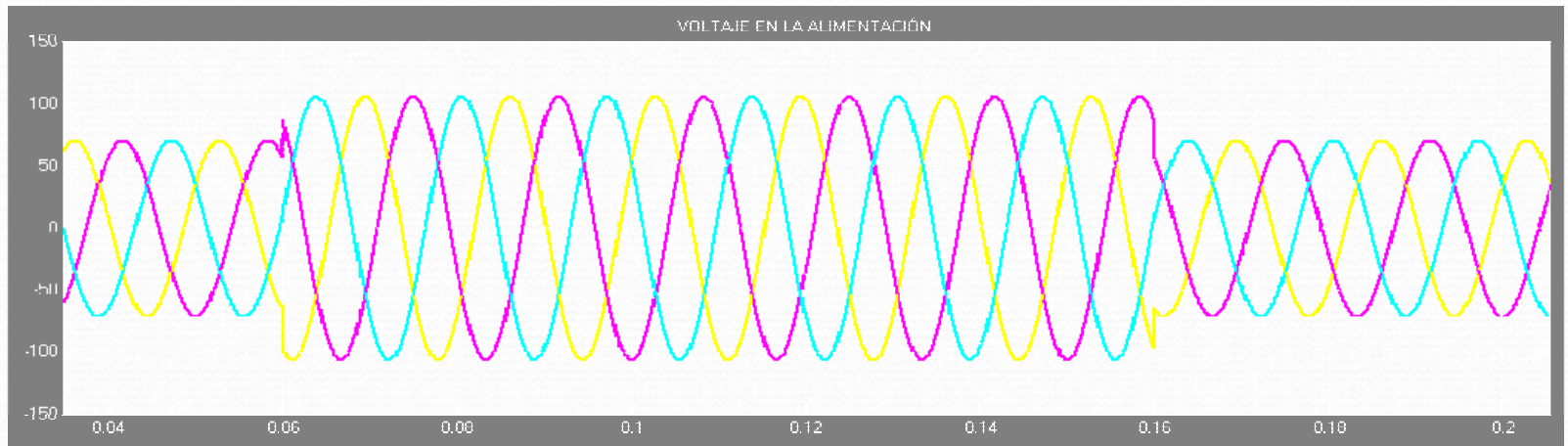


SIMULACIÓN DE LAZO CERRADO

RESULTADOS PARA SAG



SIMULACIÓN DE LAZO CERRADO RESULTADOS PARA SWELL



CONCLUSIONES

- ✓ La capacidad de la unidad de almacenamiento de energía es un factor limitante durante la compensación, 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.

CONCLUSIONES

- ✓ Los máximos valores de distorsión armónica obtenidos durante la compensación en el DVR son: THDV = 4.3 % y THDI = 5.4% para sag, THDV = 3.4% y THDI = 4.7% para swell. Estos valores están dentro del rango que permite la norma IEEE 519-1992.
- ✓ Las formas de ondas obtenidas durante la compensación del sag y swell poseen muy poca distorsión, sus niveles de distorsión armónica están dentro del rango permitido debido a que el convertidor trabajó siempre en zona de modulación lineal, es decir no hubo sobremodulación, y al correcto dimensionamiento del filtro LC.
- ✓ 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; para reducir estas caídas de voltaje es necesario implementar un control de lazo cerrado.

RECOMENDACIONES

- ✓ 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 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.

PROYECTO FUTURO

- Implementación del controlador diseñado en lazo cerrado para el DVR.



MUCHAS GRACIAS