DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN COMPENSADOR ESTATICO DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM); BASADO EN UN CONVERTIDOR TRIFASICO CON MODULACION SINUSOIDAL DE ANCHO DE PULSO (SPWM), CONTROLADO POR UN PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES (DSP TMS320C2000)

INTEGRANTES:
Rafael Pérez Ordóñez
Víctor Lituma Silva
Marcos Guerrero Zambrano

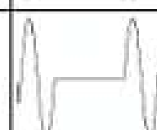
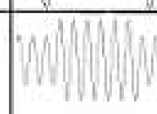
CONTENIDO

- Planteamiento del problema
- El DSTATCOM como solución
- Implementación del DSTATCOM
- Diseño del Control
- Simulaciones
- Prototipo
- Conclusiones y Observaciones
- Trabajo futuro

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cómo se ve afectada la Calidad de la Energía?

- Factor de potencia
- Variaciones de tensión de corta duración (Sags/Swells)
- Contenido de harmónicos (THD)
- Fluctuaciones de Tensión (Flickers)
- Cargas desbalanceadas

Perturbación	Figura	Opciones	Funcionamiento
Distorsión armónica		-F.Activos	-Bueno
Fluctuaciones de tensión		-STATCOM -DVR -UPQC	-Bueno -Cuestionable -Mejor
Huecos e interrupciones breves		-STATCOM -DVR -UPQC	-Función UPS -Difícil -Función UPS
Variaciones de tensión		-STATCOM -DVR -UPQC	-Moderado -Bueno -Bueno
Desequilibrios		-STATCOM -DVR -UPQC	-Problemático -Bueno -Bueno

EL DSTATCOM COMO SOLUCIÓN PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA

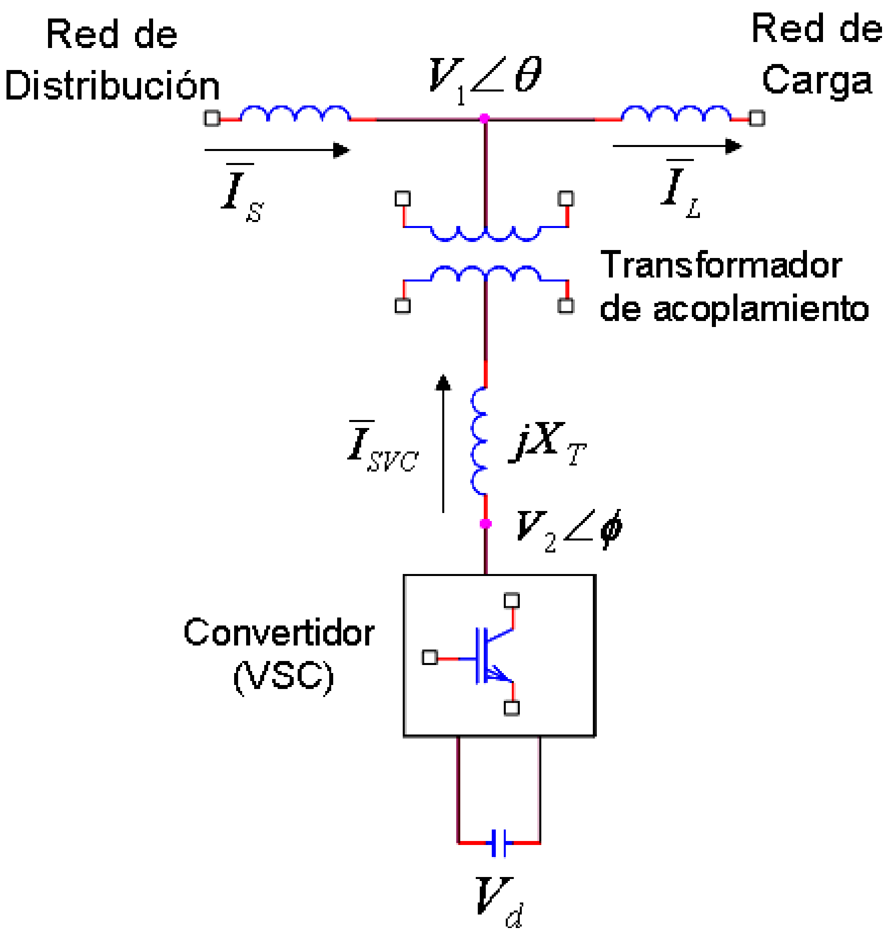
Características del DSTATCOM

- Se conecta en paralelo con la carga.
- Genera/absorbe potencia reactiva inyectando corriente en la línea utilizando un capacitor en el lado DC.
- Puede inyectar/absorber potencia reactiva también si se utilizan baterías en el lado DC.
- Cancela el efecto de cargas con bajo factor de potencia.
- Cancela los armónicos de bajo orden.
- Cancela el efecto de cargas desbalanceadas.
- Basado en un convertidor de estado sólido que normalmente usa topología VSC (voltage source converter).

Principio de Operación

Funcionamiento

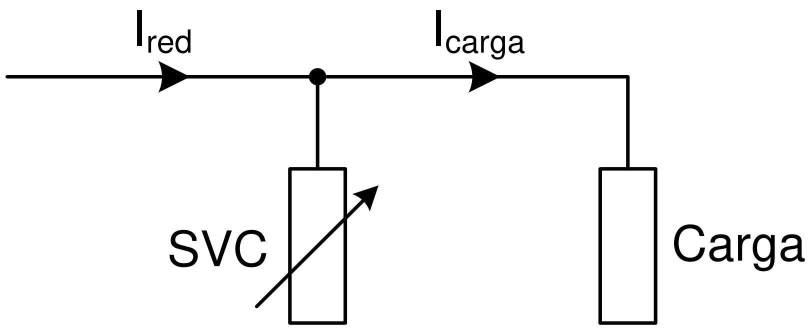
$\angle\theta = \angle\phi$	Sólo intercambia potencia reactiva
$\lvert V_1 \rvert > \lvert V_2 \rvert$	Absorbe potencia reactiva (inductivo)
$\lvert V_2 \rvert > \lvert V_1 \rvert$	Genera potencia reactiva (capacitivo)
$\angle\theta < \angle\phi$	Absorbe potencia activa (eleva V_1)
$\angle\theta > \angle\phi$	Inyecta potencia activa (reduce V_1)

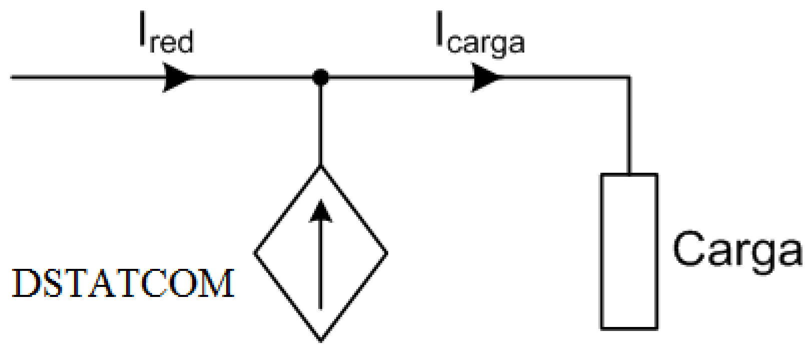


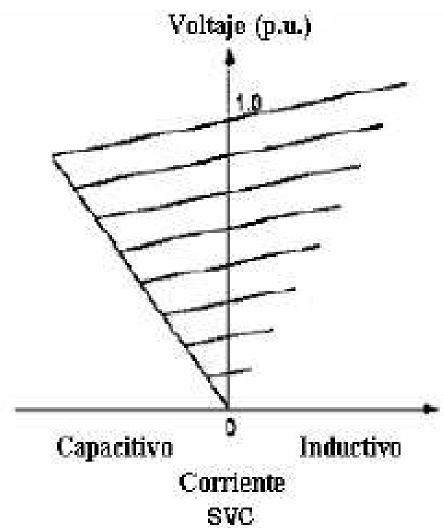
$$P_{DSTATCOM} = \frac{\lvert V_O \rvert \cdot \lvert V_S \rvert}{X_T} \cdot Sin(\delta)$$

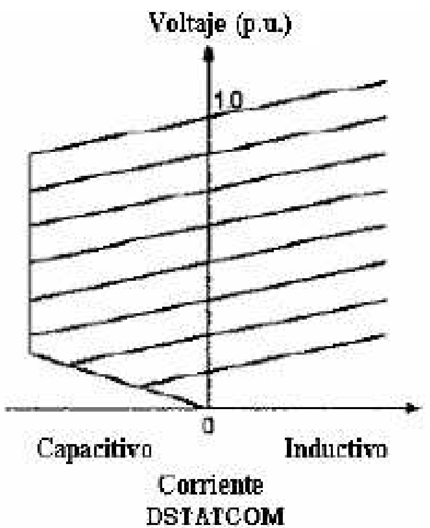
$$Q_{DSTATCOM} = \frac{\lvert V_O \rvert \cdot \lvert V_S \rvert}{X_T} \cdot Cos(\delta) - \frac{\lvert V_S \rvert^2}{X_T}$$

DSTATCOM vs SVC

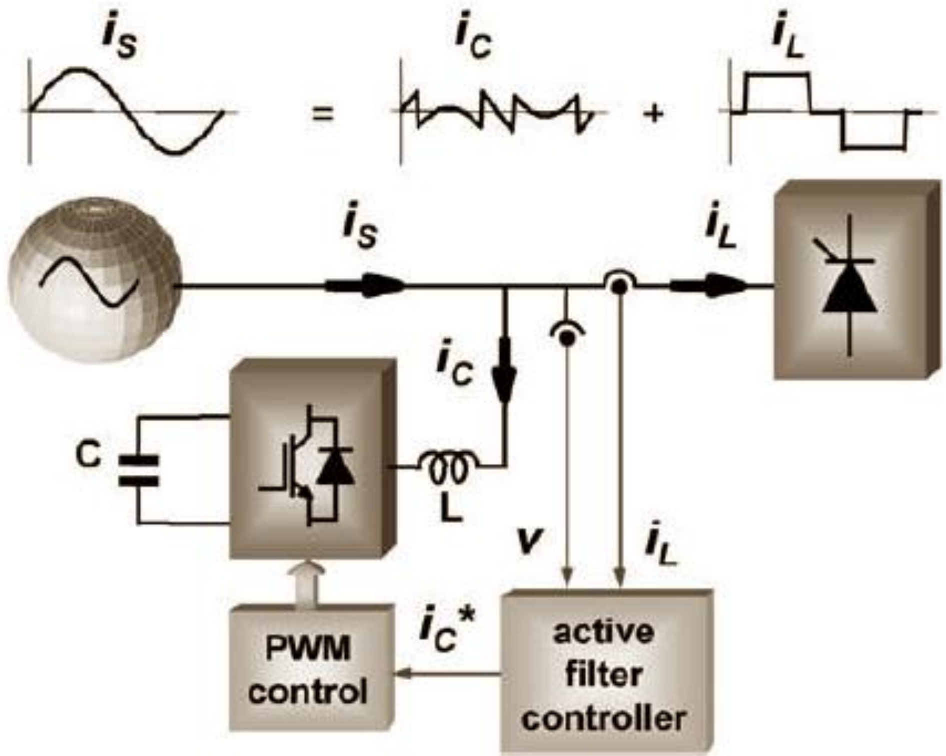








DSTATCOM como Filtro Activo

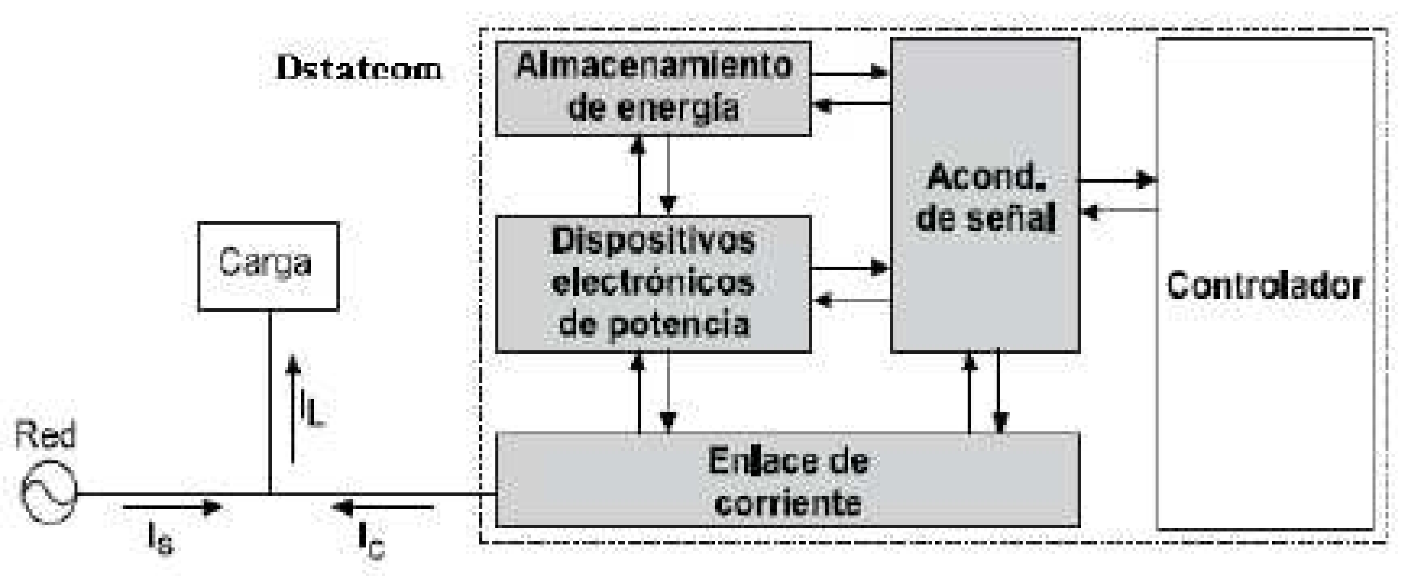


Funciona de manera similar en el modo de corrector de factor de potencia (PFC)

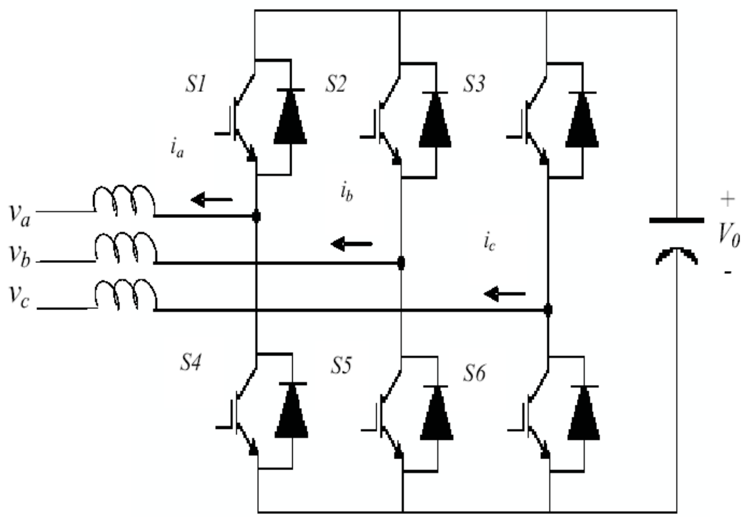
IMPLEMENTACIÓN DEL DSTATCOM

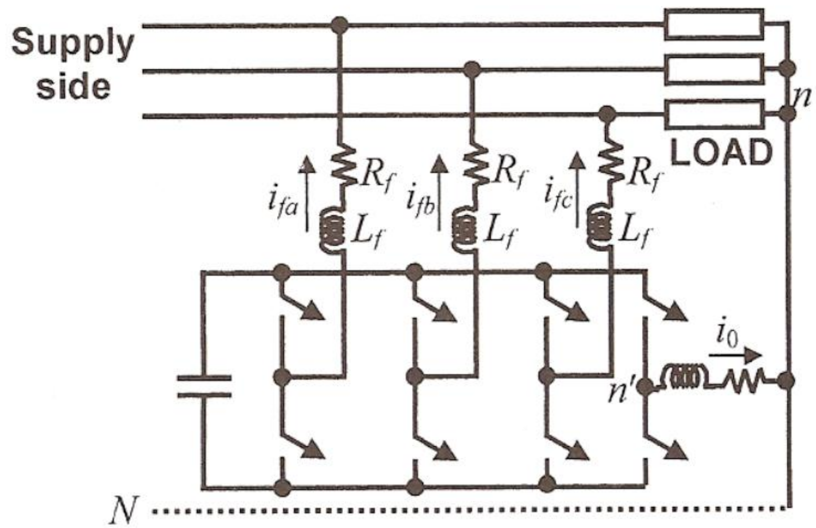
Estructura interna del DSTATCOM

- *ETAPA de FUERZA:* convertidor, enlace de corriente, elemento almacenador de energía, y dispositivo acondicionador de señales.
- *ETAPA de CONTROL:* controlador (DSP)

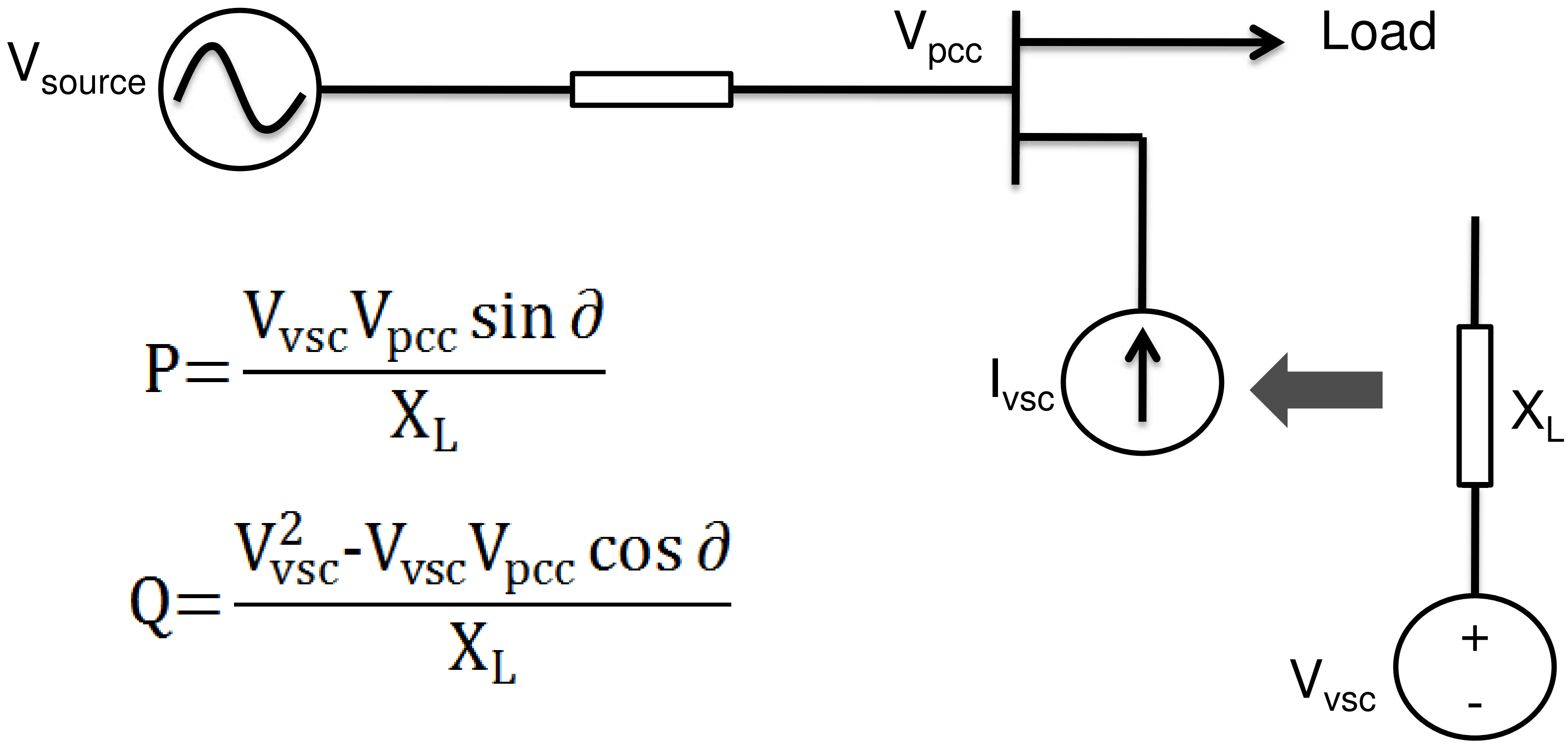


- **El convertidor** es normalmente tipo VSC y esta compuesto por un puente inversor de 3 ramas, 3 hilos, asumiendo que la carga es balanceada. De lo contrario se utiliza una rama adicional para el neutro.





- **El enlace de corriente** está constituido por una inductancia que facilita la transferencia de energía entre la red y el convertidor de potencia.

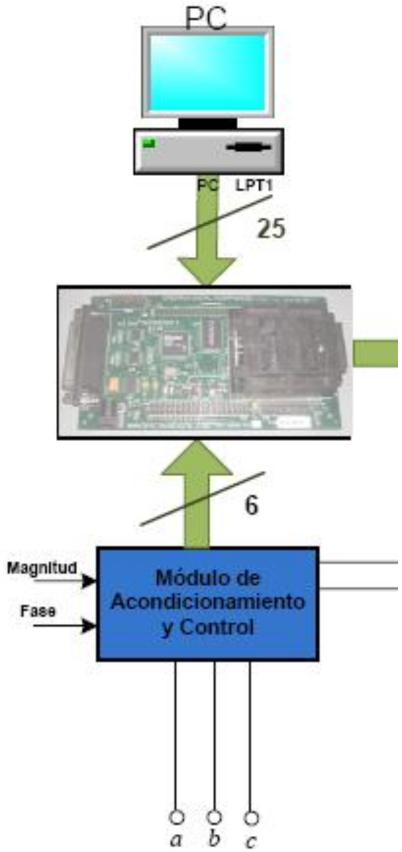


$$P = \frac{V_{vsc} V_{pcc} \sin \partial}{X_L}$$

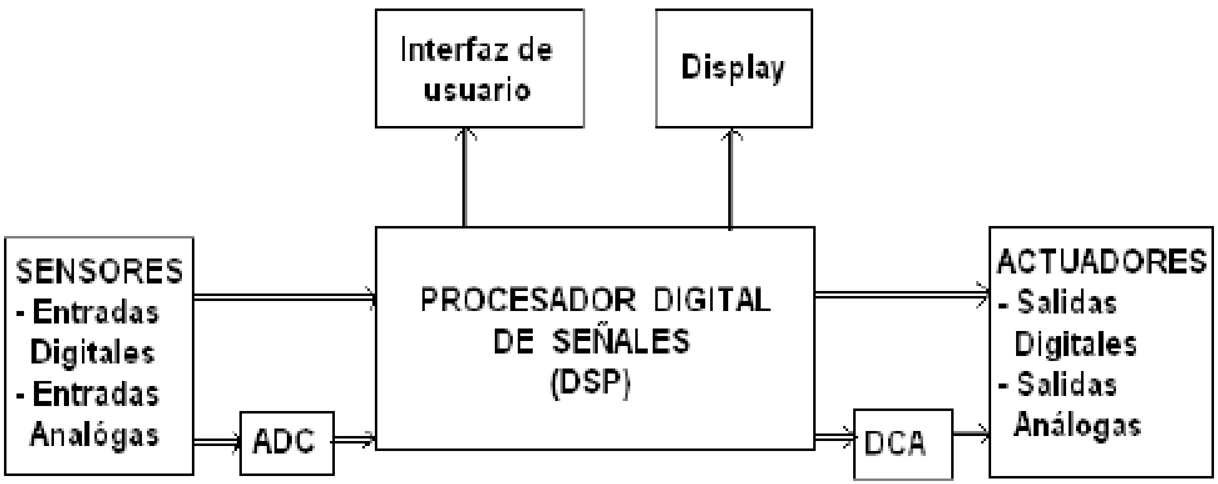
$$Q = \frac{V_{vsc}^2 - V_{vsc} V_{pcc} \cos \partial}{X_L}$$

- **El elemento almacenador de energía** esta compuesto por grandes capacitores o baterías que garantizan el suministro constante de energía a los niveles requeridos por el sistema.

- **Dispositivo Acondicionador de señales** transforma las señales medidas de tensión y corriente a niveles adecuados para las entradas análogas del controlador.

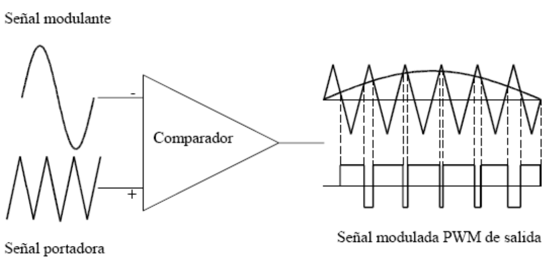


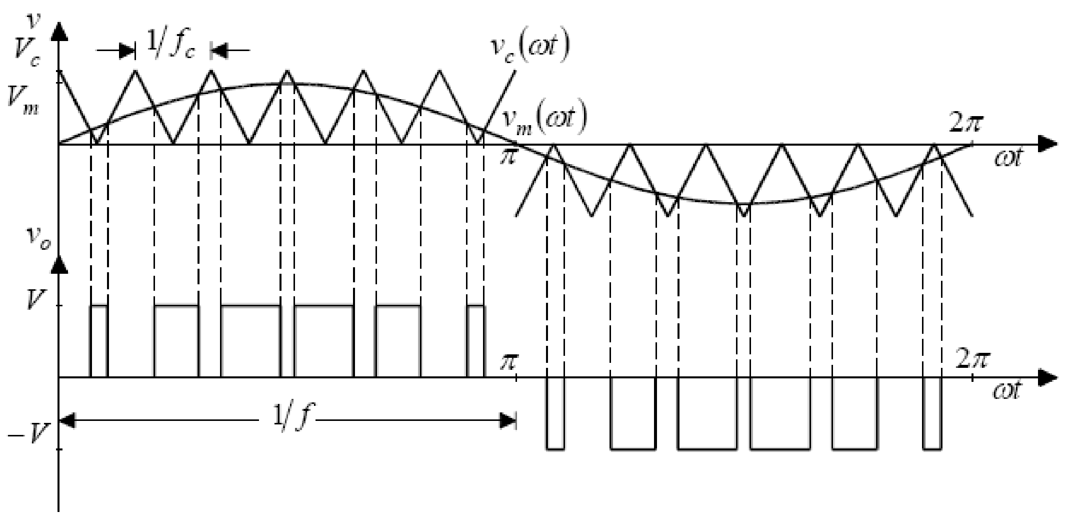
- **El controlador** garantiza la ejecución de los procesos de compensación además de controlar el nivel de energía del elemento almacenador



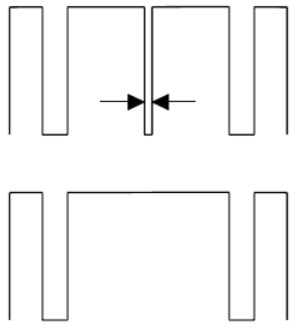
Modulación SPWM

- Los puntos de intersección entre la ondas sinusoidal de referencia y la triangular portadora determinan el ancho de los pulsos del voltaje de salida del convertidor VSC.

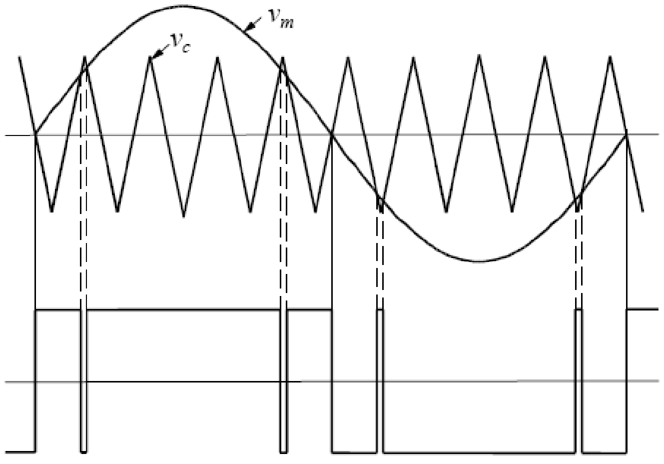


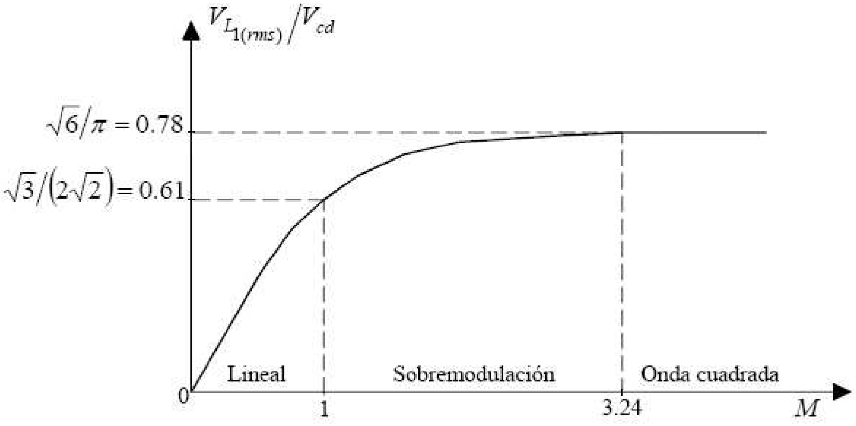


- La sobre modulación (M>1) conduce a un pulso cuadrado sin modulación. Esto incrementa el contenido armónico.
- A mayor frecuencia de la señal portadora, menor es el tamaño de los filtros pasivos requeridos para filtrar la onda cuadrada.



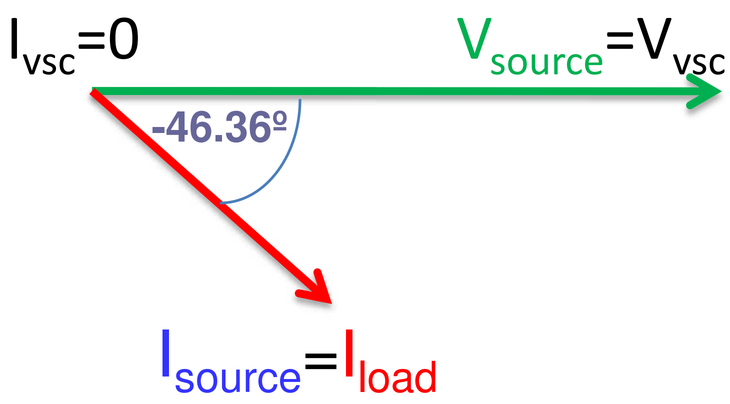
$$M = \frac{V_m}{V_c} \qquad p = \frac{f_c}{f_m}$$



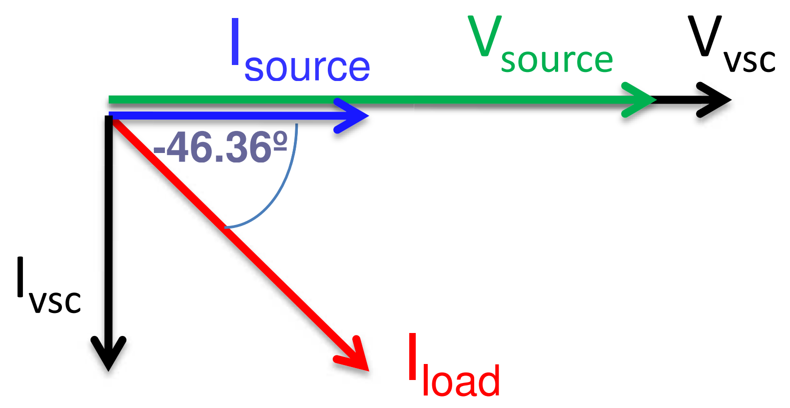


Diagramas Fasoriales en Modo PFC

- Carga R-L con un factor de potencia FP=0.69



Sin Compensación



Con Compensación

Esquemático del DSTATCOM usando PLECS

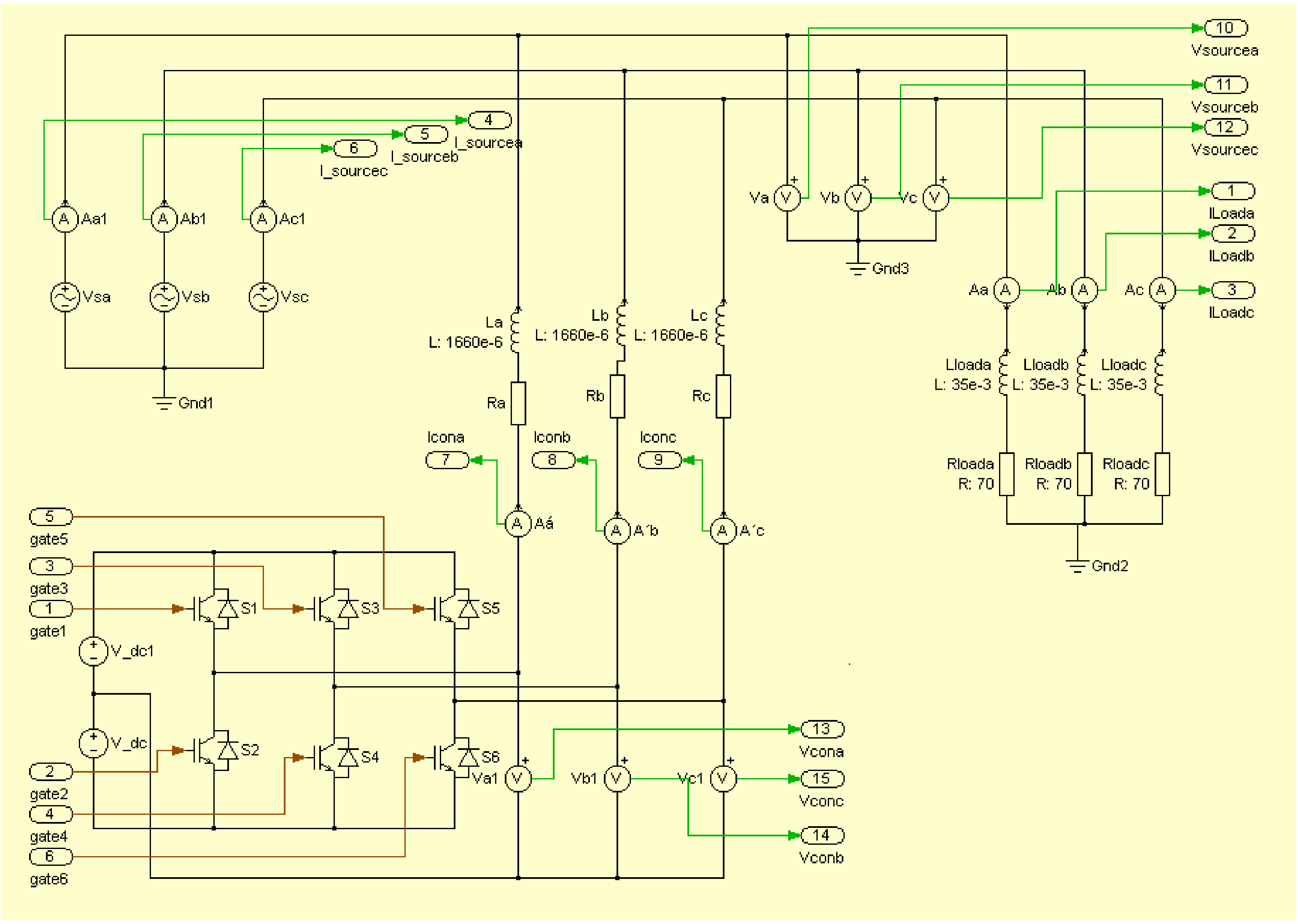
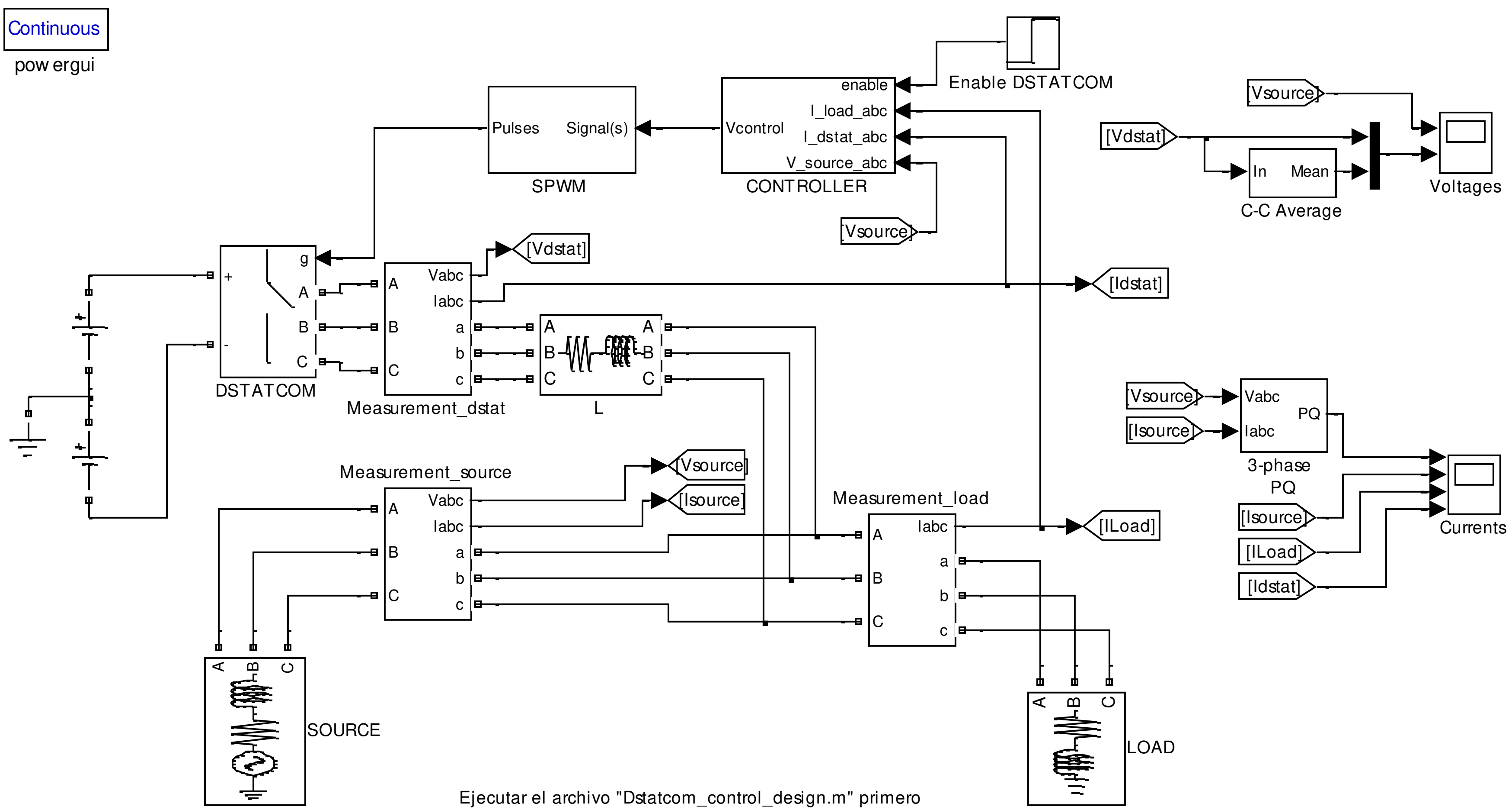
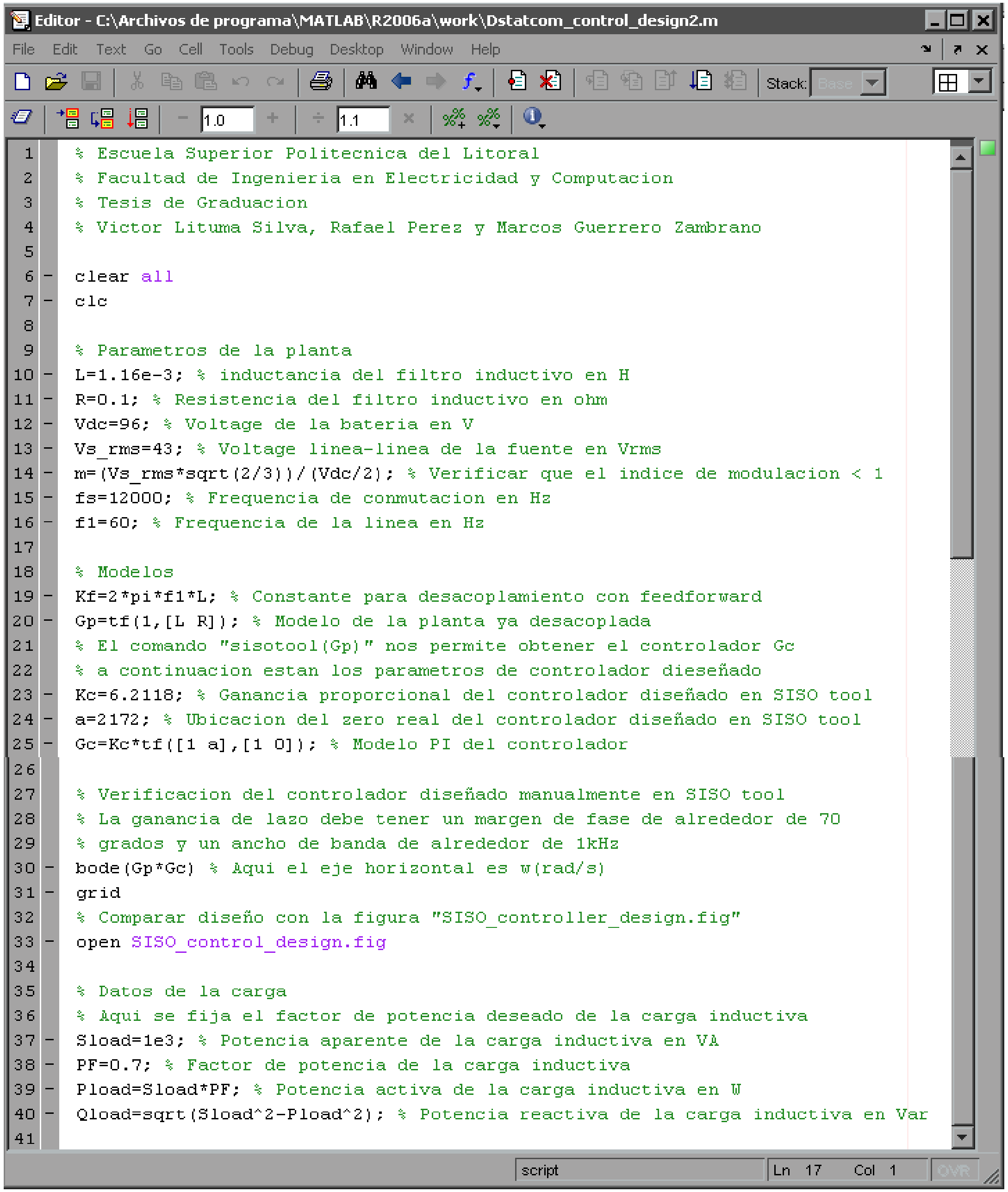


Diagrama Completo del DSTATCOM en Simulink

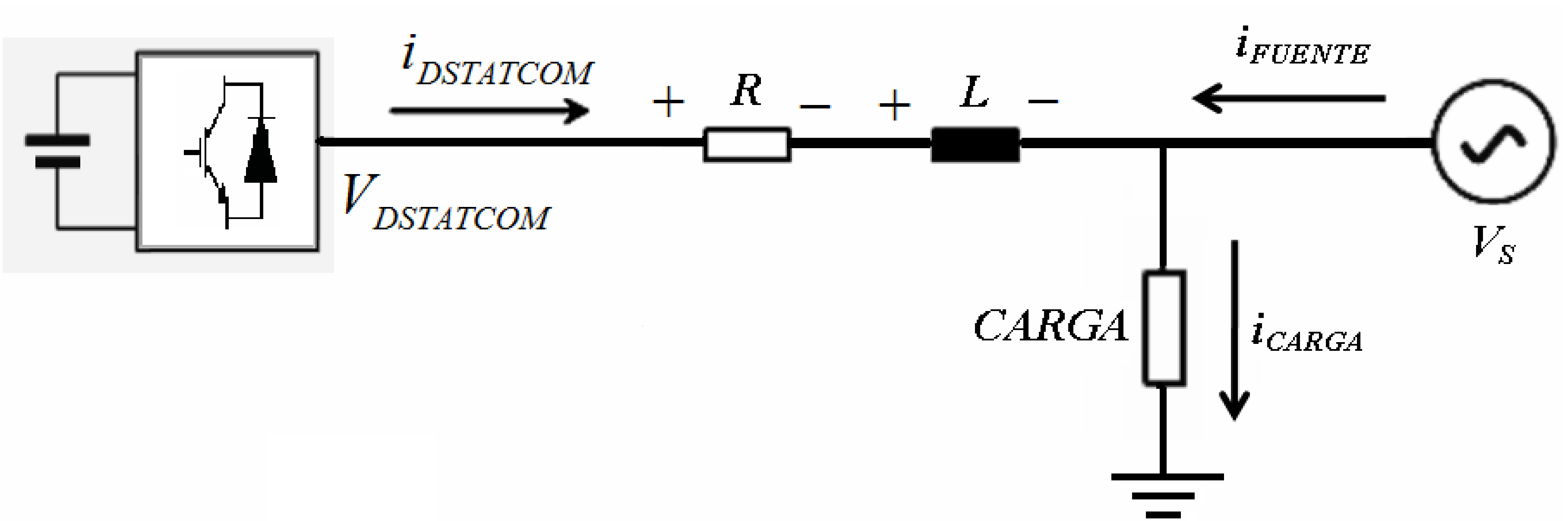





```
% Escuela Superior Politecnica del Litoral
% Facultad de Ingenieria en Electricidad y Computacion
% Tesis de Graduacion
% Victor Lituma Silva, Rafael Perez y Marcos Guerrero Zambrano

clear all
clc

% Parametros de la planta
L=1.16e-3; % inductancia del filtro inductivo en H
R=0.1; % Resistencia del filtro inductivo en ohm
Vdc=96; % Voltage de la bateria en V
Vs_rms=43; % Voltage linea-linea de la fuente en Vrms
m=(Vs_rms*sqrt(2/3))/(Vdc/2); % Verificar que el indice de modulacion < 1
fs=12000; % Frequencia de conmutacion en Hz
f1=60; % Frequencia de la linea en Hz

% Modelos
Kf=2*pi*f1*L; % Constante para desacoplamiento con feedforward
Gp=tf(1,[L R]); % Modelo de la planta ya desacoplada
% El comando "sisotool(Gp)" nos permite obtener el controlador Gc
% a continuacion estan los parametros de controlador dieseñado
Kc=6.2118; % Ganancia proporcional del controlador diseñado en SISO tool
a=2172; % Ubicacion del zero real del controlador diseñado en SISO tool
Gc=Kc*tf([1 a],[1 0]); % Modelo PI del controlador

% Verificacion del controlador diseñado manualmente en SISO tool
% La ganancia de lazo debe tener un margen de fase de alrededor de 70
% grados y un ancho de banda de alrededor de 1kHz
bode(Gp*Gc) % Aqui el eje horizontal es w(rad/s)
grid
% Comparar diseño con la figura "SISO_controller_design.fig"
open SISO_control_design.fig

% Datos de la carga
% Aqui se fija el factor de potencia deseado de la carga inductiva
Sload=1e3; % Potencia aparente de la carga inductiva en VA
PF=0.7; % Factor de potencia de la carga inductiva
Pload=Sload*PF; % Potencia activa de la carga inductiva en W
Qload=sqrt(Sload^2-Pload^2); % Potencia reactiva de la carga inductiva en Var
```

DISEÑO DEL CONTROL

Modelamiento de la Planta



$$V_{DSTATCOM} - V_S = L\frac{di_{DSTATCOM}}{dt} + i_{DSTATCOM}R$$

- Después de aplicar la transformación abc-dq0 se obtienen las ecuaciones:

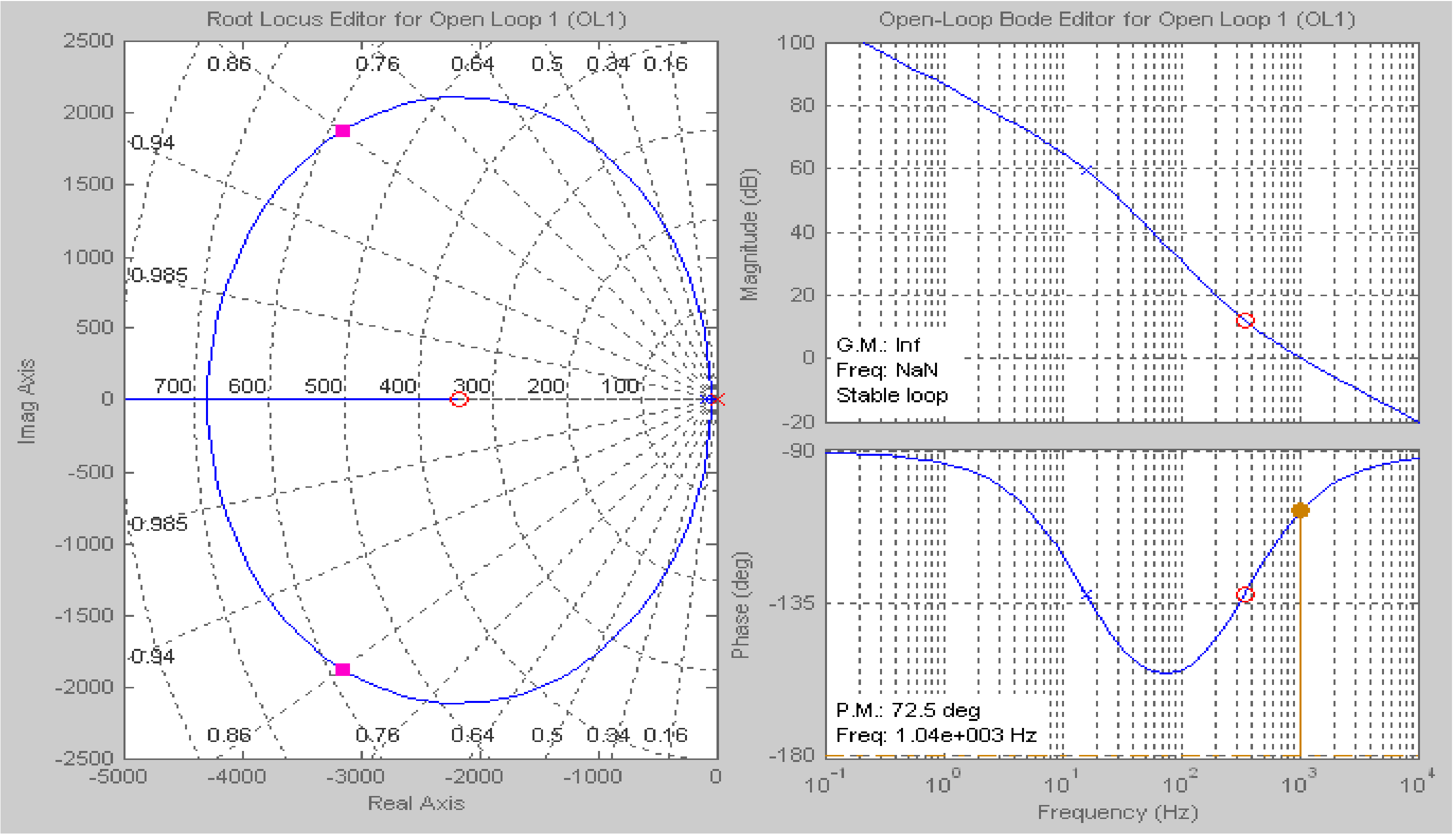
$$L\frac{di_{Dstatcom\_d}}{dt}+Ri_d=v_{Dstatcom\_d}-V_s+\omega Li_{Dstatcom\_q}$$

$$L\frac{di_{Dstatcom\_q}}{dt}+Ri_{Dstatcom\_q}=v_{Dstatcom\_q}-\omega Li_{Dstatcom\_d}$$

- Se cancelan los términos cruzados con feedforward y no se consideran los términos que son constantes. Las dos funciones de transferencia de la planta se simplifica en:

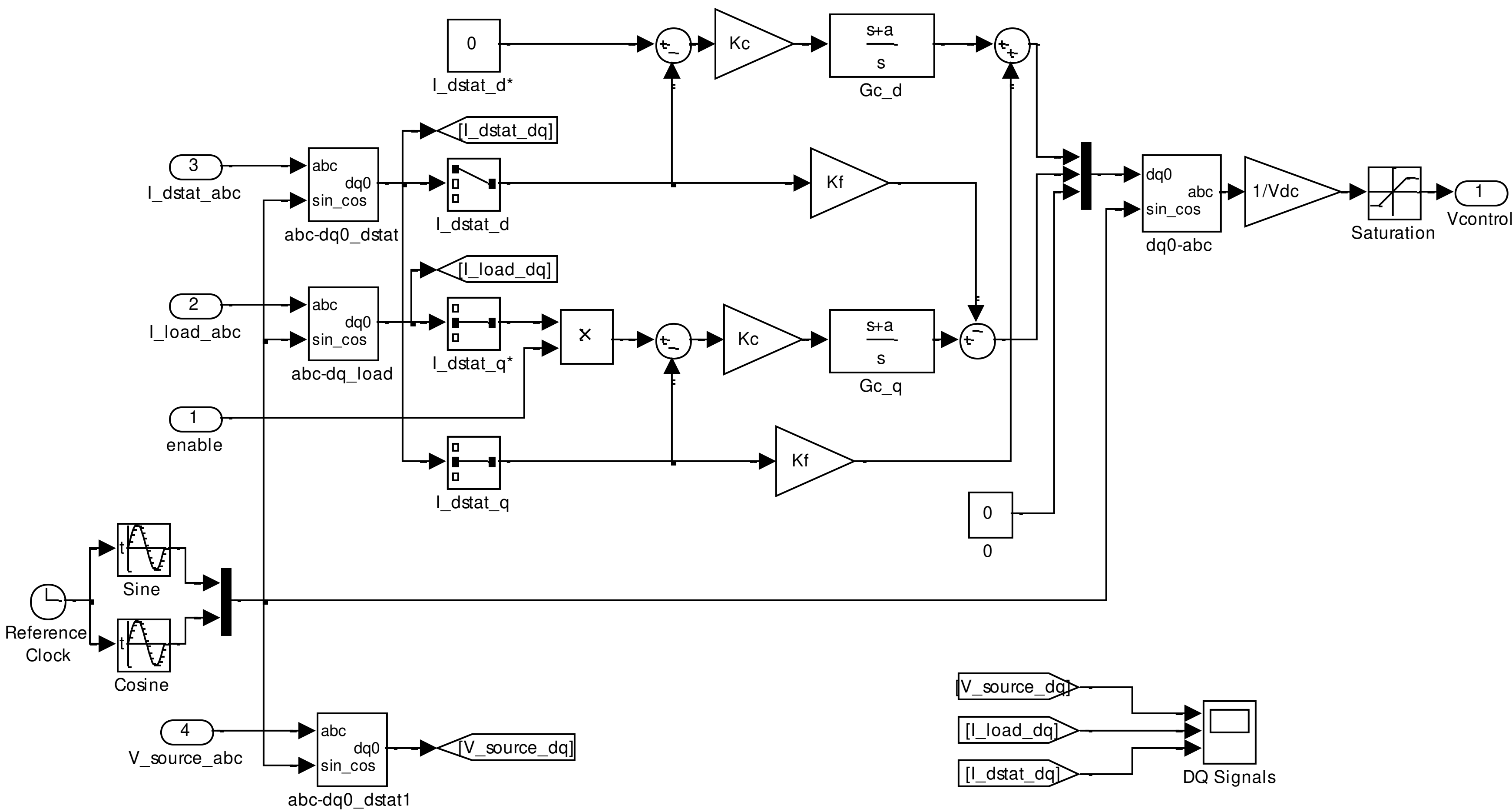
$$\frac{I_{Dstatcom\_d}(s)}{V_{Dstatcom\_d}(s)}=\frac{1}{Ls+R} \qquad \frac{I_{Dstatcom\_q}(s)}{V_{Dstatcom\_q}(s)}=\frac{1}{Ls+R}$$

Diseño del Controlador con SISOTOOL



- El objetivo es conseguir una ancho de banda de aproximadamente 1kHz con un margen de fase de 70 grados.

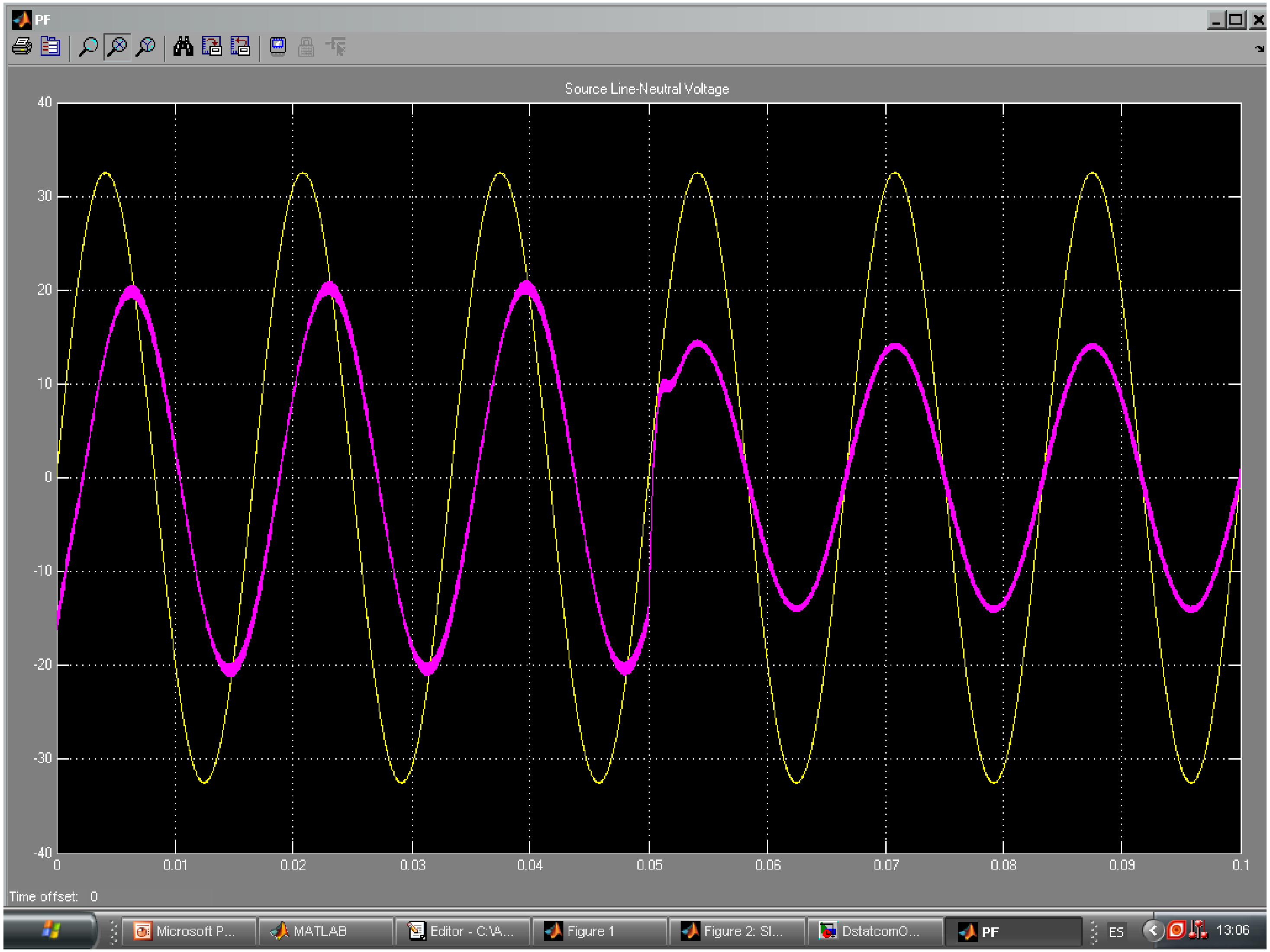
Controlador Completo



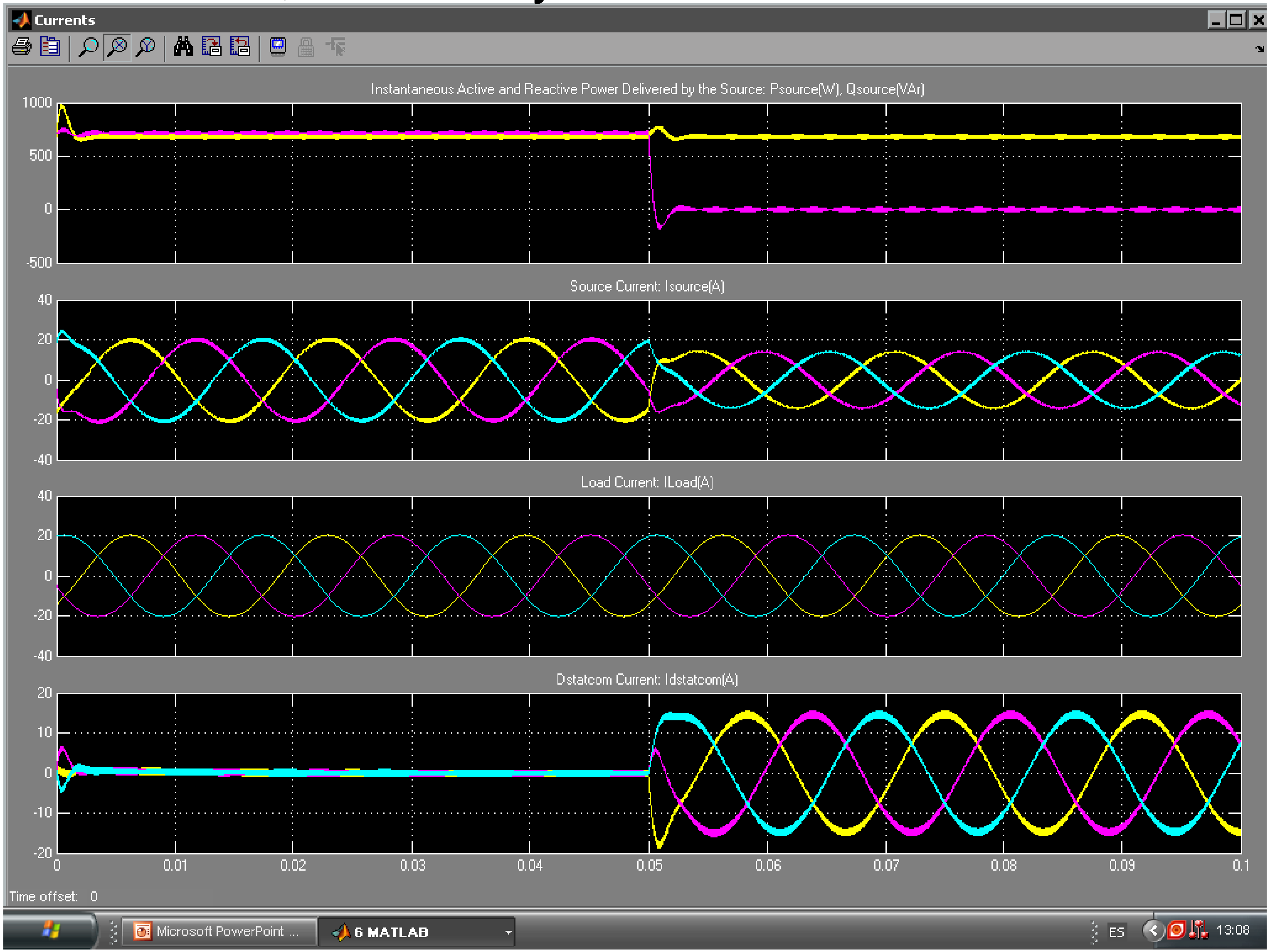
- El controlador PI obtenido es el mismo para los dos canales. Gc=Kc*(s + a)/s, Kc=6.2118, a=2172

SIMULACIONES

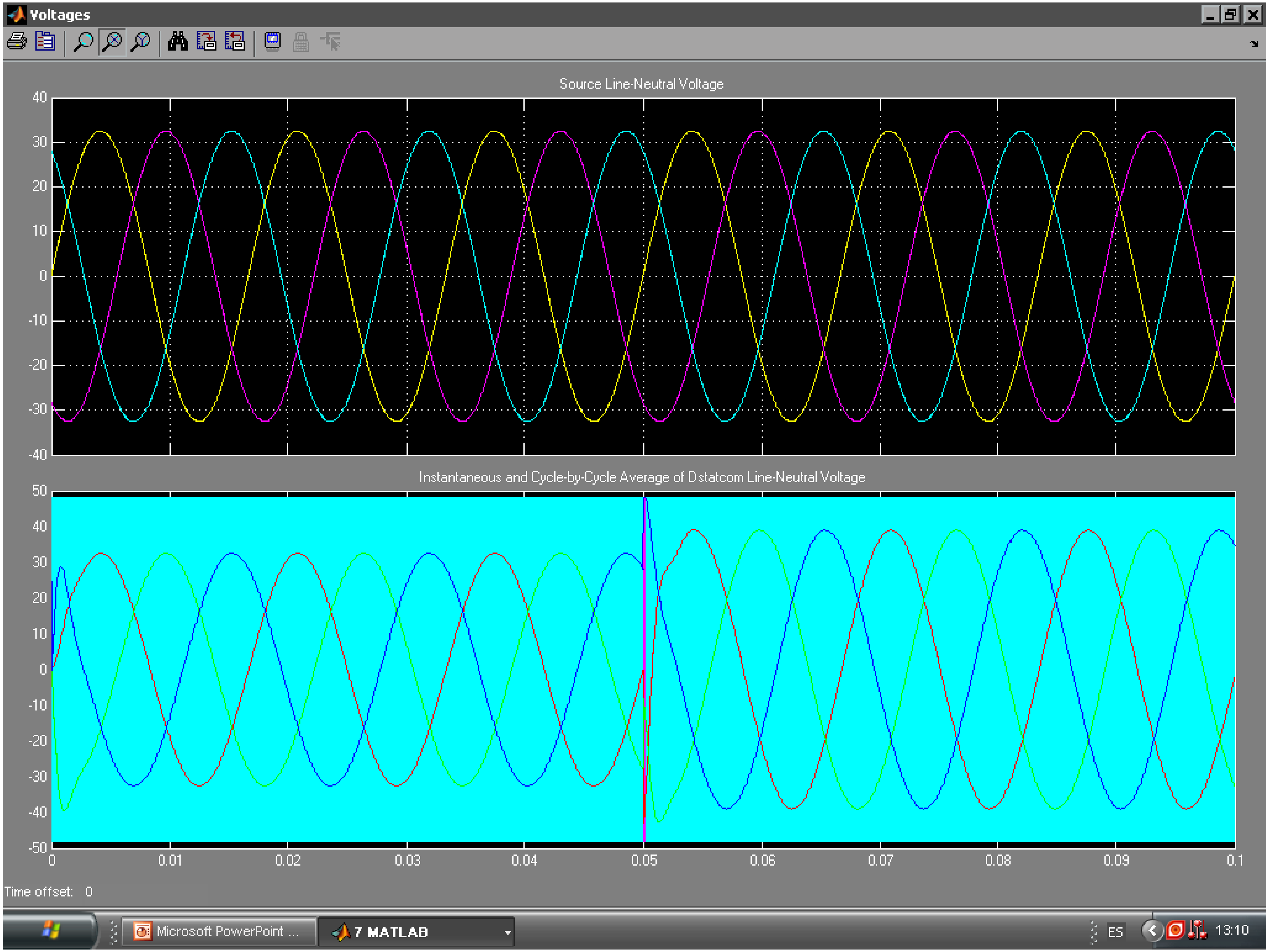
- FP=0.69 antes corrección
- FP=0.98 después corrección



- Potencia Activa, Reactiva y Corrientes



- Voltajes



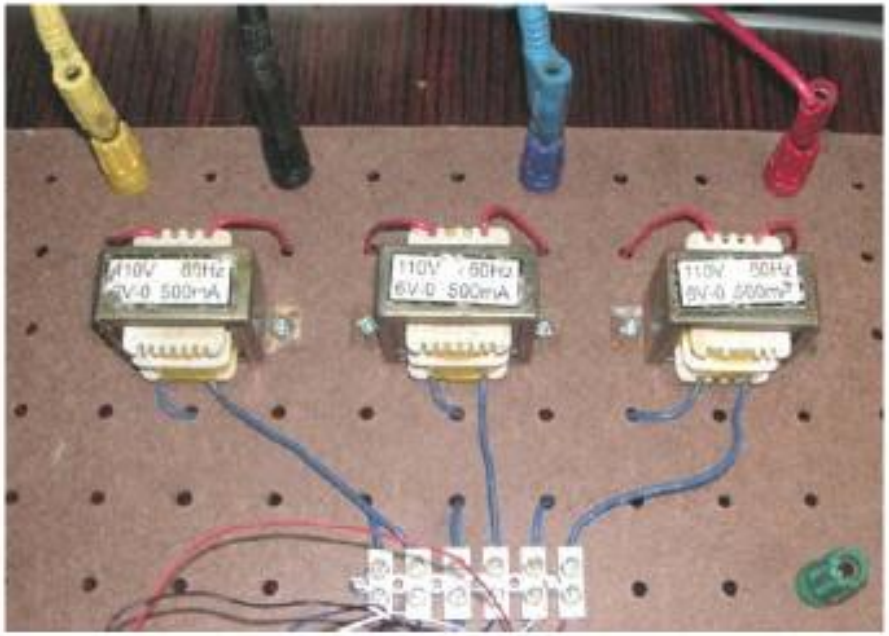
Voltages
Source Line-Neutral Voltage
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
Instantaneous and Cycle-by-Cycle Average of Dstatcom Line-Neutral Voltage
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
Time offset: 0
Microsoft PowerPoint ...
7 MATLAB
ES
13:10

PROTOTIPO

Equipo Implementado

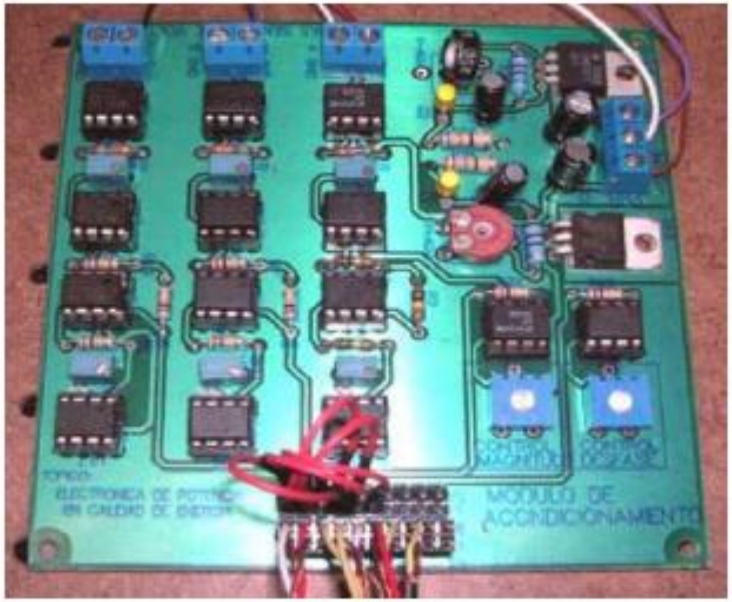
TRANSFORMADORES

- Transformadores 110 Vac/6Vac 500 mA.
- Conexión Y-Y aterrizada.



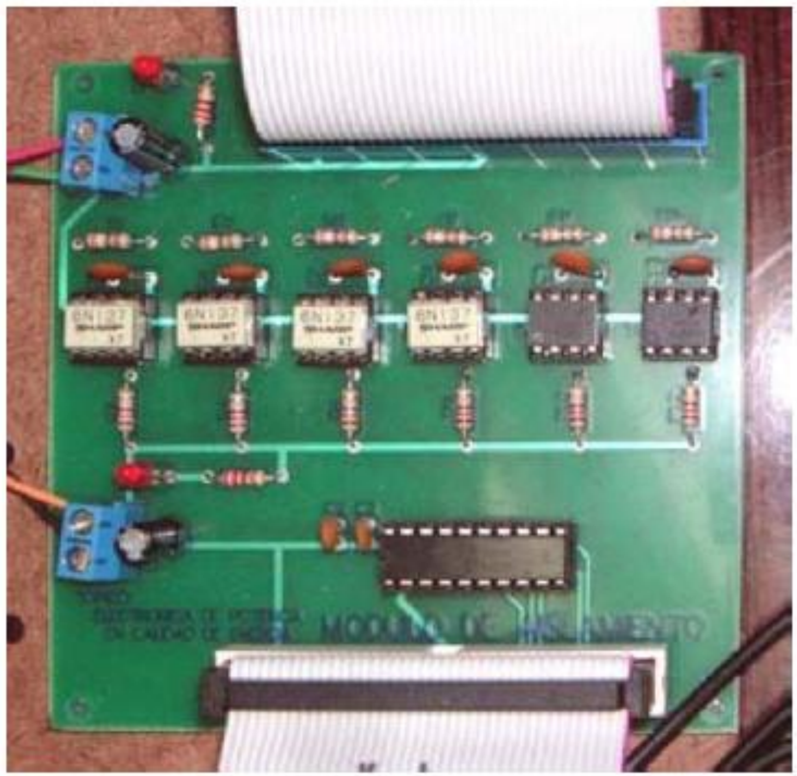
MODULO DE ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL

- Acondiciona señales para el DSP (0-3Vac)
- Se tienen controles de magnitud y fase.



MODULO DE AISLAMIENTO

- Recibe los pulsos de control del DSP
- Buffer analógicos
- Opto-acopladores



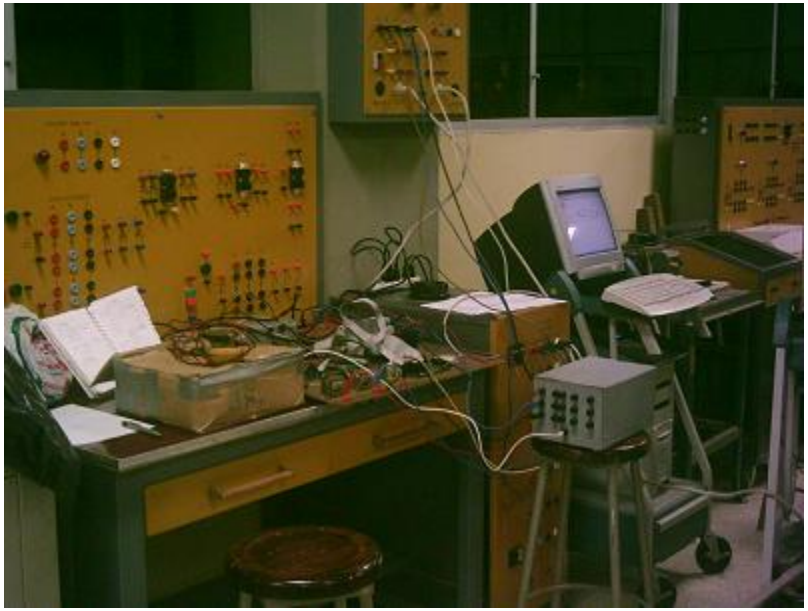
MODULO DE FUERZA

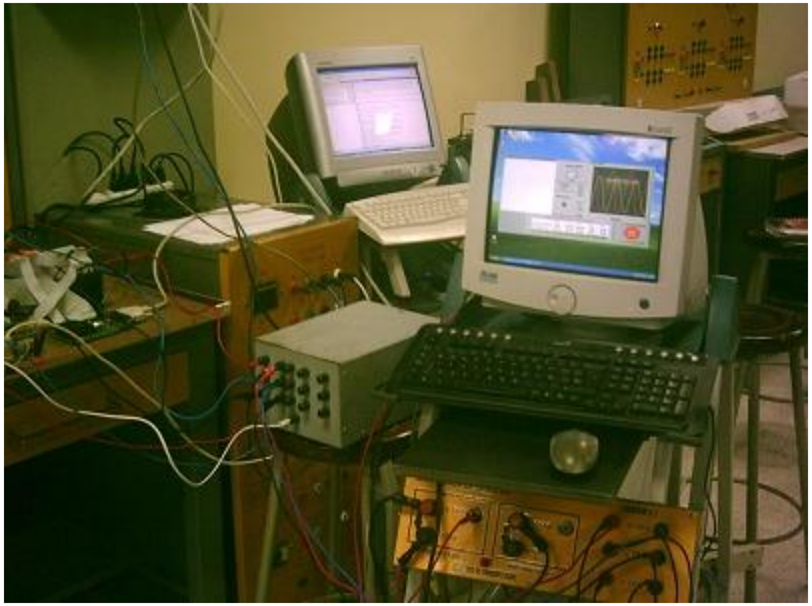
- Aquí reside el IRAMY20UP60B

PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES (DSP)

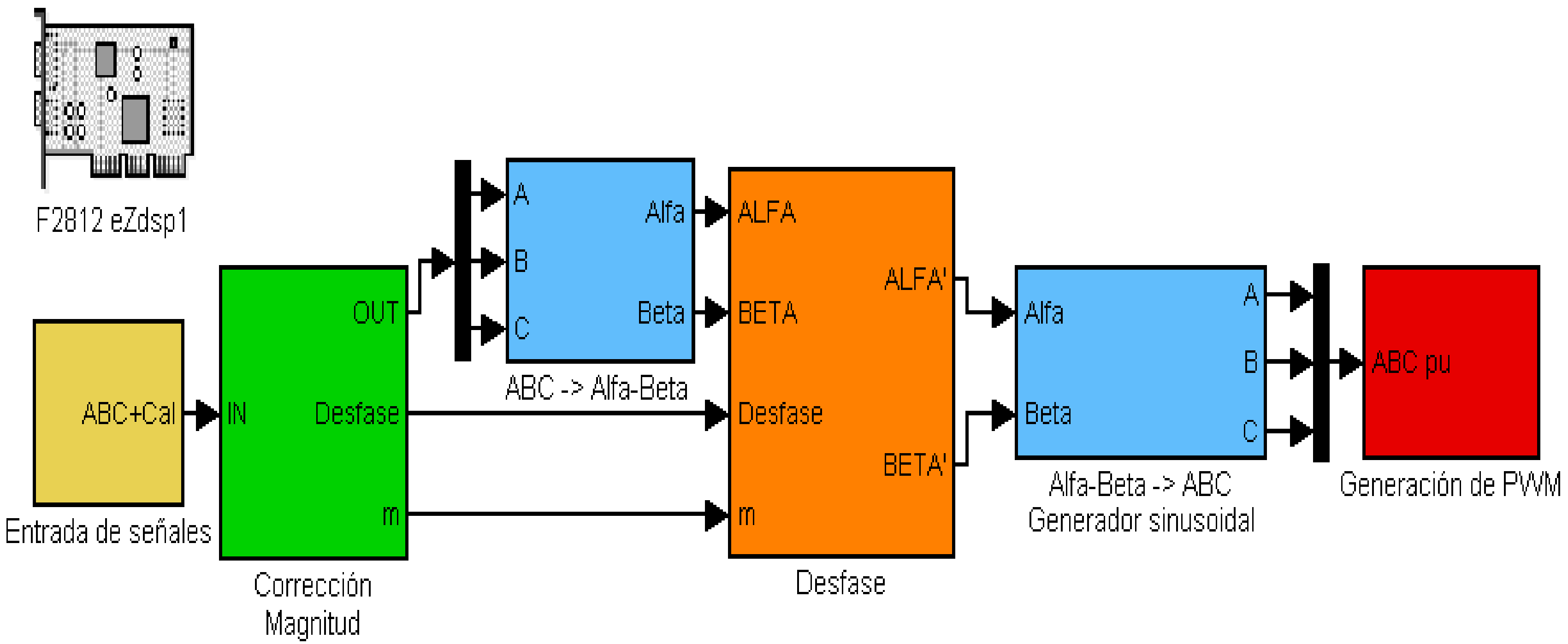
- Familia ***TMS320C2000***
- Tarjeta ***eZdspTMF2812***
- Procesador digital de señal ***TI TMS320F2812***

EQUIPO ENSAMBLADO

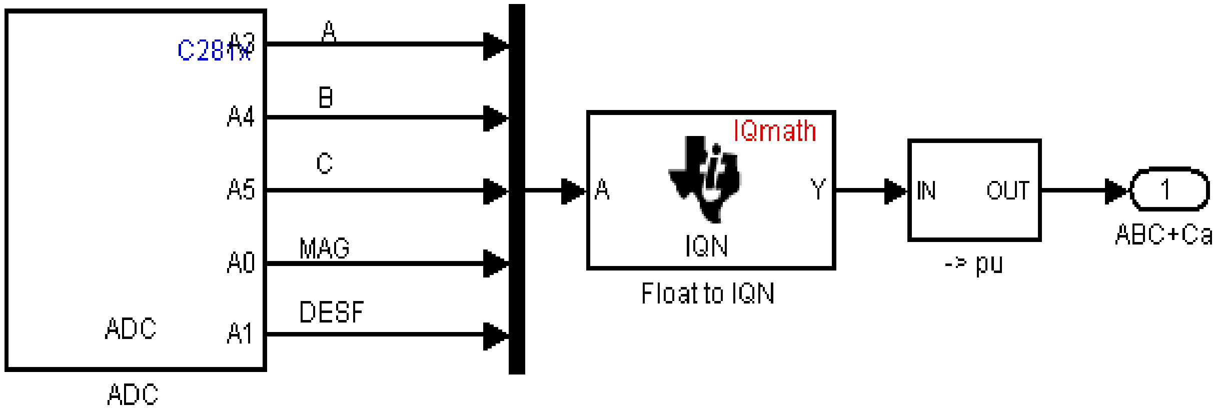


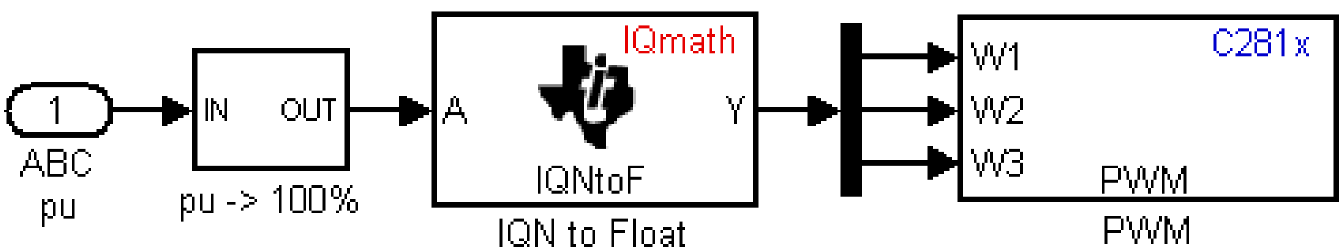


PROGRAMA A CARGAR AL DSP



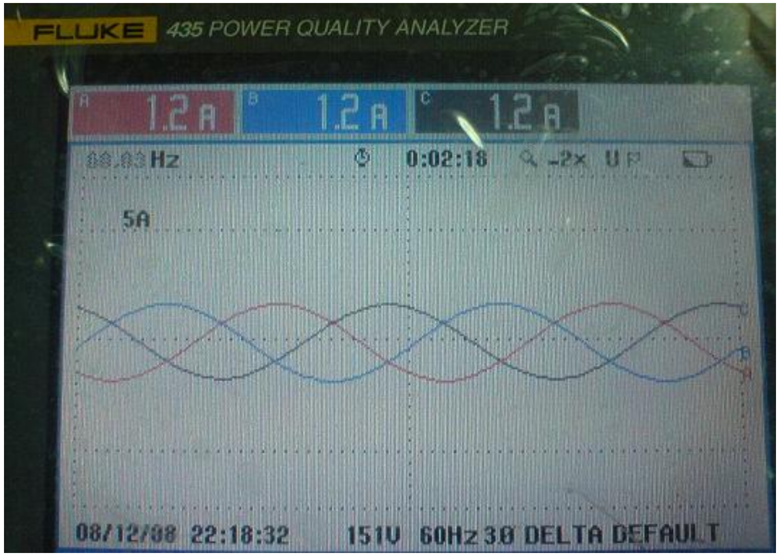
Entrada de señales y generación PWM





Mediciones

Corrientes de la carga y convertidor (implementación física) carga R=75Ω y L=35mH



Corriente de la Carga

Corriente del Convertidor

Mediciones

Corriente de la fuente

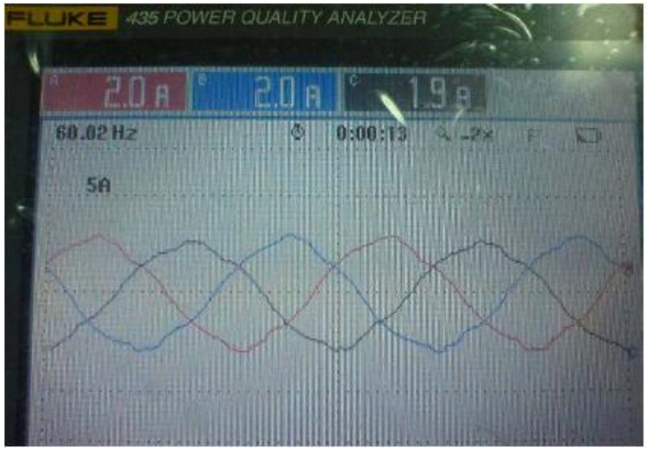
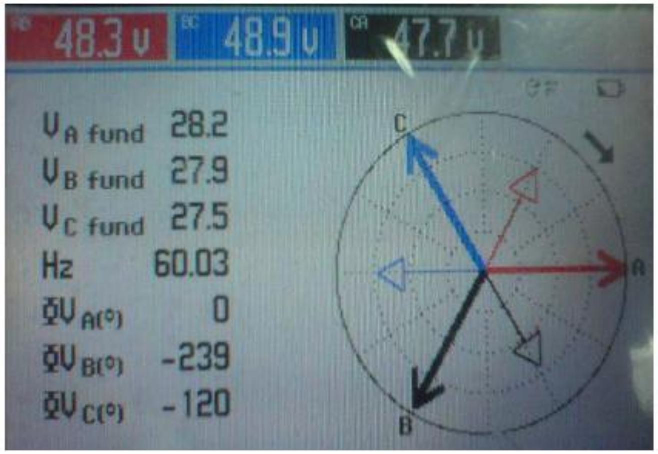
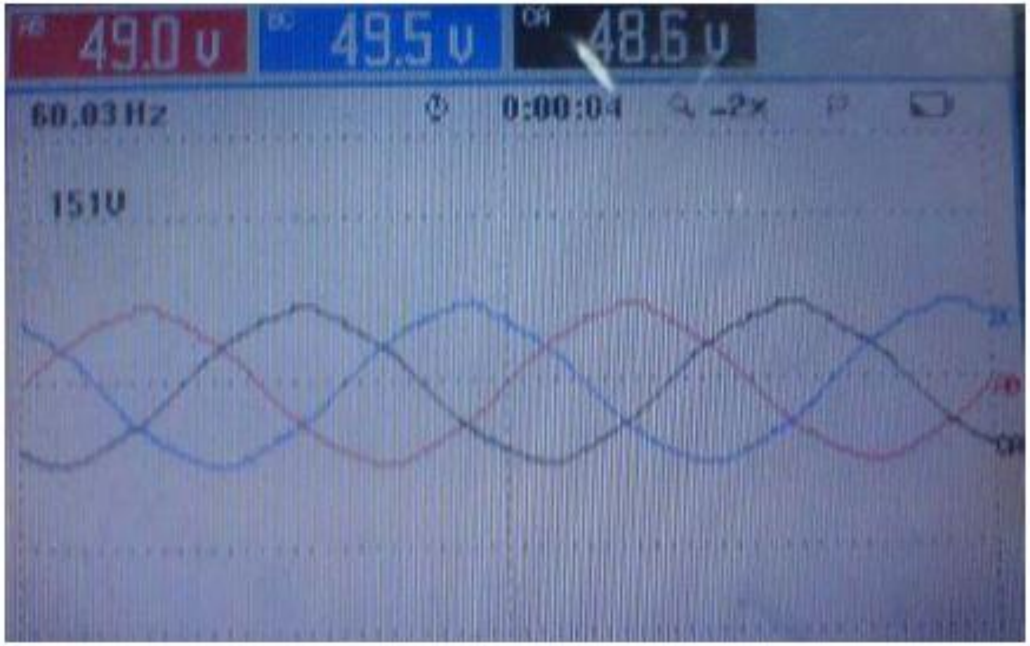


Diagrama fasorial
V_{LN} de la carga

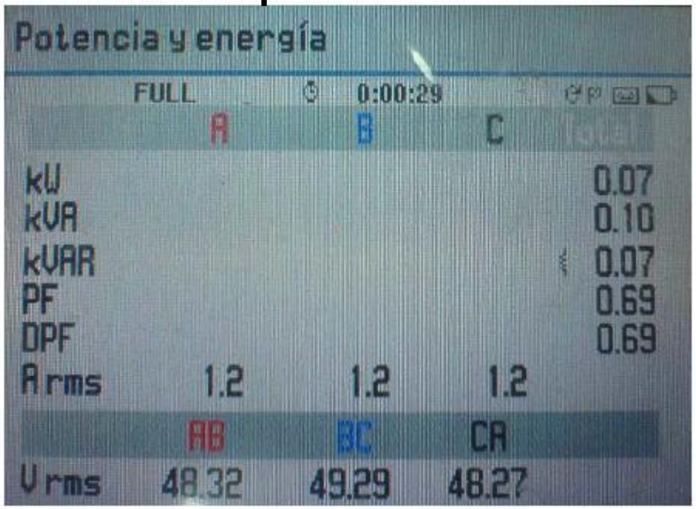


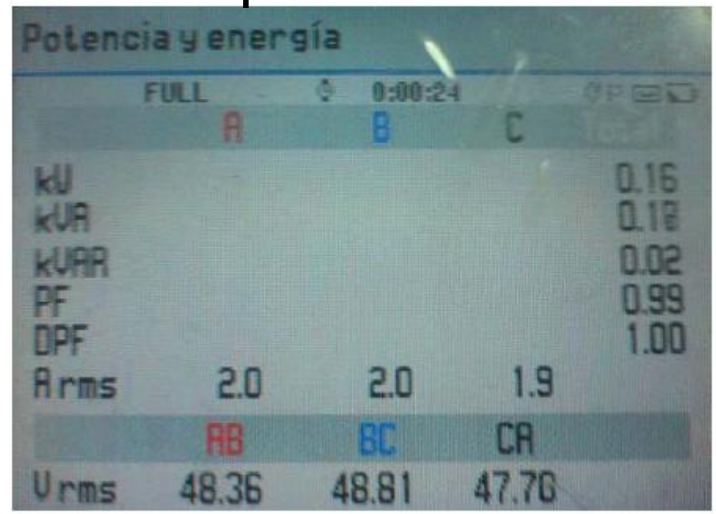
Voltaje en el punto de acoplamiento común PCC

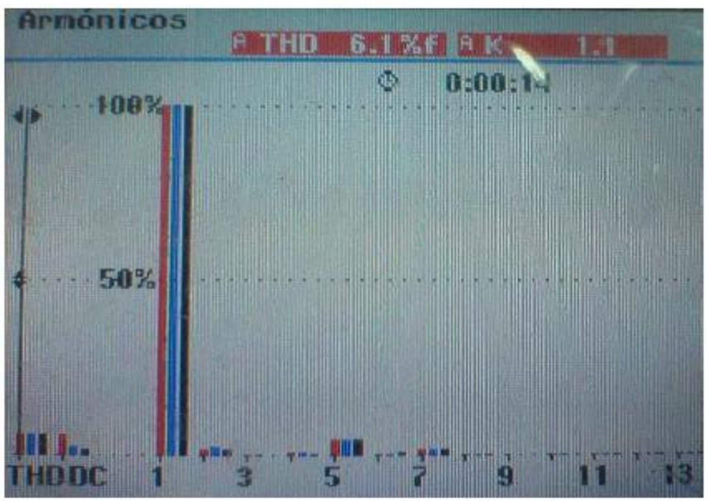


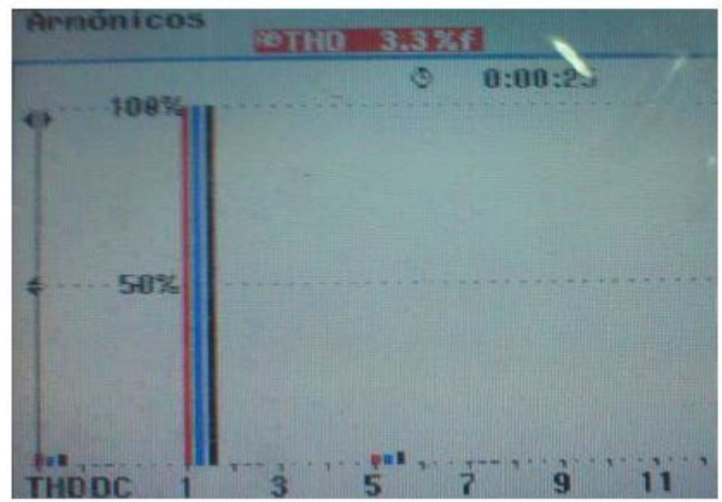
FP antes de la compensación

FP después de la compensación









THD corriente de la fuente

THD voltaje de la fuente

CONCLUSIONES
Y
OBSERVACIONES

1. El DSTATCOM como compensador estático, permitió diseñar y planificar la implementación de un compensador de potencia reactiva controlado por medio de un DSP.

2. Previo al acoplamiento físico, se tomó precauciones para los valores de salida de corriente del convertidor en la sobremodulación. La corriente de salida del convertidor puede llegar a 30 A. Valores muy peligrosos para la implementación física, dada las limitaciones de las protecciones escogidas para el diseño.

3. Por medio de Simulink/MATLAB y “Target for TI C2000”, se implementa el programa que nos ayuda a controlar la magnitud y fase, con las transformaciones y manipulación de las señales en el DSP.

4. La expectativa de un comportamiento diferente de las corrientes de la carga, fuente y convertidor se cumplió. La corriente de la carga es sinusoidal, en concordancia con el voltaje terminal sinusoidal que esta recibe. Por otro lado las corrientes de la fuente y convertidor presentan distorsión.

5. Al limitar la corriente de salida del convertidor a 5 A, la respuesta del convertidor para un índice de modulación (m) de 0.7 presenta una amplitud de 1.4 A.

6. No se esperaba un perfil de onda tan irregular para el índice de modulación anterior. La calibración de los potenciómetros no permitía un rango flexible de variación de voltaje para apreciar el comportamiento de inyección de corrientes reactivas.

7. El perfil de forma de onda de la corriente del convertidor es distorsionado como consecuencia de la componente armónica de la corriente de inyección del compensador.

8. Para una amplitud de voltaje de la red alterna de distribución mayor a , se entra en sobremodulación.

9. El factor de potencia intrínseco de la carga de prueba se aproxima a 0.7 antes de la compensación. Luego de la compensación para un m=0.7, tal factor de potencia se aproxima a un valor de 0.99.

10. La potencia reactiva suministrada por el DSTATCOM compensa a la entregada por la fuente de distribución, obteniendo con ello un incremento de 0.07 kW hasta un valor de 0.16 kW en la potencia activa suministrada por la fuente.

11. El convertidor implementado genera un THD corriente de 6.1% y THD voltaje de 3.3%, lo que cumple las normas IEEE 519-1992 de control de armónicos, para el control de calidad de la energía.

TRABAJO FUTURO

- Implementar el control en cascada con lazo cerrado para ver el comportamiento dinámico del DSTATCOM ante una perturbación de la red.

- Desarrollar un laboratorio virtual para realizar estudios de calidad de energía mediante el uso de los diversos dispositivos implementados en los trabajos de graduación.

GRACIAS