

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



DISEÑO DE UN BANCO DE CONDENSADORES AUTOMÁTICO EN BAJA TENSIÓN PARA UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL CON PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

JUAN CARLOS BOLAÑOS BACA

**PROMOCIÓN
2004 - II**

**LIMA – PERÚ
2010**

**DISEÑO DE UN BANCO DE CONDENSADORES
AUTOMÁTICO EN BAJA TENSIÓN PARA UN SISTEMA
ELÉCTRICO INDUSTRIAL CON PRESENCIA DE CARGAS
NO LINEALES**

SUMARIO

El sistema eléctrico de utilización de una planta industrial cualquiera requerirá, en mayor o menor medida, de compensación reactiva, la cual puede tener varias clasificaciones según: el nivel de tensión, el tipo de accionamiento, la carga a compensar o su ubicación dentro de la red eléctrica. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en la actualidad existen cargas eléctricas de naturaleza no lineal, las cuales producen efectos negativos sobre la calidad de la energía eléctrica utilizada, y por ende, en el funcionamiento de los bancos de condensadores.

El presente informe trata sobre la determinación de los criterios que deben considerarse para el diseño de un banco de condensadores automático, desde el cálculo de la potencia reactiva y la elección del número de escalones hasta la determinación de la capacidad de las protecciones, el dimensionamiento de las barras de cobre y de los cables conductores, considerando la presencia de armónicos y los efectos de la resonancia.

Los criterios de diseño se determinarán de acuerdo a las normativas nacionales e internacionales vigentes y a las recomendaciones técnicas de instituciones especializadas tales como IEEE. Al final del informe se diseñará un banco de condensadores automático a partir de mediciones de los parámetros eléctricos de una planta industrial, exponiéndose una relación de conclusiones y recomendaciones.

INDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
COMPENSACIÓN REACTIVA	
1.1 Concepto	2
1.2 Consumo de energía reactiva y la normativa peruana	3
1.3 Clasificación de la compensación reactiva	4
1.4 Beneficios técnico-económicos de la corrección del factor de potencia	6
1.4.1 Disminución de costos por penalidades	6
1.4.2 Aumento de potencia del transformador	6
1.4.3 Disminución de pérdidas por efecto Joule	6
CAPÍTULO II	
PERTURBACIONES EN LA RED ELÉCTRICA	
2.1 Distorsión armónica	7
2.2 Efectos de los armónicos	10
2.2.1 Pérdidas	10
2.2.2 Factor K	10
2.2.3 Resonancia	11
2.3 Filtros de rechazo y de absorción	14
CAPÍTULO III	
CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	
3.1 Concepto de calidad de la energía eléctrica	16
3.2 Calidad de la energía eléctrica según la normativa peruana	16
CAPÍTULO IV	
CRITERIOS DE DISEÑO	
4.1 Elección del tipo de compensación	19
4.2 Cálculo de la potencia reactiva a compensar	19
4.3 Escalones en la regulación de la potencia reactiva	20
4.3.1 Concepto de escalón	20

4.3.2	Regulación física y regulación eléctrica	20
4.3.3	Elección del número de escalones	21
4.4	Elección de los componentes principales	22
4.4.1	Condensadores	22
4.4.2	Protecciones eléctricas	23
4.4.3	Contactores especiales para condensadores	23
4.5	Distribución de la intensidad de corriente	24
4.5.1	Dimensionamiento de las barras colectoras	24
4.5.2	Dimensionamiento de los cables de fuerza	26
4.6	Elección de la envolvente	26
4.7	El circuito de control	27
4.7.1	El regulador de potencia reactiva	27
4.7.2	Dimensionamiento del transformador de control	28
4.8	Disminución de los efectos de los armónicos en la red a compensar	29
4.8.1	Sobredimensionamiento de la tensión de los condensadores	30
4.8.2	Uso de filtros de rechazo	30
4.8.3	Criterios para elegir la solución	31
CAPÍTULO V		
UN EJEMPLO DE DISEÑO		
5.1	Mediciones obtenidas de una planta industrial típica	33
5.2	Cálculo de la potencia reactiva y determinación del número de escalones	33
5.3	Elección de los componentes principales	35
5.4	Dimensionamiento de las barras colectoras y de los cables de fuerza	35
5.5	Elección de la envolvente	36
5.6	Elección del regulador de potencia reactiva	37
5.7	Dimensionamiento del transformador de control	37
5.8	Disminución de los armónicos en la red a compensar	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		38
ANEXO A		
DIAGRAMAS DE DISPOSICIÓN DE UN BANCO DE CONDENSADORES TÍPICO		40
ANEXO B		

PAUTAS BÁSICAS DE PUESTA EN SERVICIO, OPERACIÓN Y	
MANTENIMIENTO DE UN BANCO DE CONDENSADORES	43
BIBLIOGRAFÍA	46

PRÓLOGO

En el presente informe se determinarán los criterios necesarios para el diseño de un banco de condensadores automático a ser utilizado en la red eléctrica de baja tensión de una planta industrial. Se considerarán las recomendaciones técnicas de instituciones especializadas, tales como IEEE, y las normativas nacionales e internacionales relacionadas.

Los tres primeros capítulos presentan los fundamentos básicos que permiten entender la importancia técnica y económica de la compensación reactiva, así como el concepto de calidad de la energía. El primer capítulo trata sobre la compensación reactiva, en donde se da una definición, se describen los métodos y se explican los beneficios que se obtienen de la compensación. En el segundo capítulo se hace una breve exposición de las perturbaciones más comunes que se presentan en una red eléctrica, sus efectos y algunos métodos para disminuirlas. Y el tercer capítulo ofrece algunos apuntes acerca de la calidad de la energía eléctrica, su definición e importancia.

El capítulo cuatro determina los criterios de diseño de un banco de condensadores. El marco conceptual del diseño considera que la compensación reactiva es automática, en baja tensión, se hace mediante un banco de condensadores convencional y que la protección eléctrica de los escalones es mediante fusibles. Asimismo, se debe anotar que en los criterios de diseño no se han considerado los cálculos pertinentes a los esfuerzos electrodinámicos de las barras, ni a la ventilación forzada necesaria, ni tampoco se indica la disposición de los equipos dentro de la envolvente.

El quinto capítulo ofrece el diseño de un banco de condensadores bajo las consideraciones expuestas en el párrafo anterior, a partir de las mediciones de los parámetros eléctricos de una planta industrial.

Finalmente, se enumera una relación de conclusiones y recomendaciones a ser tomadas en cuenta para el diseño antes expuesto.

CAPÍTULO I

COMPENSACIÓN REACTIVA

1.1 Concepto

La compensación reactiva consiste en suministrar a las cargas de una red eléctrica la potencia reactiva suficiente como para mejorar el factor de potencia del sistema, acercándolo a la unidad, por lo que también es llamada compensación del factor de potencia.

El consumo de potencia reactiva obliga a prever unos medios de generación y transmisión más dimensionados. Es por ello que hay un doble interés en la compensación reactiva porque supone transformadores y líneas menos dimensionadas. Por otro lado, la compañía suministradora de energía tiene también interés en disminuir los reactivos por los mismos motivos y por ello se suele establecer algún tipo de recargo sobre la potencia y energía consumidas, en función del factor de potencia acumulado al final del período de facturación.

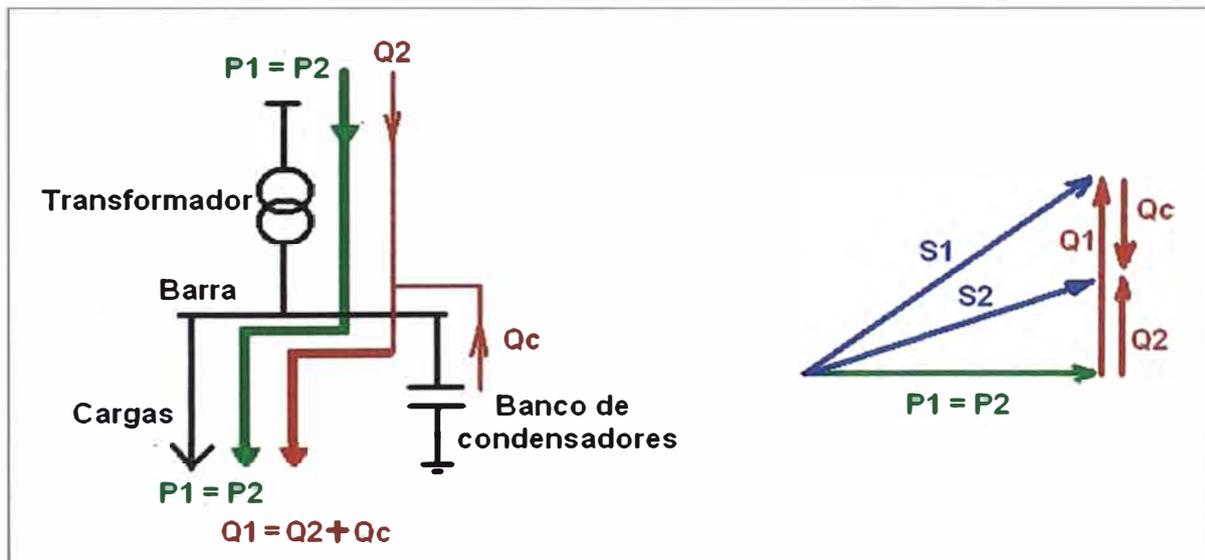


Fig. 1.1 Compensación reactiva

La Fig. 1.1 muestra, en color rojo, que la potencia reactiva solicitada por la carga eléctrica Q_1 es suministrada por el banco de condensadores (Q_c) y por la red comercial

(Q2), por lo que se dice que la potencia aparente requerida por el sistema será menor luego de que sea este sea compensado. La compensación se puede llevar a cabo mediante bancos de condensadores, motores síncronos, condensadores síncronos y compensadores estáticos. Sin embargo, en el presente trabajo sólo se tratará sobre el diseño de bancos de condensadores, debido a que para sistemas industriales en baja tensión es el método más económico y técnicamente más fácil de aplicar.

1.2 Consumo de la energía reactiva y la normativa peruana

Según la normativa peruana vigente la empresa suministradora de energía deberá incluir en su facturación un monto que dependerá del exceso de la energía inductiva consumida por el usuario durante el período de facturación. Este exceso es establecido en la R. N°. 1908-2001-OS/CD como la energía reactiva que sea superior al 30% de la energía activa total consumida en un mes. El monto a facturar se calcula como sigue:

$$\text{Recargo} = \text{kVAR.h en exceso} * \text{cargo por energía reactiva} \quad (1.1)$$

El cargo por energía reactiva se expresa en S/. /kVAR.h. De aquí se puede observar la importancia que para una industria significa el control sobre el consumo de la energía reactiva, visto no sólo desde el punto de vista técnico, sino también desde el económico.

En esta norma también se establece que no está permitido que se inyecte a la red energía reactiva capacitiva. Si esto ocurriera el suministrador y el usuario deberán coordinar para evitar esta situación, y si tal corrección no se diera en un tiempo determinado entonces la empresa suministradora podrá cobrar tal energía con el cargo por energía reactiva.

De ambas situaciones expuestas se tiene que es posible formular un límite inferior y un límite superior para el valor del factor de potencia de un sistema eléctrico, de tal manera que no se le facture al usuario por consumo de exceso de energía reactiva, si el factor de potencia se encuentra dentro de esos límites:

$$\tan\Phi_{\text{mínimo}} = Q / P = 0,3P / P = 0,3 \quad (1.2)$$

$$\text{fdp}_{\text{mínimo}} = \cos\Phi_{\text{mínimo}} = \cos(\arctan(0,3)) = 0,9578 \quad (1.3)$$

De lo anterior el límite inferior podría elegirse en 0,9578 como factor de potencia, con lo que cualquier sistema eléctrico tendría el nivel mínimo necesario de energía reactiva para asegurar que no existirán cobros por exceso de energía inductiva. Por otro lado el límite superior podría ser considerado como 1, sin embargo esto no es posible en virtud a que no sólo la carga no es estática sino que la compensación se realiza por bloques de energía o

“escalones”, además del hecho de que se correría el riesgo de inyectar energía capacitiva al sistema alimentador. Así, podría establecerse como límite superior del valor del factor de potencia como 0,99.

La práctica habitual en el diseño de un banco de condensadores es la de elegir a 0,98 como factor de potencia deseado. Dicho valor no sólo asegura una buena compensación de la energía reactiva, acercando el valor a 1, sino que se encuentra dentro de los límites determinados en la normativa vigente.

1.3 Clasificación de la compensación reactiva

a) Según el nivel de tensión

Se puede clasificar en compensación en baja tensión, compensación en media tensión o compensación en alta tensión.

b) Según el tipo de accionamiento

Se puede clasificar en compensación fija y compensación automática. La primera considera la conexión o desconexión de los escalones de forma manual, o simplemente no los considera, normalmente utilizada para compensar las solicitaciones de potencia reactiva de transformadores de potencia. La segunda toma en cuenta la utilización de un regulador de potencia reactiva, aparato que determina cuántos pasos deben estar conectados y en qué momento, de modo que la entrada o salida de escalones se realiza en forma automática.

Dentro de la compensación automática también existen los bancos de condensadores accionados por tiristores.

c) Según la carga a compensar

La compensación reactiva puede ser dedicada a cargas individuales o para un sistema de utilización, como es el objeto de estudio del presente trabajo. Se considera por ejemplo para un transformador de potencia, suministrando la potencia reactiva necesaria por el núcleo. La compensación individual también considera el arranque de un motor asíncrono, teniendo especial consideración en el tipo de arranque (directo, arranque estrella-triángulo, mediante un variador de velocidad, etc.).

d) Según su ubicación

La compensación de la potencia reactiva puede clasificarse de acuerdo a la ubicación del banco de condensadores con respecto a la red eléctrica a compensar. Si está conectada en la barra principal del sistema será llamada Global, si está conectada a una barra de distribución desde la cual se alimenta a varias cargas entonces será Parcial y si está conectada a una sola carga entonces será Individual.

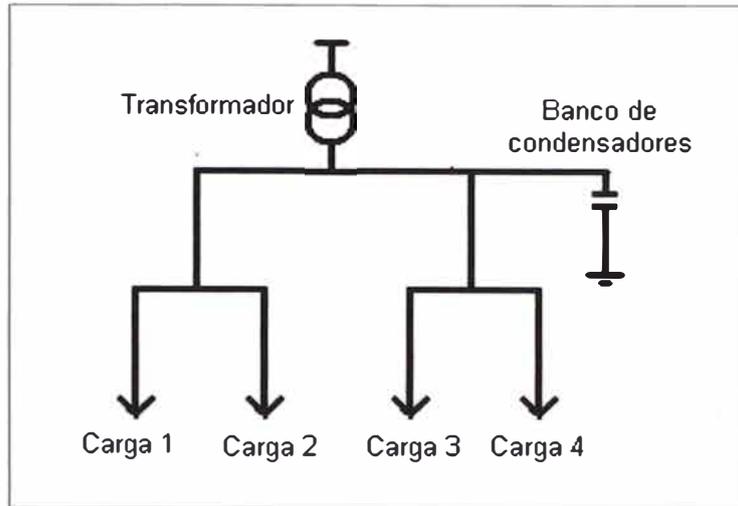


Fig.1.2 Compensación Global

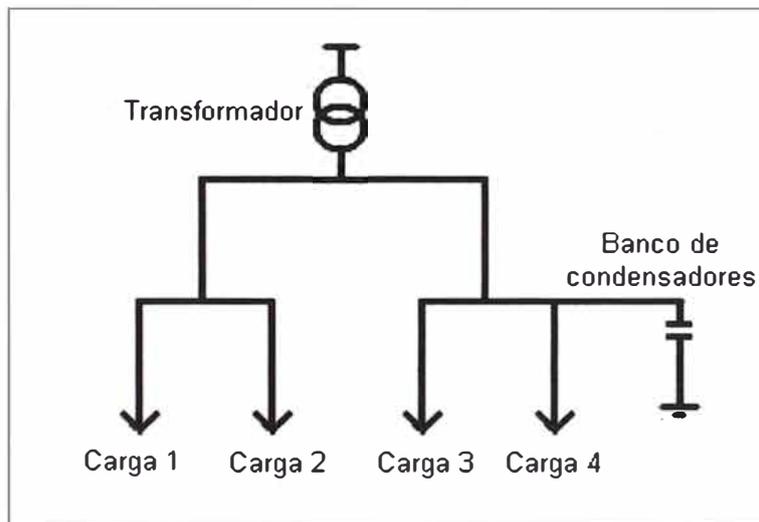


Fig.1.3 Compensación Parcial

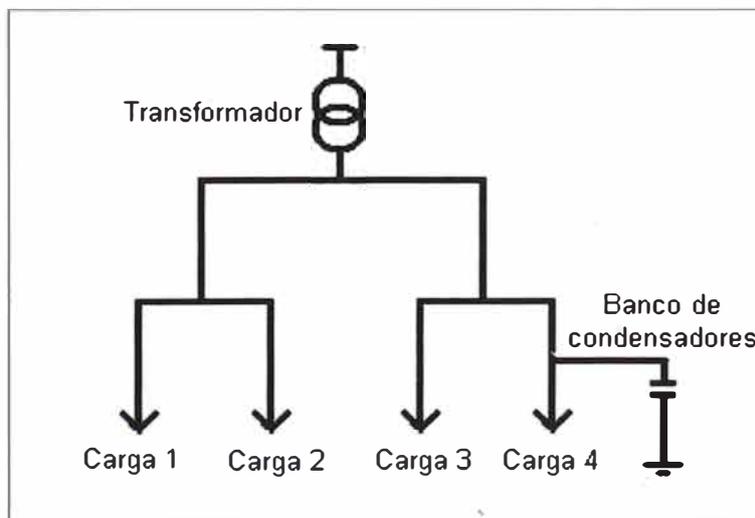


Fig.1.4 Compensación Individual

1.4 Beneficios técnico-económicos de la corrección del factor de potencia

La siguiente es una relación de los beneficios más comunes:

- Disminución de costos por penalidades.
- Aumento de potencia del transformador.
- Disminución de pérdidas por efecto Joule.

1.4.1 Disminución de costos por penalidades

Como ya se expuso en el acápite 1.2, según la normativa peruana existe una penalización económica para el usuario que tenga consumos de energía reactiva mayores al 30% del consumo de energía activa en un mes. En un sistema eléctrico industrial, de acuerdo a la cantidad de máquinas y de la actividad que realicen, el factor de potencia puede tener valores tan bajos como 0,60 o valores tan “altos” como 0,85 (“altos” en el sentido de que en una industria en la que no exista compensación reactiva es muy difícil obtener valores mayores a este). Observando ambos extremos es fácil notar que es imprescindible efectuar una compensación del factor de potencia en un sistema eléctrico industrial, lo cual, de acuerdo a la capacidad instalada de la industria, puede significar un ahorro anual de varios miles de nuevos soles.

1.4.2 Aumento de potencia del transformador

La instalación de condensadores aguas abajo de un transformador de potencia, que alimenta una instalación donde el factor de potencia es bajo, permite un aumento de la potencia activa disponible en bornes de BT y permite incrementar la carga eléctrica de la instalación sin cambiar el transformador. Por lo tanto, en realidad la potencia del transformador no aumenta, pero sí aumenta la capacidad de recibir más carga luego de que la energía reactiva haya sido compensada.

1.4.3 Disminución de pérdidas por efecto Joule

La intensidad de corriente en un conductor y su naturaleza son factores directamente relacionados con las pérdidas de un conductor. La intensidad de alimentación de una carga es la intensidad aparente, por lo que a medida de que se reduzca el factor de potencia el valor de la intensidad aparente se acerca al de la intensidad activa, por lo que la intensidad de corriente que circule por los conductores luego de la compensación será menor, con una consecuente disminución de pérdidas por efecto Joule.

CAPÍTULO II

PERTURBACIONES EN LA RED ELÉCTRICA

La causa principal de la distorsión de la tensión de la red son las propias cargas, por su forma de funcionar durante los arranques y paradas, por la conmutación de corrientes importantes entre diversos circuitos, ocasionando caídas de tensión en las impedancias del sistema. Otras veces las causas de perturbación son externas, las más comunes son las perturbaciones atmosféricas y las elevaciones del potencial de tierra en condiciones de defecto. Otros tipos de perturbaciones ocasionan problemas denominados de “compatibilidad electromagnética” o problemas de mal funcionamiento (errático) de algunos equipos cuando se alimentan desde una red muy perturbada. Estos problemas, a pesar de no ser cuantificables en términos de rendimiento, ocasionan pérdidas importantes de eficacia en los sistemas de producción por averías o paros intempestivos.

Los principales parámetros de la red que se ven afectados por algún tipo de perturbación son: frecuencia, amplitud, la forma de onda y la simetría del sistema trifásico.

2.1 Distorsión armónica

Las perturbaciones más importantes que afectan a la forma de onda son los armónicos. Sus efectos se dejan sentir por lo general hasta un máximo de 2500 Hz y suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparos de relés diferenciales, etc.

Los armónicos se comportan como fuentes de corriente dispuestas en paralelo y trabajan a diferente frecuencia, por lo que la suma de todas las corrientes es la intensidad que alimenta a la carga. Por esta razón el nivel de corriente que llega a la carga cuando hay distorsión armónica sobrecalienta a los cables y a los equipos.

Se puede decir que una carga es lineal si al ser alimentada por una tensión sinusoidal responde con una corriente sinusoidal. En cambio, las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alterna sinusoidal absorben corrientes que no son sinusoidales, aunque por lo general sí son periódicas. Ejemplos de estas cargas son: convertidores estáticos, equipos

electrónicos monofásicos, instalaciones de iluminación con lámparas de descarga, hornos de arco, equipos de soldadura, transformadores, reactancias con núcleo de hierro, etc.

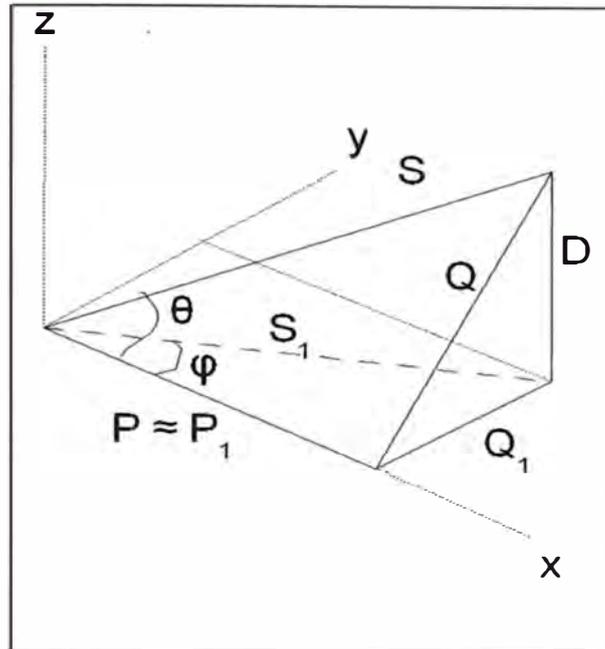


Fig. 2.1 Tetraedro de potencias

En la figura anterior se pueden distinguir cuatro triángulos:

- El de potencias fundamentales, P_1, Q_1, S_1 : $S_1^2 = P^2 + Q_1^2$ (2.1)
- El de potencias fluctuantes, Q_1, D_1, Q : $Q^2 = Q_1^2 + D^2$ (2.2)
- El de potencias totales, S, P, Q : $S^2 = P^2 + Q^2$ (2.3)
- El de potencias aparentes, S, S_1, D : $S^2 = S_1^2 + D^2$ (2.4)

En los circuitos con armónicos el factor de potencia FP es la relación de la potencia activa P y la potencia aparente total S . Nótese que cuando existen corrientes armónicas el FP ya no coincide con el $\cos\varphi$ que forman las componentes fundamentales. Las relaciones en este caso son las siguientes:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}} = \cos\theta \quad (2.5)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2}} \quad (2.6)$$

Al comparar las ecuaciones (2.5) y (2.6) se observa que el factor de potencia total es siempre menor que el $\cos\varphi$ o factor de potencia de la componente fundamental. El significado de esto es que para transmitir la misma potencia activa en un circuito con

armónicos es necesario dimensionar la instalación para una potencia aparente mayor, de manera que se supere la distorsión.

Un sistema trifásico desequilibrado puede ser descompuesto en la suma de tres sistemas: uno de secuencia directa, otro de secuencia inversa y otro de secuencia cero, llamado también homopolar. El método de descomposición es válido para sistemas trifásicos cualesquiera, de tres o de cuatro hilos, es decir, con o sin neutro, y sirve tanto para el estudio de tensiones como para corrientes.

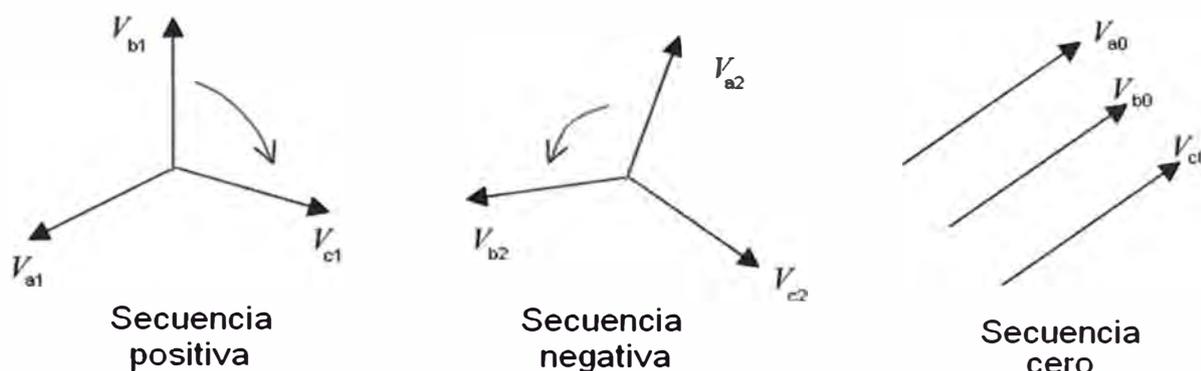


Fig. 2.2 Sistemas de secuencia positiva, negativa y cero

Para un sistema trifásico desequilibrado con neutro y presencia de armónicos la potencia aparente puede descomponerse como sigue:

$$S^2 = P_{1R}^2 + Q_{1R}^2 + D_R^2 + P_{1S}^2 + Q_{1S}^2 + D_S^2 + P_{1T}^2 + Q_{1T}^2 + D_T^2 \quad (2.7)$$

Se puede observar que las potencias en cada fase pueden dar resultados muy distintos, por lo que un sistema de esta naturaleza debe ser tratado como tres sistemas monofásicos independientes y que en caso de desequilibrios no tendría sentido hablar de potencia trifásica, ni de medida ni de compensación del factor de potencia en trifásico.

Por otro lado, en un sistema trifásico desequilibrado sin neutro y con armónicos no se puede hablar de tensiones fase-neutro, por lo que el concepto de potencia por fase sólo se puede aplicar si se utiliza un neutro artificial.

Se puede dividir también la potencia en tres sistemas con secuencia directa, inversa y homopolar, en vez de ser entre fases. Entonces, habrá una ecuación para cada índice n de cada armónico, debiéndose considerar además la secuencia que tengan cada uno de dichos armónicos.

$$S_n = S_{nd} + S_{ni} + S_{n0} = \sqrt{3} \cdot U_{nd} \cdot I_{nd} + \sqrt{3} \cdot U_{ni} \cdot I_{ni} + \sqrt{3} \cdot U_{n0} \cdot I_{n0} \quad (2.8)$$

2.2 Efectos de los armónicos

Los principales efectos de los armónicos sobre la red pueden resumirse diciendo que éstos aumentan innecesariamente la potencia que hay que transportar y por consiguiente empeoran el factor de potencia.

2.2.1 Pérdidas

Existen dos tipos de pérdidas: en el cobre y en el hierro. Las primeras afectarán a todos los cables, a los devanados y en general a todos los elementos resistivos de la red. La presencia de armónicos hace aumentar el valor eficaz total de la corriente.

$$P = R.I^2 = R.\sqrt{\sum I_n^2} \quad (2.9)$$

En cuanto a las pérdidas en el hierro, estas son causadas tanto por las pérdidas por histéresis y por las corrientes inducidas, o pérdidas Foucault. Las primeras son proporcionales a la frecuencia y al cuadrado de la corriente eficaz total, y las segundas son proporcionales a la frecuencia al cuadrado y a la corriente eficaz al cuadrado:

$$\text{Pérdidas por histéresis:} \quad P_H = k_H \cdot \sum n I_n^2 \quad (2.10)$$

$$\text{Pérdidas por corrientes parásitas:} \quad P_F = k_F \cdot \sum n^2 \cdot I_n^2 \quad (2.11)$$

Sin embargo, las corrientes parásitas suelen minimizarse por el hecho de que los núcleos de hierro no son macizos sino formados por láminas, por lo que las pérdidas dominantes suelen ser las de histéresis. Las pérdidas totales en el hierro pueden expresarse como sigue:

$$P_{Fe} = k_{Fe} \cdot \sum n^q \cdot I_n^2 \quad (2.12)$$

En donde q suele tener un valor ente 1,7 y 1,8.

Por lo tanto mientras la corriente aparente, provocada por la distorsión armónica, sea mayor, mayores serán las pérdidas, tanto en el cobre como en el hierro.

2.2.2 Factor K

El calentamiento por armónicos afecta a muchos transformadores de la red de distribución. El comité de normalización europeo CENELEC ha definido en el documento HD 428.4S1 un factor de reducción de la potencia de transformadores o de sobredimensionamiento de los mismos, llamado factor K:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{ef}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \cdot \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad (2.13)$$

En donde e es un factor que representa la relación entre pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro del transformador. Este factor puede obtenerse de los datos de ensayo del transformador, o en su defecto puede elegirse $e = 0,3$ y el exponente q entre 1,7 y 1,8.

Para hallar la potencia en kW que puede soportar un transformador de un sistema eléctrico con un factor K determinado se utiliza:

$$P = S \cdot \frac{FP}{K} \quad (2.14)$$

Donde S es la potencia del transformador en kVA y FP es el factor de potencia. De esta ecuación se puede observar que mientras mayor sea el nivel de armónicos en la red, mayor será el factor K y menor la capacidad del transformador de potencia. Es decir, no disminuye la potencia del transformador sino que disminuye su capacidad de trabajo, debido a que también deberá suministrar la potencia debida a las corrientes provocadas por la distorsión armónica.

2.2.3 Resonancia

Las condiciones de resonancia son aquellas en los que un sistema pasa de ser inductivo a capacitivo o viceversa, este cambio provoca problemas muy graves como pueden ser sobrecorrientes o sobretensiones, los cuales ocasionan el fallo y/o destrucción de equipos que se encuentran expuestos a estos fenómenos.

a) Resonancia paralelo

Ocurre cuando las impedancias de un elemento inductivo con un capacitivo se igualan, cuando estos elementos se encuentran en paralelo. Este efecto se presenta cuando el equivalente del sistema en el cual esta conectado un banco de condensadores, se iguala a la impedancia equivalente del banco de condensadores (quedando en paralelo).

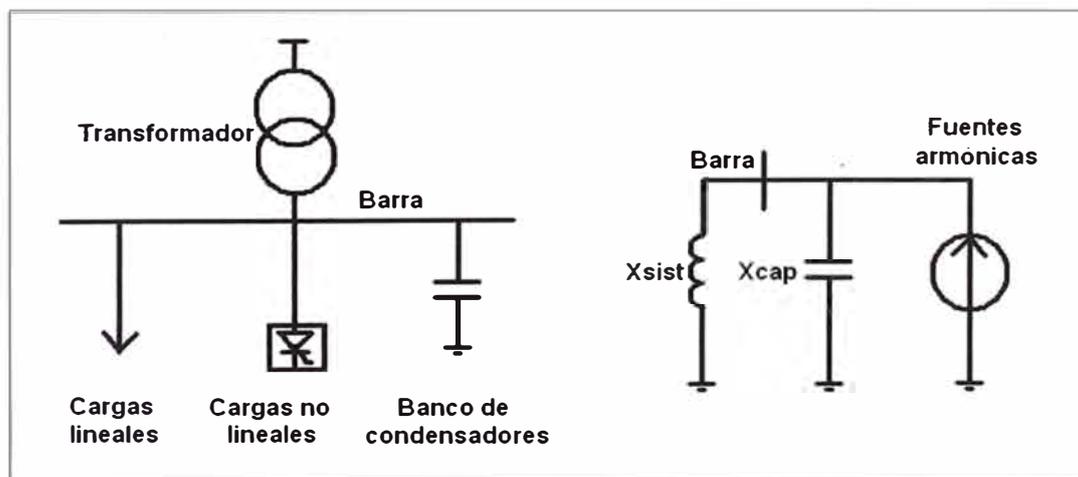


Fig. 2.3 Circuito resonante paralelo

Entonces este equivalente paralelo esta dado por:

$$Z_{eq} = \frac{X_{sist} X_{cap}}{X_{sist} - X_{cap}} \quad (2.15)$$

Al igualarse estas impedancias a una cierta frecuencia, la impedancia equivalente se hace infinita, y al existir una fuente de corriente a esa frecuencia en paralelo, entonces se tienen sobretensiones que ocasionan grandes corrientes entre el sistema y el banco de condensadores.

De esta manera, para que estas dos impedancias sean iguales se necesita que exista una frecuencia llamada de resonancia, que depende de las impedancias del banco de condensadores y del sistema. Está dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{sist}}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVar_{CAP}}} \times 60 \text{ Hz} \quad (2.16)$$

Donde MVA_{CC} es la capacidad de corto circuito donde esta conectado el banco de condensadores y los $MVar_{CAP}$ es la capacidad del banco de condensadores.

Como se puede observar, si se tiene una planta industrial, la cual esta conectada a un misma tensión y tiene un mismo banco de condensadores, pero diferentes valores MVA_{CC} entonces el sistema responde de manera distinta, tal y como lo muestra la figura 2.4.

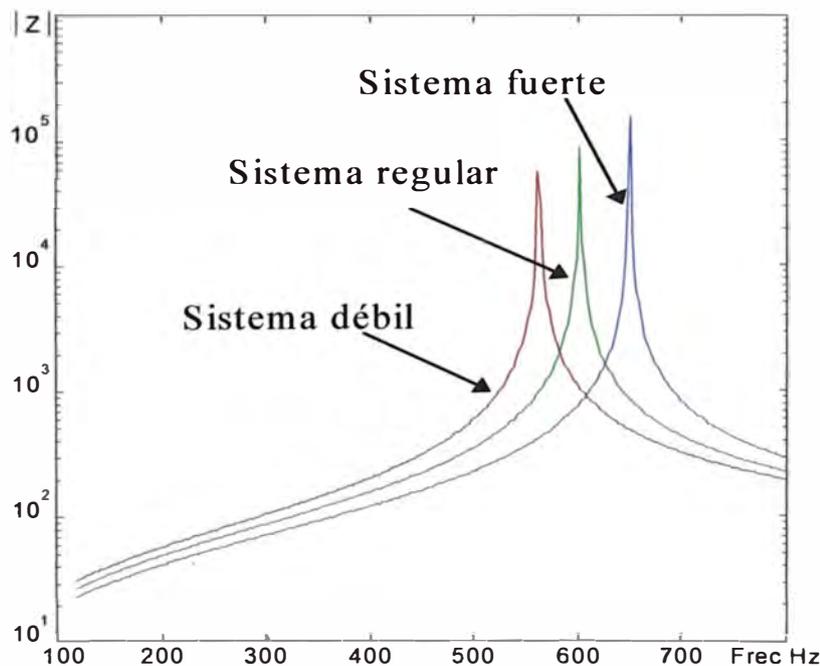


Fig. 2.4 Efecto del sistema a la resonancia paralelo

La figura 2.4 muestra que a medida que el sistema sea más débil se tiene que las frecuencias de resonancia se acercan cada vez más a frecuencias que pueden existir en el sistema como por ejemplo la 3^a, 5^a o 7^a armónica, ocasionando así problemas de resonancia, pudiendo ocasionar daños en el banco de condensadores.

b) Resonancia serie

Este caso ocurre cuando una impedancia inductiva se encuentra en serie con un condensador. En forma práctica esta resonancia serie puede presentarse en cualquier sistema eléctrico, sobre todo en sistemas industriales. Un modelo de la representación de un sistema eléctrica con resonancia serie se presenta en la figura 2.5.

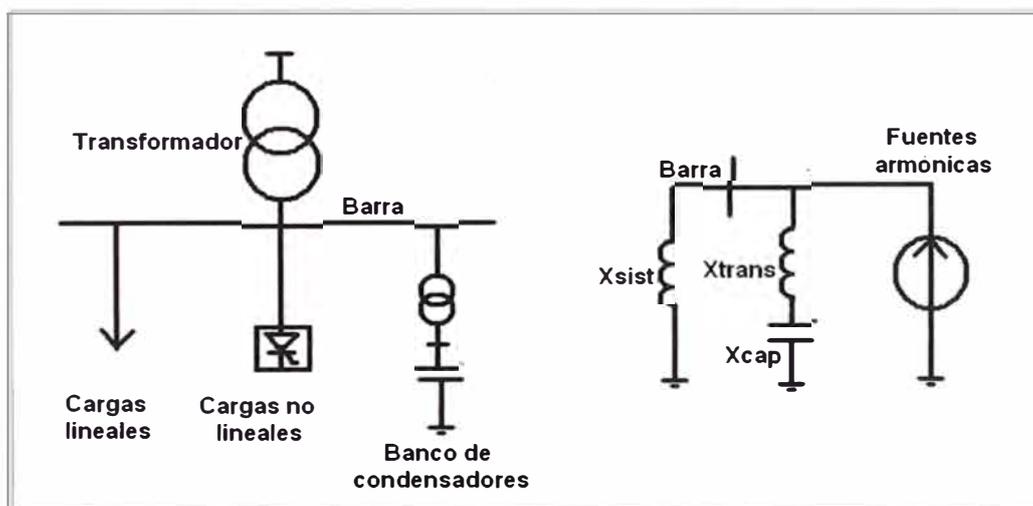


Fig. 2.5 Sistema resonante serie

Entonces al igualarse la impedancia del transformador con el banco de condensadores, se tiene que la impedancia equivalente esta dada por:

$$Z_{eq} = X_{trans} - X_{cap} \quad (2.17)$$

Donde al igualarse estas impedancias se tiene una equivalente igual a cero, dando como resultado una corriente grande a través de estos elementos.

Así mismo la frecuencia de resonancia serie esta dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{1}{L_{trans} C}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{trans}}} \times 60 \text{ Hz} \quad (2.18)$$

Además de que también existe una resonancia en paralelo con el sistema, dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{sist} + X_{trans}}} \times 60 \text{ Hz} \quad (2.19)$$

La figura 2.6 muestra el efecto del sistema sobre la resonancia serie, se observa que a

medida que el sistema es más débil, se tienen impedancias muy grandes antes de la resonancia, pudiendo ocasionar estos picos sobretensiones armónicas muy fuertes.

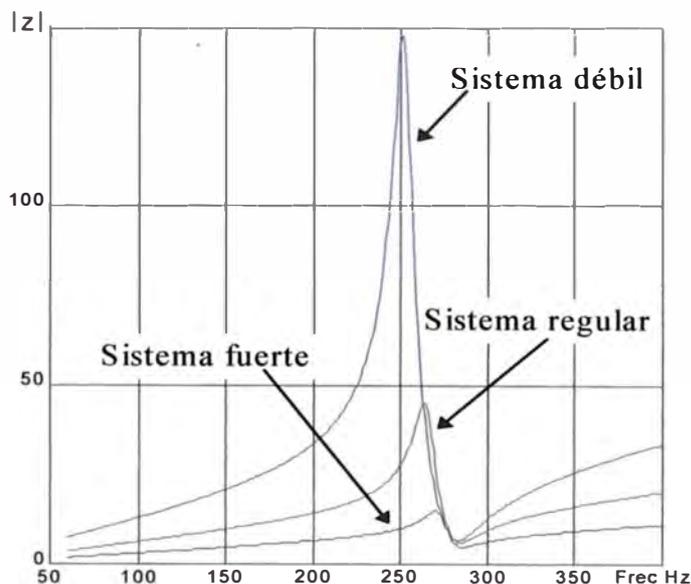


Fig. 2.6 Efecto del sistema a la resonancia serie

c) Razón de corto circuito

La razón de corto circuito es la razón que existe entre la capacidad del sistema y la capacidad de la carga no lineal conectada al sistema.

$$SCR = \frac{MVA_{CC}}{MW_{rect}} \quad (2.20)$$

Según el IEEE Std. 141-1993, en forma práctica, si el *SCR* es menor a 20 y existe una condición de resonancia paralelo cerca de una armónica característica de la carga no lineal entonces pueden existir problemas de resonancia en el sistema, por lo que se deberán realizar estudios a fin de determinar la posible adición de filtros de armónicos.

2.3 Filtros de rechazo y de absorción

a) Filtros de rechazo

El objetivo del filtro de rechazo es impedir la resonancia paralelo entre transformador y condensadores, y evitar la sobrecarga de armónicos en los bancos de condensadores.

Los filtros de rechazo están compuestos de varias ramas L-C, las cuales se conectan y desconectan en función de la demanda de compensación del factor de potencia.

Se especifican mediante el factor de sobretensión, $p\%$, que representa la relación entre la tensión de la reactancia y la del condensador:

$$p\% = 100 * \left(\frac{\omega}{\omega_R} \right)^2 \quad (2.21)$$

Al instalar un filtro de rechazo la impedancia equivalente en el punto de conexión disminuye, con lo que se logra reducir los armónicos de tensión en ese punto. Véase la Figura 2.7 en donde se muestra una reactancia.



Fig. 2.7 Reactancia para filtro de rechazo

b) Filtros de absorción

Los filtros de absorción sirven para desviar hacia ellos los armónicos de corriente generados por una carga no lineal importante, de tal manera que no afecten a las cargas vecinas. Sin embargo, un filtro de absorción no puede aplicarse en cualquier caso, sobre todo si la impedancia de la red es muy alta. Para pensar en aplicar un filtro de absorción debe tratarse de filtrar una carga de potencia considerable.

Estos filtros están formados por varias ramas L-C habitualmente conectadas en el lado de baja tensión. Cada rama está dedicada a un armónico, y los valores de L y C están dimensionados según la corriente armónica que deban absorber. Dependiendo de la corriente total a filtrar, puede emplearse más de una rama LC para filtrar la perturbación de una determinada frecuencia.

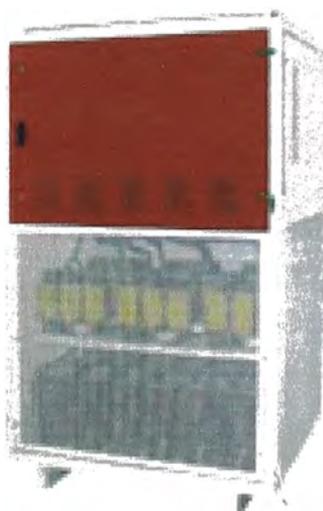


Fig. 2.8 Batería con filtros de absorción

CAPÍTULO III CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

3.1 Concepto de la calidad de la energía eléctrica

La calidad de la energía eléctrica puede ser entendida como el mayor grado de confiabilidad que se pueda tener sobre un suministro eléctrico. Entonces, la buena calidad de la energía eléctrica se caracteriza por la continuidad y por tener el menor número posible (idealmente cero) de interrupciones. Para poder determinar que la calidad de la energía es buena los parámetros eléctricos deben permanecer dentro de los rangos recomendados por los organismos especializados, como la IEEE. A partir de este marco las normas y reglamentos técnicos de cada país determinan los estándares permitidos para los parámetros eléctricos.

Los parámetros eléctricos más importantes a tener en cuenta son la tensión y la frecuencia, por lo que un índice claro de una buena calidad de la energía eléctrica será el que la señal de tensión sea lo más sinusoidal posible y que no tenga interrupciones y que la frecuencia sea siempre constante, es decir, sin fluctuaciones.

3.2 Calidad de la energía eléctrica según la normativa peruana

La Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) es la que determina los estándares mínimos de calidad, lo que significa un "...suministro eléctrico continuo, adecuado, confiable y oportuno..."; según el Decreto Supremo N° 020-97-EM.

Para la NTCSE, la calidad de los servicios eléctricos se realiza en los siguientes aspectos:

a) Calidad de Producto:

- Tensión
- Frecuencia
- Perturbaciones (Flicker y Tensiones Armónicas).

b) Calidad de Suministro:

- Interrupciones.

c) Calidad de Servicio Comercial:

- Trato al Cliente

- Medios de Atención
- Precisión de Medida

d) Calidad de Alumbrado Público:

- Deficiencias del Alumbrado

En lo que respecta al presente informe sólo será necesario mencionar los estándares relativos a la calidad del producto, debido a que las interrupciones, trato al cliente o deficiencias del alumbrado (por citar algunos de los otros puntos mencionados en la NTCSE) no están relacionados con el tema desarrollado.

Según la NTCSE se deben tener en cuenta tanto los indicadores de calidad como las tolerancias, en lo referente a la tensión, frecuencia y las perturbaciones como el flicker y los armónicos, de lo cual se puede resumir lo siguiente:

I. Tensión

El indicador de calidad de la tensión es:

$$\Delta V_k (\%) = \frac{(V_k - V_N)}{V_N} * 100\% \quad (3.1)$$

En donde se debe tomar en cuenta que el intervalo de medición k debe ser de quince minutos. El indicador representa la diferencia entre la media de los valores eficaces instantáneos medidos en el punto de entrega (V_k) y el valor de la tensión nominal (V_N) del mismo punto. La tolerancia para este indicador es de $\pm 5,0\%$ de tensión nominal y de $\pm 7,5\%$ en servicios de baja tensión calificados como urbanos, urbano-rurales y/o rurales.

II. Frecuencia

En el caso de la frecuencia el indicador es:

$$\Delta f_k (\%) = \frac{(f_k - f_N)}{f_N} * 100\% \quad (3.2)$$

Además de la frecuencia la NTCSE determina el control sobre dos indicadores directamente relacionados a ella: las Variaciones Súbitas de Frecuencia expresada en hertz (VSF) y la Integral de Variaciones de Frecuencia Diaria expresada en ciclos (IVFD), las cuales se definen así:

$$VSF = \sqrt{\left[(1/1 \text{ minuto}) \int_0^{1 \text{ minuto}} f^2(t) dt \right]} - f_N \quad (3.3)$$

$$IVDF = \Gamma + \int_0^{24 \text{ hrs}} [f(t) - f_N] dt \quad (3.4)$$

En donde Γ es la suma algebraica de los valores de la integral que aparece como segundo término en el miembro derecho de la Fórmula 3.4, para cada uno de los días del año calendario, anteriores al día en que se evalúa la IVDF.

Las tolerancias admitidas para variaciones sobre la frecuencia nominal, en todo nivel de tensión, son:

- Variaciones Sostenidas ($\Delta f_k'$ (%)): $\pm 0,6$ %.
- Variaciones Súbitas (VSF'): $\pm 1,0$ Hz.
- Variaciones Diarias (IVDF'): $\pm 600,0$ Ciclos.

III. Perturbaciones

La norma contempla el control sobre todas las perturbaciones pero sólo define los indicadores y las tolerancias para el flicker y las armónicas.

En el caso del flicker el indicador de calidad es el índice de severidad por flicker de corta duración (P_{ST}). Para las armónicas los indicadores son las tensiones armónicas individuales (V_i) y el factor de distorsión total de armónicas (THD).

La tolerancia para el indicador de flicker es que no debe superar la unidad, mientras que para los indicadores de las armónicas la tolerancia se indica en la Tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1 Tolerancias de la tensión armónica y el factor de distorsión total

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA ó THD	TOLERANCIA V _i ' ó THD' (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicas Impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	0.1 + 2.5/n	0.2 + 12.5/n
(Armónicas impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	3.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

CAPÍTULO IV CRITERIOS DE DISEÑO

4.1 Elección del tipo de compensación

Se debe elegir el tipo de compensación de acuerdo al nivel de tensión, a la forma de conexión deseada, a la carga a compensar y al nivel de compensación. En lo que respecta al presente informe la compensación se escoge en BT, de conexión automática, sobre un sistema de utilización industrial y del tipo global, es decir, con el banco de condensadores conectado a las barras principales del sistema.

4.2 Cálculo de la potencia reactiva a compensar

Del triángulo de potencias de la Fig. 1.1 se tiene que la cantidad de potencia reactiva requerida para compensar un sistema eléctrico es:

$$Q_C = P * (\tan \phi_{inicial} - \tan \phi_{final}) \quad (4.1)$$

En donde Q_C es la potencia requerida (a compensar) en kVar, P es la potencia activa del sistema eléctrico en kW, $\phi_{inicial}$ es el valor del ángulo correspondiente al estado actual del sistema y ϕ_{final} el valor del ángulo correspondiente al valor final deseado. Como ya se vio en el capítulo 1 el valor final deseado mínimo aceptable es de $\cos \phi_{final} = 0,9578$. Sin embargo, para efectos de cálculo se puede asumir que $\cos \phi_{final} = 0,98$, con lo que la penalidad de recargo en la factura de la energía eléctrica consumida será completamente anulada.

De la fórmula 4.1 se puede elaborar una tabla en la que se halle un factor a partir de una doble entrada de datos, en donde se escoge $\phi_{inicial}$ y ϕ_{final} . Dicho factor multiplicará a la potencia P , hallándose la potencia reactiva a compensar Q_C por el banco de condensadores. Los valores de la potencia activa y del factor de potencia actual del sistema se pueden obtener mediante mediciones con analizadores de redes o mediante cálculos a partir de los datos de las facturas eléctricas, preferentemente de los 12 meses anteriores al cálculo. Sin embargo, siempre se deben tomar mediciones con un analizador de redes que pueda sensar armónicos para efectos de diseño de un banco de condensadores de un sistema industrial.

Tabla N° 4.1 Cálculo de la potencia reactiva a compensar

**Valores del factor multiplicador
($Q_c = \text{factor} * P$)**

cosΦ final cosΦ inicial	0,955	0,960	0,965	0,970	0,975	0,980	0,985
0,650	0,859	0,877	0,897	0,919	0,941	0,966	0,994
0,670	0,797	0,816	0,836	0,857	0,880	0,905	0,933
0,690	0,738	0,757	0,777	0,798	0,821	0,846	0,874
0,710	0,681	0,700	0,720	0,741	0,764	0,789	0,817
0,730	0,626	0,645	0,664	0,686	0,708	0,733	0,761
0,750	0,571	0,590	0,610	0,631	0,654	0,679	0,707
0,770	0,518	0,537	0,557	0,578	0,601	0,626	0,653
0,790	0,466	0,484	0,504	0,525	0,548	0,573	0,601
0,810	0,413	0,432	0,452	0,473	0,496	0,521	0,549
0,830	0,361	0,380	0,400	0,421	0,444	0,469	0,497
0,850	0,309	0,328	0,348	0,369	0,392	0,417	0,445
0,870	0,256	0,275	0,295	0,316	0,339	0,364	0,392
0,890	0,202	0,221	0,241	0,262	0,284	0,309	0,337
0,910	0,145	0,164	0,184	0,205	0,228	0,253	0,280
0,930	0,085	0,104	0,123	0,145	0,167	0,192	0,220
0,950	0,018	0,037	0,057	0,078	0,101	0,126	0,154

4.3 Escalones en la regulación de la potencia reactiva

4.3.1 Concepto de escalón

Un banco de condensadores en BT está compuesto por varios condensadores, los cuales van conectándose o desconectándose de acuerdo a la solicitud del sistema. Para que puedan entrar o salir del sistema por órdenes del regulador de potencia reactiva los condensadores deben ser agrupados en escalones, los cuales definen el funcionamiento del banco, así como su equipamiento y tamaño.

El escalón es, entonces, un bloque de potencia reactiva, definida por el valor nominal de los condensadores que lo componen. Por ejemplo, en un banco de 180kVar en 400V se tiene que existen 6 condensadores de 30kVar agrupados mediante una regulación 1:1:2:2. Esto significa que los dos primeros escalones son de 30kVar cada uno y los otros dos están compuestos cada uno por dos condensadores de 30kVar.

4.3.2 Regulación física y regulación eléctrica

Para entender la diferencia entre la regulación física y la eléctrica se puede dar como ejemplo otro banco de 180kVar en 400V, pero que tenga una regulación 1:1:1:1, lo que significa que está conformado por 6 condensadores de 30kVar cada uno, en donde cada condensador consistirá en un escalón. Comparando este ejemplo y el del acápite anterior se entenderá que la regulación eléctrica es la misma, puesto que el primer escalón en ambos

casos está conformado por un condensador de 30kVar, sin embargo la regulación física es distinta, debido a que en el segundo caso se necesitarán 6 contactores (dos más que en el primer caso) resultando esto en el uso de más materiales y, en consecuencia, en un mayor tamaño de la envolvente.

4.3.3 Elección del número de escalones

Debe elegirse el número de escalones tomando en cuenta el equilibrio entre la regulación eléctrica y la física, es decir, se debe tomar en cuenta que un excesivo número de escalones significará utilizar más equipos, una envolvente más grande y probablemente una entrada y salida del sistema de los escalones más pequeños de una manera muy rápida, lo que puede desgastar muy rápido a los contactores y a los condensadores.

Por otro lado, el uso de muy pocos escalones significará que los condensadores estarán agrupados en bloques de potencia reactiva muy grandes, lo que hará que el sistema no sea compensado adecuadamente, porque si la solicitud de potencia reactiva es muy fluctuante el escalón de turno (compuesto por un bloque importante de potencia reactiva) será conectado y desconectado muchas veces en poco tiempo, ocasionando, en primer lugar, que el tiempo de vida de los contactores y los condensadores disminuya, y, en segundo lugar, que habrá momentos en los que el sistema estará sobrecompensado o subcompensado, debido a la falta de una regulación fina.

Otro factor a tomar en cuenta es que los reguladores de potencia reactiva que se encuentran en el mercado tienen como máximo 14 relés de salida, es decir que tienen la capacidad de accionar hasta 14 escalones, incluyendo aquellos que se considere como reserva para un futuro crecimiento de la planta industrial.

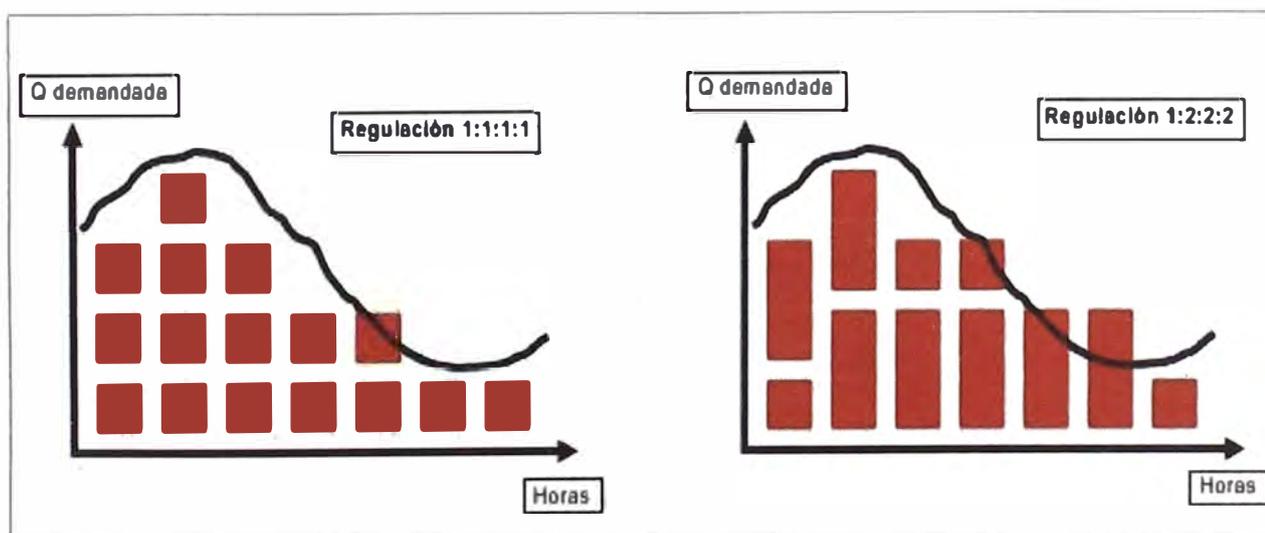


Fig. 4.1 Comparación de dos tipos de escalonamiento (regulación)

4.4 Elección de los componentes principales

4.4.1 Condensadores

Los condensadores a utilizar deberán ser preferentemente del mismo fabricante, de una tensión nominal igual o superior a la del sistema y de una potencia total que sea inmediatamente superior a la obtenida en los cálculos previos.

Si la tensión nominal de los condensadores es mayor que la del sistema entonces se deberá calcular el valor de la potencia reactiva de cada condensador en la tensión de operación:

$$Q_{op} = Q_n * \frac{V_{op}^2}{V_n^2} \quad (4.2)$$

En donde el valor de la potencia reactiva de operación (Q_{op}) es igual al valor de la potencia reactiva nominal (Q_n) multiplicado por la relación de los cuadrados de las tensiones de operación (V_{op}) y la nominal del condensador (V_n).

Se deben elegir condensadores que cumplan con las recomendaciones de normas internacionales como por ejemplo la IEEE Std. 18-2002, en donde se establece, entre otras cosas, que:

- * Puedan soportar el 110% de la tensión nominal eficaz.
- * Puedan soportar el 120% de la tensión nominal pico, incluyendo armónicos.
- * Puedan soportar el 135% de la corriente nominal eficaz.
- * Que no excedan el 135% de la potencia reactiva nominal.
- * El condensador deberá poseer internamente un dispositivo de descarga que reduzca la tensión residual a 50V o menos en un tiempo máximo de un minuto después de que sea desconectado.



Fig. 4.2 Condensadores tubulares de diferentes potencias

Por otro lado la norma IEC 60831-2 dice:

- * La tensión máxima podrá ser de 110%Vn durante 8 horas al día, 115%Vn durante 30 minutos, 120%Vn durante 5 minutos y 130%Vn durante 1 minuto.
- * La máxima corriente es de 130%In.
- * La tasa de descarga es de 75V en 3 minutos.
- * La tolerancia de potencia nominal es de -5% a +5%.

Los estándares de la IEEE son referenciales, mientras que el cumplimiento de las normas IEC por parte de los fabricantes de condensadores puede ser certificado por laboratorios especializados, por lo que se pone más énfasis a estas últimas, ya que con dichas certificaciones se garantiza que los condensadores utilizados cumplen con los requisitos mínimos de la norma.

4.4.2 Protecciones eléctricas

El banco de condensadores deberá tener un interruptor general, que puede ser del tipo caja moldeada o de bastidor abierto. La capacidad del interruptor deberá ser como mínimo de 1,43 veces la capacidad nominal del banco; según la norma IEC 60831-2.

Los escalones del banco podrán ser protegidos por interruptores automáticos en caja moldeada o por fusibles. En el primer caso la capacidad de los interruptores deberá ser correspondiente a 1,43 veces la capacidad nominal del escalón, mientras que en el segundo los fusibles deberán poder soportar entre 1,6 a 1,8 veces la corriente nominal.

Se debe tomar en cuenta que mientras la función principal de los interruptores es la de proteger a los condensadores de un cortocircuito, permitiendo aislar un escalón a la vez, los fusibles sirven principalmente para aislar un escalón defectuoso de los demás una vez presentada la falla.

El sobredimensionamiento de las protecciones se debe a que se está considerando los límites máximos de operación de los condensadores y la presencia de armónicos.

4.4.3 Contactores especiales para condensadores

Cuando se conecta por primera vez un escalón la corriente de inserción puede llegar a ser tan grande como 200 veces la corriente nominal o aún más. El límite de la corriente de conexión para los condensadores es, justamente, de 200 veces In, por lo que los contactores deberán poder soportarla. Según la IEEE Std. 18-2002 los contactores podrán escogerse con una capacidad nominal mínima de 1,5 veces la corriente nominal del escalón, teniendo en cuenta contactores comunes. Pero también advierte que siempre es mejor tomar los datos recomendados por los fabricantes de los contactores.

A propósito del párrafo anterior se debe anotar que en el mercado eléctrico existen contactores especiales para condensadores, los cuales tienen unos accesorios especiales llamados inductancias de choque, diseñadas para soportar las altas corrientes de inserción al conectarse un escalón. Las inductancias de choque son pequeñas resistencias que se colocan en forma de espirales (bobinas) en paralelo con los contactos principales del contactor mediante un bloque de contactos auxiliares. (Véase Fig. 4.3)

Según las especificaciones del fabricante los contactores especiales para condensadores se pueden usar para diversos niveles de tensión y, por lo tanto, para escalones de diferente potencia reactiva en diferentes tensiones.

En la Tabla N° 4.2 se muestra las capacidades de contactores especiales de un fabricante.

Tabla N° 4.2 Potencia de contactores para condensadores según un fabricante europeo

Tabla de selección según IEC 60947-4-1												
Modelo	Potencia en kVar, 60Hz, AC-6b											
	230/240 V			400/415 V			440 V			500/550 V		
	40°C	55°C	70°C	40°C	55°C	70°C	40°C	55°C	70°C	40°C	55°C	70°C
A	8	7,5	6	12,5	12,5	10	15	13	11	18	16	12,5
B	12,5	11,5	9	22	20	15,5	24	20	17	30	25	20
C	16	16	11	30	27,5	19,5	32	30	20,5	34	34	25
D	25	24	20	40	40	35	50	43	37	55	50	46
E	30	27	23	50	45	39	55	48	42,5	65	60	50
F	35	30	25	60	50	41	65	53	45	75	65	55
G	40	35	30	70	60	53	75	65	58	85	75	70
H	45	40	35	80	70	60	85	75	70	95	82	78



Fig. 4.3 Contactor especial para condensadores

4.5 Distribución de la intensidad de corriente

4.5.1 Dimensionamiento de las barras colectoras

Para poder distribuir la potencia reactiva generada por los condensadores hacia el sistema eléctrico se requerirá de un juego de barras colectoras, las cuales deberán soportar los niveles de intensidad de corriente máximos del banco. Las barras colectoras son

preferentemente planas, de cobre de alto grado de pureza y de dimensiones como las que se indican en la Tabla N° 4.3 (las sombreadas en verde son las dimensiones más comunes en el mercado eléctrico).

Una práctica común es la de elegir las barras colectoras que tengan la capacidad de conducir 1,5 veces la corriente nominal calculada para el banco de condensadores, con lo que se supera la capacidad elegida para el interruptor principal (1,43 veces la corriente nominal).

Tabla N° 4.3 Capacidad de las barras colectoras de cobre, según la norma DIN 43671

Carga Continua de Barras de Cobre (DIN 43671)								
Grosor x Ancho	Sección	Peso por metro	Intensidad continua en amperios c. a. pintado hasta 60Hz			Intensidad continua en amperios c.a. desnudo hasta 60Hz		
			1	2	3	1	2	3
mm	mm²	Kg/m						
2x12	23,5	0,209	123	202	228	108	182	216
2.3x12	27,6	0,241	135	220	244			
2x15	29,5	0,262	148	240	261	128	212	247
3x15	44,5	0,396	187	316	381	162	282	361
2x20	39,5	0,351	189	302	313	162	264	298
3x20	59,5	0,529	237	394	454	204	348	431
5x20	99,1	0,882	319	560	728	274	500	690
10x20	199	1,77	497	924	1320	427	825	1180
3x25	74,5	0,663	287	470	525	245	412	498
5x25	124	1,11	384	662	839	327	586	795
3x30	89,5	0,796	337	544	593	285	476	564
5x30	149	1,33	447	760	944	379	672	896
10x30	299	2,66	676	1200	1670	573	1060	1480
3x40	119	1,05	435	692	725	366	600	690
5x40	199	1,77	573	952	1140	482	836	1090
10x40	399	3,55	850	1470	2000	715	1290	1770
5x50	249	2,22	697	1140	2010	583	994	1260
10x50	499	4,44	1020	1720	2950	852	1510	2040
5x60	299	2,66	826	1330	1510	688	1150	1440
10x60	599	5,33	1180	1960	2610	985	1720	2300
5x80	399	3,55	1070	1680	1830	885	1450	1750
10x80	799	7,11	1500	2410	3170	1240	2110	2790
5x100	499	4,44	1300	2010	2150	1080	1730	2050
10x100	988	8,89	1810	2850	3720	1490	2480	3260
10x120	1200	10,7	2110	3280	4270	1740	2860	3740
10x150	1500	13,3	2550	3915	5080			
10x160	1600	14,2	2700	4130	5360	2220	3590	4680
10x200	2000	17,8	3290	4970	6430	2690	4310	5610

Sin embargo, una mejor elección es la de calcular el juego de barras colectoras de modo que su capacidad sea mayor o igual en 15% a la capacidad del interruptor general, con lo que no sólo se asegura el buen funcionamiento del sistema en presencia de armónicos sino

que se evitan los efectos nocivos de las fuerzas electrodinámicas o los sobrecalentamientos en las barras.

4.5.2 Dimensionamiento de los cables de fuerza

Para distribuir la energía reactiva desde los condensadores hacia las barras colectoras, pasando a través de los contactores y fusibles, se necesitarán cables del tipo THW-90 que tengan como mínimo una capacidad de 1,43 veces la corriente nominal del escalón.

4.6 Elección de la envolvente

Para los bancos de condensadores de sistemas de utilización industriales se deben utilizar envolventes (Fig. 4.4) capaces de contener todos los equipos que los componen, como lo son: los equipos de protección y control, las barras colectoras y los condensadores.

Generalmente la envolvente es del tipo autoportado, es decir que permanece fijado al suelo, siendo de tamaños acordes a los estándares del fabricante (entre 1,8m y 2,1m de alto y entre 0,6m y 0,8m de ancho por cada cubículo o “cuerpo”). La envolvente deberá ser fabricada con planchas de fierro laminadas en frío de 2mm de espesor para la estructura y puerta, y con planchas de 1,5mm de espesor para los paneles laterales, posteriores y techo. De acuerdo a los estándares de cada fabricante la envolvente puede poseer zócalos de entre 0,10m a 0,20m de altura. La envolvente deberá tener tratamiento anticorrosivo por decapado químico y podrá ser pintado con pintura electrostática.



Fig. 4.4 Banco de condensadores de dos cuerpos (vista exterior)

De acuerdo a la cantidad de escalones y a las dimensiones de los condensadores se debe elegir una envolvente de uno o varios cuerpos, es decir que sea modular, capaz de albergar todo el equipamiento necesario de fuerza y control, dejando el espacio suficiente para que el cableado entre los equipos sea adecuado, de tal manera que se eviten recalentamientos. Por esta razón se debe tener especial cuidado en efectuar el cálculo del caudal de disipación térmica de la envolvente, y si se encuentra necesario, el cálculo del sistema de ventilación forzada, que incluye el uso de un termostato, ventiladores, extractores de aire y rejillas de ventilación, según sea el caso. El sistema de ventilación forzada hará fluir el aire caliente, producto del funcionamiento de los condensadores, desde la parte inferior de la envolvente y lo expulsará por la parte superior de la misma. Estos cálculos se pueden realizar mediante programas (software) diseñados por los propios fabricantes de sistemas de ventilación para envolventes, y que son de dominio público.

4.7 El circuito de control

Los equipos involucrados en el circuito de control son el transformador de corriente, el regulador de potencia reactiva, las bobinas de los contactores especiales para condensadores y, según sea el caso, el transformador de tensión. Este último permite alimentar las bobinas de los contactores si su tensión de operación y la del sistema son diferentes. El transformador de corriente se instala en la barra principal del Tablero General del sistema, y sirve para indicarle al regulador de potencia reactiva el nivel de corriente utilizado por las cargas del sistema. La potencia del transformador de corriente deberá ser calculado para alimentar al regulador de potencia reactiva y suficiente para superar las pérdidas por efecto Joule del cable de control entre el transformador y el regulador.

4.7.1 El regulador de potencia reactiva

El regulador deberá elegirse de acuerdo a la tensión de operación del sistema. En el mercado existen reguladores que trabajan en 230V y en 400V, para otras tensiones será necesario utilizar un transformador de tensión adecuado. (Véase Fig. 4.5)

Son habituales los reguladores que poseen 6, 8, 12 ó 14 relés de salida, capaces de controlar la misma cantidad de escalones, por lo que se deberá elegir aquel regulador que tenga por lo menos la misma cantidad de relés como escalones tenga el banco.

También es necesario tomar en cuenta el posible crecimiento de cargas del sistema de utilización industrial, por lo que se deberá consultar con el usuario del banco sobre sus planes de compra de nuevos equipos para separar tanto los relés de salida del regulador

como el espacio necesario dentro de la envolvente de uno o más espacios de reserva, para compensar las cargas futuras.

Para sistemas eléctricos con presencia de armónicos se sugiere utilizar reguladores que posean una alarma contra armónicos, la cual se puede programar para que al sensor un cierto nivel de armónicos (por ejemplo un THD (I) de 7%) el regulador desconecte uno a uno los escalones hasta sacar de servicio al banco por completo, de esta manera se puede proteger los condensadores de las sobretensiones provocadas por los armónicos producidas por las cargas no lineales del sistema.



Fig. 4.5 Reguladores de potencia reactiva

De acuerdo al fabricante la programación de los escalones que el regulador acepte podrá ser, entre otras, las siguientes: 1:1:1:1, 1:1:2:2, 1:2:2:2 ó 1:2:4:4. Por esta razón se debe tener cuidado en elegir los condensadores apropiados para ejecutar la programación deseada, la diferencia entre la unidad y los escalones dobles o cuádruples no deberá exceder del 10%. Algunos reguladores tienen capacidades de programación más flexibles, por lo que siempre se debe consultar la información técnica del fabricante.

4.7.2 Dimensionamiento del transformador de control

Cuando la tensión de trabajo del sistema y la tensión de trabajo de las bobinas de los contactores y del regulador son diferentes se deberá utilizar un transformador de control. Sin embargo, se sugiere utilizar dos transformadores de tensión, uno para las bobinas de los contactores y otro para el regulador y los equipos del sistema de ventilación forzada, si es requerido. De esta manera se asegura que alguna falla o sobretensión que se presente en el circuito de control de los contactores no afectará del mismo modo al sistema de ventilación forzada o al trabajo del regulador.

La potencia del transformador para los contactores es el resultado de la suma de la potencia de llamada del contactor más grande y de las potencias de mantenimiento de todos los demás contactores, multiplicada por un factor de seguridad, que puede ser de 10% a 20%:

$$St = 1,15*(S_{llamada\ max} + \sum S_{mantenimiento}) \quad (4.3)$$

Por otro lado, la potencia del segundo transformador de control se calcula sumando la potencia requerida por el regulador y por los ventiladores que se instalarán en la envolvente, también multiplicados por un factor de seguridad.

Para obtener las potencias de llamada y de mantenimiento de las bobinas de los contactores se deberá consultar la información técnica proporcionada por el fabricante.

4.8 Disminución de los efectos de los armónicos en la red a compensar

Para poder tomar una acción que reduzca los armónicos en una red eléctrica industrial es necesario primero llevar a cabo un estudio de calidad de la energía en el que se registren, entre otros parámetros, los niveles de armónicos de tensión y de corriente tanto en el tablero general como en los puntos de conexión de las cargas no lineales (o conjuntos de cargas) más importantes. De esta manera los especialistas que hicieron las mediciones podrán determinar las soluciones más convenientes y de mejor tasa de recuperación económica, como por ejemplo el uso de filtros de rechazo o de absorción, el uso de transformadores de potencia con un mayor factor K, el uso de transformadores de aislamiento para equipos con mucha electrónica y para equipos de cómputo, etc.

En el diseño de un nuevo banco de condensadores para una planta industrial la información obtenida en el estudio determinará la solución más adecuada que podrá ser: utilizar condensadores estándar, utilizar condensadores sobredimensionados o utilizar condensadores sobredimensionados en conjunto con reactancias. Estas soluciones dependen de los registros obtenidos y de las pautas que se darán más adelante.

Las tablas siguientes indican los niveles máximos de distorsión según la IEEE.

Tabla N° 4.4 Niveles de distorsión de corriente permitidas según IEEE Std. 519

Distorsión máxima de armónicos de corriente (% de IL)						
Orden par de armónicos						
Isc/IL	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<=h	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

* Isc es la máxima corriente de corto circuito en el punto de conexión (PCC).

* IL es la máxima corriente demandada (componente a la frecuencia fundamental) en el PCC.

Tabla N° 4.5 Niveles de distorsión de tensión permitidas según IEEE Std. 519

Tensión de la barra en el PCC	Distorsión individual de tensión (%)	Distorsión total de tensión THD (%)
<69kV	3,0	5,0
69,001kV<161kV	1,5	2,5
161kV>	1,0	1,5

4.8.1 Sobredimensionamiento de la tensión de los condensadores

El sobredimensionamiento de los condensadores significa que se utilizarán aquellos que tengan una tensión nominal superior a la tensión de operación del sistema, de esta manera podrán trabajar en presencia de un nivel de armónicos moderado, sin que las sobretensiones que se puedan presentar dañen los equipos. Esto es porque de acuerdo a las normas de fabricación, como la IEC 60831-1, que son cumplidas por los distintos fabricantes, se asegura que al utilizar un condensador sobredimensionado su capacidad de soportar sobrecorrientes o sobretensiones será aun mayor que la de un condensador estándar. Aunque en teoría se podrían utilizar condensadores sobredimensionados con una tensión nominal muy superior a la de operación del sistema, en realidad no es recomendable utilizar condensadores muy sobredimensionados debido a que mientras mayor sea la tensión nominal de los condensadores mayor será su tamaño y menor su capacidad, además de un aumento significativo en el costo.

Por lo tanto, se deben utilizar condensadores sobredimensionados de acuerdo a las tablas de cada fabricante, o con un nivel de tensión inmediatamente superior al requerido, tomando en cuenta siempre el recálculo de las potencias reactivas tal como se indicó en el acápite 4.4.1. Por ejemplo un condensador de 20kVar en 480V podrá utilizarse en un sistema de 380V pero con una potencia recalculada de 12,5kVar, y soportará mayores sobretensiones que otro de 12kVar y tensión nominal de 380V.

4.8.2 Uso de filtros de rechazo

Los filtros de rechazo son constituidos por el conexionado de condensadores en serie con reactancias construidas para una frecuencia específica. Para encontrar el filtro adecuado se debe utilizar aquellas reactancias que tengan el factor de desintonía óptimo, según las tablas de los fabricantes. De acuerdo a las mediciones obtenidas en el estudio de calidad de la energía si la distorsión es mayor en un nivel de armónicos dado, por ejemplo el 5° armónico, entonces la frecuencia de resonancia será de 300Hz y el filtro deberá elegirse para una frecuencia inmediatamente inferior a esta, por ejemplo de 280Hz, lo que implicaría un factor de desintonía igual a 4,6%.

Cada fabricante tiene distintos factores de desintonía lo que implica distintas frecuencias desintonizadas, lo importante es tener en cuenta la frecuencia nominal del sistema, que las frecuencias de resonancia son múltiplos de ella y que, finalmente, siempre se deberá elegir, de los datos del fabricante, aquella reactancia desintonizada a una frecuencia inmediatamente inferior a la de resonancia.



Fig. 4.5 Filtro de rechazo compuesto por reactancias y condensadores

Para verificar si un banco resonará con el sistema se debe hallar la frecuencia de resonancia mediante la fórmula 2.6, mientras mayor sea el resultado el sistema será más fuerte. Si la frecuencia hallada es cercana a la de un armónico (3°, 5°, 7°) entonces la potencia del banco se deberá disminuir.

4.8.3 Criterios para elegir la solución

De acuerdo a la Tabla N° 4.6, al comparar la potencia total de las cargas no lineales (S_H) con la potencia nominal del transformador de potencia (S_T) y tomar en cuenta los valores típicos de armónicos para esas cargas se puede seleccionar la mejor solución.

Sin embargo, para tener un resultado más preciso será necesario evaluar las mediciones obtenidas en un estudio de calidad de la energía, mediante el registro de datos de un analizador de redes con capacidad de detectar armónicos de tensión y de corriente. Una vez realizadas las mediciones se compara el factor de carga del sistema multiplicado por la distorsión armónica de corriente con los valores fijados en la Tabla N° 4.7, en donde S_L es la potencia aparente total consumida por todas las cargas, medida en el lado de baja tensión del transformador de potencia, S_T es la potencia aparente nominal del transformador y THD(I) la distorsión armónica de corriente medida.

Tabla N° 4.6 Soluciones de acuerdo a los datos del sistema

Datos	Solución
$\frac{S_H}{S_T} \leq 10\%$	Utilizar condensadores estándar; con una tensión nominal igual a la del sistema.
$10\% < \frac{S_H}{S_T} \leq 25\%$	Utilizar condensadores sobredimensionados; con una tensión nominal inmediatamente superior a la del sistema, o la que indique el fabricante.
$25\% < \frac{S_H}{S_T} \leq 60\%$	Utilizar condensadores sobredimensionados en conjunto con reactancias para formar filtros de rechazo, de acuerdo a los armónicos típicos correspondientes a las cargas no lineales del sistema.
$\frac{S_H}{S_T} > 60\%$	Utilizar filtros de absorción para múltiples armónicos, luego de elaborar un estudio de calidad de la energía.

Tabla N° 4.7 Soluciones de acuerdo a las mediciones del estudio de calidad

Datos	Solución
$THD(I) * \frac{S_L}{S_T} \leq 5\%$	Utilizar condensadores estándar; con una tensión nominal igual a la del sistema.
$5\% < THD(I) * \frac{S_L}{S_T} \leq 10\%$	Utilizar condensadores sobredimensionados; con una tensión nominal inmediatamente superior a la del sistema, o la que indique el fabricante.
$10\% < THD(I) * \frac{S_L}{S_T} \leq 20\%$	Utilizar condensadores sobredimensionados en conjunto con reactancias para formar filtros de rechazo, de acuerdo a los armónicos obtenidos en la medición.
$THD(I) * \frac{S_L}{S_T} > 20\%$	Utilizar filtros de absorción para múltiples armónicos, luego de analizar las mediciones obtenidas.

Como apunte final a este capítulo se debe anotar que diversos fabricantes de condensadores y reactancias han elaborado sus propios métodos prácticos para determinar los límites descritos en la Tabla N° 4.6, por lo que estos cambian ligeramente de fabricante en fabricante. Por esta razón, es recomendable realizar un estudio de calidad de la energía para obtener los datos solicitados por la Tabla N° 4.7 y determinar con mayor nivel de precisión la solución más óptima, porque relaciona la solución posible directamente con los datos medidos de operación del sistema.

CAPÍTULO V UN EJEMPLO DE DISEÑO

5.1 Mediciones obtenidas de una planta industrial típica

Después de efectuar las mediciones para un estudio de calidad de la energía en una planta industrial se han obtenido los siguientes datos:

- Sistema: TNS.
- Frecuencia de operación: 60Hz.
- Tensión de operación del sistema: 400V, 3F+N.
- Potencia aparente del transformador de potencia: 1000kVA.
- Tensión de cortocircuito del transformador de potencia: 4,2%.
- Factor de potencia mínimo: 0,73.
- Factor de potencia cuando la potencia activa es máxima: 0,88.
- Potencia activa cuando el factor de potencia es mínimo: 283kW.
- Potencia activa máxima: 896,5kW.
- THD(I): 13,6%, 5to armónico
- THD(V): 2,1%

Según la inspección realizada en la planta se pudo observar que el total de cargas generadoras de armónicas tiene una potencia aparente de 287kVA. Esta potencia es la capacidad total de las cargas no lineales, estén trabajando o no.

5.2 Cálculo de la potencia reactiva y determinación del número de escalones

De los datos obtenidos y utilizando la Tabla N° 4.1, con un factor de potencia deseado de 0,98 la potencia reactiva a compensar será de 207,4kVar. Al calcular la potencia reactiva a partir de la potencia activa máxima del sistema se obtendrá 302,1kVar. Si se hubiera elegido el factor de potencia deseado en 0,97 el resultado sería 259,2kVar, lo que significa que será suficiente con elegir una potencia reactiva para el banco entre 259,2kVar y 302,1kVar. Una primera aproximación al elegir la mejor solución en presencia de armónicos será la que se obtenga al utilizar la Tabla N° 4.6. Así, la relación S_H / S_T es de 28,7%, por lo que se deberá asumir, en primera instancia, el uso de condensadores

sobredimensionados en conjunto con reactancias para elaborar filtros de rechazo. Esta información es útil si no es posible efectuar las mediciones o no se cuenta con el tiempo para efectuarlas.

Una mejor aproximación a la solución es mediante los registros obtenidos en las mediciones y el uso de la Tabla N° 4.7, con lo que (utilizando los datos del momento del mayor consumo) el resultado es de 12,19%, por lo que la solución será la misma a la planteada en el párrafo anterior.

Dicho esto se deberán elegir condensadores de tensión nominal superior a 400V, por lo que una buena elección de condensadores sobredimensionados será la de aquellos con una tensión nominal de 440V. En el mercado existen condensadores de diversas potencias en 440V. Si se escoge un condensador de 40kVar en 440V entonces su potencia reactiva en 400V será de 33kVar. Con nueve escalones cada uno de 33kVar la potencia del banco será de 297kVar, la cual se encuentra dentro de los límites definidos en el primer párrafo de este acápite, por lo que dicho valor es aceptable.

Sin embargo, se puede observar que en el momento en el que el sistema tiene su factor de potencia más bajo la potencia reactiva requerida no podrá ser compensada de un modo adecuado, porque con 7 escalones de 33kVar la potencia del banco será de 231kVar mientras que con 6 será de 198kVar, lo que no llega a cubrir con eficacia los 207,4kVar en este punto de operación. En cambio, si existieran escalones de 16,5kVar (20kVar en 440V), la regulación podría lograr 214,5kVar, lo que implicaría que el banco podría suministrar la potencia reactiva de manera más eficiente.

Así, se escogerá entonces el uso de 2 condensadores de 20kVar y de 8 de 40kVar en 440V, es decir, 2 condensadores de 16,5kVar y 8 de 33kVar en 400V, lo que da un total de 297kVar en 400V. La programación será 1:1:2:2, y consistirá de 10 escalones.

Para conocer si el banco planteado resonará con el sistema se debe calcular la frecuencia de resonancia, por lo que al reemplazar los datos en la fórmula 2.16 se obtiene una frecuencia de resonancia de 537,2Hz. Este resultado significa que el banco tenderá a resonar con el sistema en el 9° armónico y ya que este es un múltiplo de tres lo más recomendable es el uso de transformadores de aislamiento Dy para proteger a las cargas monofásicas, tales como los equipos de cómputo.

Para calcular la reactancia se deberá escoger un p% inmediatamente superior al calculado a partir de los datos del sistema, que resulta en 4%. Así, se deberá escoger una reactancia con una frecuencia desintonizada para el 5° armónico, por ejemplo de 280Hz ($p = 4,6\%$), y

que sea apropiada para usarse con condensadores de 16,5kVar y otra para condensadores de 33kVar en 400V o valores de potencia reactiva nominal inmediatamente superiores, de acuerdo a las datos técnicos de los fabricantes. De esta manera se constituirán 10 filtros de rechazo para el 5° armónico, uno en cada escalón del banco.

5.3 Elección de los componentes principales

Para una potencia reactiva total de 297kVar en 400V la corriente nominal será de 429 A, que al ser multiplicado por 1,43 la corriente nominal del interruptor principal deberá ser mayor o igual a 614 A. En el mercado existen interruptores automáticos en caja moldeada y regulables con capacidad nominal de 630 A.

La elección de los fusibles, como ya se ha dicho en el capítulo anterior, dependerá de la potencia de los escalones. Para los escalones de 16,5kVar la corriente nominal es de 23,8 A, que al multiplicar por 1,6 da como resultado 38,1 A, por lo que se escogerá fusibles de 40 ó de 50 A, de acuerdo al fabricante. De igual modo, para los escalones de 33kVar la corriente nominal es de 68,2 A, por lo que los fusibles escogidos serán de 80 A.

Para escoger los contactores especiales para condensadores se puede utilizar el valor de la corriente de operación multiplicado por 1,43, sin embargo siempre será mejor utilizar las tablas de datos del fabricante, en la que determinan no las corrientes nominales sino las potencias reactivas nominales a las que pueden maniobrar. Como ejemplo, si se utiliza la Tabla N° 4.2 los condensadores elegidos serán los que tienen una potencia nominal de 22kVar para los escalones pequeños y los de 40kVar para los escalones más grandes. La elección natural de la temperatura de trabajo será de 40° C.

5.4 Dimensionamiento de las barras colectoras y de los cables de fuerza

Como la corriente nominal del interruptor principal es de 630 A, entonces las barras colectoras deberán poder soportar al menos 15% más de intensidad de corriente, es decir 724,5 A. De la Tabla N° 4.3 se elegirá aquella dimensión que sea común en el mercado y que sea inmediatamente superior al calculado, por lo que se elige un juego de barras colectoras de 10x40mm². Las barras deberán tener el largo suficiente para albergar todas las conexiones para cada escalón e inclusive para las ampliaciones futuras.

El cable de fuerza para los escalones más pequeños deberá poder conducir 23,8 A multiplicado por 1,43, es decir 34 A, por lo que será suficiente el de 6mm² del tipo THW. Para los escalones más grandes la corriente de diseño será de 97,5 A, por lo que se escogerá el cable de 25mm².

Se considera siempre la capacidad de conducción de los cables dentro de un ducto.

5.5 Elección de la envolvente

Los tamaños y potencias de los condensadores varían de fabricante en fabricante, sin embargo se puede decir que en líneas generales si una envolvente tiene 2m de altura, de 0,6m a 0,8m de ancho y de 0,6m de profundidad podrán caber en ella de 9 a 16 escalones, conformados cada uno hasta por dos condensadores del tipo tubular (también existen condensadores del tipo caja metálica, que son generalmente más grandes). Sin embargo, es necesario prever el espacio necesario para las reactancias, por lo que el conjunto condensador-reactancia requerirá aproximadamente el doble del espacio calculado inicialmente. Es recomendable que las reactancias estén físicamente sobre los condensadores, ya que de lo contrario el calor que estas generan los dañará.

Tomando en cuenta que los condensadores tubulares son los más comunes y que para el ejemplo sólo serán necesarios 10 escalones y 2 espacios de reserva, será suficiente con escoger 2 gabinetes de 2100x600x600mm², lo que significa 2,1m de alto (incluido el zócalo de 100mm), 0,6m de ancho y 0,6m de profundidad, cada cuerpo.

En el primer cuerpo se instalarán el interruptor principal y las barras colectoras, en los otros dos se instalarán los condensadores, fusibles y contactores. A pesar de que esta es una buena idea para iniciar el dimensionamiento de la envolvente, siempre se deberá recurrir a los datos de montaje de los equipos indicados por los fabricantes, así como del personal con la experiencia necesaria como para diseñar y efectuar los diagramas de disposición del banco de condensadores, en donde se detalla la ubicación, distancias y forma de montaje tanto de los equipos como del conexionado de las barras colectoras y otros detalles. (Ver Anexo A)

Otro punto importante es el del sistema de ventilación. Los condensadores por su naturaleza de trabajo tenderán a calentar el interior del gabinete, por lo que será necesario considerar un sistema de ventilación forzada compuesto por uno o más termostatos y varios ventiladores, extractores de aire y rejillas de ventilación.

La cantidad de estos equipos deberá ser determinada de acuerdo al caudal nominal de los mismos y al poder de disipación de la envolvente, que depende tanto de su área total como del material y de la ubicación de la misma. Primero se halla la potencia disipada por las barras y los equipos y se compara con la potencia que la envolvente es capaz de disipar.

Los cálculos para hallar los equipos idóneos para el sistema de ventilación se pueden hacer mediante programas (software) de los fabricantes de ventiladores, muchos de ellos ofrecidos por internet en forma gratuita.

5.6 Elección del regulador de potencia reactiva

Como ya se indicó anteriormente el banco de condensadores tendrá 10 escalones y 2 escalones de reserva, lo que da un total de 12 relés de salida. Será entonces suficiente escoger un regulador de 230V de tensión nominal (ya que el sistema es 400/230V 3F+N) y que tenga como mínimo 12 relés. Para el caso de estudio es recomendable utilizar un regulador que posea una alarma contra armónicos, de tal manera que se garantice que el banco se desactivará cuando exista una fuerte carga de armónicos, mayor a la que los condensadores puedan soportar. En el mercado a veces los reguladores con alarma tienen 14 relés de salida, por lo que esta opción es también válida.

5.7 Dimensionamiento del transformador de control

Como el sistema eléctrico posee neutro no será necesario el uso de transformadores de control. Sin embargo, si fuera necesario, entonces la potencia del transformador deberá poder alimentar al contactor más grande mientras la bobina absorbe la corriente de llamada y a todos los demás mientras permanezcan cerrados. Así, si la potencia de llamada del contactor más grande es de 140 VA, las potencias de mantenimiento son de 12 VA para cualquier contactor y el factor de seguridad se elige en 120%, entonces la potencia será de 312 VA. Entonces será suficiente con escoger un valor común en el mercado que cubra esa solicitud de potencia, como por ejemplo 400 VA.

5.8 Disminución de los armónicos en la red a compensar

Llegado a este punto el banco de condensadores ha sido completamente definido y se ha hallado la solución más óptima. Sin embargo, antes de poner el banco en funcionamiento se deberá sugerir al usuario las soluciones necesarias para disminuir los niveles de armónicos del sistema ya que pueden generar problemas, ocasionando flujo de armónicos hacia cargas que no estén protegidas por filtros, generando sobrecalentamientos, corrientes parásitas, sobrecarga de equipos, etc. De esta manera se disminuirán los niveles de armónicos y se asegurará un buen funcionamiento del banco de condensadores y del sistema, dentro de los parámetros que establecen las normas, tales como la IEEE Std. 519.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Para diseñar un banco de condensadores es necesario tener un conocimiento previo de los datos del sistema eléctrico, del transformador de potencia y de la naturaleza de las cargas, para así poder determinar la ubicación del banco y las posibles dificultades que se presenten al momento de su traslado, montaje, conexión y puesta en servicio.
2. Debido al avance de la tecnología y al incremento del uso de equipos con controladores electrónicos se hará siempre necesario hacer un estudio de calidad de la energía en el sistema a compensar. Si esto no fuera posible entonces se deberá obtener la mayor cantidad de datos posibles, siendo uno de los más significativos el de la potencia de las cargas generadoras de armónicos.
3. Los datos registrados en el estudio de calidad ayudarán a determinar la solución más adecuada respecto a la presencia de armónicos en el sistema. Sin embargo, las tablas N° 4.6 y N° 4.7 no provienen de norma alguna, sino de los ensayos en el laboratorio y de la experiencia lograda a lo largo de los años por algunos de los fabricantes de condensadores más reconocidos, por lo que dichas tablas no dejan de ser referenciales.
4. Es necesario estar en constante contacto con el usuario final al momento de coordinar tanto el estudio de calidad como la ejecución del diseño. Para el estudio de calidad se debe consultar, por ejemplo, en qué puntos del sistema medir. Para la ejecución del diseño un dato relevante es la proyección de cargas futuras, lo que determinará si deberán considerarse espacios de reserva para nuevos escalones o no.
5. Siempre se deberá recurrir a la información técnica de los fabricantes de los equipos a considerar dentro del banco de condensadores, los cuales definirán los modelos a utilizar según las características técnicas que tengan.
6. Es necesario verificar la condición de resonancia del banco de condensadores calculado con el sistema
7. En la medida de lo posible se deberán dejar espacios de reserva para nuevos escalones, para que se puedan compensar las cargas futuras.

8. Los estándares establecidos en las diversas normas no siempre coinciden en los límites de los parámetros eléctricos, porque a veces tienen diferentes reglas o formas de definir un determinado parámetro.
9. Siempre que se tome una decisión de diseño deberá realizarse en base a un fundamento teórico bien definido o una norma competente. Las normas técnicas utilizadas deberán ser compatibles con las normas legales vigentes.
10. Se pueden diseñar, fabricar y poner en funcionamiento bancos de condensadores en plantas industriales que tengan apreciable presencia de cargas no lineales.
11. No siempre es recomendable sobredimensionar un condensador, porque puede afectar al tamaño de la envolvente y al costo del banco.
12. Los factores multiplicadores para hallar los valores de diseño de los equipos, barras y cables se deben fundamentalmente a que consideran los efectos de sobretensión y sobrecalentamientos provocados por armónicos.
13. Es recomendable el uso de un regulador de potencia reactiva con alarma de armónicos programable.
14. No siempre son necesarios los transformadores de control, sin embargo cuando son necesarios se recomienda el uso de dos, uno para los contactores y otro para el regulador y los ventiladores.
15. El calor generado por los condensadores puede producir efectos negativos en el banco por lo que su disipación debe ser tomada seriamente al diseñar un banco.
16. Es necesario sugerir un plan de mantenimiento del banco de condensadores, ya que por bien diseñado que esté sus componentes siempre se desgastarán, comenzando por la disminución de la rigidez dieléctrica de los condensadores y terminando por la menor potencia que suministrarán a lo largo del tiempo.

ANEXO A
DIAGRAMAS DE DISPOSICIÓN DE UN BANCO DE CONDENSADORES
TÍPICO

ANEXO A: DIAGRAMAS DE DISPOSICIÓN DE UN BANCO DE CONDENSADORES TÍPICO

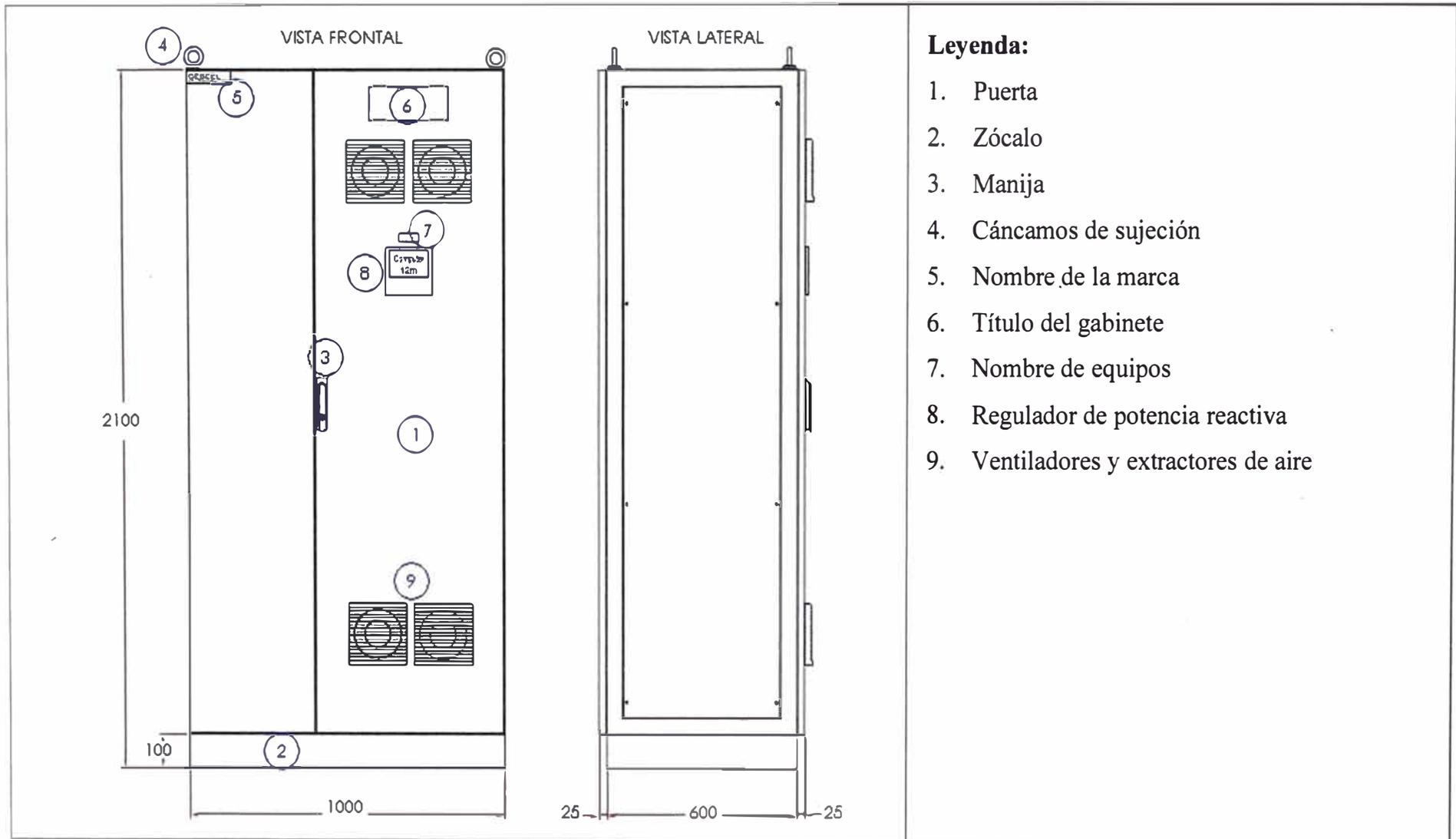
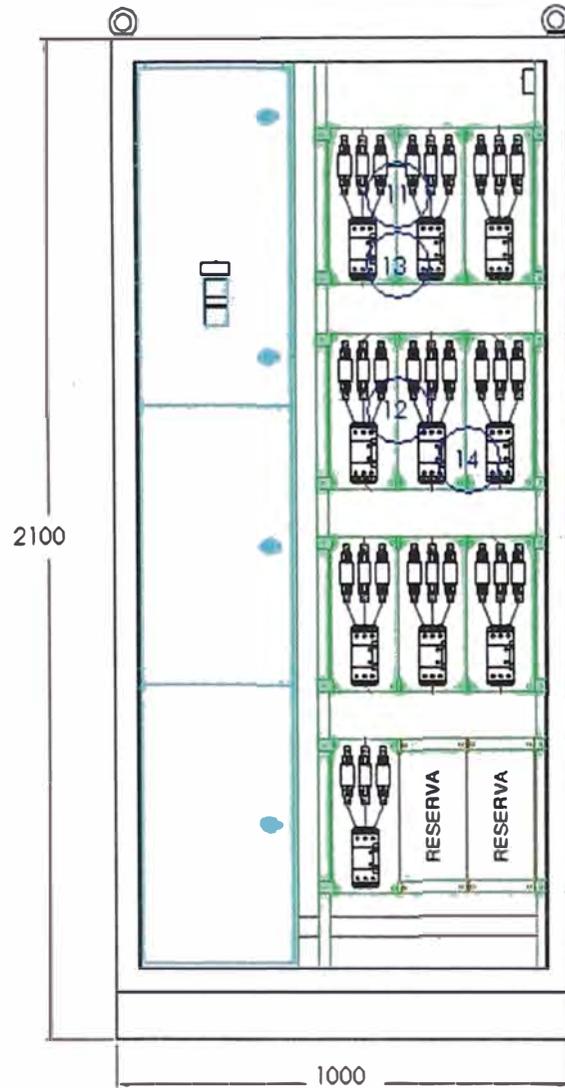
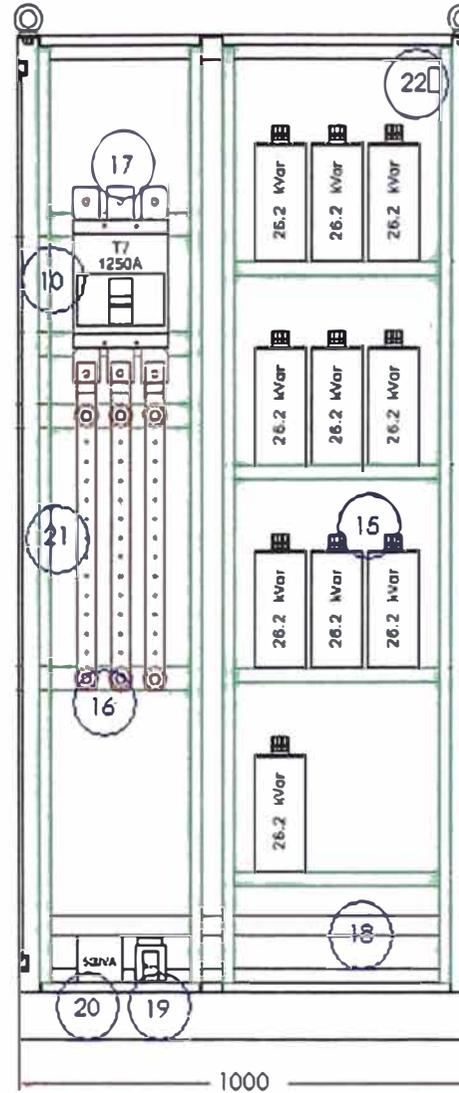


Fig. A.1 Vista exterior

VISTA INTERIOR DE LOS CONTACTORES



VISTA INTERIOR DE LOS CONDENSADORES



Leyenda:

- 10. Interruptor principal
- 11. Fusibles 63 A
- 12. Fusibles 125 A
- 13. Contactores 30kVar
- 14. Contactores 60kVar
- 15. Condensadores
- 16. Aisladores 750kg/1kV
- 17. Barras de conexión (suples)
- 18. Barra de tierra
- 19. Transformador de control 150VA (regulador y ventiladores)
- 20. Transformador de control 500VA (contactores)
- 21. Barra colectora 10x80mm²
- 22. Termostato

Fig. A.2 Vista interior

ANEXO B
PAUTAS BÁSICAS DE PUESTA EN SERVICIO, OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE UN BANCO DE CONDENSADORES

ANEXO B: PAUTAS BÁSICAS DE PUESTA EN SERVICIO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN BANCO DE CONDENSADORES

a) Puesta en servicio

- Revisar de nuevo las conexiones del circuito de mando y de potencia.
- Volver a situar los fusibles de protección del circuito de maniobra.
- Dar tensión al banco.

Si en este instante hay demanda de energía reactiva, el banco empezará (después del tiempo de conexión consignado) a efectuar las maniobras para compensar el $\cos\phi$ al valor previsto.

- Comprobar el funcionamiento manual del banco, forzando la desconexión de algunos condensadores al presionar el pulsador correspondiente durante unos segundos. Al dejar de pulsar y pasado el tiempo de conexión, volverá a conectarlos de nuevo.

Sin embargo, no es conveniente en momentos de baja carga conectar manualmente la totalidad de la batería, pues en determinados casos podrían llegar a producirse fenómenos de resonancia con el transformador de alimentación.

b) Precauciones de operación

Para un trabajo óptimo del banco de condensadores, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La tensión de servicio no debe superar la tensión nominal; el trabajo en condiciones de sobrecarga acorta considerablemente la vida de los condensadores.
- La corriente absorbida por cada condensador, medida a la salida del contactor, no debe ser superior a 1,3 veces la intensidad nominal del mismo. En caso que la intensidad que absorben los condensadores sea superior a la nominal, puede ser debido a la presencia de armónicos en la red o a una tensión superior a la nominal. Ambas circunstancias son perjudiciales para los condensadores.

c) Revisiones periódicas

El mantenimiento requerido por las baterías es muy limitado, pero se recomienda efectuar las siguientes operaciones:

- Al primer mes de funcionamiento:
 - Inspeccionar visualmente los condensadores.
 - Examinar los fusibles de protección.

- Controlar la temperatura.
- Controlar la tensión de servicio (especialmente en condiciones de baja carga).
- Reapretar bornes y conexiones.
- Anualmente:
 - Verificar la intensidad nominal de los condensadores.
 - Mantener limpios los bornes y aisladores de los condensadores.
 - Verificar el apriete de las conexiones de los bornes.
 - Revisar el estado de los contactos de los contactores.

Los condensadores más comunes son los del tipo tubular, los cuales tienen un sistema de protección interno, que hace que la superficie interna del condensador se ensanche cuando éste ha sido vulnerado. Si en un banco se observan condensadores cuya superficie interna está hinchada entonces es necesario cambiarlo. También puede ocurrir que por efectos del sobrecalentamiento producido por armónicos los condensadores con el paso del tiempo pierdan sus características dieléctricas, por lo que siempre será necesaria una revisión periódica de los equipos.

BIBLIOGRAFÍA

1. IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Std 18-2002", IEEE-E.E.U.U., 2002.
2. IEEE Industry Applications Society, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution, IEEE Std 141-1993", IEEE-E.E.U.U., 1993.
3. IEEE Industry Applications Society / Power Engineering Society, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519-1992", IEEE-E.E.U.U., 1992.
4. IEC, "IEC 60831-1", IEC-Francia, 1995.
5. Josep Balcells Sendra, "Calidad y Uso Racional de la Energía Eléctrica", CIRCUTOR S. A.-España.
6. Jordi Serra, "Guía Técnica de Eficiencia Energética Eléctrica", CIRCUTOR S. A.-España, 2008.
7. Schneider Electric, "Guide for the Design and Production of LV Compensation Cubicles", Schneider Electric S. A.-Francia, 1999.
8. Schneider Electric, "Capítulo E. La Compensación de la Energía Reactiva", Schneider Electric S. A.-España, 1999.
9. ABB Sace, "Protection and Control Devices", ABB Sace-Italia, 2007.
10. INTERNATIONAL CAPACITORS S. A., "Notas Técnicas de Aplicación. Condensadores de Potencia", LIFASA S. A.-España.
11. EPCOS, "Armónicas y Corrección del Factor de Potencia", Elecond Capacitores S.A.-Argentina.
12. CIRCUTOR, "Batería automática de condensadores con maniobra por contactores. Manual de Instrucciones", CIRCUTOR S. A.-España.
13. Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.