

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **COMPENSACIÓN REACTIVA INDUSTRIAL CON BANCO DE CONDENSADORES CONMUTADOS POR TIRISTORES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**ALEXANDER MÁLAGA CABALLERO**

**PROMOCIÓN  
2006- I**

**LIMA – PERÚ  
2011**

# **COMPENSACIÓN REACTIVA INDUSTRIAL CON BANCO DE CONDENSADORES CONMUTADOS POR TIRISTORES**

Agradezco a mi Madre y a mis maestros por la excelente instrucción recibida en esta Universidad.

## SUMARIO

El presente informe realiza el estudio de dos sistemas de compensación reactiva para la corrección del factor de potencia de una carga industrial lineal y variable con el tiempo. Para ello se emplea la conmutación de un banco de condensadores por disparo de tiristores y luego se realiza su simulación. El primer sistema de compensación descrito es extraído de un artículo de la IEEE publicado en el año 1998 [1]. Luego se describe un sistema de compensación alternativo.

La compensación reactiva mediante la conmutación de bancos de condensadores por tiristores, ofrece mayores beneficios que los bancos de condensadores automáticos, en especial si se trata de compensar cargas que varían rápidamente con el tiempo. Entre los principales beneficios se tiene: 1) no se generan corrientes transitorias durante la conexión y desconexión de los condensadores, 2) la respuesta de compensación es más rápida, y 3) no se generan armónicos [1].

La configuración del sistema eléctrico en estudio es del tipo estrella con neutro conectado a tierra. Los condensadores están configurados en forma binaria, es decir el segundo duplica en valor al primero, el tercero al segundo y el cuarto al tercero. Esta configuración va a permitir una compensación más fina, donde la precisión la brinda el condensador de menor valor. A su vez permite reducir el número de condensadores necesarios para compensar un mismo rango de valores de potencia reactiva.

## ÍNDICE

### PRÓLOGO

### CAPÍTULO I

#### ANTECEDENTES

1.1	Objetivo	2
1.2	Evaluación del problema	2
1.3	Alcances	2

### CAPÍTULO II

#### COMPENSACIÓN REACTIVA

2.1	Principios de compensación reactiva	4
2.1.1	Corriente total	4
2.1.2	Factor de potencia	4
2.2	Corrección del factor de potencia	7
2.3	Técnicas de compensación reactiva	8
2.3.1	Banco de condensadores automáticos	9
2.3.2	Compensadores síncronos	13
2.3.3	Compensadores estáticos reactivos (SVCs)	14
2.4	Ubicación de bancos de condensadores	21
2.4.1	Tipos de compensación según la ubicación de bancos de condensadores	21
2.4.2	Consideraciones para la ubicación de bancos de condensadores	22
2.5	Criterios para el diseño de sistemas de compensación reactiva	27
2.5.1	Medición de carga	27
2.5.2	Dimensionamiento del sistema	28
2.5.3	Selección de la tecnología	28
2.5.4	Selección del nivel de tensión	29
2.5.5	Ventilación forzada	29
2.5.6	Instalación	29
2.5.7	Limitación de corrientes de inserción (inrush)	30

<b>2.5.8</b>	<b>Configuración del sistema de corrección de potencia</b>	<b>31</b>
<b>2.5.9</b>	<b>Protección del sistema de compensación contra sobretensiones transitorias</b>	<b>32</b>
<b>2.6</b>	<b>Estándares para compensación reactiva</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>COMPENSADOR REACTIVO CONMUTADO POR TIRISTORES</b>		
<b>3.1</b>	<b>Sistema eléctrico a compensar</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Sistemas de compensación reactiva</b>	<b>34</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Sistema de compensación reactiva publicado por la IEEE (1998)</b>	<b>35</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Sistema de compensación reactiva alternativo</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMPENSACIÓN REACTIVA</b>		
<b>4.1</b>	<b>Simulación del sistema de compensación reactiva publicado por la IEEE (1998)</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulación del sistema de compensación reactiva alternativo</b>	<b>46</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Análisis del sistema no compensado</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análisis del sistema compensado (f.p.=1.00)</b>	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>ANÁLISIS DE COSTOS DE LOS SISTEMAS DE COMPENSACIÓN.</b>		
<b>5.1</b>	<b>Análisis de costos del sistema de compensación automático.</b>	<b>52</b>
<b>5.2</b>	<b>Análisis de costos del sistema de compensación estático .</b>	<b>53</b>
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>54</b>
<b>ANEXO A: Catálogo de Productos EPCOS para corrección del f.p.</b>		<b>55</b>
<b>ANEXOS B: Catálogo de Tiristores ABB</b>		<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>68</b>

## PRÓLOGO

El informe tiene como propósito presentar un sistema alternativo de compensación reactiva por conmutación de un banco de condensadores por medio de tiristores, a fin de corregir el factor de potencia de una carga industrial lineal variable.

El estudio del sistema de compensación reactivo describe sus características y diferencias frente al sistema de compensación reactiva publicado en el año 1998 por la IEEE [1], al igual que sus ventajas sobre otras técnicas de compensación reactivas comúnmente usadas en la industria.

El capítulo 2 hace una descripción de los fundamentos de compensación reactiva, corrección de factor de potencia y las distintas técnicas de compensación. Luego se presentan los criterios para la ubicación de bancos de condensadores y su selección para un sistema eficiente.

El capítulo 3 describe la configuración propuesta del compensador reactivo estático (SVC) aplicado y su sistema de compensación reactiva de disparo de tiristores para la corrección del factor de potencia de una carga industrial lineal.

El capítulo 4 presenta el análisis y los resultados de la simulación del sistema de compensación reactiva descrito usando el software Simulink de Matlab.

Finalmente el capítulo 5 presenta las conclusiones finales.

Están fuera del alcance del presente informe el diseño de los componentes eléctricos y el estudio de compensación con cargas no lineales.

# **CAPÍTULO I**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Objetivo**

El estudio de una alternativa de sistema de compensación reactiva para la corrección de factor de potencia de una carga industrial lineal y variable en baja tensión. La corrección del factor de potencia se hace por medio de la conmutación de un banco de condensadores a través del accionamiento de tiristores.

El estudio del sistema propuesto describe sus características y diferencias frente al sistema de compensación publicado el año 1998 por la IEEE [1], al mismo tiempo que sus ventajas sobre otras técnicas de compensación reactivas comúnmente usadas en la industria.

### **1.2 Evaluación del Problema**

Las cargas industriales tienen un factor de potencia bajo, lo que crea problemas como el pago de recargos por consumo de energía reactiva, valores elevados de potencia aparente, selección de conductores con mayores secciones, pérdidas de energía elevadas, y baja potencia disponible en transformadores MT/BT. Un buen sistema de compensación del factor de potencia resuelve estos problemas. Entre las distintas técnicas de compensación, la técnica de conmutación de banco de condensadores por accionamiento de tiristores es la más conveniente, más aún si las cargas a compensar son dinámicas.

### **1.3 Alcances**

El capítulo 2 describe los fundamentos de compensación reactiva, corrección de factor de potencia y las distintas técnicas de compensación. Luego se presentan los criterios para la ubicación de bancos de condensadores y su selección para un sistema eficiente.

El capítulo 3 describe la configuración propuesta del compensador reactivo estático (SVC) aplicado y su sistema de compensación reactiva de disparo de tiristores para la corrección del factor de potencia de una carga industrial lineal.

El capítulo 4 presenta los resultados y análisis de la simulación de los sistemas de compensación reactiva descritos usando el software Simulink de Matlab.



Finalmente el capítulo 5 describe las conclusiones tomadas del presente informe. Están fuera del alcance del presente informe el diseño de los componentes eléctricos y el estudio de compensación con cargas no lineales.

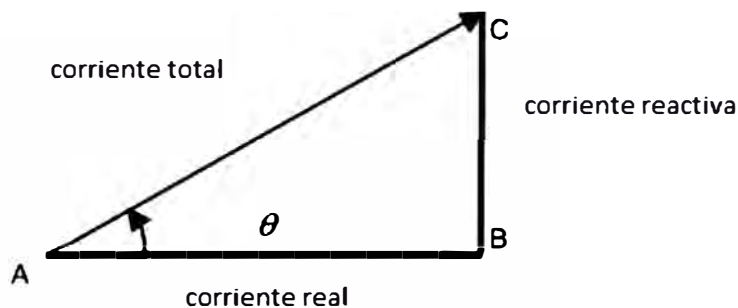
## CAPÍTULO II COMPENSACIÓN REACTIVA.

### 2.1 Principios de compensación reactiva

La corriente requerida para la alimentación de motores, luminarias, y computadoras está compuesta por una componente activa y otra reactiva. La corriente activa es aquella que es convertida por el equipo en trabajo útil como la producción de calor a través de un calentador. La unidad de medida de esta corriente es el amper (A) y la de potencia es watts (W). La corriente reactiva es aquella requerida para crear el flujo magnético necesario para el funcionamiento de cargas inductivas. La corriente es medida en amper (A) y la potencia reactiva en volt-amper reactivo (VAR).

#### 2.1.1 Corriente total

La corriente total es la suma algebraica de las componentes activa y reactiva, medidas en amperes. El volt-amper (VA) representa el producto de la tensión y corriente. En la figura 2.1 se muestra la relación entre la corriente activa, reactiva y total.



**Fig. 2.1** Relación entre la corriente activa, reactiva y total

La corriente total se expresa en la siguiente ecuación:

$$I_{total} = \sqrt{(I_{activa})^2 + (I_{reactiva})^2} \quad (2.1)$$

#### 2.1.2 Factor de potencia

El factor de potencia para las cargas lineales se expresa como la relación entre la corriente activa y la corriente total en un circuito. De igual forma, el factor de potencia es la relación de la potencia activa kW y la potencia aparente kVA.

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{I_{\text{activa}}}{I_{\text{total}}} = \frac{kW}{kVA} \quad (2.2)$$

Respecto al triángulo de la figura 2.1:

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{AB}{AC} \quad (2.3)$$

El ángulo  $\theta$  se denomina ángulo de factor de potencia. Este es el ángulo medido entre la corriente total y la corriente activa. El coseno de este ángulo ( $\cos \theta$ ) es el factor de potencia.

### Ejemplo 2.1

En un circuito de 220 V AC, la corriente activa y reactiva son 40 A y 30 A, respectivamente. Calcular la corriente total. ¿Cuál es la potencia en kVA, kW, y kVAR? ¿Cuál es el factor de potencia y el ángulo de factor de potencia?

Solución

$$I_{\text{total}} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 A$$

$$kVA_{\text{total}} = \frac{(220V)(50A)}{1000} = 11$$

$$kW = \frac{(220V)(40A)}{1000} = 8.8$$

$$kVAR = \frac{(220V)(30A)}{1000} = 6.6$$

$$kVA = \sqrt{(4.4)^2 + (3.3)^2} = 5.5$$

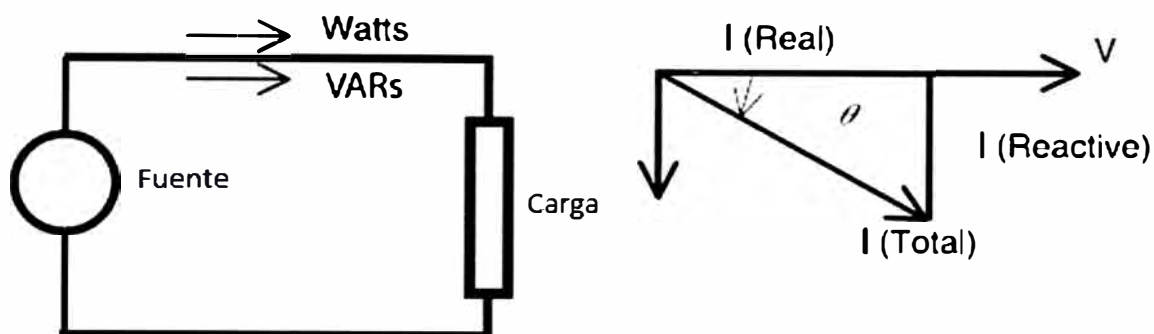
$$\text{Factor de potencia} = \frac{40}{50} = 0.8$$

$$\text{Ángulo de factor de potencia} = \cos^{-1}(0.8) = 36.8^\circ$$

#### a) Factor de potencia inductivo

En la figura 2.2 se muestra una carga de tipo inductiva y su diagrama fasorial. En este

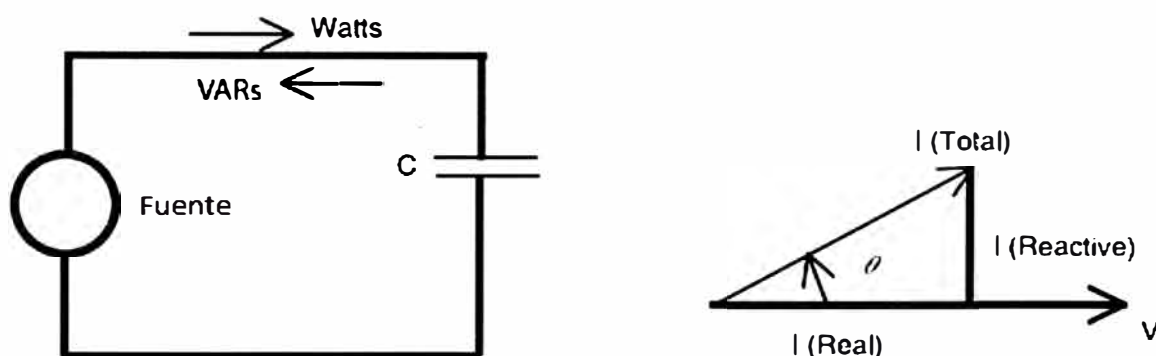
circuito, la carga absorbe potencia reactiva. En este caso el ángulo de factor de potencia es negativo, en consecuencia el factor de potencia es inductivo.



**Fig. 2.2** Factor de potencia inductivo.

### b) Factor de potencia capacitivo

En la figura 2.3 se muestra una carga de tipo capacitivo y su diagrama fasorial. En este circuito, la carga inyecta potencia reactiva hacia la fuente. En este caso el ángulo de factor de potencia es positivo, en consecuencia el factor de potencia es capacitivo.

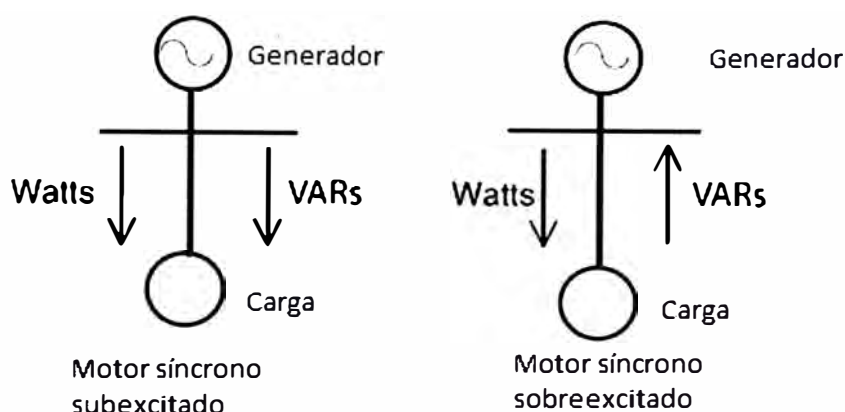


**Fig. 2.3** Factor de potencia capacitivo.

A fin de aclarar este concepto, en la figura 2.4 se muestra el flujo de potencia en un motor síncrono.

**Tabla 2.1** Conceptos de Potencia Activa y reactiva en un Motor síncrono.  
Ent.: entrega, Abs.: absorbe, ind.: inductivo, cap.: capacitivo

Carga	En Generador			En Carga		
	kW	kVAR	FP	kW	kVAR	FP
Motor síncrono Subexcitado	Ent.	Ent.	ind.	Abs.	Abs.	ind.
Motor síncrono sobreexcitado	Ent.	Abs.	cap.	Abs.	Ent.	cap.



**Fig. 2.4** Flujo de potencia en un motor síncrono.

El flujo de potencia en el generador y carga puede ser descrito tomando en cuenta los factores de potencia que se muestra en la tabla 2.1. El factor de potencia es inductivo si la carga requiere potencia reactiva y es capacitivo si la carga entrega potencia reactiva a la fuente.

### Ejemplo 2.2

Una subestación industrial suministra potencia a un sistema de iluminación, un motor de inducción y un motor síncrono de la siguiente forma:

Iluminación= 40kW  $\cos\theta=1$

Motor de inducción= 100kW  $\cos\theta=0.7$

Motor síncrono= 200kW  $\cos\theta=0.9$

Calcular la potencia kW, kVAR, el factor de potencia en cada carga y el factor de potencia a nivel de la subestación.

$$kVA = \sqrt{340^2 + 158.5^2} = 375$$

$$\text{Factor de potencia global} = \frac{340}{375} = 0.907(\text{ind})$$

**Tabla 2.2** Cuadro de Cargas de la Subestación

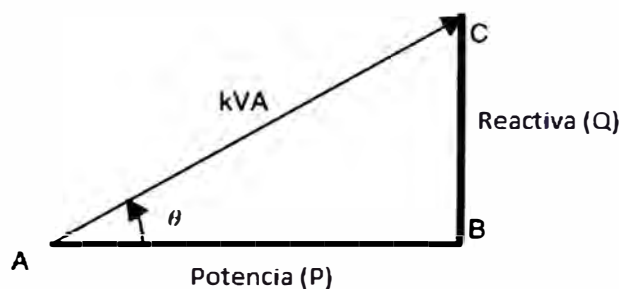
Carga	kW	PF	kVA	kVAR	Ángulo en grados
Iluminación	40	1.0	40	0.0	0
Motor de inducción	100	0.7	143	71.4	45.6
Motor síncrono	200	0.9	222	87.1	25.8
Total	340			158.5	

## 2.2 Corrección del factor de potencia

La mayoría de cargas industriales como los motores de inducción operan a un valor de factor de potencia moderadamente bajo. Alrededor del 60% de las cargas industriales consisten en motores y en consecuencia el factor de potencia global del sistema de potencia es bajo. Dependiendo de la potencia del motor y otras condiciones de operación, el factor de potencia varía entre 0.30 a 0.95. En consecuencia el factor de potencia es siempre una preocupación en sistemas eléctricos industriales.

La eficiencia del sistema se puede mejorar corrigiendo el factor de potencia. En varios sistemas industriales se prefiere un factor de potencia igual a 0.95.

En la tabla 2.3 se muestra la relación entre el factor de potencia y Q/P. Se puede observar que aún, a un factor de potencia igual a 90%, se requiere una potencia reactiva igual al 48% de la corriente activa. Para factores de potencia bajos, el requerimiento de potencia reactiva es mucho mayor. En consecuencia se requiere de alguna forma de compensación reactiva en instalaciones industriales.



**Fig. 2.5** Relación entre potencia activa, reactiva, y aparente (kVA).

El factor de potencia de cualquier sistema eléctrico puede estar en atraso o adelanto. La naturaleza del factor de potencia se puede determinar a partir de la dirección de la potencia activa y reactiva. Si las potencias activa y reactiva siguen la misma dirección, entonces el factor de potencia está en atraso. Si por el contrario, la dirección de la potencia reactiva es opuesta a la activa, entonces el factor de potencia está en adelanto. Un motor de inducción es una carga típica con factor de potencia en atraso, mientras que un condensador será una carga típica con factor de potencia en adelanto.

### 2.3 Técnicas de compensación reactiva

A fin de compensar el consumo de energía reactiva en un sistema industrial, debido a cargas fijas o variables como hornos de arco, molinos de bolas, chancadoras y otros equipos para la industria, existen varias estrategias de compensación. Entre ellas están los bancos de condensadores, condensadores síncronos y compensadores estáticos (SVC). Dentro de éstos últimos se tienen condensadores e inductores conmutados por tiristores. A

continuación se presentan las principales características de cada sistema junto a sus ventajas y desventajas.

**Tabla 2.3 Factor de Potencia y relación Q/P**

Factor de potencia %	Ángulo en grados	Q/P
100	0.0	0.00
95	11.4	0.20
90	26.8	0.48
85	31.8	0.62
80	36.8	0.75
70.7	45.0	1.00
60	53.1	1.33
50	60.0	1.73

En la tabla 2.4 se muestran factores de potencia típicos en algunas plantas industriales.

**Tabla 2.4 Factores de Potencia típicos de algunas Plantas Industriales [2]**

Industria	%FP	Industria	%FP
Química	80-85	Soldadura de arco	35-60
Mina de carbón	65-80	Taller de máquinas	45-60
Electrochapado	65-70	Horno de arco	75-90
Hospital	75-80	Rociadura	60-65
Edificio Comercial	80-90	Plástico	75-80
Cemento	80-85	Maquinaria	40-65
Textil	65-75	Metales	75-80

### Ejemplo 2.3

El factor de potencia de una carga de 100 kVA es 0.8. Se requiere mejorar el factor de potencia a 0.95. ¿Cuál es la potencia requerida kVAR del banco de condensadores a ser conectado en paralelo?

$$P = Sx \cos \theta_2$$

$$P = 100kVA \times 0.80 = 80kW$$

$$Q_c = P \times f$$

$$Q_c = 80kW \times 0.421 (\text{ver tabla 2.5})$$

$$Q_c = 33.68kVAR$$

#### 2.3.1 Banco de condensadores automáticos

Los condensadores pueden ser instalados en barras de media tensión, distribución, o en la misma carga. Pueden instalarse también para corregir el factor de potencia de un grupo de

cargas o para una carga en particular. Los beneficios obtenidos a nivel de utilización son la liberación de la capacidad de generación del sistema, ahorros en la capacidad del transformador de potencia, reducción de pérdidas en las líneas, y mejoras en el nivel de tensión.

**Tabla 2.5** Factores de corrección para obtener factor de potencia deseado  $\cos\phi_2$ .

f	cos $\phi_2$												
cos $\phi_1$	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.328	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

### Condensadores fijos versus condensadores conmutados

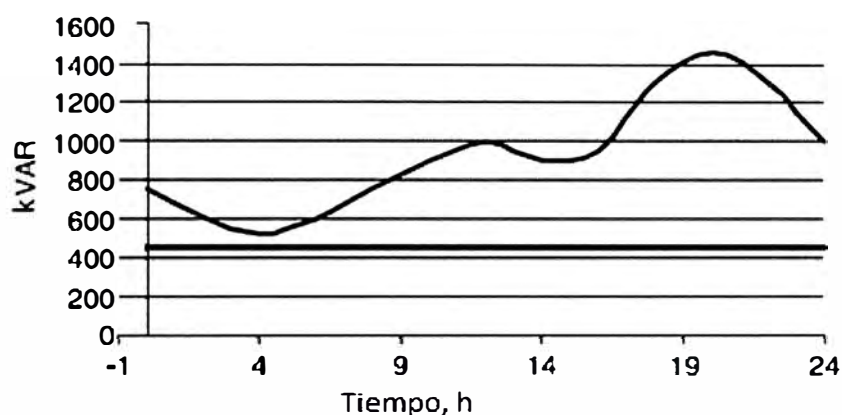
Los condensadores aplicados a sistemas de distribución se localizan generalmente en líneas de distribución o en subestaciones. Los bancos de condensadores frecuentemente presentan de tres a nueve unidades de condensadores conectados en configuración estrella con neutro a tierra, con neutro aislado, o en delta. Los condensadores de distribución tienen por fin corregir localmente el factor de potencia y minimizar las pérdidas del sistema



mediante la entrega de potencia reactiva. Los condensadores pueden ser fijos o conmutados dependiendo de las condiciones de carga. Para su selección se aplica los siguientes criterios:

#### a) Condensadores fijos para condiciones de carga mínima

La figura 2.6 muestra el diagrama de carga reactiva típico de un sistema de distribución por un periodo de 24 horas. Generalmente, los condensadores fijos satisfacen el requerimiento de potencia reactiva para un nivel de carga base, mientras que los condensadores conmutados compensan la potencia kVAR inductiva de los picos de carga. Condensadores conmutados empleados para niveles de carga por encima del mínimo hasta el nivel de carga pico.



**Fig. 2.6** Diagrama de carga donde se muestra la potencia reactiva base requerida (para condensadores fijos) y máxima demanda de potencia kVAR (para condensadores conmutados)

#### Dimensionamiento y ubicación de condensadores

Para mejores resultados, los condensadores deben ser ubicados donde generen mayor reducción de pérdidas, mejores niveles de tensión, y estén cerca de la carga. En caso que no sea muy práctico aplicar estas reglas, se recomienda lo siguiente:

- Para cargas uniformemente distribuidas, el condensador se puede ubicar a dos tercios de la subestación.
- Para cargas distribuidas uniformemente decrecientes, el condensador puede ubicarse a la mitad de la distancia de la subestación.
- Para mayor nivel de tensión, el condensador debe ubicarse cerca de la carga.

Generalmente, el banco de condensadores se ubica donde el factor de potencia sea mínimo, determinado por las medidas de la tensión, corriente, potencia activa, reactiva y aparente. Varios sistemas de utilización prefieren un factor de potencia igual a 0.95. Los

picos y valles del diagrama de carga de potencia reactiva hace difícil que un condensador fijo pueda compensar un nivel deseable. Si se obtuviese un factor de potencia igual a 1.00 durante la carga de pico, entonces habría sobrecompensación en la línea durante las condiciones de fuera de pico. Un factor de potencia sobre compensado ocasiona exceso de pérdidas en el sistema, al igual que en condiciones de factor de potencia bajo. La sobrecompensación puede originar también sobretensiones, lo cual dañaría el equipo. En consecuencia, un factor de potencia en adelanto no es favorable. A fin de lidiar con estas condiciones, los condensadores fijos se usan para compensar los valores de potencia reactiva constantes de carga y los condensadores conmutados compensan los valores de potencia reactiva durante condiciones de máxima demanda. En particular, esto va a prevenir la sobrecompensación.

#### **b) Condensadores conmutados**

Los condensadores conmutados proveen mayor flexibilidad para la compensación reactiva, la tensión, factor de potencia, y pérdidas. Usualmente los condensadores son utilizados con un controlador automático de conmutación. Un sensor detecta una condición particular y luego envía una señal de disparo a los interruptores conectados al banco de condensadores. Un sistema de compensación típico toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Tensión: La compensación reactiva para un nivel de tensión deseado es un factor de mayor consideración.
- Corriente: La magnitud de corriente es mayor en cuanto mayor sea la demanda de reactivos.
- Compensación reactiva de carga: La demanda de reactivos aumenta y disminuye con la carga.
- Tiempo de conmutación: Los condensadores se conectan durante las horas de máxima demanda y se desconectan en mínima demanda.
- Temperatura: En ciertas cargas como enfriadores de ambiente, la demanda de reactivos aumenta cuando la temperatura disminuye.

Las principales desventajas consisten en la generación de corrientes transitorias al momento de la conmutación. Además, al ser un sistema de compensación discreto, el resultado final se refleja en una subcompensación o bien en una sobrecompensación de la carga.

### 2.3.2 Compensadores síncronos

La máquina síncrona puede ser usada para compensar el factor de potencia de una carga si opera en modo capacitivo. En este modo de operación se le denomina condensador síncrono. Para describir la operación de esta máquina se considera que no existen pérdidas. Luego la tensión en los terminales es  $V$  y la fuerza electromotriz  $E$ . Si se aplica una fuerza antagonista al rotor de la máquina, éste tenderá a disminuir su velocidad hasta que se produzca un torque igual en valor pero opuesto del torque aplicado. Luego el rotor va a girar a la misma velocidad del generador y la tensión  $E$  interna estará desfasada un cierto ángulo respecto a tensión  $V$  de la red. Como resultado se produce un vector de tensión  $E_1$ , y la corriente por fase  $I$  es igual a:

$$I = \frac{(V - E)}{\sqrt{3}Z} \quad (2.4)$$

Donde  $Z$  es la impedancia por fase. Como la impedancia reactiva es predominantemente inductiva, la corriente estará en atraso a la tensión aplicada. La potencia aplicada al motor síncrono bajo esta condición es:

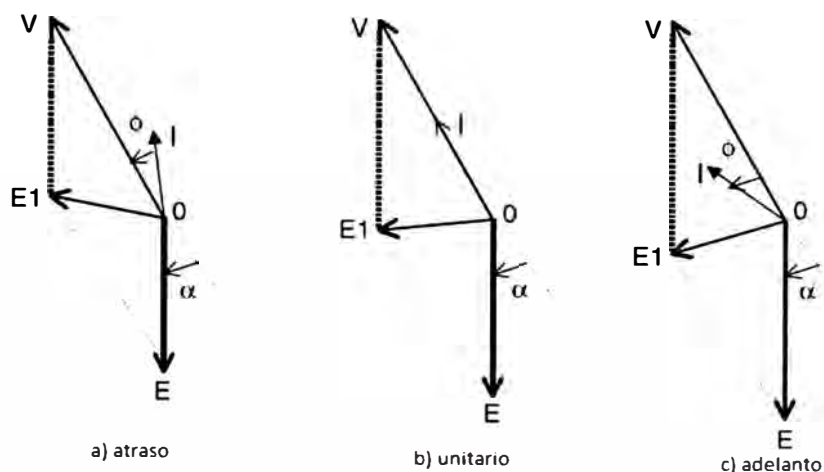
$$P = VI \cos \phi \quad (2.5)$$

Donde  $\Phi$  es ángulo de desfase entre la tensión medida en los terminales  $V$  y la corriente  $I$ . En la figura 2.7a se representa esta condición. Si la excitación se incrementa en el motor síncrono, se obtendrá un factor de potencia unitario según se muestra en la figura 2.7b. La tensión de excitación se incrementará dada la condición previa. La tensión resultante  $E_1$  varía en módulo y ángulo. La corriente  $I$  está en fase con la tensión  $V$  y en consecuencia el factor de potencia es igual a 1.

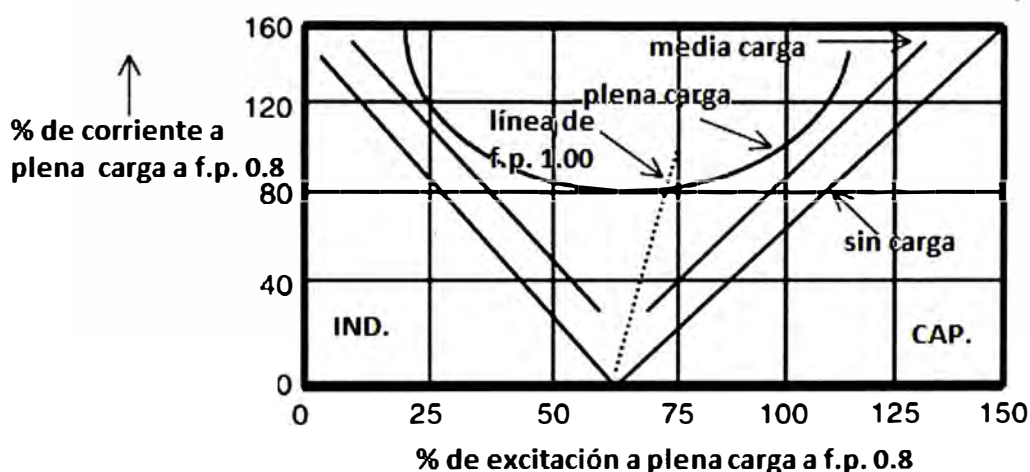
Un incremento en la corriente de excitación incrementará la tensión  $E$  como se muestra en la figura 2.7c. La tensión interna resultante  $E_1$  varía en módulo y ángulo. La corriente  $I$  se adelanta respecto a la tensión de línea  $V$  en un ángulo  $\Phi$ . La corriente  $I$  se mantiene constante en los tres casos. Esto es así debido a que la velocidad y torque son los mismos en los tres casos. Como el ángulo de desfase cambia en las tres condiciones, los factores de potencia correspondientes serán diferentes.

Como la tensión de línea es la misma en cada condición de operación, la carga, excitación, corriente de línea, y el factor de potencia están relacionados. En la figura 2.8 se muestra la relación de estas variables. Para el factor de potencia unitario y una corriente de excitación determinada, la corriente de línea es mínima. Si la excitación disminuye, la corriente de línea aumenta y el motor operará a factor de potencia inductivo. Si por el

contrario, la excitación aumenta a partir del factor de potencia unitario, la corriente de línea también aumentará, pero operará en modo capacitivo.



**Fig. 2.7** Diagrama fasorial de un motor síncrono para condiciones de factor de potencia en atraso, unitario y en adelanto.



**Fig. 2.8** Curvas V en las que se muestra la relación de corriente de carga y excitación.

En consecuencia, el condensador síncrono se puede usar para mejorar el factor de potencia del sistema al igual que un banco de condensadores.

En la actualidad prácticamente no se utilizan ya que son difíciles y caros de mantener, requieren complejos circuitos de protección y de arranque, además contribuyen significativamente a aumentar la corriente de cortocircuito.

### 2.3.3 Compensadores estáticos reactivos (SVCs)

Los compensadores estáticos reactivos son una buena alternativa de compensación dinámica.

Los siguientes SVCs se usan para proveer compensación dinámica en paralelo:

- a) TCR+FC Reactor controlado por tiristores y condensador fijo
- b) TCR+TSC Reactor controlado por tiristores y condensador conmutado por tiristores
- c) TCR+MSC Reactor controlado por tiristores y condensador conmutado mecánicamente
- d) TSC Condensador conmutado por tiristores
- e) SVC compensador estático reactivo controlado por microprocesador [2,5] .

### **Descripción del SVC**

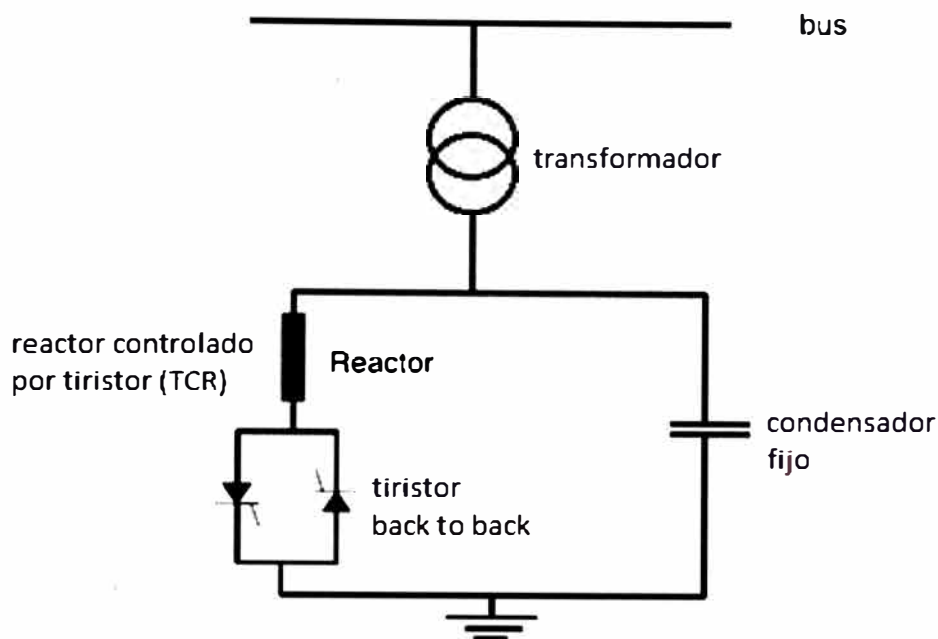
Un SVC típico consiste en tiristores controlados por un circuito de disparo, un sistema de enfriamiento para tiristores, equipo de compensación reactiva electrónico, banco de condensadores, reactores de filtro, e interruptores de potencia. Los SVCs son fabricados para baja y media tensión debido a los límites de tensión que soportan los tiristores.

#### **a) Reactor controlado por tiristor (TCR) y Condensador fijo (FC)**

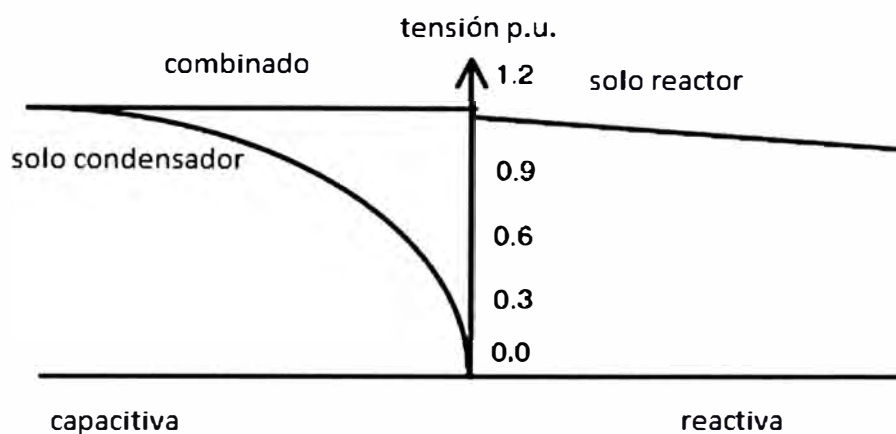
En este circuito, los condensadores se seleccionan para proveer la máxima potencia reactiva requerida al punto de instalación. La potencia inductiva requerida es compensada en forma dinámica para mantener el nivel de tensión deseado cuando la demanda de la potencia reactiva es menor a la máxima. El control se realiza por ángulos de disparo. La figura 2.8 muestra un esquema típico. El resultado de esta compensación es un factor de potencia cercano a la unidad, con cambios mínimos en la tensión gracias a la compensación continua por fase del reactor. A máxima potencia capacitiva, se desconecta el reactor. Cuanto mayor es el ángulo de disparo, mayor es el contenido armónico. En la figura 2.9 se muestra la variación de potencia capacitiva e inductiva.

#### **b) Reactor controlado por tiristores (TCR) y condensador conmutado por tiristores (TSC)**

La figura 2.10 muestra una variación del esquema mencionado. Este consiste en varios condensadores conectados en paralelo con un reactor controlado por tiristores. Para la conmutación de los condensadores y control del reactor se requiere un sistema de compensación electrónico. La eficiencia del sistema completo es menor debido a las pérdidas en el reactor. El número de ramas de condensadores depende del requerimiento de potencia reactiva, rangos del tiristor, etc. En la figura, para un SVC de 10MVAR, el banco de condensadores será de dos 5MVAR (o en cualquier otra combinación) y el reactor será de 10MVAR. La figura 2.11 muestra la relación entre la potencia reactiva entregada por el SVC versus la potencia reactiva demandada.



**Fig. 2.8** Reactor controlado por tiristor (TCR) y condensador fijo (FC).

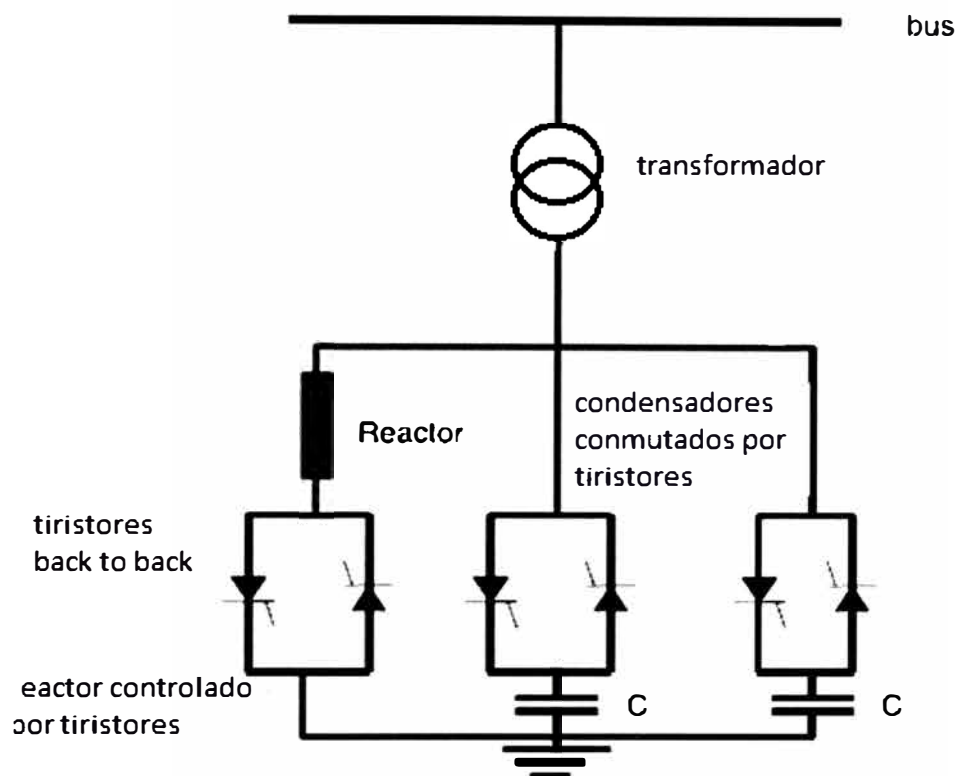


**Fig. 2.9** Curva característica de tensión con condensador fijo y reactor controlado por tiristor.

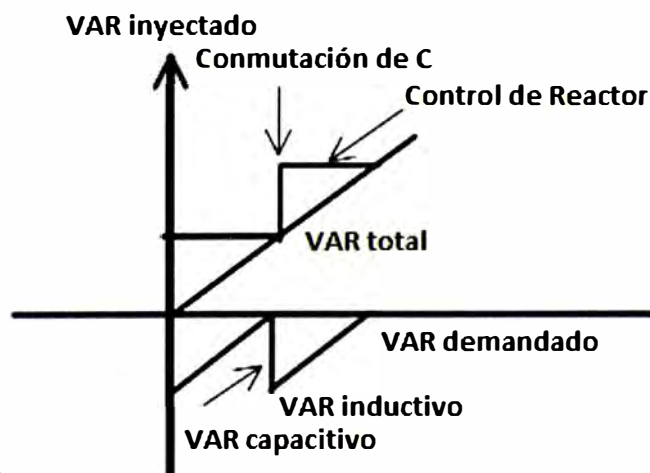
**c) Reactor controlado por tiristores (TCR) y condensador conmutado mecánicamente.**

Este circuito se muestra en la figura 2.12. En ella los condensadores son conmutados por interruptores mecánicos. Este método es indicado para condiciones de carga estable, donde el requerimiento de carga es predecible y los condensadores son conmutados usando interruptores. Dependiendo de la demanda, el banco de condensadores puede operar en diferentes combinaciones. El reactor provee un tipo de compensación suave. Este esquema

es bajo en precio, sin embargo la velocidad de respuesta es lenta. Para un SVC de 10 MVAR, el banco de condensadores consistirá de tres pasos de 3.33 MVAR cada uno, y el reactor será de 10MVAR.



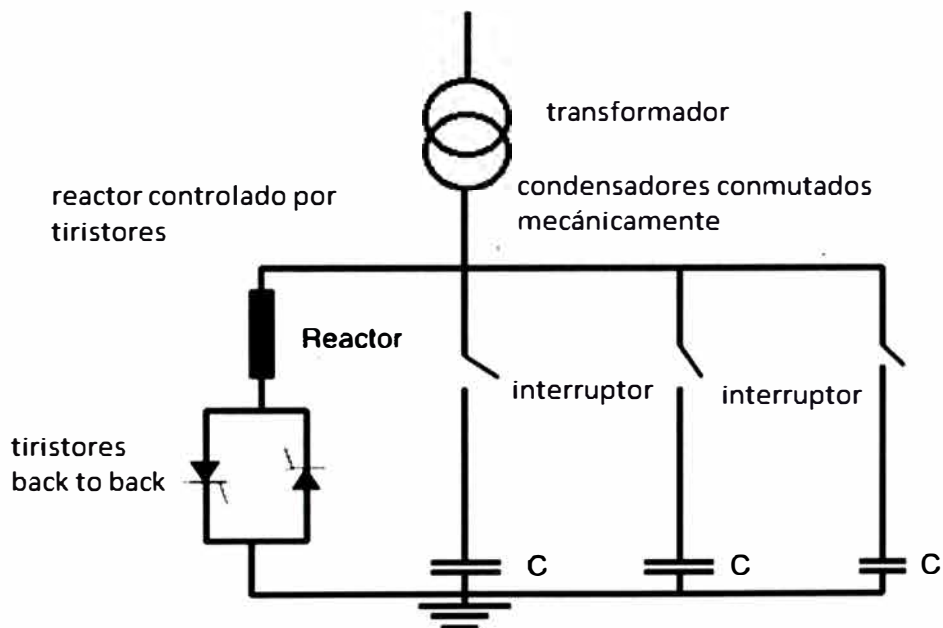
**Fig. 2.10** Reactor controlado por tiristores (TCR) y Condensador conmutado por tiristor (TSC).



**Fig. 2.11** Curva característica de Potencia reactiva entregada a la fuente versus potencia reactiva demandada de TSC y TCR.

#### d) Condensadores conmutados por tiristores (TSC)

En este caso los condensadores son conectados y desconectados usando tiristores. La configuración binaria se usa para reducir el número de condensadores requeridos para compensar un mismo rango de valores de reactivos. Este circuito es aplicable tanto para cargas desbalanceadas como balanceadas. La figura 2.13 muestra un esquema típico de TSC. Para una carga de 10MVAR, el condensador 1 vale 4MVAR, el condensador 2 3MVAR, y el condensador 3 3MVAR. Algunos diseños emplean el arreglo binario. Con este esquema, la potencia reactiva se puede compensar ciclo a ciclo. Cada fase se corrige independientemente y se corrige desbalances. Las condiciones de ferro-resonancia son suprimidas debido a que los condensadores son conmutados cada ciclo. No se generan armónicos debido a que no se conectan reactores.



**Fig. 2.12** Reactor controlado por tiristores (TCR) y condensadores conmutados mecánicamente (MC).



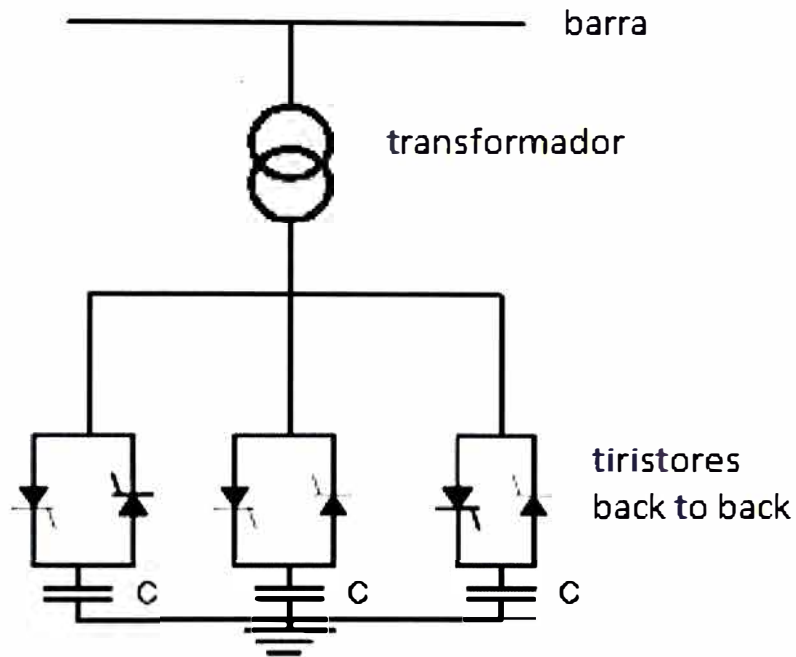


Fig. 2.13 Condensadores conmutados por tiristores (TSC).

### Principio de funcionamiento de ramas capacitivas

El análisis del funcionamiento del circuito mostrado en la figura 2.14 es el de determinar el momento exacto para la conexión del condensador al sistema a fin de evitar generar transitorios de corrientes.

De la figura se deduce que mientras el tiristor está apagado, el condensador se carga a través del diodo al máximo valor de tensión  $-V_m$  entre fase y neutro. La descarga del condensador no es posible ya que el tiristor se encuentra apagado.

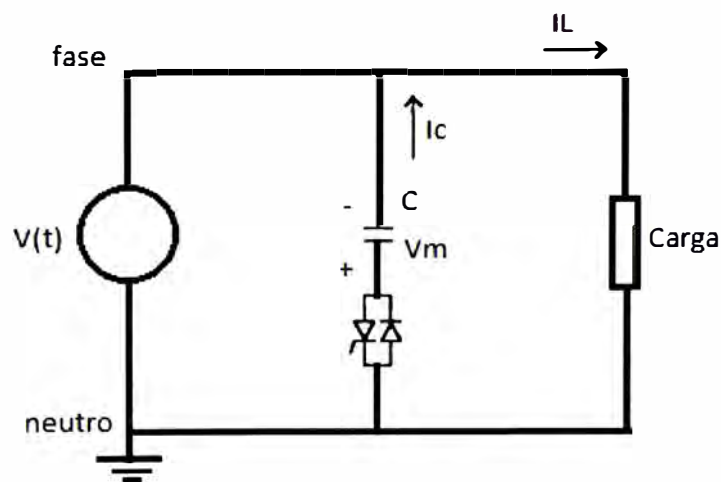


Fig. 2.14 Configuración de un sistema fase-neutro con rama capacitiva.

La conexión suave se logra cumpliendo dos condiciones: (1) la variación de tensión al momento de la conexión del condensador debe ser nula, y (2) el voltaje ánodo-cátodo en el tiristor debe ser cero.

Matemáticamente las condiciones se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{dv(t)}{dt} \Big|_{t=t_0} = 0 \quad (2.6)$$

$$v^{th}(t) \Big|_{t=t_0} = 0 \quad (2.7)$$

Donde:

$v(t)$  : Voltaje entre fase neutro

$v^{th}(t)$  : Voltaje en el tiristor

$t_0$  : Momento de disparo del tiristor

Luego, del circuito pueden establecerse las siguientes relaciones:

$$v(t) = V_m \text{sen}(wt) \quad (2.8)$$

$$v^{th}(t) = v(t) - V_c = V_m \text{sen}(wt) - V_c \quad (2.9)$$

Donde:

$V_c$  : Tensión del condensador de la rama capacitiva

Debido al efecto del diodo anti-paralelo se tiene:

$$V_c = -V_m \quad (2.10)$$

$$v^{th}(t) = V_m (\text{sen}(wt) + 1) \quad (2.11)$$

Por las condiciones dadas al inicio:

$$\text{sen}(wt_0) + 1 = 0 \quad (2.12)$$

$$wt_0 = 270^\circ \quad (2.13)$$

Del análisis realizado se concluye que para que se cumpla la conexión suave, vale decir sin transitorios de corriente, el tiristor deberá ser accionado cuando  $v(t)$  alcanza su máximo valor de tensión negativa, y la descarga del condensador será cuando  $wt = 270^\circ$  [5].

### e) SVC compensador estático controlado por microprocesador.

En este tipo de dispositivo los TSC y TCR son controlados por un microprocesador. Esta configuración brinda compensación continua y es indicada para cargas como molinos, máquinas de soldadura, hornos de arco, motores grandes, y estaciones de bombeo. En la figura 2.14 se muestra el diagrama unifilar del compensador estático. Su rango de potencia reactiva por fase es de 50kVAR en atraso a 750kVAR en adelanto.

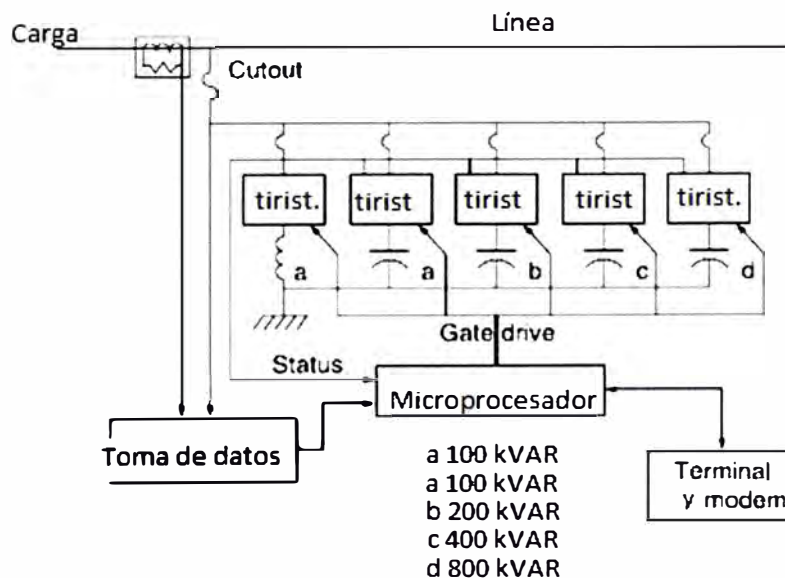
## 2.4 Ubicación de bancos de condensadores

Los condensadores se pueden instalar en barras de alta tensión, distribución o en las mismas cargas. A continuación se describen los tipos de compensación principales según la ubicación de los bancos de condensadores [3].

### 2.4.1 Tipos de compensación según la ubicación de bancos de condensadores

#### a) Compensación centralizada

La figura 2.15 muestra el arreglo de compensación central. En este arreglo, la corrección del factor de potencia se aplica a un grupo de cargas. Esta técnica es adecuada para sistemas de utilización o industriales en los cuales las cargas se hallan distribuidas. Si toda la carga se conecta y desconecta por completo, entonces el condensador también se conectará y desconectará. En cambio si parte de la carga se conecta y desconecta con frecuencia, entonces este tipo de compensación no es el indicado. Económicamente es mejor tener un banco de condensadores grande que varios bancos pequeños.



**Fig. 2.14** Diagrama unifilar de un SVC controlado por microprocesador.

#### b) Compensación sectorial

En algunas aplicaciones industriales, las cargas se conectan y desconectan con frecuencia. Este tipo de cargas se debe agrupar por alimentadores a fin de compensarlos individualmente. En la figura 2.16 se muestra este tipo de configuración.

Este arreglo no favorecerá la reducción de pérdidas en la alimentación primaria.

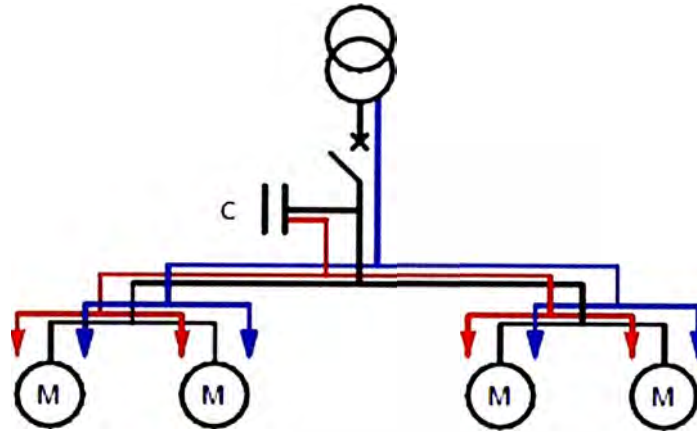


Fig. 2.15 Compensación centralizada.

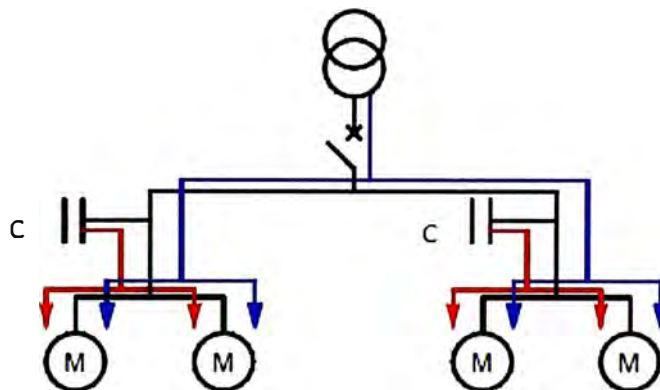


Fig. 2.16 Compensación sectorial.

### c) Compensación individual

La figura 2.17 muestra el arreglo para la compensación individual. En este esquema la compensación se hace por separado para cada una de las cargas. Este tipo de compensación se usa mayormente en aplicaciones industriales y el costo puede ser muy alto.

#### 2.4.2 Consideraciones para la ubicación de bancos de condensadores

Los condensadores en paralelo proveen potencia reactiva localmente, lo que conlleva a la reducción de la demanda de potencia aparente, mejora la tensión, reduce las pérdidas en las líneas, y ahorra la energía que se consume. Los beneficios son mayores si los bancos se conectan directamente a las cargas, sin embargo esto no es práctico debido al tamaño de las

cargas, su distribución, y el nivel de tensión. Dependiendo de la aplicación, los condensadores son conectados a alta, media tensión y baja tensión.

#### a) Banco de condensadores conectados en alta tensión

Las líneas de transmisión tienden a experimentar caídas de tensión considerables durante picos de demanda. En consecuencia, los bancos de condensadores se usan para suministrar energía reactiva a subestaciones de alta tensión. Estos bancos son accionados según los picos de demanda.

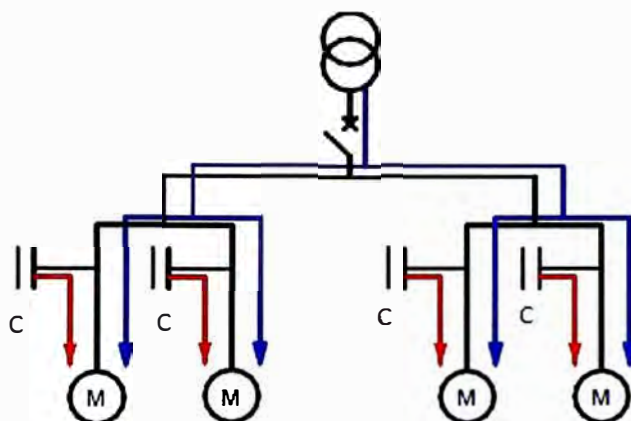


Fig. 2.17 Compensación individual.

#### b) Banco de condensadores para subestaciones

Los bancos de condensadores se instalan en subestaciones cuando se requiere compensar grandes cantidades de potencia reactiva a media y alta tensión. Los equipos de estos bancos son: condensadores, interruptores tipo cut-out con fusibles, interruptores, supresores de tensiones impulsionales, controladores, aisladores para alta tensión, e interconexiones. A niveles altos de tensión, los bancos de condensadores se usan para compensar potencia reactiva, para mejorar el nivel de tensión, reducir pérdidas en las líneas y transformadores. Su instalación no se hace sin un estudio cuidadoso de flujo de carga y estabilidad.



**Fig. 2.18** Banco de condensadores de 2.3kV y 3150kVAR.

**c) Banco de condensadores con encerramiento metálico**

El tipo de construcción de panel con encerramiento metálico se usa para bancos a ser instalados en subestaciones pequeñas. Estas unidades son compactas y requieren menor mantenimiento. El tiempo de vida de estos bancos es mayor debido a que no son expuestos a factores climáticos externos como calor, frío, humedad y polvo.

**d) Bancos de condensadores para distribución**

Los bancos de condensadores de distribución se instalan próximos a las cargas o en subestaciones. Aunque estos compensan la potencia reactiva en cargas locales, podrían no reducir las pérdidas en líneas y transformadores. Los condensadores de baja tensión son menos costosos que los de alta tensión.

**e) Banco de condensadores fijos**

Los bancos de condensadores fijos se usan en sistemas de distribución y ciertas cargas industriales donde el factor de potencia requerido es constante. A veces, estos bancos de condensadores pueden ser conectados junto a la carga.



**Fig. 2.19** Banco de condensadores de 6.6kV y 5x500 kVAR.

#### **f) Banco de condensadores automáticos**

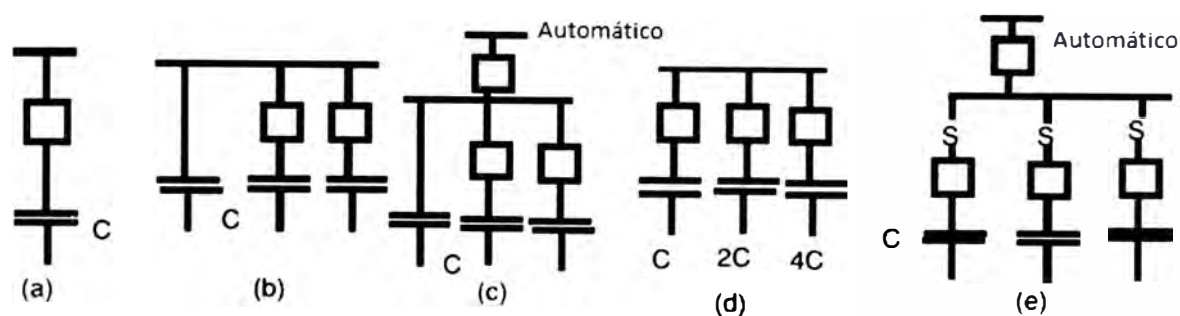
En alta y media tensión, se requiere compensar la potencia reactiva durante picos de carga. Los bancos son conectados durante picos de carga y desconectados en ausencia de estos. Los esquemas de conexión mantienen los niveles de potencia reactiva más o menos constantes, al igual que el factor de potencia, reducen sobretensiones cuando se liberan cargas, y reducen pérdidas en transformadores y alimentadores.

Para la conexión y desconexión de condensadores se usan las siguientes señales:

- Tensión: debido a que la tensión varía con la carga
- Corriente: al conectarse la carga
- Potencia reactiva: si la demanda de potencia reactiva aumenta el banco de condensadores se conectará y viceversa.
- Factor de potencia: si el factor de potencia cae por debajo de un valor predeterminado, el banco de condensadores será conectado.
- Tiempo: a veces los bancos de condensadores pueden ser conectados usando temporizadores y desconectados según los requerimientos de fábrica.

En la práctica se conecta el banco con pasos a fin de acomodarse a las variaciones de potencia reactiva consumida. En la figura 2.20 se muestran varios arreglos de conexión para bancos de condensadores automáticos. La figura 2.20a muestra un banco conectado por un interruptor. La figura 2.20b muestra un banco fijo y dos automáticos. Los interruptores deben ser capaces de soportar las corrientes de cortocircuito.





**Fig. 2.20** Arreglos de conexión de bancos de condensadores.

La figura 2.20c muestra un arreglo de conexión con un interruptor automático y dos interruptores no automáticos. En algunas aplicaciones donde existe variaciones aleatorias en el requerimiento de potencia reactiva, el banco es conmutado según un arreglo de tipo binario, como el mostrado en la figura 2.20d. En la tabla 2.5 se muestran las combinaciones para la selección de condensadores. La selección es posible usando un controlador programable. La figura 2.20e muestra otro esquema donde un interruptor automático conmuta tres bancos de condensadores equipados con fusibles e interruptores no automáticos. Los bancos de condensadores pueden ser de igual capacidad.

#### **g) Instalación de banco en lado de baja tensión de transformadores**

El banco de condensadores se instala próximo a la carga para ofrecer compensación reactiva local. En un sistema donde una cantidad considerable de pequeñas cargas requiere ser compensada, la demanda de potencia reactiva varía. En condiciones fuera de pico de carga, la tensión del banco puede elevarse y producirse sobrecompensación. Esto conlleva a la operación no deseada de fusibles y fallas en condensadores. En consecuencia, es recomendable colocar el banco de condensadores en el lado de baja tensión del transformador. Se debe realizar un estudio para cuidar que el condensador y la reactancia del transformador en serie no produzcan resonancia.

#### **h) Instalación de banco en lado de alta tensión de transformadores**

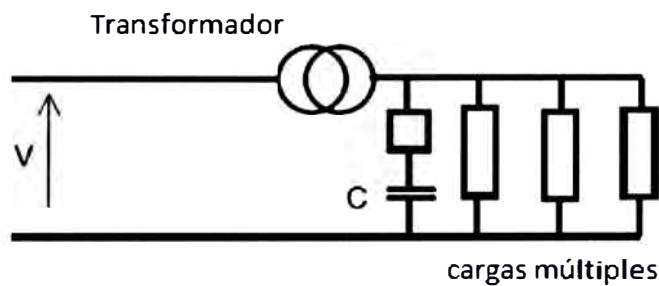
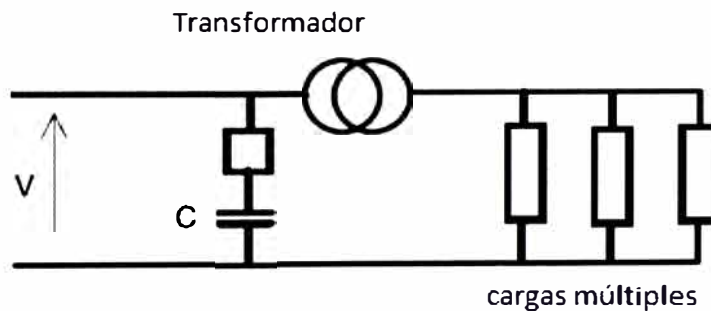
Este tipo de instalación provee el mismo tipo de compensación reactiva que el banco de baja tensión. La instalación puede ser libre de sobretensiones si el banco se conmuta dependiendo de los requerimientos de factor de potencia. Una de las mayores ventajas en este tipo de compensación es que se reducen las pérdidas en el transformador. El costo de un banco de condensadores de alta tensión es mayor comparado a uno de baja tensión.

Al igual que en la compensación de baja tensión se debe evitar la sobrecompensación y resonancia en el sistema.



**Tabla 2.5** Combinaciones lógicas para conmutación de condensadores

Item	Bit 0	Bit 1	Bit 2	Nota
1	0	0	0	Tres interruptores abiertos
2	1	0	0	interruptor 1 cerrado
3	0	1	0	interruptor 2 cerrado
4	1	1	0	interruptores 1 y 2 cerrados
5	0	0	1	interruptor 3 cerrado
6	1	0	1	interruptores 1 y 3 cerrados
7	0	1	1	interruptores 2 y 3 cerrados
8	1	1	1	Tres interruptores cerrados

**Fig. 2.21** Conexión de banco de condensadores en lado de baja tensión.**Fig. 2.22** Conexión de banco de condensadores en lado de alta tensión.

## 2.5 Criterios para el diseño de sistemas de compensación reactiva

El éxito para el diseño de un buen sistema de corrección de factor de potencia se basa en una buena toma de medidas y un buen análisis.

A continuación se describen las reglas básicas para el diseño del sistema [4]:

### 2.5.1 Medición de carga

Desconectar todos los condensadores existentes del sistema

Determinar las condiciones normales de operación

Medir todos los parámetros eléctricos de la instalación:

- factor de potencia
- corriente
- potencia activa
- potencia reactiva
- la tensión de carga
- THD-V%
- THD-I%
- la amplitud de corrientes y tensiones armónicas

Es también necesario medir la velocidad con que varía la carga a fin de determinar el tamaño de los pasos, las constantes de tiempo de conmutación y si se requiere, un tipo de compensación dinámica. De acuerdo a los estándares, el tiempo de medición no debe ser menor a una semana.

### 2.5.2 Dimensionamiento del sistema.

Primero se debe determinar el valor de la capacidad del banco de condensadores de acuerdo al factor de potencia deseado.

Luego se recomienda que los pasos del banco de condensadores se calculen de forma tal que la sensibilidad del banco sea alrededor del 15 a 20% de la potencia reactiva total del sistema.

Se recomienda diseñar bancos con valores de potencia reactiva estándares, de preferencia múltiplos de 25kVAR.

### 2.5.3 Selección de la tecnología

Los valores de THD-V% y THD-I% son los factores más determinantes al diseñar un sistema de compensación.

- Medir la presencia de corrientes armónicas en el alimentador principal del sistema con los condensadores desconectados bajo todas las condiciones posibles de carga.
- Determinar la frecuencia y la amplitud máxima de cada corriente armónica existente
- Calcular la distorsión armónica total de corriente (THD-I) como porcentaje de la corriente de frecuencia fundamental:

$$THDI = \frac{100x\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots I_n^2}}{I_1} \quad (2.14)$$

- Medir la presencia de posibles tensiones armónicas externas al sistema. De ser posible medir la tensión armónica del lado de alta tensión.
- Calcular la distorsión armónica total de tensión (THD-U) como porcentaje de la tensión de frecuencia fundamental:

$$THDU = \frac{100 \times \sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots U_n^2}}{U_1} \quad (2.15)$$

- Observar si existen armónicos tales que THD-I > 10% y el THD-U > 3% (medido sin condensadores conectados al sistema)

De no ser el caso, se puede usar un sistema de compensación de factor de potencia estándar, sin considerar filtros para armónicos, pero la tensión nominal del condensador debe ser mayor a la tensión real del sistema  $U_{cap} > U_{real}$ . Se ha de considerar la naturaleza de la carga, por ejemplo para cargas dinámicas se deberá usar compensación reactiva por accionamiento de tiristores.

De ser el caso, se debe usar filtros para armónicos y realizar un estudio especializado del tema.

Adicionalmente, se debe tener cuidado que los condensadores creen resonancia con la reactancia de la línea.

#### **2.5.4 Selección del nivel de tensión**

La tensión real de operación se determina cuando los condensadores están conectados. Al usar condensadores con tensiones nominales mayores a la tensión real de operación, la vida útil se extiende considerablemente.

#### **2.5.5 Ventilación forzada**

De acuerdo al estándar internacional IEC60831, los condensadores de clase D deben operar a temperatura ambiente promedio de 35°C, aunque es posible que operen a temperatura máxima de 50°C por un periodo corto de tiempo.

No se recomienda bajo ninguna circunstancia la operación a mayor temperatura debido a que esto disminuye la expectativa de vida del condensador.

Se recomienda que cualquier sistema de compensación de 100 kVAR o más, cuente con ventilación suficiente para operar a 35 °C recomendados.

#### **2.5.6 Instalación**

Se debe asegurar que los componentes estén instalados a distancias adecuadas entre ellos a fin de garantizar que la ventilación sea efectiva, sin obstrucción de flujo de aire y prevenir el calentamiento por radiación, contacto o convección.

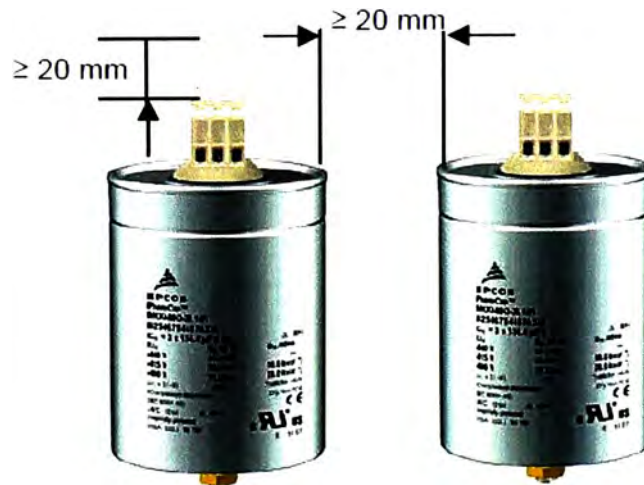
Los reactores para filtro de armónicos pueden operar cerca a 100°C. Por ello deben instalarse lo más alejado posible de los condensadores. Por otro lado, los reactores deberán instalarse lo más próximo a la salida del flujo de aire frío a fin de evitar transferencia de calor a otros componentes.

Los contactores son diseñados para operar a temperatura máxima de 50°C, según la selección de los condensadores. Los contactores deben instalarse de modo que no reciban calor transferido de otros componentes del sistema.

Los fusibles deben tener una capacidad de ruptura de 1.6 veces la corriente nominal.

Los cables deben seleccionarse con el calibre correcto. Los cables sub-dimensionados pueden ocasionar sobrecalentamiento en los terminales del condensador y reducción de la expectativa de vida del equipo. Adicionalmente se recomienda cables con alto nivel de aislamiento para reducir la emisión de temperatura.

Se debe garantizar que se apliquen los torques recomendados a los terminales del banco de condensadores y a la barra de conexión a tierra.



**Fig. 2.23** Distancias mínimas entre condensadores.

### 2.5.7 Limitación de corrientes de inserción (inrush)

La conexión de condensadores, siempre genera corrientes transitorias. Estas corrientes dependen más de la corriente de cortocircuito del punto de conexión que del mismo condensador.

Si estas corrientes no se controlan, la vida útil de los equipos y la calidad de la energía de la instalación se verán reducidos.

En los sistemas de compensación estándar, los contactores deberán ser especialmente diseñados para cargas capacitivas y para atenuar corrientes transitorias. Sin embargo, debido a que estas corrientes se pueden atenuar hasta cierta medida, lo más recomendable es reducir al máximo el número de conmutaciones, a fin de garantizar mayor vida útil a los componentes del sistema.



**Fig. 2.24** Contactor Epcos para condensadores.

Los sistemas de compensación dinámicos y modernos emplean módulos de tiristores para conmutar los pasos de condensadores sin generar corrientes transitorias. Esto permite obtener un número ilimitado de operaciones sin causar daños a los equipos ni disminuir la calidad del sistema.



**Fig. 2.25** Módulo de tiristores Epcos de la serie TSM.

### 2.5.8 Configuración del sistema de corrección de potencia

El sistema debe tener un valor de factor de potencia objetivo. Una vez que la potencia reactiva requerida es calculada, la constante de tiempo de conmutación no debe ser configurada muy sensible.

El paso no debe tener un valor menor al 10% de la potencia total del banco de condensadores. De otra forma una pequeña variación de la carga ocasionará siempre la conmutación.

A fin de reducir el número de conmutaciones, se emplean controladores inteligentes para corrección de factor de potencia. Estos registran el número de conmutaciones y el tiempo por cada conmutación.



**Fig. 2.26** Controlador de factor de potencia Epcos de la serie BR6000.

También es recomendable configurar el sistema para dos pasos del mismo nivel mínimo de potencia. El estrés es mayor en el paso de menor valor debido a que es el que hace posible la regulación más fina. Por ello al optar por dos pasos del mismo valor mínimo, el estrés se repartirá entre ellos.

### **2.5.9 Protección del sistema de compensación contra sobretensiones transitorias**

Todas las condiciones de sobrecarga ocasionan aumento de temperatura en el condensador, entre otros efectos. Las sobrecorrientes debido a armónicos ocasionan mayores pérdidas internas, las que se transforman en calor. La sobretensión permanente ocasiona corriente permanente y en consecuencia más calor.

Adicionalmente, el dieléctrico del condensador es muy sensible a las sobretensiones transitorias, y a temperaturas más elevadas la sensibilidad es mayor.

Las sobretensiones transitorias son muy frecuentes en instalaciones industriales debido a la conmutación de grandes cargas. El sistema puede protegerse de forma muy efectiva con varistores de baja tensión.

## **2.6 Estándares para compensación reactiva**

IEC60831: Estándar para corrección de factor de potencia en baja tensión

IEC61921: Bancos de condensadores para corrección de factor de potencia en baja tensión

DIN EN61921: Leistungskondensatoren Kondensatorbatterien zur Korrektur des Niederspannungsleistungsfaktors

EN 50160: Características de tensión para suministro de energía en sistemas de distribución pública

IEEE Standard 519-1992: IEEE Prácticas recomendadas y requerimientos para compensación reactiva de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

## CAPÍTULO III

### COMPENSADOR REACTIVO CONMUTADO POR TIRISTORES.

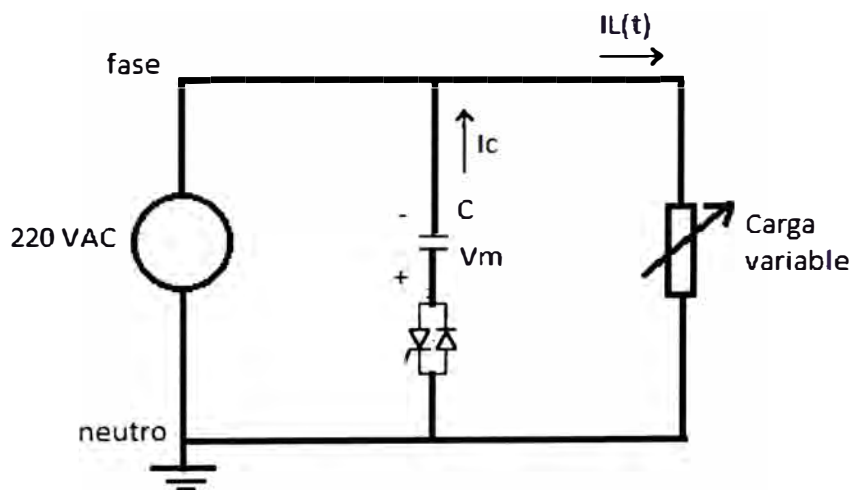
En el presente capítulo se describen dos sistemas de compensación para corrección del factor de potencia de una carga lineal y trifásica, empleando condensadores conmutados por tiristores (TSC).

#### 3.1 Sistema eléctrico a compensar

El sistema eléctrico a compensar consiste de una carga trifásica lineal y variable en configuración estrella con el neutro puesto a tierra y tensión de línea de 380 VAC.

La carga es un inductor variable que consume una corriente de línea eficaz  $I_{L\text{eff}}$  entre 28.28 y 35.35A aproximadamente. De igual forma la componente activa  $I_{p\text{eff}}$  es constante e igual a 22.6 A. La corriente reactiva  $I_{q\text{eff}}$  varía entre 7.77 y 28.28 A. Estos valores se dan en estado estable.

Finalmente, el factor de potencia de la carga variará entre 0.62 y 0.94. Para facilitar el estudio de este sistema se considera una fase es decir la configuración fase-neutro.



**Fig. 3.1** Configuración fase-neutro del sistema eléctrico a compensar.

#### 3.2 Sistemas de compensación reactiva

Los sistemas de compensación reactiva a ser descritos buscan resolver dos problemas



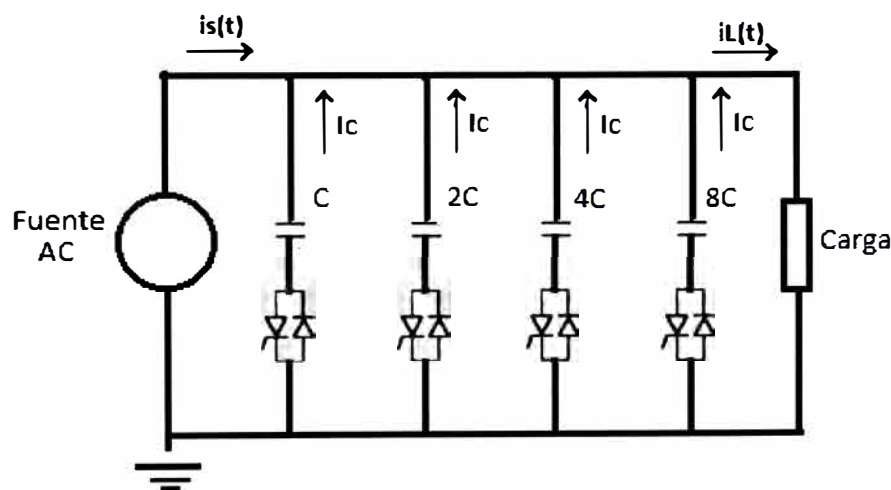
básicos: 1) seleccionar qué condensadores deben ser conectados y 2) seleccionar en qué momento realizar la conexión. Funcionarán de modo tal de: 1) no generar transitorios al momento de la conexión y desconexión del banco de condensadores, 2) compensar la red de forma rápida y 3) no generar corrientes armónicas.

Los condensadores están configurados en forma binaria, es decir el segundo condensador duplica en valor al primero, el tercero condensador al segundo y el cuarto condensador al tercero. Esta configuración va a permitir una compensación más fina, en donde la precisión la brinda el condensador de menor valor. A su vez permite reducir el número de condensadores necesarios para compensar un mismo rango de valores de potencia reactiva.

A continuación se describen dos tipos de sistemas de compensación reactiva para la corrección automática del factor de potencia por conmutación de tiristores.

### 3.2.1 Sistema de compensación reactiva publicado por la IEEE (1998)

En la figura 3.2 se muestra el esquema eléctrico del sistema de compensación binario compuesto por 4 condensadores conmutados por tiristores.



**Fig. 3.2** Compensador reactivo binario (de 4 bits) (configuración fase-neutro).

La figura 3.3 muestra el esquema de bloques del control binario del sistema de compensación reactiva de 8 bits para la corrección del factor de potencia. Este sistema requiere conocer la amplitud de la componente reactiva  $i_q(t)$  de la corriente consumida por la carga que pasa por el alimentador principal.

A continuación se describe en forma breve el funcionamiento del sistema y sus componentes.

#### a) Subsistema de detección de cruce por cero

El componente de detección de cruce por cero genera pulsos cada vez que la tensión de la fuente es nula y su derivada respecto al tiempo es positiva. Gráficamente se observa que se genera un pulso al inicio de cada ciclo de onda.

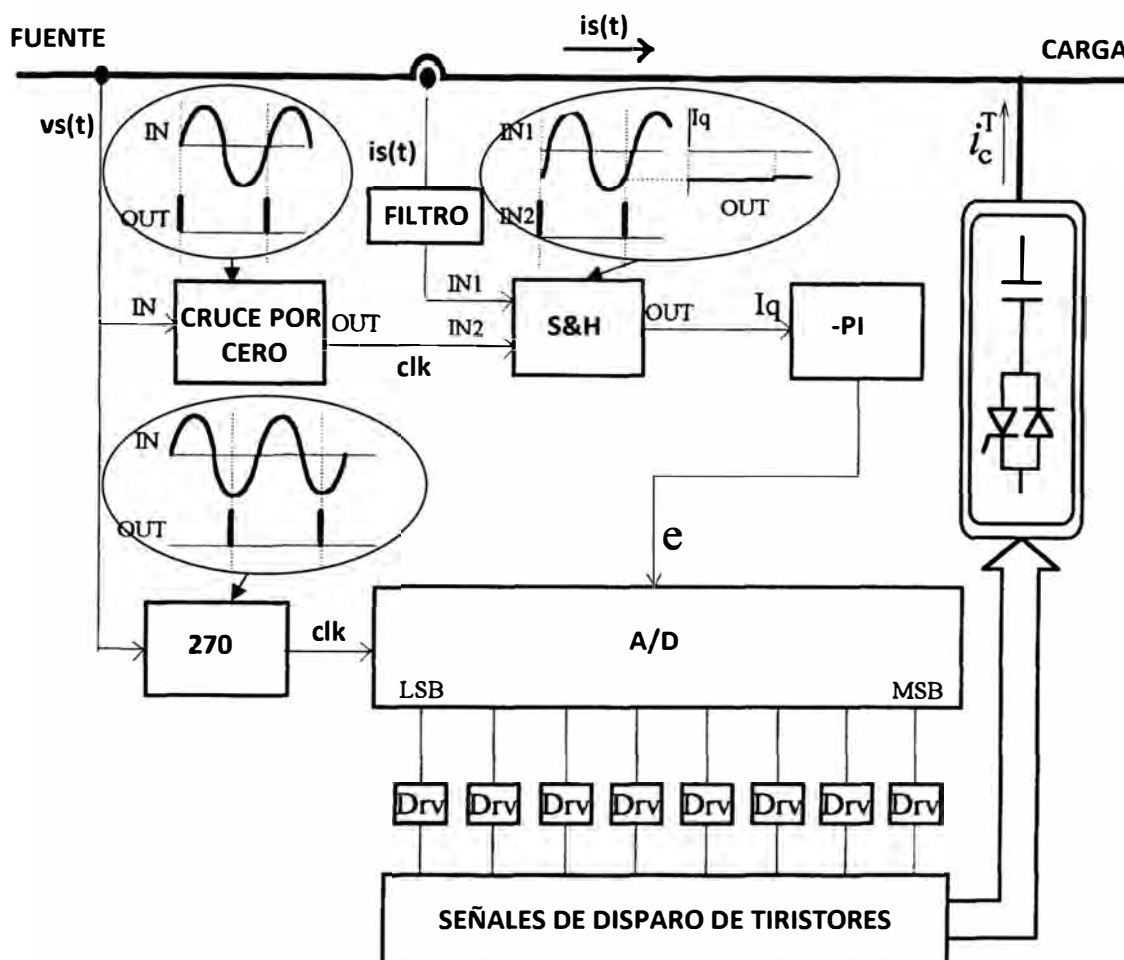


Fig. 3.3 Diagrama de bloques de compensación reactiva por fase (sistema de 8 bits).

#### b) Subsistema de generación de pulsos a 270°

El bloque "270°" toma la señal de la tensión por fase de la fuente y dispara un tren de pulsos cada 270° hacia el convertidor A/D. El disparo se produce cada vez que la tensión de la fuente alcanza su máximo valor negativo, y es igual a la tensión de carga en los condensadores  $v_c(t) = -V_m$ . De esta forma se asegura que la conexión de los condensadores con la red sea suave y no se generen transitorios de corriente.

#### c) Subsistema de Filtro de componente reactiva

El bloque "Filtro" toma la señal de la corriente de línea  $i_s(t)$  a fin de obtener la componente reactiva  $i_q(t)$ .

La siguiente ecuación representa la corriente de línea  $i_s(t)$  con sus diferentes componentes:

$$i_s(t) = i_0(t) + i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (3.1)$$

Donde:

$i_0(t)$  : Componente dc

$i_p(t)$  : Componente activa por fase

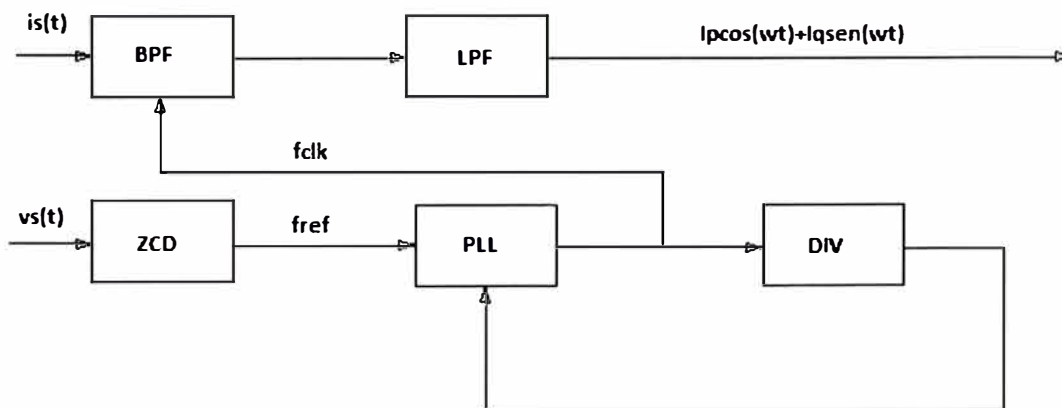
$i_q(t)$  : Componente reactiva por fase

$i_h(t)$  : Componente armónica

La ecuación se puede expandir a su forma más general:

$$i_s(t) = I_0 + I_p \cos(\omega t) + I_q \text{sen}(\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty} I_{2j} \cos(2j\omega t + \phi_{2j}) + \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k+1} \cos((2k+1)\omega t + \phi_{2k+1}) \quad (3.2)$$

La figura 3.4 muestra el diagrama de bloque del filtro utilizado para aislar la componente reactiva. En este diagrama se emplea un filtro pasa-banda BPF. La señal fclk se obtiene a partir de la tensión  $v_s(t)$  a través de un PLL. ZCD es el bloque detector del cruce por cero, y LPF es el filtro pasa-bajo. Esta parte del sistema de control solo deja pasar a las componentes de la corriente  $i_s(t)$  que tienen la misma frecuencia que la tensión de la red, es decir, a la componente activa y reactiva fundamental de la corriente de carga.



**Fig. 3.4** Diagrama de bloques de filtro.

#### d) Subsistema “Sample & Hold” (S&H)

La señal filtrada de corriente  $i_s(t)$  y los pulsos “clk” del circuito de cruce por cero de la tensión de la red son aplicados al bloque “S&H” (Sample and Hold), el cual genera una señal dc proporcional a la amplitud de la componente reactiva  $i_q(t)$  de la corriente de línea.

#### e) Subsistema proporcional-integral (-PI)

La señal  $I_q(t)$  es multiplicada por  $-1$  y tomada por el controlador proporcional- integral “PI”, el que genera la señal “e”.

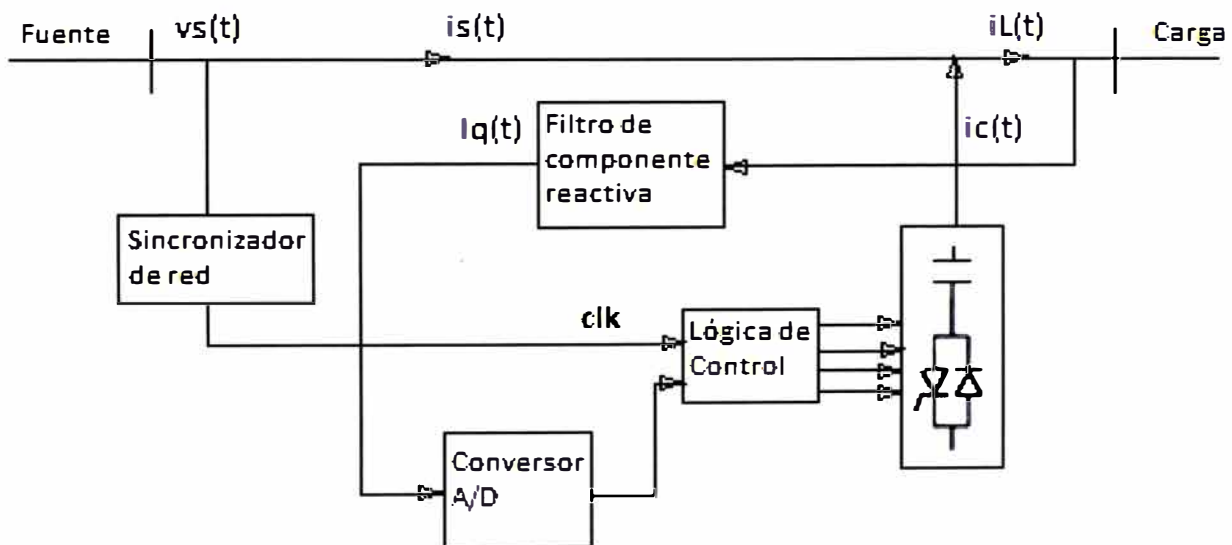
#### f) Convertidor A/D

La señal  $e$  es convertida a señales digitales a través del convertidor A/D (analógico-digital) de 8 bits. Esta combinación de señales crea la lógica de disparo de los tiristores [1].

#### 3.2.2 Sistema de compensación reactiva alternativo.

La figura 3.5 muestra otra alternativa para el sistema de corrección del factor de potencia de una carga variable y lineal. Como se observa en este caso, el sistema toma la señal de componente reactiva  $i_q(t)$  de la corriente de carga  $i_L(t)$ .

El sistema de compensación reactiva está compuesto por los siguientes subsistemas: (1) un sincronizador de red, (2) un Filtro para obtener la componente reactiva de la corriente de carga, (3) un convertidor A/D de 4 bits, (4) lógica de compensación reactiva y (5) un banco de condensadores conmutados por tiristores.



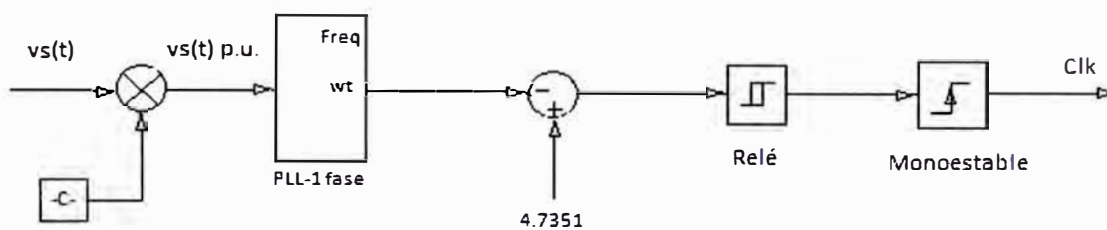
**Fig. 3.5** Sistema de compensación reactiva alternativo.

El funcionamiento del sistema y sus componentes se describen a continuación:

#### a) Subsistema de sincronización de red

El bloque sincronizador de red toma la señal  $v_s(t)$  y genera pulsos cada  $270^\circ$ . En este bloque la señal  $v_s(t)$  es transformada a su valor por unidad  $v_s(t)$  p.u. Luego es procesada por un sistema de sincronismo o “PLL” (Phase Locked Loop) que genera una señal en forma de rampa cuyo valor varía de  $0$  a  $2\pi$  radianes, al igual la señal  $v_s(t)$ .

Esta rampa es comparada con la señal de tensión constante de 4.7351, equivalente en radianes del ángulo de  $270^\circ$ , a través de un circuito comparador que genera un nivel de tensión diferente de cero en el instante que el valor de la rampa sea mayor que la constante. El nivel de tensión generado por el comparador es aplicado a un circuito mono-estable que produce un pulso de duración programable. Finalmente, esta señal de disparo, conjuntamente con el bloque de lógica de compensación reactiva, determinan cuales tiristores deben ser activados para la conmutación de los condensadores.



**Fig. 3.6** Diagrama de bloques de sincronizador de red.

### b) Subsistema de Filtro de componente reactiva

El bloque "Filtro " toma el valor de la corriente de carga  $i_L(t)$  a fin de obtener su componente reactiva  $i_q(t)$ .

A fin de despejar el valor de  $i_q(t)$ , se parte de la ecuación:

$$i_L(t) = I_p \cos(\omega t) + I_q \text{sen}(\omega t) \quad (3.3)$$

$$i_q(t) = i_L(t) - i_p(t) = i_L(t) - I_p \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

Donde  $I_p$  es la magnitud de la componente activa de la corriente de carga que requiere ser calculada y que está en fase con la tensión de línea.

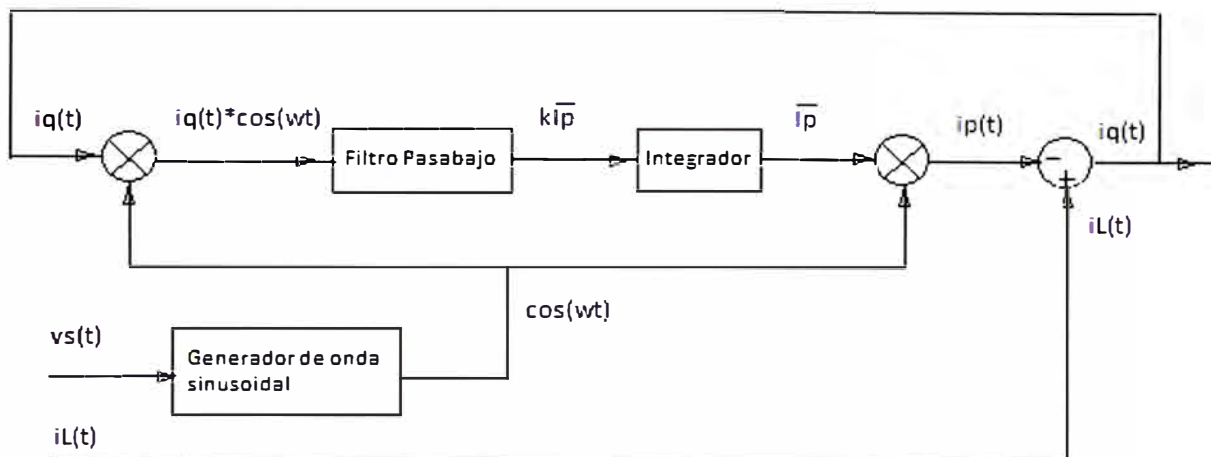
Para calcular  $I_p$  la ecuación (3.3) se multiplica por  $\cos(\omega t)$ , que es una señal sinusoidal en fase con la tensión, y se obtiene la relación:

$$i_L(t) \cdot \cos(\omega t) = \frac{I_p}{2} [1 + \cos(2\omega t)] + \frac{I_q}{2} \text{sen}(2\omega t) \quad (3.5)$$

De este resultado se observa que colocando un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte menor a  $\omega$  junto con un integrador permite obtener  $\overline{I_p}$ , que es un valor estimado de la amplitud de la componente activa de la corriente de carga. Luego,  $\overline{I_p}$  es multiplicada por  $\cos(\omega t)$ , obteniendo en forma estimada la componente activa  $i_p(t)$ . Éste valor luego es

sustraído de la corriente de carga total  $i_L(t)$ , lo que dá como resultado la componente reactiva  $i_q(t)$  instantánea de la corriente de carga.

Finalmente a partir de la corriente  $i_q(t)$  resultante, se obtiene la amplitud  $I_q$ , la que se convierte en valor por unidad  $I_q$  (p.u.) al dividirla por un valor de base para luego ser aplicada a la entrada del convertidor análogo-digital (A/D) [6].



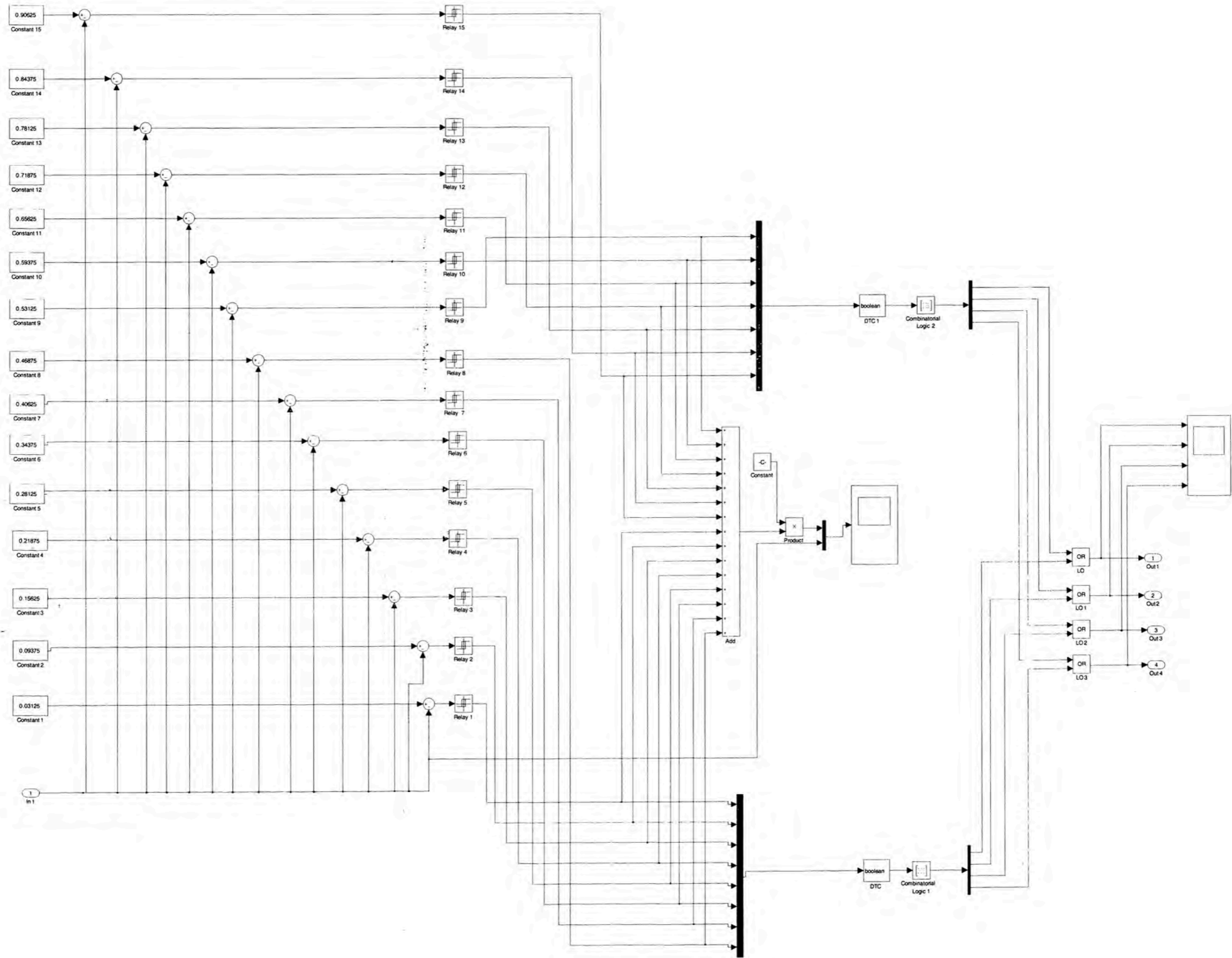
**Fig. 3.7** Diagrama de bloques del filtro de corriente reactiva.

### c) Convertidor A/D

El convertidor A/D de 4 bits transforma la señal analógica de la amplitud de la componente reactiva  $I_q(t)$  de la corriente de carga, a señal digital. La señal  $I_q(t)$  es reducida a un rango de valor entre 0-1.0, para ser leída por el convertidor.

En la figura 3.8 se muestra la estructura de este convertidor en el que la señal es comparada con diversos valores constantes que discretizan la señal como se muestra en la figura 3.9. Se emplean  $2^4 - 1 = 15$  comparadores para obtener  $2^4 = 16$  combinaciones lógicas. Se observa además que las señales de salida de los comparadores ingresan a multiplexores y codificadores, donde se generan las distintas combinaciones de 4 bits correspondientes al valor discreto de la corriente. La señal analógica digitalizada en 4 bits es mostrada en la figura 3.9. Finalmente la figura 3.10 muestra la generación de pulsos para el disparo de los tiristores [7].

PLANO 01



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONVERTIDOR A/D (4 BITS)

PLANO : 1	HOJA : 1/1
ESCALA : S/E	FORMATO : A-3
ARCHIVO : FIGURA 3.8	



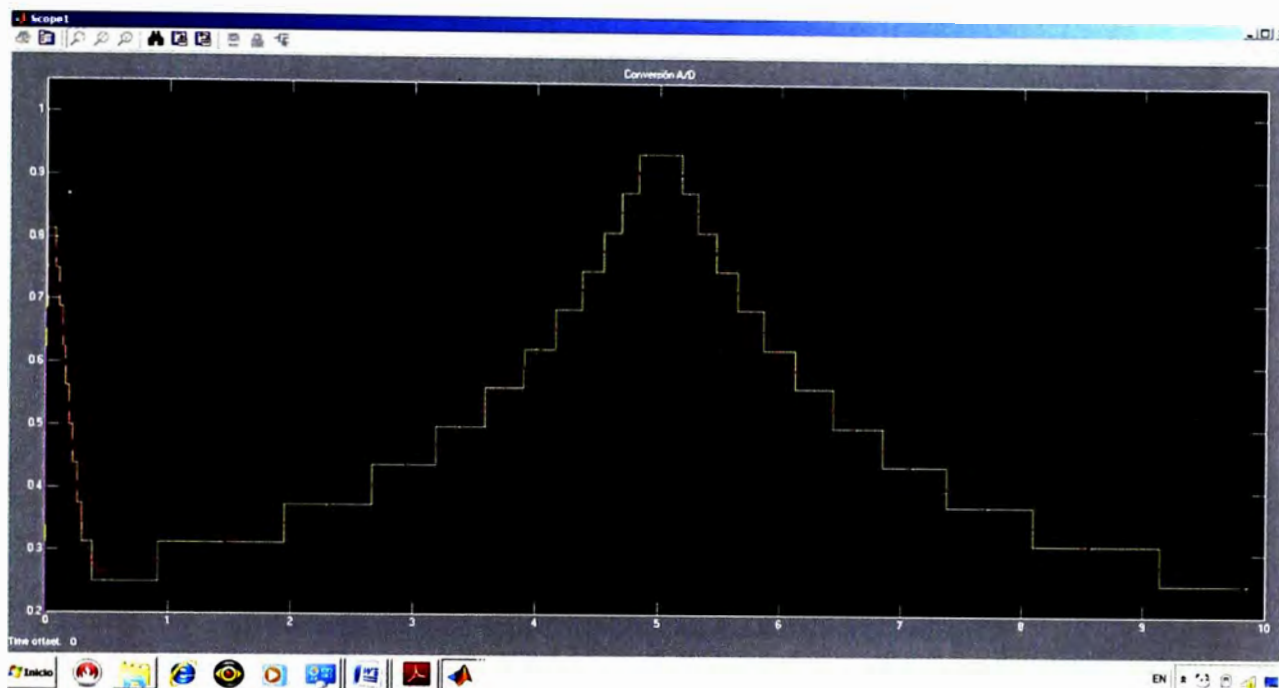


Fig. 3.9 Discretización de la amplitud de la corriente  $I_q(t)$ .

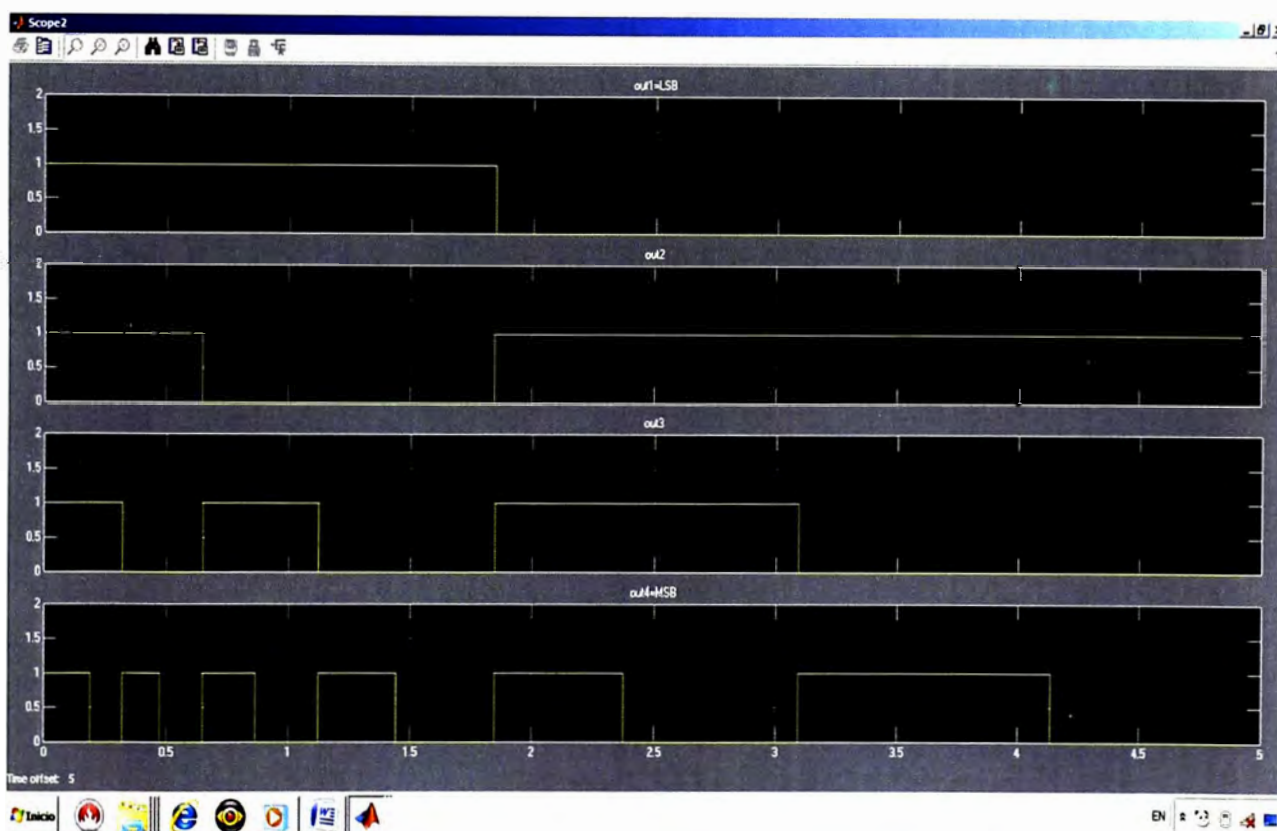


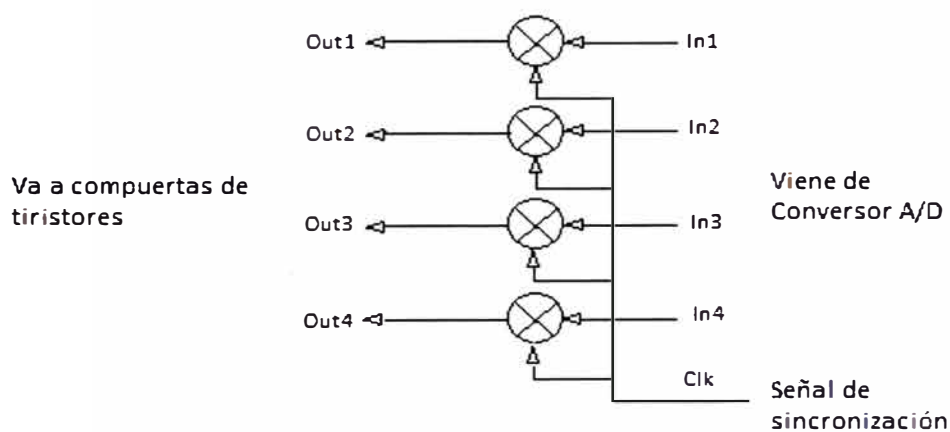
Fig. 3.10 Señal digital de salida de 4 bits del convertidor A/D (convertidor A/D 4 bits) que se emplea para el disparo de los tiristores de los condensadores del sistema de compensación.

**Tabla 3.1**  $2^4 = 16$  combinaciones lógicas generadas por convertidor A/D de 4 bits

Combinaciones lógicas	out4=MSB	out3	out2	out1=LSB
15	1	1	1	1
14	1	1	1	0
13	1	1	0	1
12	1	1	0	0
11	1	0	1	1
10	1	0	1	0
9	1	0	0	1
8	1	0	0	0
7	0	1	1	1
6	0	1	1	0
5	0	1	0	1
4	0	1	0	0
3	0	0	1	1
2	0	0	1	0
1	0	0	0	1
0	0	0	0	0

#### d) Subsistema de lógica de compensación reactiva

El bloque de lógica de compensación reactiva multiplica la señal digital del convertidor A/D por la señal sincronizada de disparo de los tiristores obtenida del sistema de sincronización (clk). De esta forma solo se permite la conexión de los condensadores necesarios para la inyección de corriente capacitiva que compense la corriente reactiva de la carga. Y se atenderán a los cambios de la componente reactiva de la corriente de carga solo en los valores negativos máximos de la tensión de la red evitando así la generación de transitorios en la corriente.



**Fig. 3.11** Lógica de compensación reactiva.

### e) Banco de Condensadores

El banco de condensadores consiste de 4 ramas capacitivas controladas por el disparo de tiristores. Los condensadores se conectan en serie con una inductancia L y una resistencia R para limitar corrientes. Los tiristores son conectados en anti-paralelo con un diodo.

Para el cálculo del valor de la capacitancia C, 2C, 4C y 8C de los condensadores, se parte del valor instantáneo máximo de la corriente reactiva consumida  $i_{q\max}(t) = 40 \text{ A}$  por la carga, es decir, al máximo valor que alcanza la amplitud de la componente reactiva ( $I_{q\max}(t) = 40\text{A}$ ).

Luego:

$$I_c = \frac{I_{q\max}}{\sqrt{2}} = \frac{40 \text{ A}}{\sqrt{2}} = 28.28 \text{ A} \quad (3.5)$$

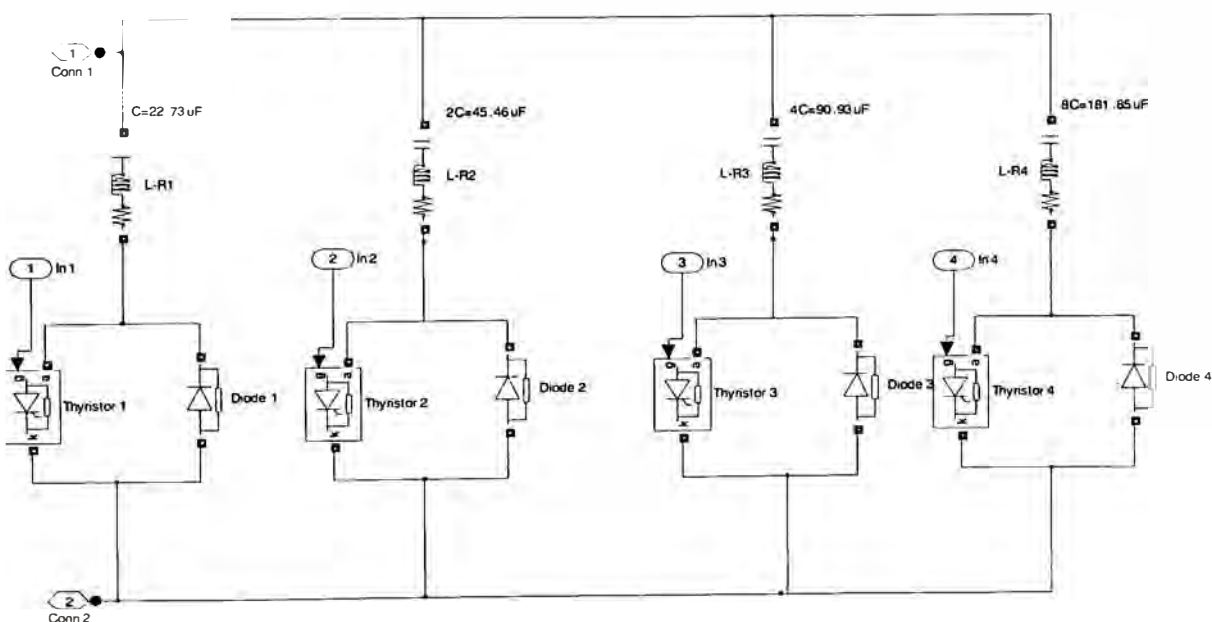
$$X_c = \frac{V_c}{I_c} = \frac{220 \text{ V}}{28.28 \text{ A}} = 7.33 \Omega \quad (3.6)$$

$$15C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{377 \times 7.33} = 340.97 \mu\text{F} \Rightarrow C = 22.73 \mu\text{F} \quad (3.7)$$

Finalmente a partir del valor de C, se calcula los valores del resto de ramas capacitivas:

**Tabla 3.2** Valores de ramas capacitivas

Pasos	C	Capacitor (uF)
1	C	22.73
2	2C	45.46
3	4C	90.93
4	8C	181.85



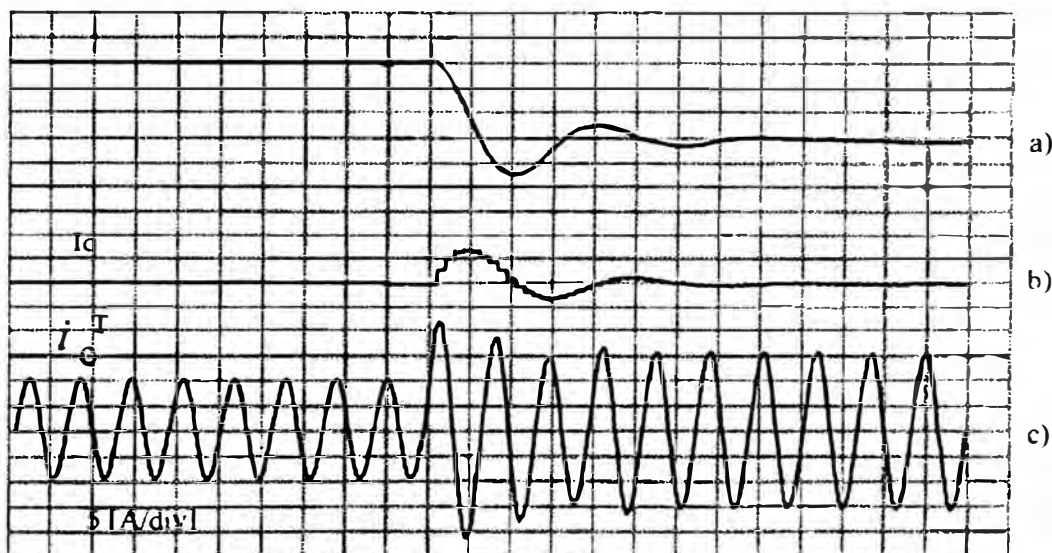
**Fig. 3.12** Esquema eléctrico fase-neutro del banco de condensadores.

Como se describió en la sección 2.3.3, la conmutación del banco debe satisfacer dos condiciones: (1) la variación de tensión al momento de la conexión del condensador debe ser nula, y (2) el voltaje ánodo-cátodo en el tiristor debe ser cero.

## CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE COMPENSACIÓN REACTIVA.

### 4.1 Resultados experimentales del sistema de compensación reactiva publicado por la IEEE (1998)

La figura 4.1 muestra algunas de las señales del sistema de compensación de la figura 3.3 obtenidas experimentalmente. La figura 4.1a muestra el comportamiento de la señal de control “e” de entrada al convertidor A/D. La figura 4.1b muestra comportamiento transitorio de la amplitud de corriente reactiva  $I_q$  que pasa por el cable alimentador y que debe ser mantenido en cero por el sistema de compensación y en la figura 4.1c se observa la variación de corriente inyectada por el banco de condensadores  $i_c^T(t)$ , debido al incremento de carga [1].



**Fig. 4.1** Variación de corriente de compensación  $i_c^T(t)$  debido al incremento de reactivos

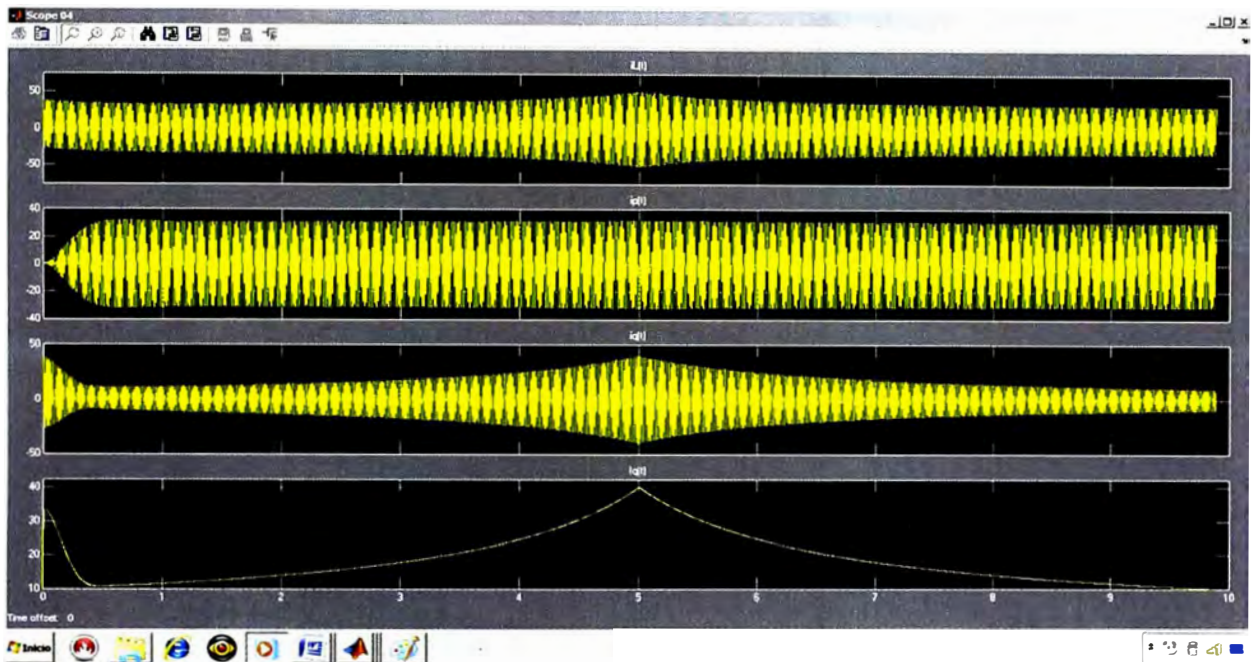
### 4.2 Simulación del sistema de compensación reactiva alternativo

La figura 4.2 muestra el sistema eléctrico y de compensación reactiva monofásico para la corrección del factor de potencia de una carga inductiva variable, desarrollado en el programa Simulink de MATLAB (versión 2007a) [8].



### 4.2.1 Análisis del sistema no compensado

En el circuito de la figura 4.2 se abren los interruptores  $sw1$  y  $sw2$  para observar el comportamiento del sistema eléctrico sin compensación. En la figura 4.3a se muestran la variación de la corriente de carga  $i_L(t)$ , la figura 4.3b muestra la componente activa  $i_p(t)$ , y la figura 4.3c muestra la componente reactiva  $i_q(t)$  de la corriente de carga. En la figura 4.3d se muestra la amplitud de la componente reactiva  $I_q(t)$ .



**Fig. 4.3** Comportamiento de la corriente de carga  $i_L(t)$ , sus componentes activa y reactivas  $i_p(t)$  y  $i_q(t)$ , y la amplitud de la componente reactiva  $I_q(t)$  (sin compensación).

La figura 4.4 muestra: (a) la potencia activa  $P_s(t)$  y reactiva  $Q_s(t)$  absorbida de la red, (b) la potencia activa  $P_L(t)$  y reactiva  $Q_L(t)$  consumida por la carga, (c) el factor de potencia del sistema y la carga. Cada señal representada con color amarillo y magenta respectivamente.

De los resultados de simulación se observa que el factor de potencia comienza a decrecer a medida que la carga consume mayor potencia reactiva  $Q_L$ . La potencia activa  $P_L$  se mantiene en todo momento constante e igual a 4972 W. El rango de factor de potencia de la carga varía entre 0.62 y 0.94 cuando el consumo de reactivos varía de 6,221 a 1,709 VARs.

PLANO 02



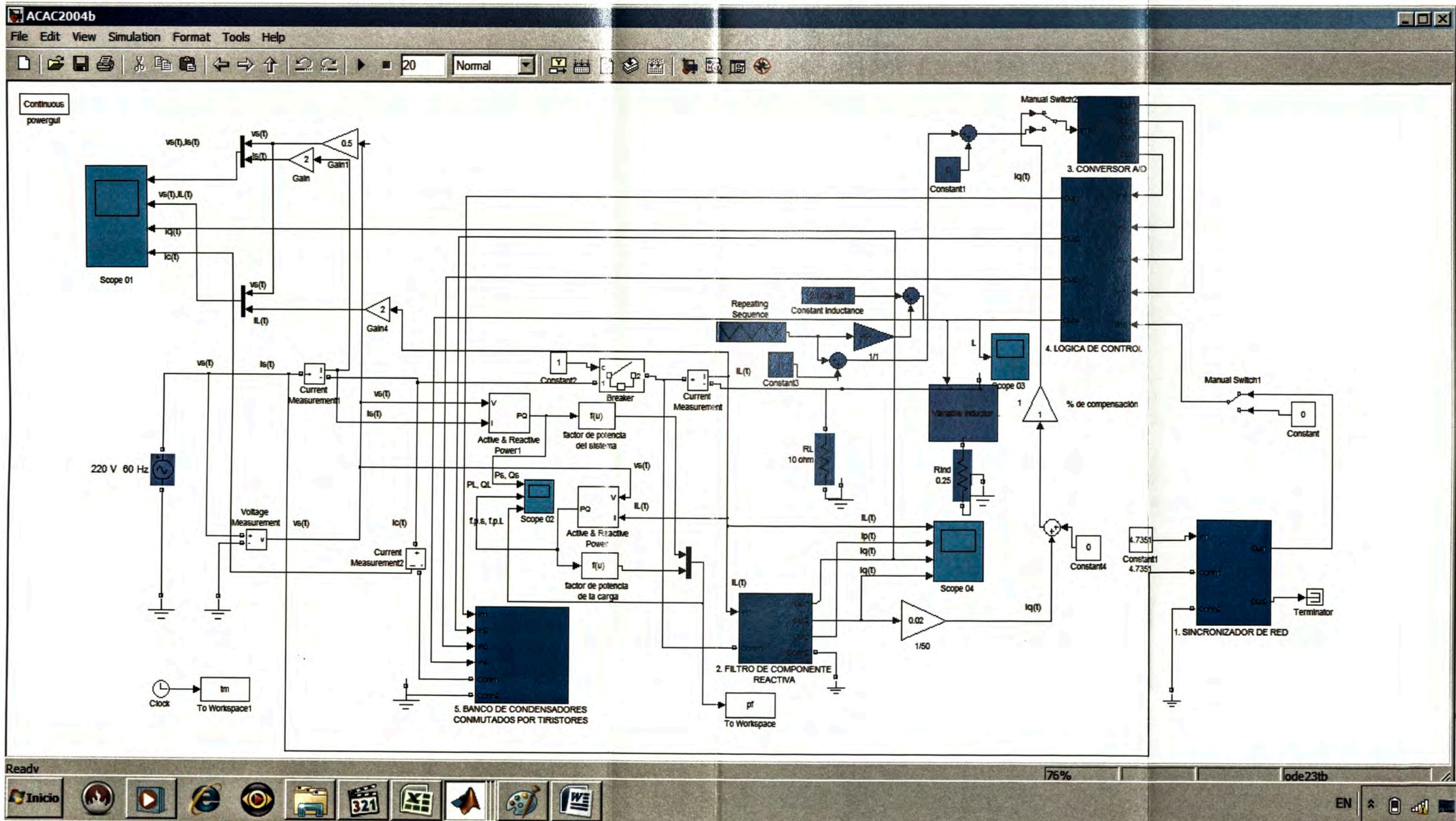
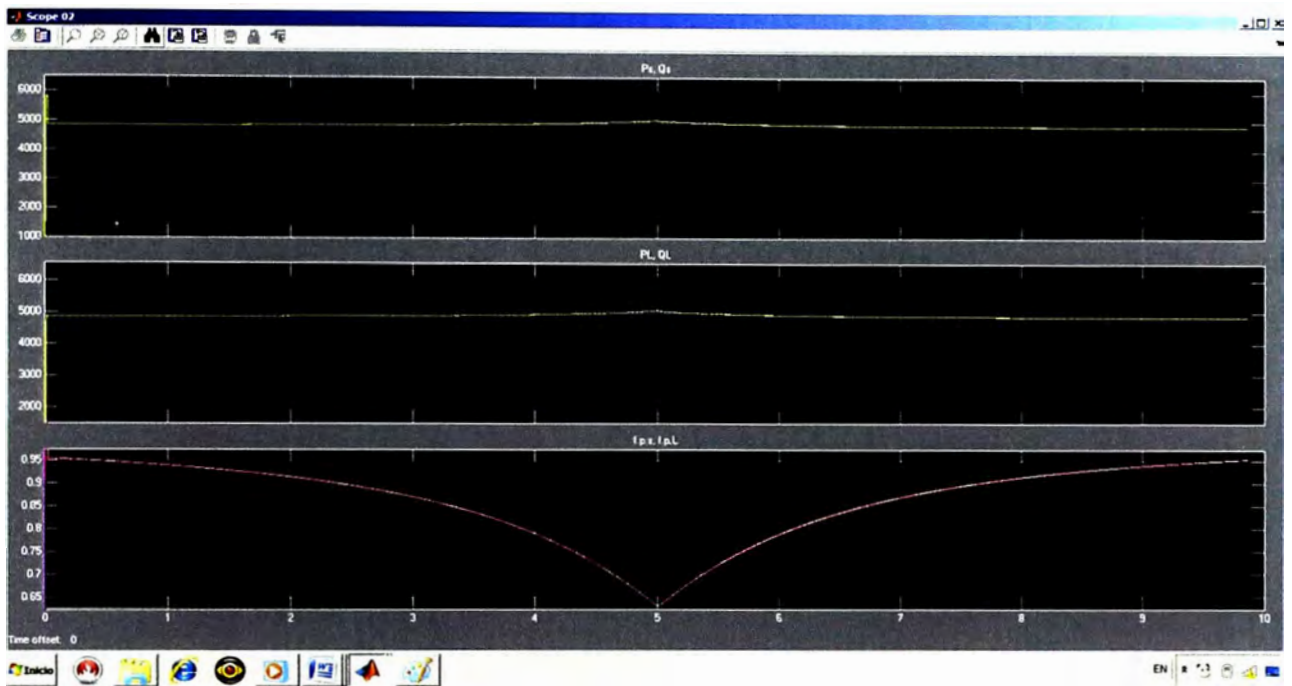


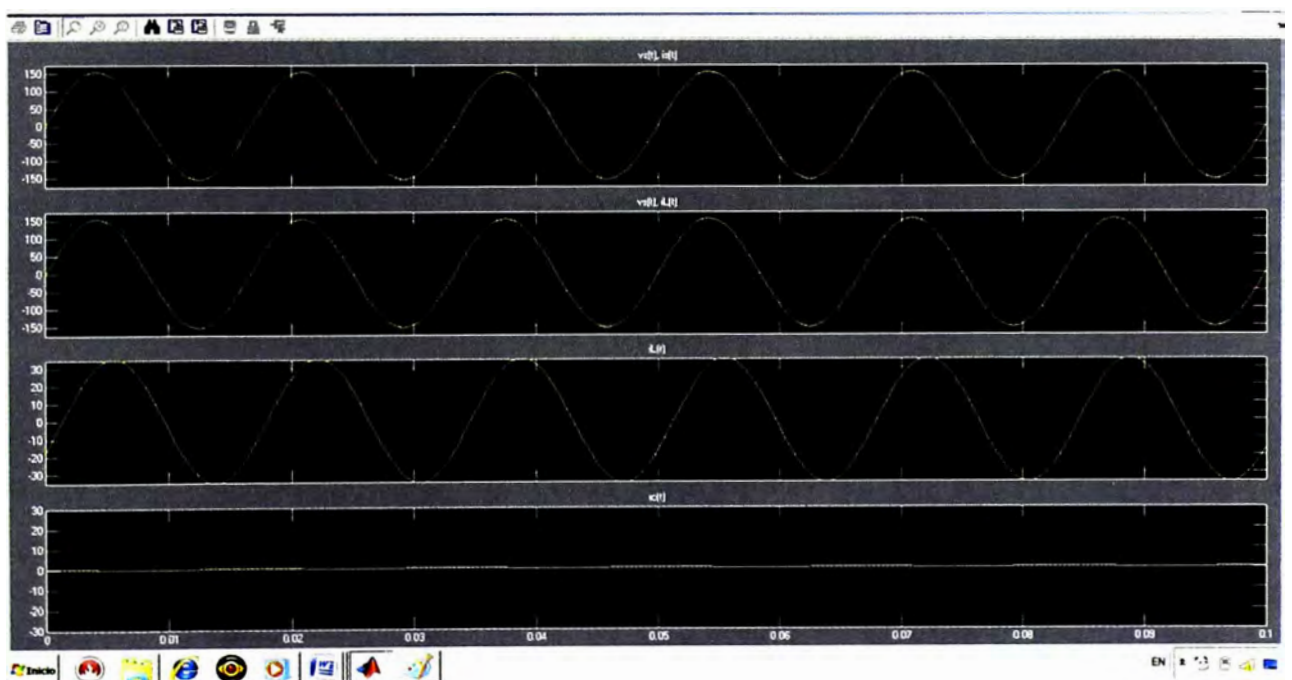
Fig. 4.2 Simulación del sistema eléctrico y de compensación reactiva para corrección del factor de potencia.





**Fig. 4.4** Potencia activa, reactiva y el factor de potencia del sistema y carga (sin compensación).

En la figura 4.5 se observa: a) el desfase entre la corriente  $i_S(t)$  y la tensión del sistema  $v_S(t)$ , b) el desfase entre la corriente de carga  $i_L(t)$  y la tensión del sistema  $v_S(t)$ , c) la corriente de carga  $i_L(t)$ , y d) la corriente de inyección del banco de condensadores  $i^T_C(t)$  que es igual a cero debido a que el sistema de compensación está desactivado.

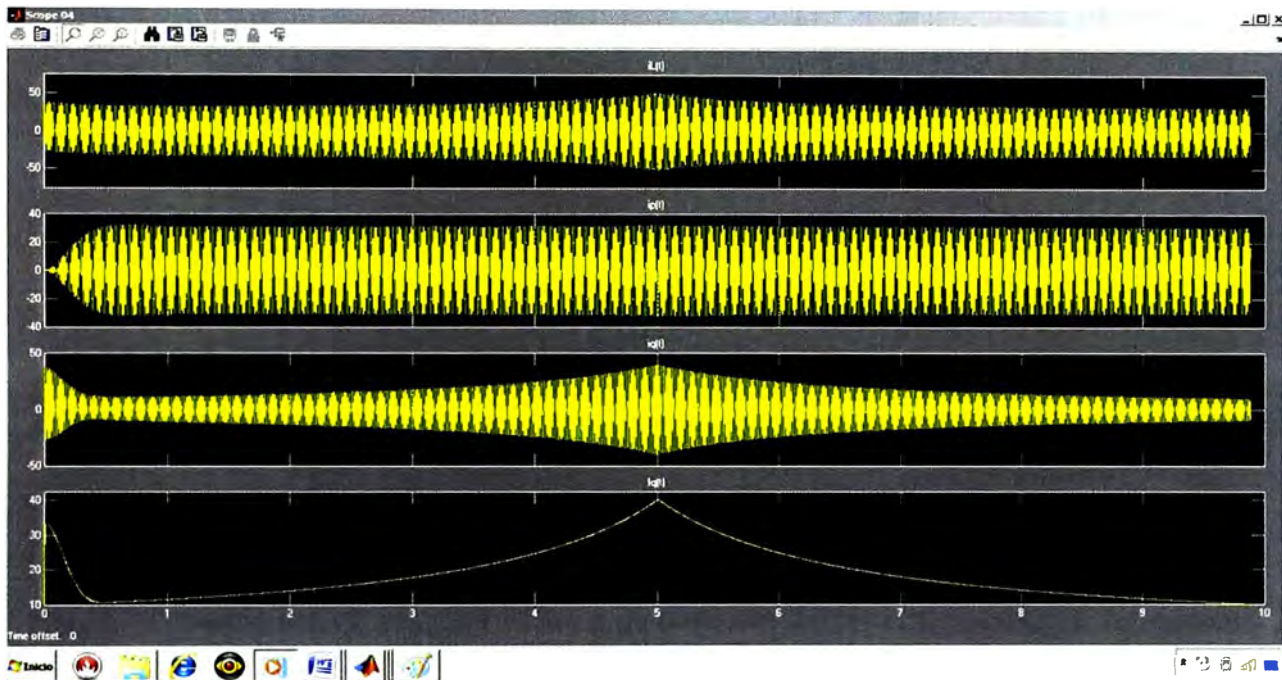


**Fig. 4.5** Desfase de la corriente del sistema  $i_S(t)$  respecto a la tensión  $v_S(t)$ .

#### 4.2.2 Análisis del sistema compensado (f.p.=1.00)

A fin de compensar el sistema, se cierran los interruptores sw1 y sw2 en el esquema de la figura 4.2 para activar el convertidor A/D y el sincronizador. La combinación de ambos bloques creará la lógica de disparo para activación de los tiristores.

La figura 4.6 muestra el mismo comportamiento de las corrientes de carga de la figura 4.3, debido a que su consumo es independiente del sistema de compensación.



**Fig. 4.6** Comportamiento de la corriente de carga  $i_L(t)$ , sus componentes activa  $i_p(t)$  y reactiva  $i_q(t)$ , y la amplitud de la componente reactiva  $I_q(t)$  (compensado).

La figura 4.7 muestra: (a) la potencia activa y reactiva del sistema  $P_S(t)$  y  $Q_S(t)$ . En este caso la potencia activa del sistema es constante mientras que la potencia reactiva tiende a mantener su valor igual a cero. La potencia reactiva se comporta según la ecuación  $Q_S(t) = Q_L(t) + Q_C(t) = 0$ , por lo cual  $Q_C(t) = -Q_L(t)$ . b) la potencia activa y reactiva de la carga es igual que el caso en que no hay compensación, como se muestra en la figura 4.4. c) el factor de potencia del sistema “fps” tiende a mantener su valor igual a 1.00, mientras que el factor de potencia de la carga “fp<sub>L</sub>” varía entre los valores 0.62 a 0.94, descritos líneas arriba.

La corrección del factor de potencia de la red se hará automáticamente según el requerimiento de corriente reactiva  $i_q(t)$ .

La figura 4.8 muestra: a) la corrección del desfase entre la tensión  $v_s(t)$  y la corriente del sistema  $i_s(t)$  o de la red, b) el desfase entre la corriente de carga  $i_L(t)$  y la tensión del sistema  $v_s(t)$ , c) la corriente de carga  $i_L(t)$ , y d) la variación de corriente de inyección del banco de condensadores  $i^T_c(t)$ .

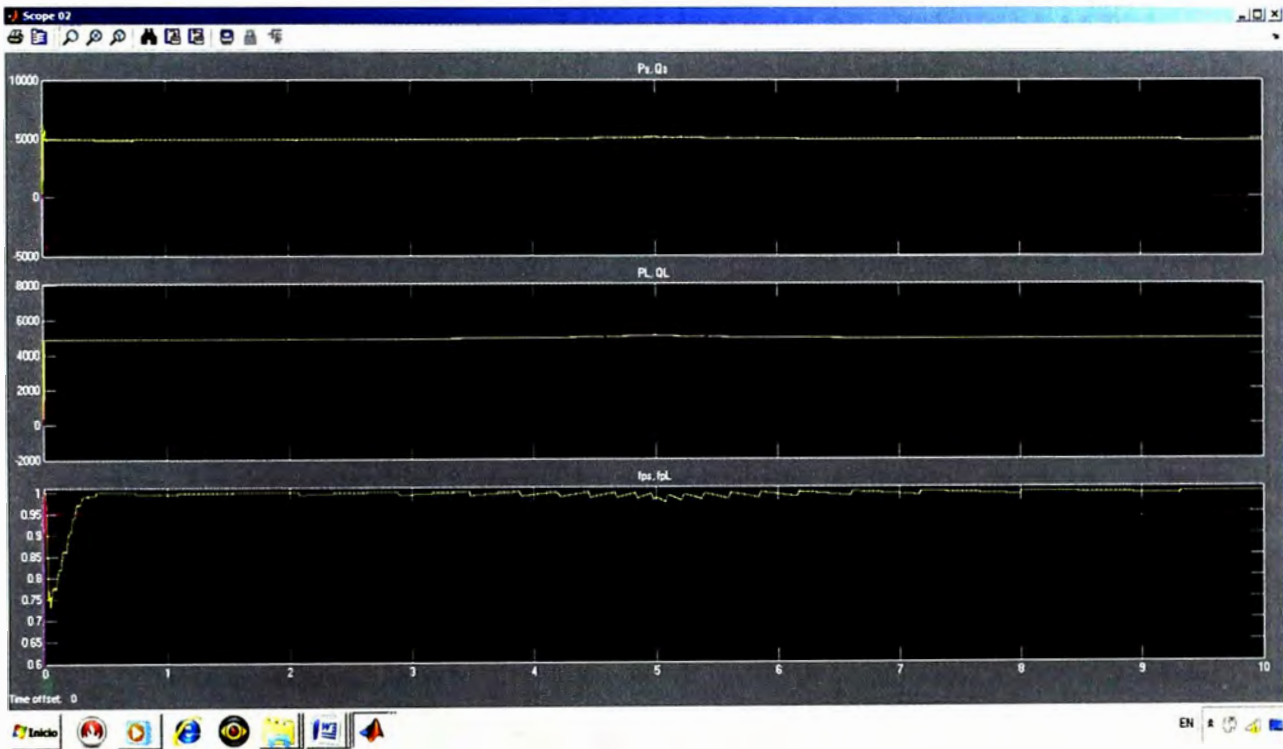


Fig. 4.7 Potencia activa, reactiva y factor de potencia del sistema y carga (compensado).

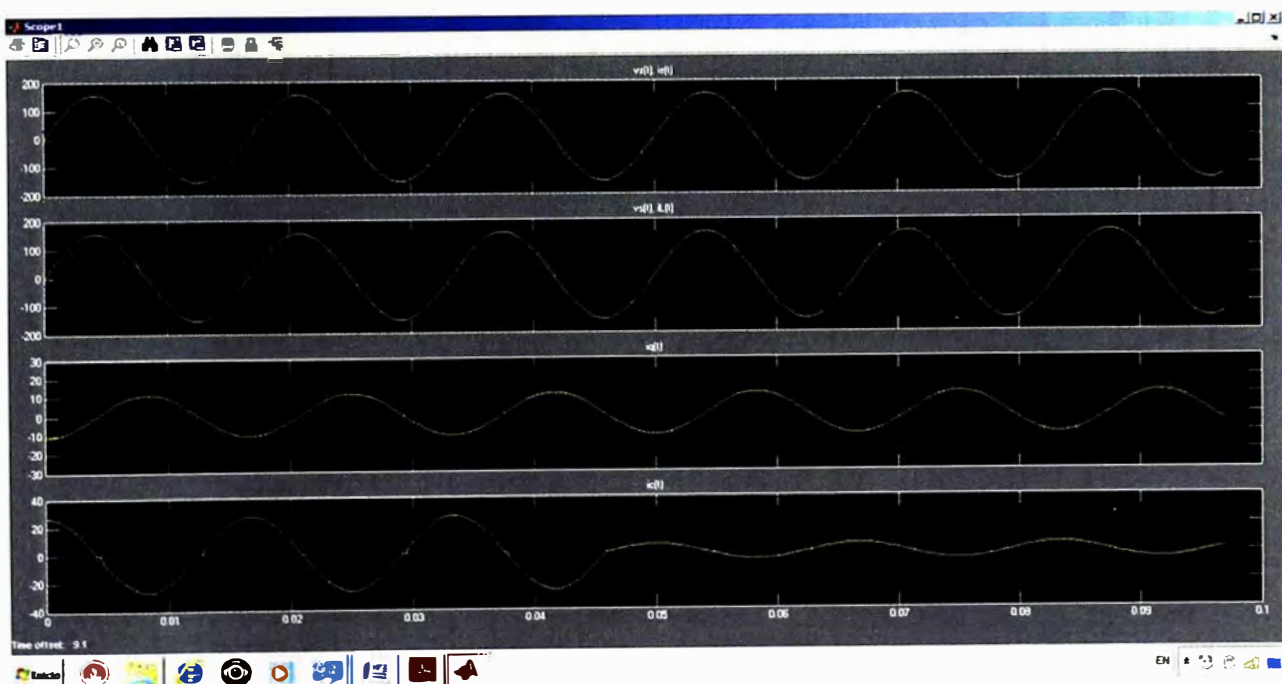


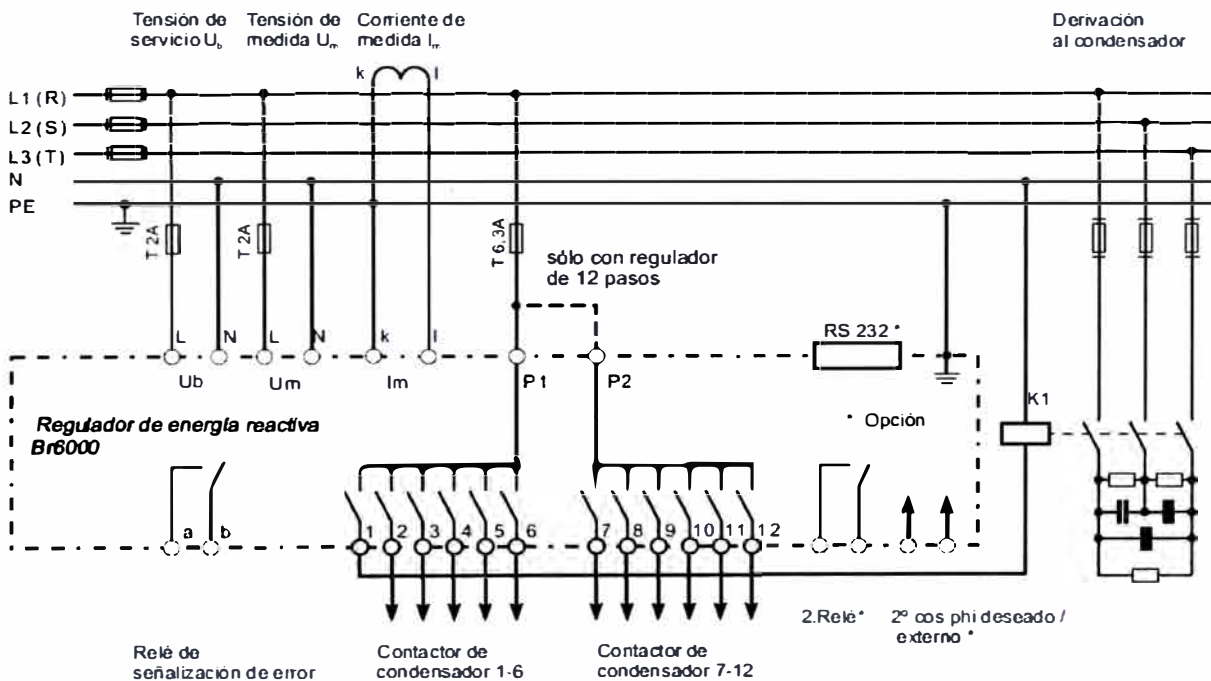
Fig. 4.8 Corrección del desfase entre la corriente y tensión del sistema  $i_s(t)$  y  $v_s(t)$   
(f.p.=1.00)

## CAPÍTULO V ANÁLISIS DE COSTOS DE LOS SISTEMAS DE COMPENSACIÓN.

En este capítulo se realiza la estimación de costos de los principales componentes de los sistemas de compensación automático y estático. No se incluyen costos por ferretería, equipos de medición, fusibles, cables y consumibles menores.

### 5.1 Análisis de Costos de un Sistema de compensación Automático

La tabla 5.1 muestra los principales componentes utilizados para un sistema de compensación automático.



**Fig. 5.1** Sistema de compensación automática con regulador programable de energía reactiva.



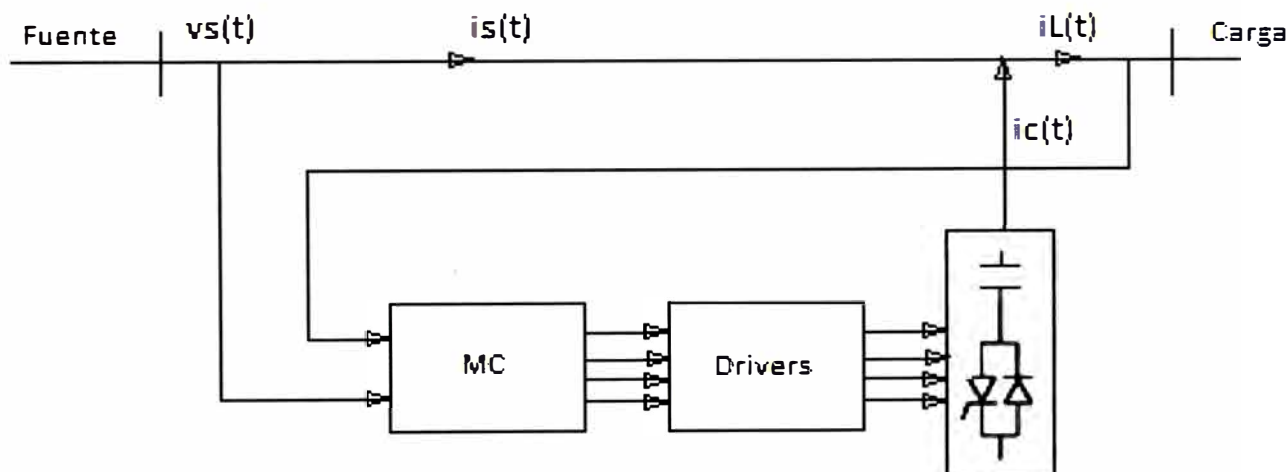
**Tabla 5.1** Lista de precios por fase de componentes principales de un compensador automático [11].

it.	Componentes	Marca	cant.	p.u. USD	precio total USD
1	Regulador Electrónico	Epcos	1	720.00	720.00
2	Contactador	Epcos	4	152.00	608.00
3	Condensador	Epcos	4	185.00	740.00
<b>Total USD</b>					<b>2,068.00</b>

## 5.2 Análisis de Costos de un Sistema de compensación Estático

Las funciones lógicas mostrados en las figuras 3.3 y 3.5 se programan en un microcontrolador. Las señales de disparo de éste son amplificadas por drivers y direccionadas a las compuertas de los tiristores.

La tabla 5.2 muestra los principales componentes utilizados para un sistema de compensación estático.



**Fig. 5.2** Sistema de compensación estático con microcontrolador y drivers.

**Tabla 5.2** Lista de precios por fase de componentes principales de un compensador reactivo [9],[10].

it.	Componentes	Marca	cant.	p.u. USD	precio total USD
1	Microprocesador (DSP+MC)	Texas Instrument	1	200.00	200.00
2	Driver	Semikron	4	175.00	700.00
3	Tiristor/Diodo	Semikron	4	82.00	328.00
4	Condensador	Epcos	4	185.00	740.00
<b>Total USD</b>					<b>1,968.00</b>

## CONCLUSIONES

1. La compensación reactiva por conmutación de capacitores a través de tiristores ofrece mayores ventajas sobre otras técnicas de compensación como por ejemplo, los bancos de condensadores automáticos que usan contactores.
2. La aplicación de un sistema de corrección del factor de potencia por conmutación de capacitores mediante tiristores, se justifica si las cargas son de comportamiento dinámico.
3. La simulación del sistema de compensación reactiva propuesto muestra que durante la conmutación, no se generan corrientes transitorias. Esto permite obtener un número ilimitado de operaciones sin causar daños a los equipos ni disminuir la calidad del sistema. Se muestra además una rápida respuesta de compensación (en ciclos).
4. El sistema de compensación reactiva alternativo, en comparación al publicado por la IEEE, no emplea los subsistemas “Cruce por cero” ni “S&H”, lo que hace más sencilla la programación del microcontrolador.
5. El sistema alternativo permite regular el porcentaje de compensación deseado (f.p.≠1.00)
6. La configuración binaria del banco de condensadores permite usar un menor número de ramas capacitivas que el que sería necesario para compensar la misma demanda de reactivos del sistema.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: CATÁLOGO DE PRODUCTOS EPCOS PARA CORRECCIÓN DEL  
F.P.**



# Capacitores PhiCap<sup>R</sup>

Capacitor autorregenerable, con fusible interno de seguridad, montado en recipiente cilíndrico de aluminio provisto de perno inferior para fijación (M12)

## Trifásicos 400/415V



Certificación IRAM según normas :  
IEC 60831- 1  
IEC 60831- 2  
Tensión nominal 400/415V  
Servicio interior

Potencia	Dimensiones ( d x h )
0,5 kvar x 3 x 400/415V	53 x 114 mm (1)
0,75 kvar x 3 x 400/415V	53 x 114 mm (1)
1 kvar x 3 x 400/415V	53 x 114 mm (1)
2 kvar x 3 x 400/415V	63,5 x 129 mm (1)
2,5 kvar x 3 x 400/415V	63,5 x 129 mm (1)
5 kvar x 3 x 400/415V	63,5 x 129 mm (1)
7,5 kvar x 3 x 400/415V	79,5 x 198 mm (2)
10 kvar x 3 x 400/415V	79,5 x 198 mm (2)
12,5 kvar x 3 x 400/415V	89,5 x 273 mm (2)
15 kvar x 3 x 400/415V	89,5 x 273 mm (2)

- (1) Considerar 12mm adicionales por la altura de los terminales  
(2) Considerar 40mm adicionales por la altura de la bornera de conexión

## Monofásicos 400/415V



Certificación IRAM según normas :  
IEC 60831- 1  
IEC 60831- 2  
Tensión nominal 400/415V  
Servicio interior

Potencia	Dimensiones ( d x h )
1,7 kvar x 400/415V (33 μF)	63,5 x 68 mm (1)
3,3 kvar x 400/415V (66,7 μF)	63,5 x 105 mm (1)
4,2 kvar x 400/415V (83,3 μF)	63,5 x 142 mm (1)
5,0 kvar x 400/415V (100 μF)	63,5 x 142 mm (1)

- (1) Considerar 12mm adicionales por la altura de los terminales

## Monofásicos 440V

Especialmente diseñados para ser utilizados en redes con una tensión mayor a la nominal (ej.: en proximidad de transformadores MT/BT).

Es importante considerar que la potencia nominal está expresada para una tensión de 440V.

Si estos capacitores son conectados a una tensión de 400V, la potencia efectiva es algo menor (ver tabla)

Potencia (en 440V)	Potencia (en 400V)	Dimensiones ( d x h )
3,3 kvar x 440V (54,3 μF)	2,7 kvar	63,5 x 105 mm (1)
4,2 kvar x 440V (69,1 μF)	3,4 kvar	63,5 x 142 mm (1)
5,0 kvar x 440V (82,3 μF)	4,1 kvar	63,5 x 142 mm (1)

- (1) Considerar 12mm adicionales por la altura de los terminales

# Capacitores PhaseCap<sup>R</sup>

**Capacitor autorregenerable, con triple fusible interno de seguridad, encapsulado en gas inerte, con recipiente cilíndrico de aluminio provisto de perno inferior para fijación.**

**Origen : Europa**

**Encapsulado seco : el envase está encapsulado con gas inerte (Nitrógeno)**

**Mayor vida útil : hasta 115.000 hs (en condiciones nominales de aplicación)**

**Diseño reforzado : soporta grandes corrientes de inserción (hasta 200 x In)**

**Resistencias de descarga : integradas dentro de la bornera de conexión ; mayor seguridad contra contactos accidentales (IP20 según VDE 0106, parte 100)**

**Certificación UL : según norma UL-810**

## Trifásicos 400V



Potencia	Dimensiones ( d x h )
7,5 kvar x 3 x 400V	121 x 164 mm (1)
12,5 kvar x 3 x 400V	121 x 164 mm (1)
15,0 kvar x 3 x 400V	121 x 164 mm (1)
25,0 kvar x 3 x 400V	121 x 200 mm (1)

(1) Considerar 40mm adicionales por la altura de la bornera de conexión

## Trifásicos 440V

Especialmente diseñados para ser utilizados en redes con una tensión mayor a la nominal (ej.: en proximidad de transformadores MT/BT).

Es importante considerar que la potencia nominal está expresada para una tensión de 440V.

Si estos capacitores son conectados a una tensión de 400V, la potencia efectiva es algo menor (ver tabla)

Potencia (en 440V)	Potencia (en 400V)	Dimensiones ( d x h )
7,5 kvar x 3 x 440V (2)	6,15 kvar	121 x 164 mm (1)
12,5 kvar x 3 x 440V	10,2 kvar	121 x 164 mm (1)
15 kvar x 3 x 440V (3)	12,3 kvar	121 x 164 mm (1)
25 kvar x 3 x 440V	20,5 kvar	142 x 200 mm (1)
28,2 kvar x 3 x 440V (4)	23,1 kvar	142 x 200 mm (1)

(1) Considerar 40mm adicionales por la altura de la bornera de conexión

(2) Equivalente a 6,25 kvar x 3 x 400V

(3) Especial para usar con filtro desintonizado 12,5 kvar / f=189Hz / p=7%

(4) Especial para usar con filtro desintonizado 25 kvar / f=189Hz / p=7%

## Productos especiales

También se encuentran disponibles (bajo pedido), los siguientes capacitores para aplicaciones especiales.

Tensión	Monofásicos	Trifásicos
480V	-	6,25 / 30,0 kvar
525V	10 / 18,6 kvar	8,3 / 30,0 kvar
690V	-	5,0 / 25,0 kvar
800V	-	5,0 / 25,0 kvar

## Sistemas Automáticos

**Sistemas para la corrección automática centralizada del Factor de Potencia, se entregan listos para su instalación.**

### Línea 2RA



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)
- Capacitores ELECOND PhiCap
- Contactores SIEMENS
- Protección general por Interruptor TM SIEMENS
- Gabinete metálico 450 x 300 x 175 mm

Modelo	Potencia	Configuración
2RA-0050	5 kvar	1 + 2 + 2
2RA-0075	7,5 kvar	2,5 + 5
2RA-0100	10 kvar	2,5 + 2,5 + 5
2RA-0125	12,5 kvar	2,5 + 5 + 5
2RA-0150	15 kvar	5 + 5 + 5

### Línea 2RB



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)
- Capacitores ELECOND PhiCap
- Contactores SIEMENS
- Protección general por Interruptor TM SIEMENS
- Gabinete metálico 600 x 300 x 175 mm

Modelo	Potencia	Configuración
2RB-0150	15 kvar	2,5 + 5 + 7,5
2RB-0175	17,5 kvar	2,5 + 5 + 10
2RB-0200	20 kvar	5 + 5 + 10
2RB-0250	25 kvar	5 + 10 + 10

### Línea 2RC



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)
- Capacitores ELECOND PhiCap
- Contactores SIEMENS / EPCOS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Gabinete metálico 900 x 400 x 250 mm

Modelo	Potencia	Configuración
2RC-0300	30 kvar	5 + 10 + 15
2RC-0375	37,5 kvar	7,5 + 15 + 15
2RC-0450	45 kvar	2 x 7,5 + 2 x 15
2RC-0525	52,5 kvar	7,5 + 3 x 15
2RC-0600	60 kvar	2 x 7,5 + 3 x 15
2RC-0675	67,5 kvar	7,5 + 4 x 15
2RC-0750	75 kvar	5 x 15

## Línea 2SE



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)
- Opcional : Regulador EPCOS BR6000
- Capacitores ELECOND PhiCap
- Contactores SIEMENS / EPCOS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Gabinete metálico
- Dimensiones :
  - 1000 x 400 x 250 mm (90/105kVAr)
  - 1200 x 600 x 250 mm (120/135kVAr)
  - 1200 x 750 x 250 mm (150/165kVAr)
- Ventilación forzada

Modelo	Potencia	Configuración
2SE-0900	90 kvar	2 x 15 + 2 x 30
2SE-1050	105 kvar	15 + 3 x 30
2SE-1200	120 kvar	2 x 15 + 3 x 30
2SE-1350	135 kvar	15 + 4 x 30
2SE-1500	150 kvar	5 x 30
2SE-1650	165 kvar	15 + 5 x 30

## Línea 2JE



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)
- Opcional : Regulador EPCOS BR6000
- Capacitores ELECOND PhiCap
- Contactores EPCOS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Gabinete metálico
- 1500 x 900 x 350 mm
- Ventilación forzada

Modelo	Potencia	Configuración
2JE-1800	180 kvar	6 x 30
2JE-1950	195 kvar	15 + 2 x 30 + 2 x 60
2JE-2100	210 kvar	3 x 30 + 2 x 60
2JE-2250	225 kvar	15 + 3 x 30 + 2 x 60
2JE-2400	240 kvar	2 x 30 + 3 x 60
2JE-2550	255 kvar	15 + 2 x 30 + 3 x 60
2JE-2700	270 kvar	30 + 4 x 60

## Línea 2SK



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)
- Opcional : Regulador EPCOS BR6000
- Capacitores ELECOND PhiCap
- Contactores EPCOS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Gabinete modular SIEMENS Línea SIKUS
- 2200 x 700 x 600 mm
- Opcional : Ventilación forzada

Modelo	Potencia	Configuración
2SK-3000	300 kvar	2 x 30 + 4 x 60
2SK-3300	330 kvar	30 + 5 x 60
2SK-3600	360 kvar	6 x 60
2SK-3900	390 kvar	30 + 6 x 60
2SK-4200	420 kvar	7 x 60

Por su concepto modular, los gabinetes SIKUS pueden ser agrupados formando conjuntos de mayor potencia. Sugerimos consultar en caso de requerir equipos de mayor potencia o configuraciones especiales.

### Línea 2RD



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)  
Opcional : Regulador EPCOS BR6000
- Capacitores SIEMENS PhaseCap
- Contactores SIEMENS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Protecciones parciales (por paso) Fusibles NH SIEMENS
- Gabinete metálico
- Dimensiones : 1000 x 500 x 350 mm
- Ventilación forzada

Modelo	Potencia	Configuración
2RD0450	45 kvar	2 x 7,5 + 2 x 15
2RD-0525	52,5 kvar	7,5 + 3 x 15
2RD-0600	60 kvar	2 x 7,5 + 3 x 15
2RD-0675	67,5 kvar	7,5 + 4 x 15
2RD-0750	75 kvar	5 x 15

### Línea 2RE



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)  
Opcional : Regulador EPCOS BR6000
- Capacitores SIEMENS PhaseCap
- Contactores SIEMENS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Protecciones parciales (por paso) Fusibles NH SIEMENS
- Gabinete metálico
- Dimensiones : 1200 x 750 x 350 mm
- Ventilación forzada

Modelo	Potencia	Configuración
2RE0875	87,5 kvar	12,5 + 3 x 25
2RE1000	100 kvar	2 x 12,5 + 3 x 25
2RE1125	112,5kvar	12,5 + 4 x 25
2RE1250	125 kvar	5 x 25

### Línea 2RF



- Regulador electrónico EPCOS BR450 (origen : Italia)  
Opcional : Regulador EPCOS BR6000
- Capacitores SIEMENS PhaseCap
- Contactores SIEMENS
- Protección general por Secc-Fusible NH SIEMENS
- Protecciones parciales (por paso) Fusibles NH SIEMENS
- Gabinete metálico
- Dimensiones : 1500 x 900 x 350 mm
- Ventilación forzada

Modelo	Potencia	Configuración
2RF1500	150 kvar	6 x 25
2RF1750	175 kvar	5 x 25 + 50
2RF2000	200 kvar	4 x 25 + 2 x 50
2RF2250	225 kvar	3 x 25 + 3 x 50
2RF2500	250 kvar	5 x 50
2RF3000	300 kvar	6 x 50



## Línea 4RY



- Regulador electrónico EPCOS BR6000 (origen : Alemania)
- Capacitores SIEMENS PhaseCap
- Contactores SIEMENS / EPCOS
- Protecciones parciales (por paso)
- Fusibles NH SIEMENS
- Gabinete modular SIEMENS Línea SIKUS (2200 x 700 x 600 mm)
- Opcional : Ventilación forzada
- Opcional : Elemento de maniobra y protección general

Modelo	Potencia	Configuración
4RY2000	200 kvar	4 x 25 + 2 x 50
4RY2250	225 kvar	3 x 25 + 3 x 50
4RY2500	250 kvar	2 x 25 + 4 x 50
4RY3000	300 kvar	6 x 50
4RY3500	350 kvar	7 x 50
4RY4000	400 kvar	8 x 50
4RY4500	450 kvar	9 x 50
4RY5000	500 kvar	10 x 50
4RY6000	600 kvar	12 x 50
4RY7000	700 kvar	10 x 50 + 2 x 100
4RY8000	800 kvar	8 x 50 + 4 x 100
4RY9000	900 kvar	6 x 50 + 6 x 100
4RY10000	1000 kvar	4 x 50 + 8 x 100

Por su concepto modular, los gabinetes SIKUS pueden ser agrupados formando conjuntos de mayor potencia. Sugerimos consultar en caso de requerir equipos de mayor potencia o configuraciones especiales.

## Equipos especiales

ELECOND CAPACITORES S.A. puede diseñar y construir equipos especiales según los requisitos particulares de cada tipo de aplicación.

Ejemplos :

- Equipos automáticos con configuraciones especiales (pasos fijos para compensación de transformadores, etc.)
- Equipos automáticos con filtros desintonizados (para instalaciones con elevado contenido de armónicas)
- Equipos automáticos con módulos de tiristores (para compensación en "tiempo real")

## Regulador electrónico EPCOS BR6000 (Origen : Alemania)

- Disponibles en versiones de 6 ó 12 salidas
- Memorización de datos históricos de aplicación
- Lectura de los principales parámetros eléctricos de la instalación

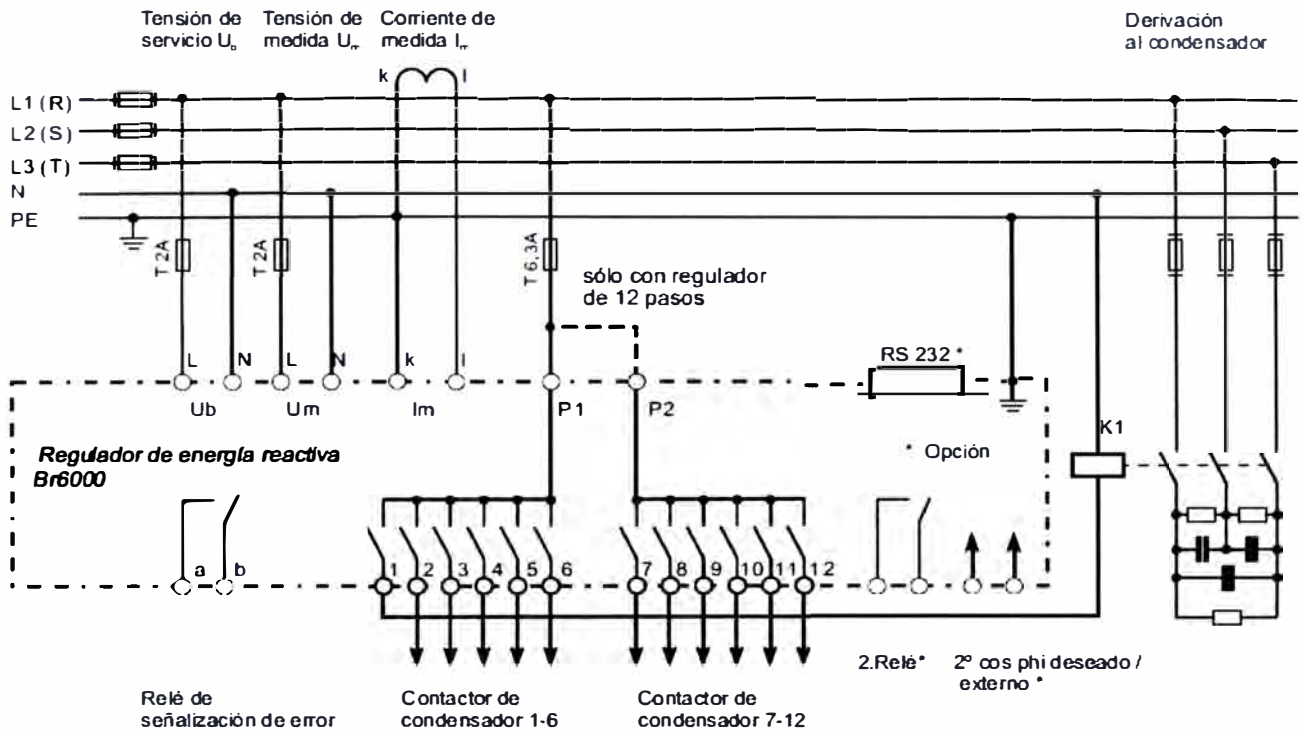


### También disponible en versiones especiales :

- Salidas transistorizadas para tiristores (corrección del Factor de Potencia en tiempo real)
- Interface RS232 ó RS485

Característica	Especificación
Dimensiones	144 x 144 x 55 mm
Cantidad de salidas	6 ó 12
Tensión de alimentación	220 Vca / 110 Vca (seleccionable)
Modo de funcionamiento	Manual / automático
Sensor interno de temp.	Si
Tiempo de conexión	Regulable entre 1 / 1200 seg.
Tiempo de desconexión	Regulable entre 1 / 1200 seg.
Tiempo de reconexión	Regulable entre 1 / 1200 seg.
Coseno Phi	Regulable entre 0,80 ind / 0,80 cap.
Memorización	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valores máximos de Tensión, Energía Reactiva, Energía Activa, Energía Aparente, Temperatura, THD</li> <li>- Número de conexiones de cada salida</li> <li>- Tiempo de funcionamiento (de cada capacitor)</li> <li>- Errores : registra los últimos 8 errores</li> </ul>
Lecturas en display	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Factor de Potencia (Cos Phi)</li> <li>- Tensión del sistema (en V)</li> <li>- Corriente aparente (en A)</li> <li>- Potencia Reactiva (en kvar)</li> <li>- Potencia Activa (en kW)</li> <li>- Potencia Aparente (en kVA)</li> <li>- <math>\Delta kVA_r</math> (Potencia necesaria para lograr el Coseno Phi programado)</li> <li>- Frecuencia (en Hz)</li> <li>- Temperatura (en °C)</li> <li>- Contenido armónico (de 3° a 19°) (V en % I en %) carga de corriente sobre los capacitores debido a armónicas</li> <li>- Armónicas (THD-V en % ; THD/I en %)</li> </ul>
Alarmas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Subcompensación</li> <li>- Sobrecompensación</li> <li>- Sobrecorriente</li> <li>- Tensión de medición</li> <li>- Sobretemperatura</li> <li>- Sobretensión</li> <li>- Baja tensión</li> <li>- Baja corriente</li> <li>- Cantidad de maniobras</li> <li>- Armónicas</li> </ul>

# BR 6000 esquema de conexión





## Reactores para filtro de armónicas

**Especialmente diseñados para equipos con filtros desintonizados de armónicas**

Los capacitores para CFP forman un circuito resonante al ser conectados en paralelo con el transformador MT/BT. La experiencia muestra que la frecuencia de resonancia de este circuito se ubica generalmente entre 250Hz y 500Hz (frecuencias correspondientes a 5ª y 7ª armónica respectivamente).

Este fenómeno puede ser evitado conectando reactores de filtro en serie con los capacitores.



Potencia	Frecuencia de resonancia	Desintonía
6,2 kvar	134Hz	$p = 14\%$
12,5 kvar	Para sistemas con 3ª armónica predominante	ó
25 kvar	189Hz	$p = 7\%$
50 kvar	Para sistemas con 5ª armónica predominante	

## Módulos de tiristores

**Para la maniobra automática de capacitores en tiempo real (<20ms)**

En algunas aplicaciones las variaciones de carga son tan bruscas que un sistema de compensación convencional con contactores electromagnéticos, no resulta apto.

Por medio de estos módulos de tiristores, los capacitores son conectados en forma instantánea sin diferencia de tensión con la red: esto hace que no sea necesario esperar el tiempo de descarga.

Esta característica evita también las perturbaciones provocadas en la red por la maniobra de los capacitores y aumenta en forma notable su vida útil.



Características :

- Instalación simple : se utiliza como un contactor.
- Tiempo de respuesta : 5ms
- Autocontrol permanente de tensión, secuencia de fase y potencia del capacitor

Tipo	Potencia
TSM-LC 25	25 kvar
TSM-LC 50	50 kvar

## Reactores de descarga

**Para la descarga rápida de capacitores**

Los resistores usados normalmente requieren un tiempo relativamente extenso para lograr la descarga de los capacitores (más de 1'). Estos reactores permiten reducir este tiempo en forma significativa.



Características :

- Descarga rápida : permite acortar los tiempos de reconexión en equipos automáticos.
- Pérdidas reducidas (< 1,8 W)
- Diseño apto para montaje sobre riel DIN 35mm

Tiempo de descarga (en sistemas de 400V)	
Hasta 25 kvar	< 10s
Hasta 50 kvar	< 20s
Hasta 100 kvar	< 40s

**ANEXO B: CATÁLOGO DE TIRISTOR ABB.**

$V_{DSM}$	=	8500 V
$I_{TAVM}$	=	1200 A
$I_{TRMS}$	=	1880 A
$I_{TSM}$	=	35000 A
$V_{T0}$	=	1.25 V
$r_T$	=	0.480 m $\Omega$

## Phase Control Thyristor

# 5STP 12N8500

Doc. No. 5SYA1044-02 Sep 01

- Patented free-floating silicon technology
- Low on-state and switching losses
- Designed for traction, energy and industrial applications
- Optimum power handling capability
- Interdigitated amplifying gate

### Blocking

Part Number	5STP 12N8500	5STP 12N8200	5STP 12N7800	Conditions
$V_{DSM}$ $V_{RSM}$	8500 V	8200 V	7800 V	$f = 5$ Hz, $t_p = 10$ ms
$V_{DRM}$ $V_{RRM}$	8000 V	7700 V	7300 V	$f = 50$ Hz, $t_p = 10$ ms
$V_{RSM1}$	9000 V	8600 V	8200 V	$t_b = 5$ ms, single pulse
$I_{DSM}$	$\leq 1000$ mA			$V_{DSM}$ $V_{RSM}$ $T_J = 90^\circ\text{C}$
$I_{RSM}$	$\leq 400$ mA			
$dV/dt_{crit}$	2000 V/ $\mu$ s			Exp. to $0.67 \times V_{DRM}$ , $T_J = 90^\circ\text{C}$

### Mechanical data

$F_M$	Mounting force	nom.	90 kN
		min.	81 kN
		max.	108 kN
$a$	Acceleration		
	Device unclamped		50 m/s <sup>2</sup>
	Device clamped		100 m/s <sup>2</sup>
$m$	Weight		2.9 kg
$D_S$	Surface creepage distance		56 mm
$D_A$	Air strike distance		22 mm

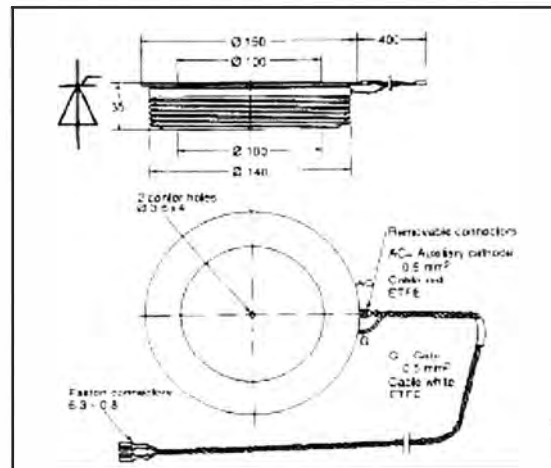


ABB Semiconductors AG reserves the right to change specifications without notice.

# ABB

## On-state

$I_{TAVM}$	Max. average on-state current	1200 A	Half sine wave, $T_C = 70^\circ\text{C}$		
$I_{TRMS}$	Max. RMS on-state current	1880 A			
$I_{TSM}$	Max. peak non-repetitive	35000 A	$t_p =$	10 ms	$T_J = 90^\circ\text{C}$ After surge: $V_D = V_R = 0\text{V}$
	surge current	38000 A	$t_p =$	8.3 ms	
$I^2t$	Limiting load integral	6125 kA <sup>2</sup> s	$t_p =$	10 ms	
		5992 kA <sup>2</sup> s	$t_p =$	8.3 ms	
$V_T$	On-state voltage	2.00 V	$I_T =$	1500 A	$T_J = 90^\circ\text{C}$
$V_{TD}$	Threshold voltage	1.25 V	$I_T =$	700 - 2100 A	
$r_T$	Slope resistance	0.480 m $\Omega$			
$I_H$	Holding current	75-150 mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$		
		50-125 mA	$T_J = 90^\circ\text{C}$		
$I_L$	Latching current	150- mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$		
		150- mA	$T_J = 90^\circ\text{C}$		

## Switching

$di/dt_{crit}$	Critical rate of rise of on-state current	250 A/ $\mu\text{s}$	Cont. $f = 50\text{ Hz}$	$V_D \leq 0.67 \cdot V_{DRM}$ , $T_J = 90^\circ\text{C}$ $I_{TRM} = 2000\text{ A}$ $I_{FG} = 2\text{ A}$ , $t_r = 0.5\ \mu\text{s}$
		500 A/ $\mu\text{s}$	60 sec. $f = 50\text{ Hz}$	
$t_d$	Delay time	$\leq 3.0\ \mu\text{s}$	$V_D = 0.4 \cdot V_{DRM}$	$I_{FG} = 2\text{ A}$ , $t_r = 0.5\ \mu\text{s}$
$t_q$	Turn-off time	$\leq 600\ \mu\text{s}$	$V_D \leq 0.67 \cdot V_{DRM}$ $dv_D/dt = 20\text{ V}/\mu\text{s}$	$I_{TRM} = 2000\text{ A}$ , $T_J = 90^\circ\text{C}$ $V_R > 200\text{ V}$ , $di_T/dt = -1\text{ A}/\mu\text{s}$
$Q_T$	Recovery charge	min	2800 $\mu\text{As}$	
		max	3400 $\mu\text{As}$	

## Triggering

$V_{GT}$	Gate trigger voltage	2.6 V	$T_J = 25^\circ$
$I_{GT}$	Gate trigger current	400 mA	$T_J = 25^\circ$
$V_{GD}$	Gate non-trigger voltage	0.3 V	$V_D = 0.4 \times V_{DRM}$
$I_{GD}$	Gate non-trigger current	10 mA	$V_D = 0.4 \times V_{DRM}$
$V_{FGM}$	Peak forward gate voltage	12 V	
$I_{FGM}$	Peak forward gate current	10 A	
$V_{RGM}$	Peak reverse gate voltage	10 V	
$P_G$	Gate power loss	3 W	

ABB Semiconductors AG reserves the right to change specifications without notice.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carlos Maffrand, Juan Dixon, Luis Morán, “Binary Controlled Static VAR Compensator, Based on Electronically Switched Capacitors”, IEEE 1998.
- [2] Ramasamy Natarajan, “Power System Capacitors”, CRC Press-Estados Unidos, 2005.
- [3] [www.elecond.com.ar](http://www.elecond.com.ar)
- [4] Ricardo Garrido, “Design Rules for PFC Systems”, EPCOS AG. ANo 116/V1, 2009.
- [5] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E Miller, “Power Electronic Control in Electrical Systems”, Newnes, 2002.
- [6] J. Sebastián Tepper, Juan W. Dixon, Gustavo Venegas, Luis Morán, “A Simple .Frecuency-Independent Method for Calculating the Reactive and Harmonic Current in a Nonlinear Load”, IEEE 1996.
- [7] Michael J. Demler, “High-Speed Analog-to-Digital Conversion”, Academic Press, Inc. 1991.
- [8] Steven T. Karris, “Introduction to Simulink with Engineering Applications”, Orchard Publications, 2006.
- [9] [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [10] [www.semikron.com](http://www.semikron.com).
- [11] [www.epcos.com](http://www.epcos.com).