

**Tesis Monográfica para Optar al Título de
Ingeniero Eléctrico**

Título

**“Estudio de Eficiencia eléctrica para el ahorro de energía eléctrica en la
Empresa Annic SA”.**

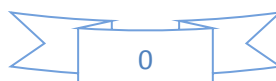
Autores:

- Br. Frank Ariel Portocarrero Soto N^o Carnet: 2010-33687
- Br. Wiltgem Rodrigo Mendoza Zeledón N^o Carnet: 2010-32784

Tutor:

Ing. Juan González Mena

Managua, Septiembre 2014



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Antecedente	6
3. Objetivos del Estudio.....	9
3.1. Objetivo General	9
3.2 Objetivo Especifico	9
4. Justificación	10
5. Marco Teórico	12
5.1 Eficiencia energética	12
5.2 Diferencia entre eficiencia energética y conservación de la energía.....	12
5.3 Importancia en elevar la eficiencia energética	12
5.4 Administración de la energía en la industria o gestión energética.....	13
5.5 Elementos fundamentales para administrar la energía.....	14
5.6 Que es el factor de potencia	16
6. Hipótesis y Variable.....	19
7. Metodología de Trabajo.....	20
7.1 Programación de los recursos y el tiempo	20
7.2 Recopilar datos y recorrido por la planta.....	21
7.3 Toma de mediciones en campo	21
7.4 Analizar los datos	22
7.5 Elaboración de la cartera de proyectos.....	22
7.6 Elaborar el informe de la auditoría energética	23
8. Conceptos básicos relacionados con potencia activa, reactiva, aparente.....	24
9. Banco de capacitores automáticos.....	39
10. Corrección del factor de potencia.....	49
11. Diseño y cálculo del banco de capacitores en la industria Annic SA	74
12 Conclusiones.....	84
13 Recomendaciones	85
14 Bibliografía	86

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 Modelo de los elementos necesarios para Administrar la Energía.....	15
Figura 2 Factor de potencia en diferentes cargas.....	17
Figura 3 Triangulo de potencia.....	18
4 Medición de potencia activa monofásica	30
5 Método de n-1 vatímetro	30
Figura 6 Medición de potencia en circuitos simétricos equilibrados.....	31
Figura 7 Ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje.....	32
Figura 8 Sistema simétrico y equilibrado mediante un vatímetro.....	33
Figura 9 Esquema de conexión de tres vatímetros para medir potencia reactiva trifásica.....	34
Figura 10 Medición del $\cos\phi$ en un circuito de una sola fase	35
Figura 11 Diagrama eléctrico de conexión.....	36
Figura 12 Valores del ángulo ϕ y la relación $W1$ y $W2$	37
Figura 13 La corriente nominal es afectada por el $\cos\phi$	38
Figura 14 Diagrama esquemático de un banco de capacitores automáticos	40
Figura 15 Determinación del $\cos\phi$, método de integración	42
Figura 16 Tabla en donde se da el valor de c/k de acuerdo a los rangos del transformador de corriente y a la potencia reactiva por paso	45
Figura 17 Conexión de los diferentes pasos.....	48
Figura 18 Valores de K_r	50
Figura 19 Factor multiplicador de la sección de los cables en función del $\cos\phi$	50
Figura 20 Compensación del factor de potencia.....	52
Figura 21 Compensación en un motor monofásico	53
Figura 22 Compensación en un motor trifásico.....	54
Figura 23 Tabla de multiplicadores de los kilowatts para corregir el factor de potencia.....	55
Figura 24 Diagrama de compensación individual	59
Figura 25 Diagrama de compensación en grupo.....	60
Figura 26 Diagrama de compensación central.....	60
Figura 27 Diagrama de compensación combinada	61
Figura 28 La compensación Q_c permite la ampliación S_2 sin tener que cambiar el transformador	72
Figura 29 Valores nominales	74
Figura 30 Diagrama unifilar	75
Figura 31 Triángulo de potencia de la instalación industrial	76

1. Introducción

El estudio de eficiencia energética (EE) es una herramienta que ayuda a reducir el consumo energético de los sistemas eléctricos y térmicos, y a su vez busca optimizar el desempeño de los mismos, evaluando sus parámetros de funcionamiento, sus consumos energéticos, la variación de la carga durante el periodo de trabajo, sus rendimientos, entre otros parámetros específicos de cada equipo.

Mediante la ejecución de una EE, se puede obtener información valiosa para el administrador de la energía, que le permitirá tomar las mejores decisiones para incrementar la eficiencia energética de los procesos, ya que ésta evalúa el desempeño de los equipos y sistemas consumidores de energía, mediante el análisis de sus parámetros de operación.

En la actualidad se hace mucho más frecuente la necesidad de utilizar compensadores de potencia reactiva en sistemas industriales debido a la diversidad de cargas existentes de naturaleza inductiva.

Algunas cargas típicas que requieren compensación son los molinos de acero, los transportadores y en especial los motores, siendo estos últimos el más representativo consumidor de potencia reactiva puesto que al energizar un motor de gran capacidad este requiere una alta potencia reactiva para poder funcionar.

Estas cargas no lineales son las más perjudiciales puesto que son cargas del tipo inductivo y como consecuencia consumen gran cantidad de potencia reactiva para su funcionamiento, ocasionando un bajo factor de potencia (menor a 0.85), así como una caída de tensión en las líneas del sistema, lo cual se refleja en pérdidas monetarias considerables para el industrial.

Actualmente la penalización por bajo factor de potencia se ha incrementado y como consecuencia las industrias afectadas pagan mucho más en su factura eléctrica innecesariamente.

Los bancos de capacitores ayudan a compensar y estabilizar el factor de potencia, adaptándose a las variaciones de carga; redundando en un beneficio inmediato al eliminar las causas de penalización. Este ahorro nos permite recuperar la inversión de los equipos en un mediano plazo.

Los sistemas de compensación de potencia reactiva tienen la finalidad de aportar energía reactiva para que el conjunto de la instalación presente un factor de potencia deseado, en general la unidad o cercano a la unidad.

Obteniendo con ello una bonificación en la factura de consumo eléctrico y así evitar las penalizaciones en la factura eléctrica.

La explicación del factor de potencia, los efectos que se presentan cuando su valor es reducido, y los métodos para corregirlo, no son temas nuevos. Desde hace muchos años han sido tratados en innumerables artículos, libros y revistas especializadas.

Sin embargo el factor de potencia es un problema permanente y de obligada importancia para todos aquellos relacionados con el diseño y operación en sistemas inductivos.

El objetivo de este trabajo es el de realizar una metodología que permita implementar bancos de capacitores para la compensación de potencia reactiva capacitiva en una industria así como simular la compensación por medio de bancos de capacitores.

El presente estudio de EE en la empresa Annic SA está orientado a brindar un panorama General de evaluación de sus sistemas energéticos dentro de sus procesos productivos.

Además también presentara las principales áreas de oportunidad de ahorro de energía que se tienen en la empresa, persiguiendo con ello:

-
- Un menor costo en el consumo de energía eléctrica. Al mejorar el factor de potencia no se pagan penalizaciones por mantener un bajo factor de potencia y además se pueden evaluar los beneficios económicos por medio de la factura eléctrica de una industria, tomando como base los costos de energía consumida antes y después de corregir el factor de potencia.
 - Aumento en la capacidad del sistema. Al mejorar el factor de potencia se reduce la cantidad de corriente reactiva que inicialmente pasaba a través de transformadores, alimentadores, tableros y cables.
 - Mejora en la calidad del voltaje. Un bajo factor de potencia puede reducir el voltaje de la planta, cuando se toma corriente reactiva de las líneas de alimentación.

Cuando el factor de potencia se reduce, la corriente total de la línea aumenta, debido a la mayor corriente reactiva que circula, causando mayor caída de voltaje a través de la resistencia de la línea, la cual, a su vez, aumenta con la temperatura.

Esto se debe a que la caída de voltaje en una línea es igual a la corriente que pasa por la misma multiplicada por la resistencia en la línea.

- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.
- Aumento de la vida útil de las instalaciones.

2. Antecedente

Según el Informe Mundial de Energía 2009 de la ONU, el aumento de la eficiencia energética y las tecnologías limpias permitirán que la cantidad de energía primaria requerida para un servicio dado pueda ser reducida, de forma rentable, entre un 25% hasta un 45% del consumo para los próximos 20 años en países en desarrollo.

Nicaragua al 2012 presenta, la intensidad energética más alta de la región centroamericana: 3 BEP (Barriles equivalentes de petróleo), demandando más energía por cada mil dólares de Producto Interno Bruto (PIB) que la mayoría de los países vecinos con niveles de desarrollo similar.

El Ministerio de Energía y Minas en su informe Balance Energético Nacional 2011, del 100% de la energía que se utiliza en Nicaragua el 11.5%(241 ktep) es consumida como energía eléctrica. El sector industrial ocupó 33.24%(80 ktep) de la energía eléctrica total y el sector público, comercio y servicios el equivalente al 29%(70 ktep).

Tomando en cuenta el 15% de ahorro por aplicar medidas de uso racional de la energía y conservación antes mencionados, esto se proyectaría en ahorros equivalentes a 22.5 ktep, que se podrían expresar como 255.71 GWh dejándose de emitir al medio ambiente 135.53 kilo toneladas de CO₂.

El incremento de la productividad de las Pequeñas y Medianas empresas (PYME), las cuales representan aproximadamente el 90% en Nicaragua y contribuyen alrededor del 40% del Producto Interno Bruto; no sólo es pertinente, sino crucial, para el fortalecimiento económico, ambiental y social del país.

No obstante, la baja capacidad creada en eficiencia energética y la aplicación de tecnologías obsoletas en las empresas PYME, han ocasionado pérdidas a los diferentes sectores productivos debido a los costos de los recursos energéticos.

En estas circunstancias, surge la oportunidad de implementar medidas de ahorro y eficiencia energética en las empresas nicaragüenses.

La transferencia e implantación de prácticas sobre eficiencia energética en la pequeña, mediana y grande industria requiere de capacidades técnicas, instrumentos de promoción y de inversiones, especialmente en los países de economías emergentes.

A pesar de que anteriormente se ha usado el scan en frecuencia para estudios específicos, aquí en este trabajo se propone como un parte integral de la metodología.

Como los problemas ocasionados por cargas no lineales llegan a ser cada vez más obvios, las compañías de electricidad y los gerentes se encaran con la necesidad de disminuir los efectos de cargas no lineales sobre sus instalaciones.

Sobre la década pasada, algunas compañías de electricidad han descubierto repentinamente un problema sorprendente: Como ellos adicionaron muchas computadoras y equipo electrónico, el factor de poder para la compañía de electricidad bajó.

En algunos casos, la reducción en el factor de potenciar era suficiente como para producir cargos extras (penalizar el bajo factor de potencia). Aún peor, fallas en transformadores y conductores coincidieron con el bajo factor de potencia.

El uso de equipo electrónico moderno ha cambiado nuestras vidas (la mayoría argumentarían para mejorar) pero ha cambiado también la característica de carga de las instalaciones modernas.

Las cargas electrónicas han ganado el nombre de “Carga no lineal”; para describir la forma de la potencia. Algunos de los efectos adversos de cargas no lineales concentradas sobre una compañía de electricidad son:

-
- La distorsión de voltaje dentro de instalaciones
 - Las corrientes excedentes por el neutro
 - Los altos niveles voltaje de neutro a tierra
 - Los recalentamiento en transformadores
 - Los grandes campos magnéticos que emanan desde transformadores
 - La reducción en la capacidad de distribución
 - Penalización por bajo factor de potencia

El término carga no lineal se usa usualmente para describir las fuentes de alimentación tipo “switch” que se encuentran en computadoras personal. De hecho, este tipo de fuente de alimentación se usa en varias aplicaciones.

Los hornos de microondas, impresoras de láser, instrumentación médica, stereos, televisores, y la iluminación electrónica están entre unos cuantos dispositivos que usan fuente de alimentación tipo “switch”.

Los otros tipos de cargas no lineales incluyen dimmers para luz, rectificadores de 6 pulsos, controladores de carga por fase y ángulo de seis pulsos y rectificadores de 12 pulsos. Los variadores de velocidad comúnmente usan rectificadores de 6 pulsos y controladores de fase y ángulo.

3. Objetivos del Estudio

3.1. Objetivo General

- Recomendar acciones para utilizar racionalmente la energía eléctrica que permita reducir los costos de facturación y aumentar la vida útil de las instalaciones.

3.2 Objetivo Especifico

- Mejorar la eficiencia y el ahorro energético de estas instalaciones.
- Aplicar una metodología que nos permita llevar a cabo el estudio
- Reducir los costos en la facturación de energía.
- Aumentar la disponibilidad de potencia de los equipos.
- Incrementar la vida útil tanto de las instalaciones como de los equipos.

4. Justificación

La importancia del estudio se fundamenta en poder analizar las oportunidades de ahorro de los equipos eléctricos en la industria, es conveniente analizar la secuencia que sigue la energía eléctrica desde que se genera hasta que se consume.

Cabe señalar que las pérdidas energéticas se producen en todas las partes de una instalación eléctrica. Esto es, generación, transporte, distribución y consumo. Las empresas, para conseguir ahorros, pueden actuar tan sólo sobre su consumo eléctrico, por lo tanto, el ahorro de energía se centrará en los procesos de producción.

“La eficiencia de un sistema energético se define como el cociente entre la potencia de salida (que es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas) y la potencia de entrada al sistema”.

La recopilación de información de energía eléctrica en la empresa nos ayuda a:

- Interpretar y controlar las variables energéticas
- Costeo Efectivo del producto
- Generación de indicadores de desempeño y evaluar:
 - Eficiencia en los procesos
 - Detección de Anomalías
 - Nuevas tecnologías
- Reducción de picos de demanda
- Evaluación de proyectos de generación alterna de energía

Se pretende verificar en situ las mediciones de campo, como el voltaje, la corriente, consumo de potencia diario, mediciones del factor de potencia actual para confirmar los datos facilitado por el jefe de mantenimiento de la empresa, si fuese necesario analizarlos con la factura eléctrica.

Es importante destacar que esta experiencia impactara positivamente tanto en los estudiantes como en los docentes que desearan conocer y adentrarse en los estudios de eficiencia energética, ya que es uno de los ejes importantes de cualquier industria, tanto como en el área de servicio de operación y mantenimiento.

La metodología que se utilizará generará recomendaciones y lecciones aprendidas que pueden tomarse en la implementación de cualquier escenario de instalación eléctrica industrial.

Otro aspecto importante es que pocos practicantes de estudio de EE están preocupados por los resultados medioambientales de la aplicación de EE, aun cuando una parte de las opciones de EE pueden llevar a obtener beneficios medioambientales y estas no son vistas de forma relevante.

Para la EE la reducción de costos es la principal preocupación ya que favorecería de forma económica a las empresas, aun cuando estas opciones conlleven impactos negativos al medioambiente.

5. Marco Teórico

5.1 Eficiencia energética

Se logra una mejora de la eficiencia energética cuando se reduce el consumo de energía en la elaboración de las mismas unidades productivas (consumo de energía por unidad de producto), o cuando el consumo de energía es reducido sin afectar la cantidad producida o los niveles de confort que el sistema produce.

5.2 Diferencia entre eficiencia energética y conservación de la energía

La eficiencia energética y la conservación de la energía son dos conceptos muy relacionados entre sí pero diferentes. La conservación de la energía es obtenida cuando se reduce el consumo de la energía debido a malos hábitos de uso (desperdicios) medido en sus términos físicos absolutos (kW-hr, Julios, etc.), como resultado, por ejemplo, del incremento de la productividad.

Por otro lado, se logra una mejora de la eficiencia energética, cuando se reduce el consumo de energía en la elaboración de las mismas unidades productivas (consumo de energía por unidad de producto), o cuando el consumo de energía es reducido sin afectar la cantidad producida o los niveles de confort que el sistema produce. La eficiencia energética contribuye a la conservación de la energía.

5.3 Importancia en elevar la eficiencia energética

A nivel Global los principales beneficios de la eficiencia energética son:

- La disminución de emisiones contaminantes y
- La contribución al desarrollo sustentable.

A nivel de país, los beneficios obtenidos de una mejora en la eficiencia energética son:

- La conservación de los recursos energéticos
- La mejora de la seguridad energética.
- La reducción de las importaciones de energéticos
- La reducción de costos utilizados para el desarrollo.

A nivel de empresa el incremento de la eficiencia energética se orienta a:

- Reducir las cuentas de energía
- Disminuir la contaminación
- Elevar la productividad
- Apoyar la gestión de mantenimiento
- Complementar los procesos de certificación ISO
- Incrementar la competitividad
- Elevar las utilidades.

5.4 Administración de la energía en la industria o gestión energética.

En la gestión industrial de nuestro medio, el enfoque que se le da a la energía se limita, por lo general, a obtener una “buena tarifa energética ”; en algunos casos, a monitorear los cambios en la cuenta mensual y en otros, a controlar la variación del índice de consumo (consumo por unidad de producción) en el tiempo, o ha observar las oportunidades de cambios tecnológicos que puedan conducir a una disminución en el consumo energético, los que generalmente tienen sus causas en problemas de mantenimiento que afectan la producción.

Es práctica común actuar sobre los consumos energéticos y no sobre la eficiencia energética, lo cual se explica porque es el consumo lo que se factura y lo que se paga.

Sin embargo, este enfoque no está orientado sobre la causa del problema que deseamos resolver, por lo que en el deseo de reducir los costos de los energéticos, solo se actúa sobre sus efectos y en muchas ocasiones, este esfuerzo se manifiesta infructuoso, con resultados cíclicos de altas y bajas.

Por el contrario, la administración de la energía o el “gerenciar la eficiencia energética” tiene como objetivo final, lograr la máxima reducción de los consumos energéticos, con la tecnología de producción actual de la compañía y posteriormente realizar los cambios a tecnologías eficientes en la medida de que estos sean rentables de acuerdo a las expectativas financieras de la empresa.

Lograr este objetivo de forma continua y que sea sostenible en el largo plazo, requiere de organizar un sistema de gestión, cambio de hábitos y cultura energética.

Si una empresa tiene una organización que demuestra un propósito activo de mejorar día con día, ya ha desarrollado acciones en las cuales participa con sus recursos humanos y físicos para lograr avances en asuntos tan importantes como la protección del ambiente, la aplicación de normas sobre salud y sanidad ocupacional, la elaboración e implementación de guías para operar con seguridad, el mantenimiento de un ambiente limpio y seguro de trabajo, etc.

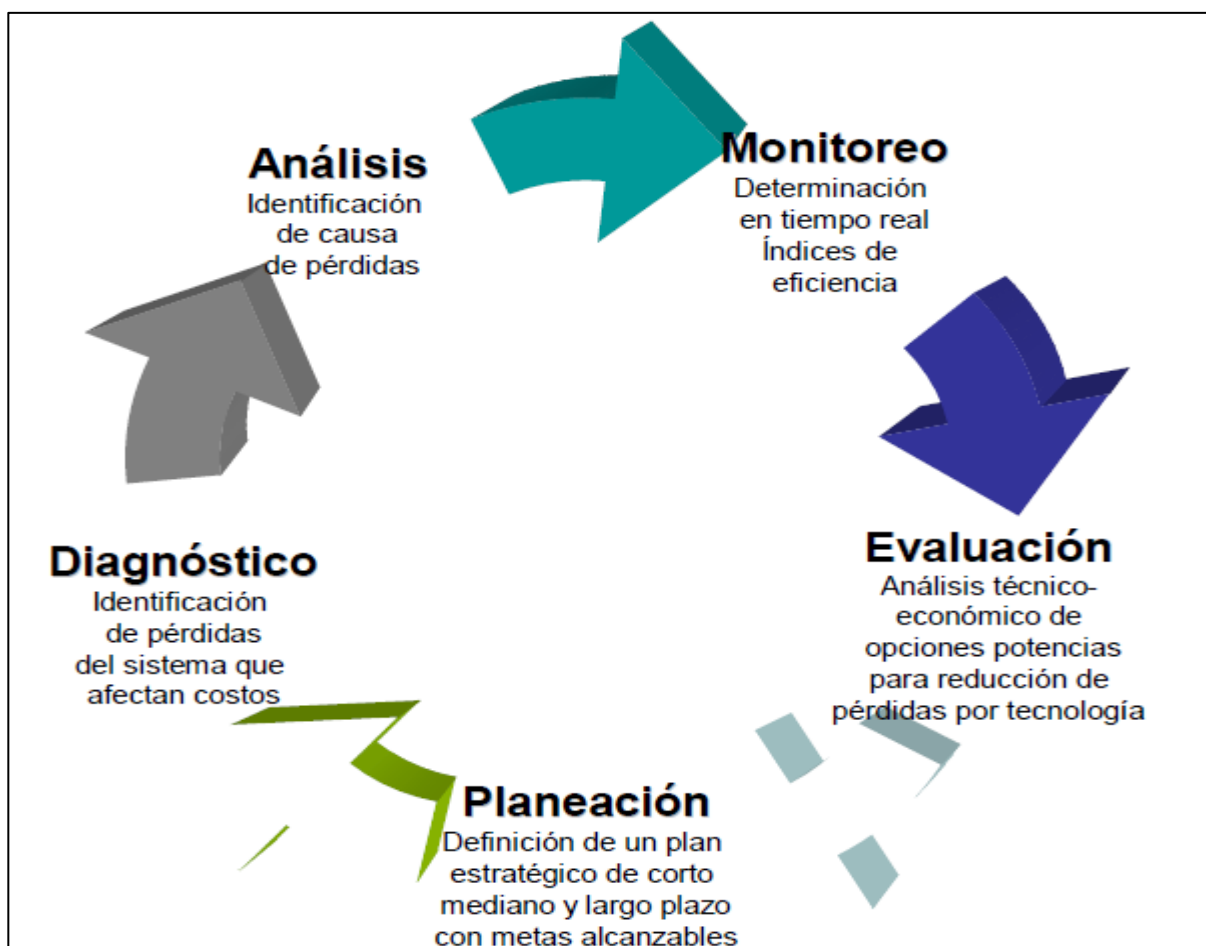
En estas condiciones, el establecimiento de una política gerencial que permita el diseño de un programa de conservación y uso racional de la energía, encuentra un terreno ya abonado, pudiéndose nutrir de una actitud positiva y educada del personal de la empresa, hacia el logro de mejores metas, y beneficiándose de la experiencia adquirida en el logro de objetivos que son paralelos y complementarios al propio.

5.5 Elementos fundamentales para administrar la energía

Una organización que demuestra un propósito activo de mejorar día a día, implica que ha desarrollado acciones en las cuales participa con recursos humanos y físicos, que conllevan a mejoras en áreas tan importantes como la protección del ambiente, la aplicación de normas de salud, calidad y sanidad ocupacional.

En estas condiciones, el establecimiento de un programa permanente orientado al uso eficiente de los recursos energéticos, encuentra un terreno fértil, pudiéndose orientar hacia el logro de mejores metas y beneficiándose de la experiencia adquirida en la implementación de procesos exitosos y muy especialmente los de certificación ISO.

Administrar la energía significa identificar dónde están las pérdidas energéticas del sistema que impactan los costos, determinar sus causas (si se deben a los procedimientos o a la tecnología), establecer y monitorear en tiempo real, indicadores de eficiencia (que no es el índice de consumo) que permitan controlar y reducir las pérdidas relativas a los procedimientos, evaluar técnica y económicamente los potenciales de reducción de las pérdidas relativas a la tecnología y contar con un plan estratégico a corto, mediano y largo plazo con metas alcanzables y entendidas por todos los actores claves. Ver figura



La organización y la posterior implementación de un programa eficaz de ahorro o de eficiencia energética que sea sostenible en el largo plazo, no es cuestión de buena suerte ni se logra como consecuencia de una atención ligera, más bien, es el resultado del entendimiento entre el costo y el consumo de energía, creando una metodología de análisis bien desarrollada y mejor ejecutada, en concordancia con la realidad de la empresa y a las disponibilidades tecnológicas

5.6 Que es el factor de potencia

Se denomina factor de potencia al cociente entre la potencia activa y la potencia aparente, que es coincidente con el coseno del ángulo entre la tensión y la corriente cuando la forma de onda es sinusoidal pura, o sea que, el factor de potencia debe tratar de coincidir con el coseno ϕ pero no es lo mismo.

$$FP = \frac{P}{S}$$

Es aconsejable que en una instalación eléctrica el factor de potencia sea alto y algunas empresas de servicio eléctrico exigen valores de 0,85 o más. También podemos decir que es simplemente el nombre dado a la relación de la potencia activa usada en un circuito, expresada en vatios o kilovatios (KW), a la potencia aparente que se obtiene de las líneas de alimentación, expresada en voltio-amperios o kilovoltio- amperios (KVA).

El factor de Potencia puede ser utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

Las cargas industriales en su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, generadores, transformadores, etc. Este carácter reactivo obliga a que, junto al consumo de potencia activa (KW), se sume el de una potencia llamada reactiva (KVAR), las cuales en su conjunto determinan el comportamiento operacional de equipos y motores.

Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas generadoras de electricidad, aunque puede ser producida por las propias industrias. Al ser suministradas por las empresas de electricidad deberá ser transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transmisión y distribución. Todas estas cargas industriales necesitan de corrientes reactivas para su operación.

Dependiendo del tipo de carga, el factor de potencia puede ser: adelantado, retrasado, igual a 1.

- En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, la tensión y la corriente están en fase en este caso, se tiene un factor de potencia unitario. Ver figura 1.
- En las cargas inductivas como los motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto a la tensión. En este caso se tiene un factor de potencia retrasado. Ver figura 1.
- En las cargas capacitivas como los condensadores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje. En este caso se tiene un factor de potencia adelantado. Ver figura 1.

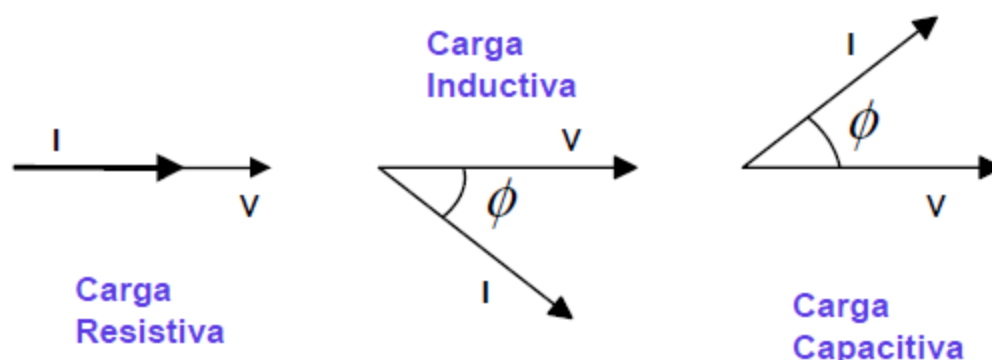


Figura 2 Factor de potencia en diferentes cargas

Por lo que se puede decir que el factor de potencia viene dado por la expresión:

$$FP = \frac{P}{S} \quad \frac{P}{S} = \cos \phi$$

P: Es la potencia activa en KW

S: Es la potencia aparente en KVA.

ϕ : Angulo entre la corriente (A) y el voltaje (V)

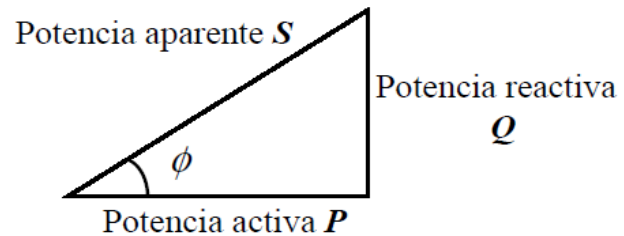


Figura 3 Triangulo de potencia

EL Angulo ϕ

En electrotecnia, el ángulo nos indica si las señales de voltaje y corriente se encuentran en fase.

Cargas Resistivas

En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, el voltaje y la corriente están en fase.

- Por lo tanto, $\phi = 0$
- En este caso, se tiene un factor de potencia unitario.

Cargas Inductivas

En las cargas inductivas como los motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje.

- Por lo tanto, $\phi < 0$
- En este caso se tiene un factor de potencia retrasado.

Cargas Capacitivas

En las cargas capacitivas como los condensadores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje.

- Por lo tanto, $\phi > 0$
- En este caso se tiene un factor de potencia adelantado.

6. Hipótesis y Variable

Hipótesis

La factibilidad de la instalación de un banco de capacitores para la corrección del Factor de potencia en cualquier instalación eléctrica industrial con carga inductiva que permita el ahorro de energía eléctrica y la factura eléctrica.

Variables

1. Pertinencia de la Información.
2. Funcionalidad de la Información.
3. Adecuación de la Información.
4. Parámetros Técnicos de Interés Tratados (Voltaje, Corriente, Factor de Potencia.).

7. Metodología de Trabajo

En esta metodología se hace un análisis de las características de toda la instalación eléctrica y los equipos consumidores de energía eléctrica.

El alcance del trabajo a realizar será:

- Toma de datos inicial
- Auditoría energética de cada una de las instalaciones eléctricas (Paneles de Distribución)
- Auditoría energética de cada uno de los aparatos consumidores de energía (Iluminación , refrigeración , aire acondicionado , producción ,)
- Análisis de resultados finales
- Elaboración de propuestas de actuación

A continuación se describen los pasos a seguir:

7.1 Programación de los recursos y el tiempo

La primera actividad a realizar es concentrar y revisar toda la información disponible de la planta, tal como:

- Nombre de la empresa.
- Rama industrial a la que pertenece y productos que elabora.
- Tamaño y edad de la planta.
- Localización de la planta.
- Estructura administrativa, anotando el nombre y cargo de los principales directivos
- y las personas involucradas con el programa de ahorro de energía.
- Horarios típicos de operación.
- Líneas de producción y productos principales.
- Consumos anuales de los energéticos utilizados por la planta.
- Costos de los energéticos.

7.2 Recopilar datos y recorrido por la planta

El objetivo de este paso es el de reunir datos de todo aquello relacionado con el uso de la energía de la planta, tales como: historial de producción y consumo de energéticos, información recopilada como resultado de una inspección visual a toda la planta, programas de mantenimiento y levantamiento de datos de equipos consumidores de energía.

- **Historial de consumo y producción**
- **Inspección visual**
- **Análisis de los programas de operación y mantenimiento**
- **Registro de levantamiento de datos**

7.3 Toma de mediciones en campo

En esta actividad se realizarán las mediciones de los parámetros de operación de los equipos, con la finalidad de determinar la eficiencia energética de cada uno de ellos, así como con la finalidad de obtener información que permita proponer mejoras.

- **Mediciones a equipos consumidores de energía eléctrica**
 - Iluminación
 - Motores
 - Aires acondicionados
 - Equipos de bombeo
 - Fugas de aire
 - Sistemas de refrigeración

7.4 Analizar los datos

Una vez que la información ha sido recopilada en los pasos anteriores del estudio EE, la información deberá ser capturada y ordenada para proceder a su análisis, con la finalidad de identificar las áreas de oportunidad de ahorro de energía que ofrezca la instalación.

Con la finalidad de identificar a los equipos y sistemas más intensivos en el consumo de energía, la primera actividad a realizar en esta etapa de la EE, es la realización de los balances de energía.

Por otra parte con la finalidad de asegurar que se están evaluando todas las medidas de ahorro posibles, es muy importante el contar con una lista de verificación de áreas de oportunidad de ahorro por tipo de aplicación.

- Elaboración de balances de energía
- Listas de medidas de ahorro de energía

7.5 Elaboración de la cartera de proyectos

Una vez que las oportunidades de ahorro de energía han sido identificadas y analizadas, se deberá realizar una cartera de proyectos, donde para cada una de las medidas de ahorro propuestas se presente la siguiente información:

- Número descripción de la medida
- Resumen que contiene:
 - Ahorro de Energía (kWh/año).
 - Emisiones evitadas de gases de efecto invernadero (tCO₂/año).
 - Ahorro económico (USD/año).
 - Inversiones necesarias (USD).
 - Periodo de Recuperación de la Inversión (años).

-
- Descripción de la situación actual. Breve descripción de la situación actual que de pie a la medida propuesta.
 - Descripción de las acciones concretas a realizar para la implementación de la medida. Describir brevemente las acciones para implantar la medida.
 - Cálculo de los ahorros. Describir los ahorros que se pretenden obtener al implantar esta medida.
 - Desglose de las inversiones (cotización). El desglosar las inversiones necesarias para implementar la medida de ahorro de energía.
 - Evaluación económica. Dicha evaluación deberá contener al menos el cálculo del período de retorno de la inversión.

7.6 Elaborar el informe de la auditoría energética

El paso final es el de preparar un informe que contenga las observaciones y conclusiones del estudio de eficiencia eléctrica , haciendo énfasis en las oportunidades de ahorro de energía, y el plan de acción para implantarlas, conteniendo las bases y los pasos seguidos en el análisis.

Este informe también deberá de presentar todos los datos energéticos básicos de la planta en una forma consistente para que se puedan comparar con los parámetros energéticos de diferentes plantas.

En esta metodología se hace un análisis de las características que un banco de capacitores debe reunir para llevar a cabo el suministro de potencia reactiva dentro de un sistema industrial, así como los criterios que se tienen que considerar para poder ser aplicados.

8. Conceptos básicos relacionados con potencia activa, reactiva, aparente

8.1 Potencia activa monofásica

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los circuitos. Cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda. Se designa con la letra P y se mide en vatios (W). De acuerdo con $P = V * I * \cos \varphi$, la ley de Ohm ($V = I * R$) y el triángulo de impedancias se tiene:

$$P = V * I * \cos \varphi = I * Z * I * \cos \varphi = I^2 * R$$

Dónde:

P: potencia activa en Watt (W)

V: voltaje en voltios (V)

I: Corriente en Amperes (A)

Z: Impedancia de la línea en ohmios (Ω)

$$R = Z * \cos \varphi$$

Resultado que indica que la potencia activa es debido a los elementos resistivos.

8.2 Potencia activa en sistemas trifásicos equilibrados

Es la suma de las potencias activas de los sistemas monofásicos que lo componen, al ser el sistema equilibrado, la potencia activa será el triple de la de una fase.

$$P_{3\phi} = 3 * V_{\phi} * I_{\phi} * \cos \varphi$$

Dónde:

I_{ϕ} : Corriente de cada una de las fases en amperes (A)

V_{ϕ} : Voltaje de cada una de las fases en voltios (V)

P: Potencia Activa en Watt (W)

$\text{Cos}\phi$: Factor de Potencia del sistema

La potencia activa en función de los valores de tensiones y corrientes de línea:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \text{cos}\phi$$

Dónde:

V_L : Voltaje de línea a línea en voltios (V)

I_L : Corriente de línea en amperios (A)

P: Potencia Activa en Watt (W)

$\text{Cos}\phi$: Factor de Potencia del sistema

Potencia activa en función de los valores de tensiones y corrientes de línea:

"Estrella" o "Y"

$$V_{\phi} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_{\phi} = I_L$$

Donde

V_L : Voltaje de línea a línea en voltios (V)

I_L : Corriente de línea en amperios (A)

I_{ϕ} : Corriente de cada una de las fases en amperes (A)

V_{ϕ} : Voltaje de cada una de las fases en voltios (V)

Reemplazando las ecuaciones del inciso 8.2 tenemos:

$$P = \frac{3}{\sqrt{3}} * V_L * I_L * \text{cos}\phi$$

Dónde:

V_L : Voltaje de línea a línea en voltios (V)

I_L : Corriente de línea en amperios (A)

P: Potencia Activa en Watt (W)

$\cos\phi$: Factor de Potencia del sistema

Se dice que la relación $\frac{3}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}$ por tanto se tiene:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\phi$$

Dónde:

V_L : Voltaje de línea a línea en voltios (V)

I_L : Corriente de línea del circuito en estrella en amperios (A)

P: Potencia Activa en Watt (W)

$\cos\phi$: Factor de Potencia del sistema

Configuración "delta" o "triangulo"

$$I_\phi = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$V_\phi = V_L$$

Dónde:

V_L : Voltaje de línea a línea en voltios (V)

I_L : Corriente de línea en amperios (A)

I_ϕ : Corriente de cada una de las fases en amperes (A)

V_ϕ : Voltaje de cada una de las fases en voltios (V)

Reemplazando tenemos:

$$P = V_L * 3 \frac{I_L}{\sqrt{3}} * \cos\phi$$

Dónde:

V_L : Voltaje de línea a línea en voltios (V)

I_L : Corriente de línea del circuito en configuración estrella en amperios (A)

P: Potencia Activa en Watt (W)

$\cos\phi$: Factor de Potencia del sistema

Se dice que la relación $\frac{3}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}$ por tanto se tiene:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\phi$$

8.3 Potencia activa en sistemas trifásicos desequilibrados

$$P = V_1 * I_1 * \cos\phi_1 + V_2 * I_2 * \cos\phi_2 + V_3 * I_3 * \cos\phi_3$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} = \tan^{-1} \frac{Q_1}{P_1}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{X_2}{R_2} = \tan^{-1} \frac{Q_2}{P_2}$$

$$\phi_3 = \tan^{-1} \frac{X_3}{R_3} = \tan^{-1} \frac{Q_3}{P_3}$$

8.4 Potencia reactiva monofásica

Esta potencia no tiene tampoco el carácter de realmente consumida y sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil, se mide en voltamperios reactivos (VAR) y se designa con la letra Q. A partir de su expresión.

$$Q = V * I * \sin\phi = I * Z * I * \sin\phi = I^2 * X$$

Dónde:

Q: potencia reactiva en voltamperios reactivos (VAR)

V: voltaje en voltios (V)

I: Corriente en Amperes (A)

X: Reactancia de la línea en ohmios (Ω)

Lo que nos reafirma que esta potencia es debida únicamente a los elementos reactivos

8.5 Potencia reactiva en sistemas trifásicos equilibrados

$$Q = 3 \cdot V_f \cdot I_f \cdot \text{sen}\phi$$

Donde:

I_ϕ : es la corriente de cada una de las fases en amperes (A)

V_ϕ : es el voltaje de cada una de las fases en voltios (V)

Q: Potencia reactiva en voltamperios reactivos (VAR)

$\text{Sen}\phi$: Factor de potencia reactivo

La potencia reactiva en función de los valores de tensiones y corrientes de línea:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \text{sen}\phi$$

Dónde:

V_L : es el voltaje de línea a línea en Voltios (V)

I_L : es la corriente de línea en Amperes (A)

$\text{Sen}\phi$: Factor de potencia reactivo

8.6 Potencia reactiva en sistemas trifásicos desequilibrados

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen}\phi_1 + V_2 \cdot I_2 \cdot \text{sen}\phi_2 + V_3 \cdot I_3 \cdot \text{sen}\phi_3$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} = \tan^{-1} \frac{Q_1}{P_1}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{X_2}{R_2} = \tan^{-1} \frac{Q_2}{P_2}$$

$$\phi_3 = \tan^{-1} \frac{X_3}{R_3} = \tan^{-1} \frac{Q_3}{P_3}$$

8.7 Potencia aparente monofásica

La potencia aparente de un circuito eléctrico de corriente alterna, es la suma de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes. Esta potencia no es la realmente consumida, salvo cuando el factor de potencia es la unidad ($\text{Cos}\phi=1$), y nos señala que la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a suministrar a bobinas y condensadores. Se la designa con la letra S y se mide en voltamperios (VA).

8.8 Potencia aparente en sistemas trifásicos equilibrados

$$|S| = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = \sqrt{(3 \cdot V_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos\phi)^2 + (3 \cdot V_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin\phi)^2}$$

$$S = 3 \cdot V_\phi \cdot I_\phi$$

Dónde:

I_ϕ : es la corriente de cada una de las fases en amperes (A)

V_ϕ : es el voltaje de cada una de las fases en voltios (V)

S: potencia aparente en voltamperios (VA)

La potencia aparente en función de los valores de tensiones y corrientes de líneas:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Dónde:

V_L : es el voltaje de línea a línea en Voltios (V)

I_L : es la corriente de línea a línea en Amperes (A)

8.9 Mediciones de potencia

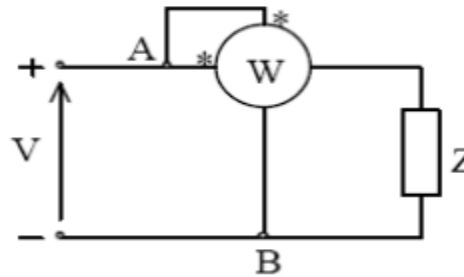
Para llevar a cabo las mediciones de potencia hay que tener en cuenta los diferentes tipos de está que se presentan en un circuito, entre ellas tenemos: Potencia Activa, Potencia Reactiva y Potencia Aparente.

8.10 Mediciones de potencia activa

La medición de potencia activa se debe llevar a cabo tanto en los circuitos monofásicos como en los circuitos trifásicos, los cuales son tratados a continuación.

8.10.1 Medición de potencia activa en una línea monofásica

La potencia activa en líneas monofásicas se mide con un Watímetro según se indica en la figura



4 Medición de potencia activa monofásica

Fuente: Ing. Augusto Abreu. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución

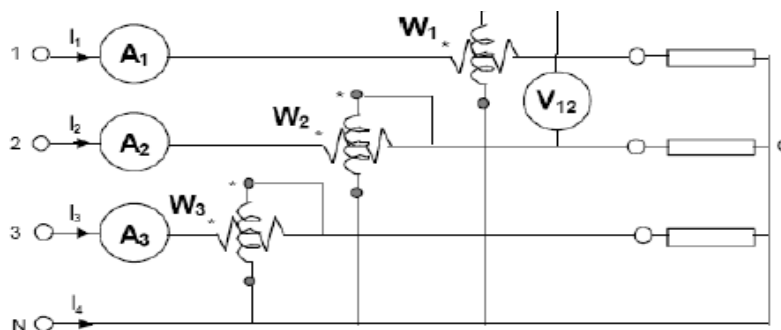
8.10.2 Medición de potencia activa en una línea trifásica

Las líneas trifásicas se pueden clasificar en:

8.10.2.1 Líneas tetrafilares (cuatro hilos, tres fases y un neutro)

8.10.2.2 Teorema de Blondell: En un circuito n-filar la potencia activa puede medirse como suma algebraica de las lecturas de n-1 vatímetros. Este enunciado es evidente en el caso de un circuito tetrafilar en que tenemos acceso al neutro de la carga.

5 Método de n-1 vatímetro



Fuente: Ing. Augusto Abreu. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución

$$W_1 + W_2 + W_3 = P$$

W_1 : Potencia medida en la fase **R** por medio del vatímetro 1

W_2 : Potencia medida en la fase **S** por medio del vatímetro 2

W_3 : Potencia medida en la fase **T** por medio del vatímetro 3

O sea que la potencia total es suma de las tres lecturas

8.10.2.3 Sistemas simétricos y equilibrados

Si la carga es equilibrada, es decir que los tres circuitos monofásicos son idénticos entre sí, basta con medir uno de ellos y multiplicar por tres su indicación para tener la potencia trifásica.

$$P_S = P_R = P_T$$

P_S : Potencia en la fase S

P_R : Potencia en la fase R

P_T : Potencia en la fase T

$$P_{3\phi} = 3 * P_R = 3 * V * I * \cos\phi$$

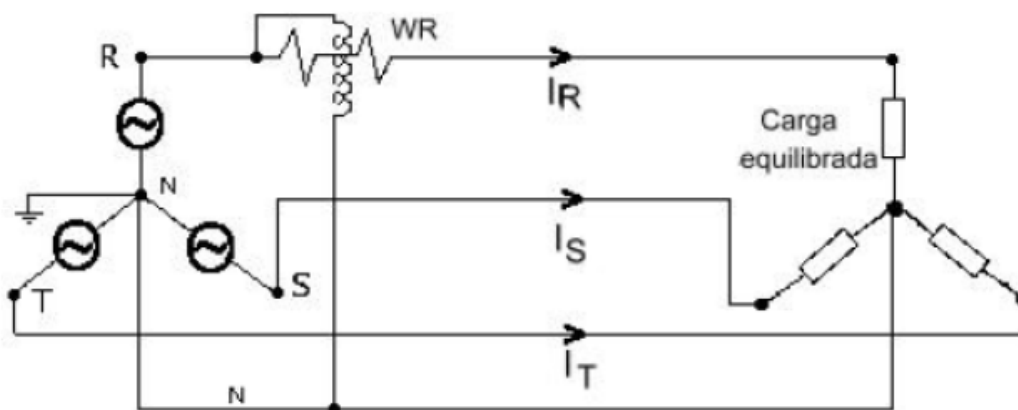


Figura 6 Medición de potencia en circuitos simétricos equilibrados

Fuente: Ing. Augusto Abreu. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución

Si no se puede asegurar que el sistema es equilibrado no se puede medir potencia trifásica utilizando un solo vatímetro en una fase. Si se produjera un cambio en la carga o en la tensión de generación cambiaría la potencia en cada una de las fases a través del tiempo y de los valores simultáneos. Por lo general las cargas trifásicas son siempre motores.

8.11 Medición de potencia reactiva

Al igual que la potencia activa la potencia reactiva también ha de medirse tanto en los circuitos monofásicos, como en los trifásicos.

8.11.1 Medición de potencia reactiva en sistemas monofásicos

8.11.1.1 Método directo

La potencia reactiva monofásica queda expresada de la siguiente manera:

$$Q_{1\phi} = V * I * \text{sen}\phi \text{ [VAR]}$$

Dónde:

V : Voltaje de fase en voltios (V)

I : Corriente de la fase en amperes (A)

$\text{Sen}\phi$: Factor de potencia reactivo

Siendo ϕ el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje en la carga. Figura

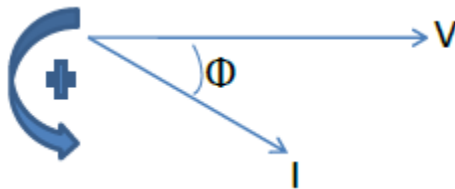


Figura 7 Ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje

La potencia reactiva monofásica se mide con el varímetro, que es un instrumento al vatímetro constituido por dos bobinas, una fija y una móvil, en serie con ésta última se conectada una bobina adicional, de tal manera que los flujos magnéticos que ambas generan están desfasados 90° entre sí. Es un instrumento de lectura directa y se lo conecta en forma análoga al vatímetro.

8.11.2 Medición de potencia reactiva en sistemas trifásicos

8.11.2.1 Sistema simétrico y equilibrado mediante un vatímetro

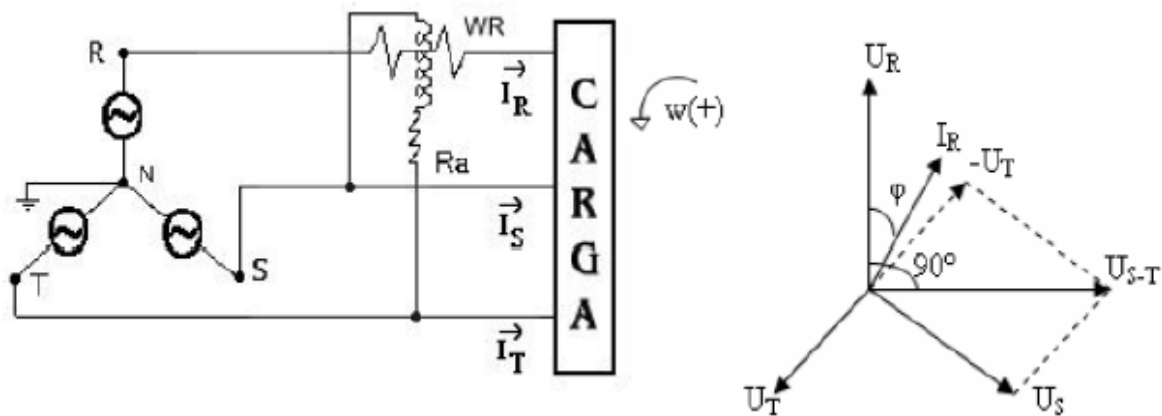


Figura 8 Sistema simétrico y equilibrado mediante un vatímetro

Fuente: Ing. Augusto Abreu. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución.

$$U=V$$

$$P_W = I_R \cdot V_{S-T} \cdot \cos(I_R \cdot V_{S-T})$$

$$P_W = I_R \cdot V_{S-T} \cdot \cos(90^\circ - \phi)$$

$$\cos(90^\circ - \phi) = \text{sen}\phi$$

$$P_W = I_R \cdot V_{S-T} \cdot \text{sen}\phi$$

Dónde:

V_{S-T} : Voltaje medido entre la fase S-T en voltios (v)

I_R : Corriente de la fase R en amperes (A)

P_W : Potencia medida por el Vatímetro

$$P_W = I_R \cdot \sqrt{3} \cdot V_\phi \cdot \text{sen}\phi$$

$$P_W = \sqrt{3} \cdot Q_{1\phi}$$

$$\sqrt{3} \cdot P_W = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_R \cdot V_\phi \cdot \text{sen}\phi = 3 \cdot I_R \cdot V_\phi \cdot \text{sen}\phi = Q_{3\phi}$$

$$Q_{3\phi} = 3 \cdot P_W$$

Teniendo un sistema simétrico y equilibrado es posible obtener la potencia trifásica, contando con un vatímetro y conectándolo de acuerdo a la figura 16, teniendo en cuenta que la bobina de intensidad se conecta a una de las fases y la de tensión a las fases restantes, de esta forma se produce un desfase de 90° entre la tensión correspondiente a las fase que se conecta la bobina de intensidad ($U_R = V_R$) y la tensión con la cual trabaja la bobina de tensión ($U_{S-T} = V_{S-T}$). Según la ecuación el vatímetro trataría de medir la potencia activa pero según la relación trigonométrica de la ecuación, resulta que la lectura del vatímetro es proporcional a la potencia reactiva trifásica y debemos multiplicarla por $\sqrt{3}$.

8.11.3 Medición de potencia reactiva trifásica mediante vatímetros

8.11.3.1 Método de los tres vatímetros

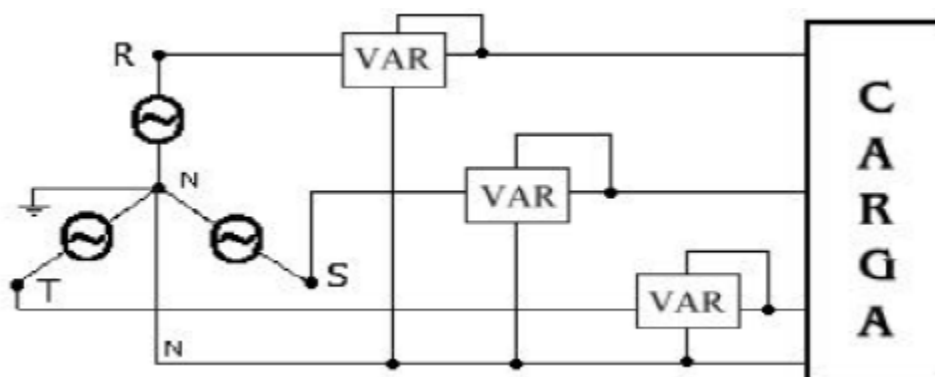


Figura 9 Esquema de conexión de tres vatímetros para medir potencia reactiva trifásica

Fuente: Ing. Augusto Abreu. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución

$$Q_{3\phi} = V_{R-N} \cdot I_R \cdot \text{sen}\phi_R + V_{S-N} \cdot I_S \cdot \text{sen}\phi_S + V_{T-N} \cdot I_T \cdot \text{sen}\phi_T$$

V_{R-N} : Voltaje de la fase R con respecto al neutro N

V_{S-N} : Voltaje de la fase S con respecto al neutro N

V_{T-N} : Voltaje de la fase T con respecto al neutro N

$\text{Sen}\phi_R$, $\text{Sen}\phi_S$, $\text{Sen}\phi_T$: Factor de potencia reactivo de cada una de las fases del circuito. I_R , I_S , I_T Es la corriente de cada una de las fases del circuito.

$$Q_{3\phi} = Q_{VAR_R} + Q_{VAR_S} + Q_{VAR_T}$$

Donde

$PVAR_R$, $PVAR_S$, $PVAR_T$. Potencia medida por cada uno de los vatímetros en cada una de las fases del circuito.

El método es para sistemas tetrafilares o con neutro artificial y no importa si el sistema es simétrico y/o equilibrado.

8.12 Valor del coseno ϕ

Sabemos que el factor de potencia puede ser calculado cuando las potencias activa y reactiva son conocidas. Este método puede también aplicarse para calcular el factor de potencia de la energía consumida durante un cierto periodo de tiempo. Usando medidores de potencia activa y reactiva y un reloj, es posible determinar la energía consumida durante un periodo determinado de tiempo y así calcular el factor de potencia. $\cos\phi$ durante este tiempo es necesario considerar la relación entre las revoluciones del disco medidor por unidad de energía usada.

8.13 Medición del coseno ϕ

8.13.1 Medición en circuitos de una sola fase

El método más simple es medir la potencia (usando un Watímetro) y la corriente y el voltaje.

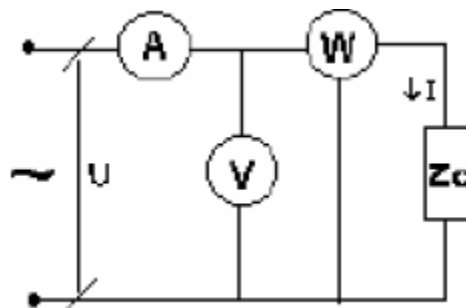


Figura 10 Medición del $\cos\phi$ en un circuito de una sola fase

Entonces tenemos $\cos\phi$ es igual a:

$$\cos\phi = \frac{PW}{V \cdot I} = \frac{P}{V \cdot I} = \frac{P}{S}$$

- Otro método es usar un medidor de fase tipo Brüger. Este es un dispositivo con dos armazones cruzados y sin acción de resorte para el indicador. El punto, asumirá una posición arbitraria (medidor) es su posición de descanso.

El principio de operación del medidor Brüger es el siguiente: Consiste en dos embobinados B 1 y B 2 fijos a través de los cuales fluye la corriente total. El flujo así creado afectará los dos embobinados móviles los cuales están montados perpendicularmente uno del otro.

El primero se alimenta a través de un circuito resistivo y el segundo a través de un circuito inductivo. Ambos están conectados al voltaje de la red, B 1 y B 2 crean un flujo en base con la corriente, B 3 un flujo en base con el voltaje y B 4 un flujo retrasado del voltaje en 90° . En equilibrio, la posición del brazo es una función del ángulo entre la corriente y el voltaje, por ejemplo la escala de ϕ es graduada en el $\cos\phi$. Debe tenerse en cuenta y aclararse que la lectura es válida sólo para una cierta frecuencia.

8.13.2 Medición en un circuito trifásico simétrico y equilibrado

Utilizando un amperímetro, un voltímetro y un vatímetro

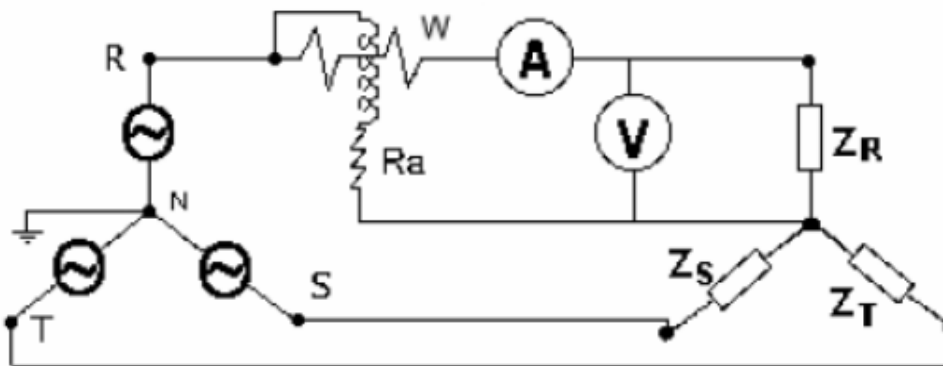


Figura 11 Diagrama eléctrico de conexión

Fuente: Ing. Augusto Abreu. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución

Cuando el sistema es simétrico y equilibrado, el desfase entre la tensión y corriente es el mismo para cada fase, por lo cual el factor de potencia trifásico coincidirá con el factor de potencia en cada una de las fases. Este valor se determina con un vatímetro, un voltímetro y un amperímetro, que medirán la potencia de una fase, la tensión de una fase y la corriente de la fase respectiva.

El método de Aron también es utilizado para conocer el factor de potencia. Partiendo de dos lecturas W_1 y W_2 se puede determinar el factor de potencia, haciendo el cociente de la lectura menor y la mayor.

$|W_1| > |W_2|$ Para cargas inductivas

$|W_2| > |W_1|$ Para cargas capacitivas

f	$\cos f$	$\frac{w_2}{w_1}$
0°	1	1
30°	0,866	0,5
60°	0,5	0
90°	0	-1

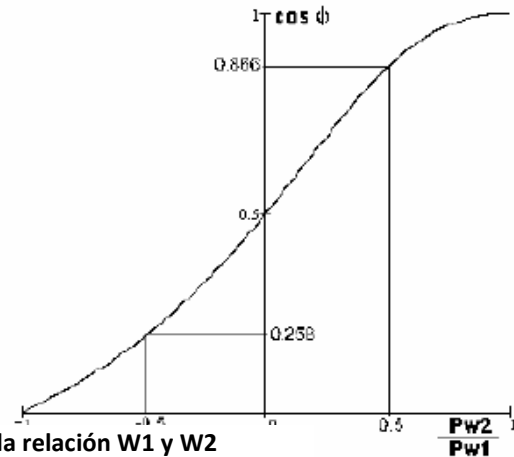


Figura 12 Valores del ángulo ϕ y la relación W_1 y W_2

De la curva podemos obtener para cualquier relación de W_2/W_1 el factor de potencia, se puede construir ésta tabla de otro modo utilizando la siguiente fórmula, para graficar la curva de $\cos \phi = f[P_{W2}/P_{W1}]$

$$\cos \phi = (1+x) / (2 \cdot \sqrt{x^2 - x + 1})$$

Donde x es igual a:

$$x = W_{\text{menor}} / W_{\text{mayor}} = W_2 / W_1$$

8.14 Problemas con un factor de potencia bajo

8.14.1 Diagrama de corriente

Una carga que consuma la mayor potencia reactiva y el factor de potencia más bajo es el fenómeno eléctrico que puede suceder en condiciones estables. Para una potencia consumida constante, el factor de potencia más bajo, la potencia aparente será más alta y así también más alta la cantidad de corriente en la red. Con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente por la carga será dos veces la corriente útil. Con un factor de potencia de 0.9 la cantidad de corriente será 10% más alta que la corriente útil. Para una potencia constante, la cantidad de corriente de la red se incrementará en la medida en que el factor de potencia disminuya.

Esto significa que los transformadores y cables de distribución estarán sobrecargados y que las pérdidas en ellos se incrementarán (en proporción al cuadrado de la corriente). Esto por supuesto es real en todos los puntos de la red.

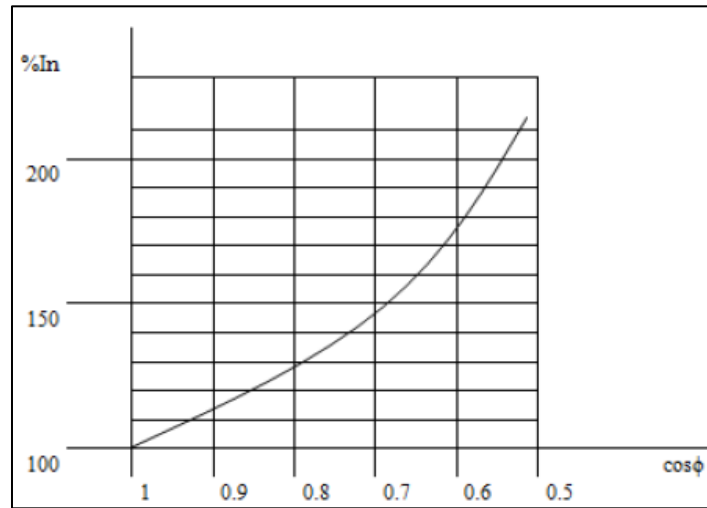


Figura 13 La corriente nominal es afectada por el $\cos \phi$

8.14.2 Otros problemas

Hemos visto la considerable influencia que el factor de potencia tiene sobre el valor de la corriente demandada en el sistema. Esas instalaciones eléctricas que operan con un factor de potencia menor a 1, afectan a la red eléctrica tanto en alta tensión como en baja tensión, además, tiene una serie de consecuencias en la medida que el factor de potencia disminuye, estas consecuencias serán tratadas más adelante.

Surge una pregunta: ¿Por qué existe un bajo factor de potencia?

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución exagerada del factor de potencia. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de:

-
- Un gran número de motores
 - Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado
 - Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria
 - Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria

Cargas puramente resistivas, tales como alumbrado incandescente, resistencias de calentamiento, etc. no causan este tipo de problema ya que no necesitan de la corriente reactiva.

9. Banco de capacitores automáticos

La potencia reactiva requerida (capacitiva) no es completamente constante durante las 24 horas del día. El requerimiento para potencia reactiva puede ser dividido en tres categorías.

- Requerimiento prácticamente constante

Este caso se aplica cuando la carga reactiva es constante. Esto es cierto considerando la compensación de la corriente de magnetización de un transformador de distribución, por ejemplo: un capacitor fijo puede ser usado.

- Requerimiento variable

Este caso puede resultar cuando la carga reactiva total varía durante el día, pero es aún demasiado pequeña para ser compensada individualmente en los objetos de carga diferentes (por razones de costo). Para este caso se debe usar un capacitor con potencia reactiva variable con la carga. Esto es un banco automático de capacitores.

- Requerimientos instantáneos

Este caso se aplica cuando el requerimiento es significativo en tamaño y la conmutación rápida es esencial (entre 0 y 0.25 ms). Capacitores controlados por tiristores pueden ser empleados.

9.1 Principio de operación

Cada banco está construido con un cierto número de capacitores trifásicos colocados en el mismo gabinete (contenedor). Los capacitores pueden ser arreglados en grupos en paralelo y conmutados con contactores.

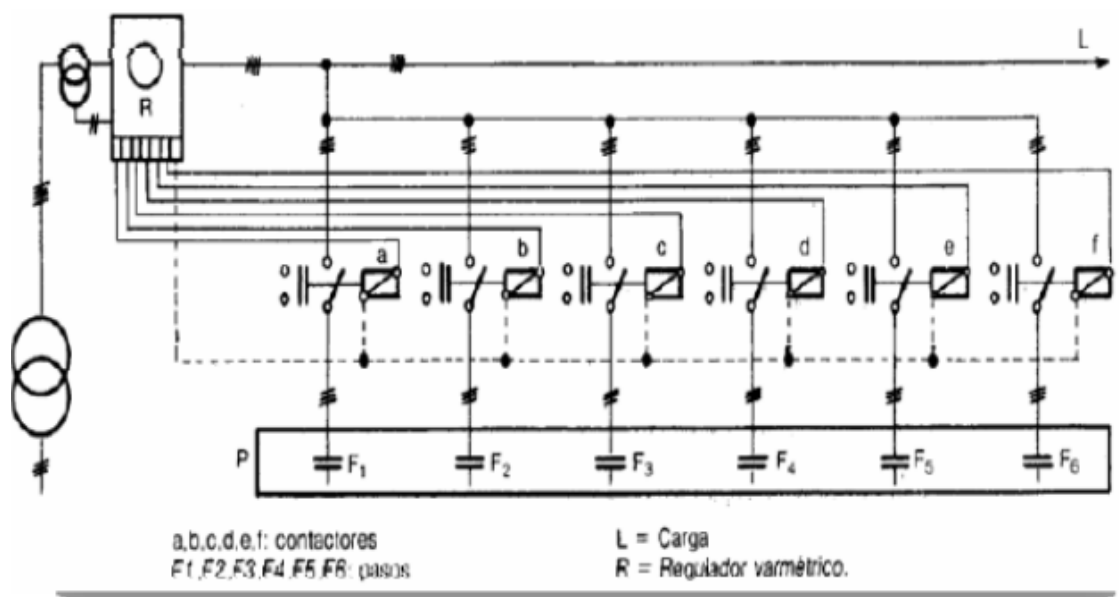


Figura 14 Diagrama esquemático de un banco de capacitores automáticos

- El número de capacitores autónomos está usualmente referido como pasos
- El número de pasos son usualmente cinco o seis
- La conmutación de los contactores y sus capacitores individuales es controlada por un regulador (vármetro)

9.2 Bancos auxiliares

Los bancos de capacitores ASEA son preparados para grandes rangos de potencia. De hecho la potencia de cada paso de capacitor puede ser doblada instalando próximo al banco principal un banco auxiliar con una superestructura conteniendo seis contactores idénticos a aquellos del banco principal. De esta manera se obtiene una conexión en cascada. Es posible multiplicar el número de bancos aún más. El principio es el mismo, por ejemplo, el contacto auxiliar de cada contactor es usado para enganchar los pasos correspondientes en las siguientes unidades auxiliares. Los bancos de capacitores auxiliares no están equipados con reguladores de var y cada uno aumenta el valor de un paso por un sexto de la potencia adicional conectada.

9.3 El regulador de var

El regulador de vares tiene 4 funciones distintas:

- a) Medir potencia reactiva requerida y controlar la conmutación (conexión y desconexión) de los diferentes pasos de los capacitores dependiendo del factor de potencia deseado

Esto es de hecho de la siguiente manera:

- Determinación del coseno ϕ deseado
 - Medición del coseno ϕ
 - Ajuste de sensibilidad
 - Control de los pasos del capacitor
 - Intervalos de conmutación entre dos pasos
- b) Desconexión en voltaje cero
- c) Insensibilidad a las armónicas
- d) Señalización de pasos de conmutación

9.3.1 Medición del coseno ϕ

Las señales de corrientes y voltaje son requeridas para determinar el valor del $\cos\phi$. Si la medición de corriente es hecha en la fase R, por ejemplo, y el voltaje es medido entre las fases S y T, el voltaje resultante estará 90° fuera de fase con respecto a la fase R. Supongamos que el circuito es resistivo ($\cos\phi = 1$). La corriente en R y el voltaje entre S y T esta cambiado en 90° . La secuencia de fase debe ser notada a fin de obtener una corriente retrasada del voltaje. La señal de la función del $\cos\phi$. Puede ser obtenida de dos formas.

Método de integración

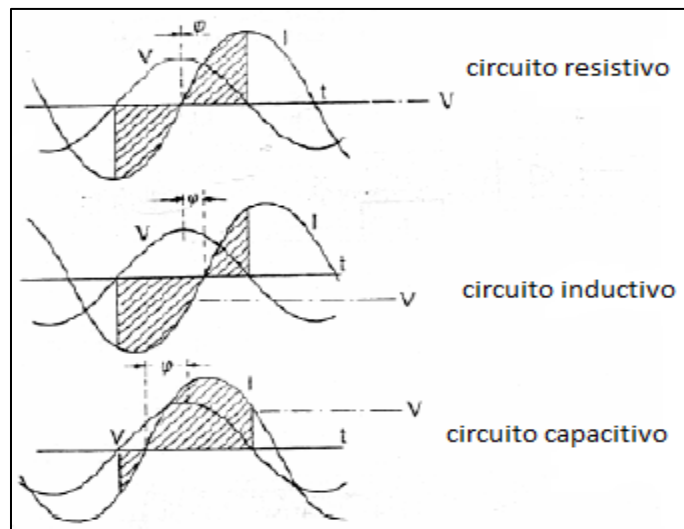


Figura 15 Determinación del $\cos\phi$, método de integración

Determinamos el valor integral de la corriente durante una mitad de onda cuando el voltaje es positivo. Podemos ver de en la figura anterior la primera gráfica donde la corriente está en fase con el voltaje (no olvide que tenemos cambiado el voltaje en 90°) que el valor integral es idéntico en la zona positiva y negativa, siendo el resultado cero. En las otras dos gráficas donde la corriente se retrasa (circuito inductivo) o se adelanta (circuito capacitivo), puede verse que el resultado no es más grande que cero, teniendo un valor positivo (circuito inductivo) o un valor negativo (circuito capacitivo).

Puede ser mostrado que este valor resultante es una función de:

- La corriente (la cual es el flujo de corriente principal en CT, si es provisto)
- El desfasamiento de corriente-voltaje

Método de fase

Las señales de voltaje y corriente usadas son idénticas a aquellas descritas en el método precedente. La señal de voltaje alterno es transformada en un impulso de corta duración con amplitud constante y desfasada 90° . Esta es una señal senoidal, la cual es una función de la corriente de alimentación transistor de efecto de campo. El voltaje de salida será un impulso con amplitud proporcional al valor de la corriente en ese momento, es decir:

9.3.2 Ajuste del $\cos\phi$

Este ajuste es hecho externamente por medio de un potenciómetro graduado en valores de $\cos\phi$.

Método de integración

El principio consiste en el desfasamiento de la señal de voltaje (usada para medir los valores del $\cos\phi$) en relación a su fase original la cual es hecha por medio de un circuito RC. Cuando el valor de la resistencia es cero, el valor de voltaje de salida es igual y en fase con el voltaje de entrada. Por el incremento de del valor de la resistencia, desfasamos el voltaje de salida en relación al voltaje de entrada. Como estamos integrando la corriente en función del tiempo donde el voltaje es positivo, el valor del voltaje no tiene importancia, tan sólo la fase es la que importa. La resistencia es regulada por medio de un potenciómetro graduado en valores de $\cos\phi$.

Método de fase

También actuamos sobre el vector de voltaje, por desfasamiento (en avance o retraso) el impulso representa el voltaje, usando un circuito RC en el que la constante de tiempo ha sido cambiada.

9.3.3 Ajuste de sensibilidad (c/k)

El ajuste de (c/k) consiste en usar ya sea atenuación de corriente o amplificación de la señal de salida de la medición del $\cos\phi$.más ajuste. Determinando el valor de $\cos\phi$ deseado por medio de la fijación de la potencia reactiva tolerada para un valor de potencia deseado. En otras palabras, fijando $\cos\phi$ para una corriente activa dada por medio de la fijación de la corriente reactiva. La corriente reactiva es la diferencia entre la corriente resultante de la carga inductiva y la corriente capacitiva. En el caso de un banco automático, la corriente capacitiva aumenta por paso hasta que alcanza la resultante seleccionada. Puede verse de inmediato que es imposible obtener la corriente residual aceptable exacta, y que una tolerancia debe ser permitida. Si la tolerancia es insuficiente, hay un riesgo de bombeo, por ejemplo: una sucesión continúa de conexión y desconexiones de un paso.

Es evidente que el bombeo puede ser evitado si la tolerancia de sensibilidad total, excede la corriente en un paso del capacitor. En la práctica el regulador no es puesto para reaccionar a cambios muy pequeños de la carga inductiva, sino para cambios correspondientes a 2/3 de la corriente de un paso del capacitor.

Entonces el regulador sensibiliza la corriente de capacitor medio del transformador de corriente, es importante notar el rango del transformador. El valor de la variación también llamada corriente de inicio y es designada por c/k. El valor de c/k puedes ser calculado por la formula siguiente:

$$\frac{I_c}{K} = 0.62 * \frac{Q}{V * \sqrt{3} * k} * (10^3) = 360 * \frac{V}{Q * k}$$

En donde:

Q: potencia nominal de un paso del capacitor en KVAR

V: voltaje de la red en V

k: relación de transformación del transformador de corriente

El rango de las escalas del regulador varía entre 0.07 y 1

Ejemplo: supongamos que tenemos un banco de 120 KVAR/400 V, construido de 6 pasos cada uno de 20 KVAR. La corriente es medida por un transformador de corriente, con rango de 500/5, obtendremos:

$$\frac{C}{K} = 360 * \frac{20}{400 * (500/5)} = 0.18$$

KVAR 230V KVAR 400 V k	6.6	10	13.3	20	26	30	40	50	60	80			
	10	20	30	40	50	60	80	100	150	200			
50/5 10	1	0.90											
100/5 20	0.52	0.45	0.78	0.90	1								
150/5 30	0.34	0.30	0.52	0.60	0.69	0.90	1						
200/5 40	0.26	0.23	0.39	0.45	0.52	0.68	0.78	0.9	1				
300/5 60	0.17	0.15	0.26	0.30	0.35	0.45	0.52	0.60	0.68	0.75	0.78	0.9	1
400/5 80	0.13	0.11	0.20	0.23	0.26	0.34	0.39	0.45	0.51	0.56	0.59	0.68	0.78
600/5 120			0.13	0.15	0.17	0.23	0.26	0.30	0.34	0.38	0.39	0.45	0.52
800/5 160			0.10	0.11	0.13	0.17	0.20	0.23	0.25	0.28	0.29	0.34	0.39
1000/5 200					0.10	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23	0.25	0.27	0.31
1500/5 300							0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21
2000/5 400								0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	
3000/5 600													0.10

Figura 16 Tabla en donde se da el valor de c/k de acuerdo a los rangos del transformador de corriente y a la potencia reactiva por paso

El valor de c/k es regulado tomando una parte del voltaje generado por la corriente integrada. Esto es hecho usando un potenciómetro graduado en c/k alimentado en un amplificador en paralelo con un circuito RC. El voltaje CD es la salida representa así una cierta parte de la potencia reactiva para ser compensada.

Este voltaje de salida controla dos transistores uno NPN y otro PNP acoplados en paralelo. Dependiendo de la polaridad del voltaje medio, ya que uno u otro de esos transistores serán controlados.

Los LED'S (diodos emisores de luz) son conectados en los circuitos del colector del transistor. Esos diodos indicarán si la corrección a ser realizada es inductiva o capacitiva.

9.3.4 Control de pasos

La señal de salida ajustada por el potenciómetro de c/k proporciona dos Indicaciones:

- Si tienen un valor suficiente controlará la operación
- Si es positivo, esta operación consiste en conectar un capacitor y viceversa

Por medio de un medidor (circuito integrado) recibiendo a señal, controla los contactores principales por medio de relevadores auxiliares integrados con el regulador de vares.

9.3.5 Secuencia de conexión

Existen tres tipos principales.

a) adición

El primer capacitor es siempre conectado tan pronto como exista una demanda, el segundo, el tercero, etc. Son conectados cuando la demanda aumenta y viceversa. Esto es representado como 1.1.1.1.1.

b) progresión

El banco incluye capacitores con valores diferentes que son múltiplos del primer paso, por ejemplo: 1-2-4 etc. El paso 1 está en la primera demanda, si la demanda aumenta, el paso 2 es conectado y el paso 1 es desconectado. Un problema puede aparecer con la conexión de un capacitor con 4 veces la unidad de potencia, pero esto puede ser reducido con una secuencia 1-2-2.

c) rotación

Los métodos precedentes sólo permiten aumentos y ciertos capacitores (por ejemplo el primero), están con mucha mayor frecuencia conectados, con respecto los otros. En un intento de restaurar el balance tendríamos:

Demanda: conecte 1

Nueva demanda: conecte 2

Reducción: desconecte (no es el 2 como en la secuencia de adición).

9.3.6 Intervalos de conmutación

El problema con los intervalos demasiado cortos entre operación de conmutación, es importante cuando c/k es calculado inadecuadamente y puede conducir al efecto previamente mencionado llamado búsqueda. Aún si los capacitores están equipados con resistencia de descarga, es necesario permitir un cierto tiempo después de la desconexión de un capacitor antes que una nueva conexión sea hecha, para permitir al capacitor descargarse a un nivel de voltaje residual bajo. El capacitor, por lo tanto, no debe ser reconectado a una carga antes que haya sido suficientemente descargado. Un cierto tiempo mínimo debe ser fijado entre la desconexión y la reconexión del paso del capacitor. Este tiempo puede ser obtenido en el contador y es típicamente alrededor de 40 segundos. Esto es suficiente para evitar sobre corrientes extras debido a la conmutación repetida del capacitor.

9.3.7 Desconexión en voltaje cero

Para evitar el problema de la auto-excitación en un motor, el capacitor debe ser desconectado cuando el voltaje es cortado. Durante un corte principal excedido en 2 periodos, el medidor es automáticamente puesto a cero. El medidor es reactivado 90 segundos después de la reenergización.

9.3.8 Armónicas

Las armónicas son más y más comunes en los sistemas de suministro principales, y es imperativo que el regulador de vares deba ser insensible a ellas. Durante una onda alterna fundamental, la integral de las armónicas pares es cero, pero la integral de las ondas armónicas impares iguala una alternancia.

Paso	Salida					
	1	2	3	4	5	6
	Acoplamiento					
1	*					
2	*	*				
3	*	*	*			
4	*	*	*	*		
5	*	*	*	*	*	
6	*	*	*	*	*	*

Paso	Salida		
	1	2	3
	Acoplamiento		
1	*		
2		*	
3	*	*	
4		*	*
5	*	*	*

Figura 17 Conexión de los diferentes pasos

El regulador de vares trabajando por integración es insensible a las armónicas pares y sensibles a las armónicas impares pero con una atenuación. El regulador trabajando por examen de fase es altamente sensible a las armónicas, y debe tener un filtro de entrada que permita el paso de la onda fundamental sin modificación y las frecuencias altas atenuadas considerablemente por ejemplo:

- 1/5 de la 1era/2da armónica
- 1/10 de la 3era armónica
- 1/20 de la 4a armónica

10. Corrección del factor de potencia

Transformadores, equipos de soldar, hornos de inducción, lámparas de descarga (fluorescentes, de vapor, de mercurio, etc.), consumen potencia reactiva inductiva, como lo hacen los motores eléctricos.

Esta potencia reactiva debe ser generada en algún lugar. Esta es la razón para instalar capacitores. Los capacitores no consumen prácticamente potencia activa y pueden producir energía reactiva localmente, compensando así la potencia reactiva inductiva consumida por las máquinas antes mencionadas, individualmente o en grupos.

Para una potencia activa constante, la potencia reactiva transmitida para este grupo de cargas (la carga inductiva y el capacitor) puede así ser reducida; el factor de potencia en la red ha sido mejorado o corregido. De esto surge la pregunta:

¿Por qué mejorar el factor de potencia?

Reducción del recargo de reactiva en la factura de electricidad, dicho coeficiente de recargo se aplica sobre el importe a pagar por la suma de los conceptos siguientes:

- Término de potencia (potencia contratada)
- Término de energía (energía consumida)

La fórmula que determina el coeficiente de recargo es la siguiente:

$$K_R = \frac{17}{\cos \varphi} - 21$$

Obteniéndose los coeficientes indicados en la tabla 2

$\text{Cos}\phi$	Kr
1	- 4 %
0.95	- 2.2 %
0.9	0.0 %
0.8	5.6 %
0.6	26.2 %
0.5	47.0 %

Figura 18 Valores de Kr

Optimización técnico-económica de la instalación, un buen factor de potencia permite optimizar técnica y económicamente una instalación. Evita el sobredimensionamiento de algunos equipos y mejora su utilización. Disminución de la sección de los cables, en la tabla 2 indica el aumento de sección de los cables motivado por un bajo $\text{Cos}\phi$. De este modo se ve que cuanto mejor es el factor de potencia (próximo a 1). Menor será la sección de los cables.

Factor multiplicador de la sección	1	1.25	1.67	2.5
$\text{Cos}\phi$	1	0.8	0.6	0.4

Figura 19 Factor multiplicador de la sección de los cables en función del $\text{Cos}\phi$

Disminución de las pérdidas en las líneas, un buen factor de potencia permite también una reducción de las pérdidas en las líneas para una potencia activa constante. Las pérdidas en vatios (debidas a la resistencia de los conductores) están, efectivamente, integradas en el consumo registrado por los contadores de energía activa (Kwh.) y son proporcionales al cuadrado de la intensidad transportada. Reducción de la caída de tensión, la instalación de condensadores permite reducir, incluso eliminar, la energía reactiva transportada, y por lo tanto reducir las caídas de tensión en línea. Aumento de la potencia disponible, la instalación de condensadores aguas abajo de un transformador sobrecargado que alimenta una instalación cuyo factor de potencia es bajo, y por lo tanto malo, permite aumentar la potencia disponible en el secundario de dicho transformador. De este modo es posible ampliar una instalación sin tener que cambiar el transformador.

NOTA: Recuerde la mejora del factor de potencia optimiza el dimensionamiento de los transformadores y cables. Reduce también las pérdidas en las líneas y las caídas de tensión. Resumiendo, podemos clasificar los factores anteriormente mencionados en beneficios económicos y beneficios en los equipos cuando se hace un mejoramiento del factor de potencia entre estos podemos mencionar.

Beneficios en los equipos:

- Disminución de las pérdidas en conductores
- Reducción de las caídas de tensión
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores
- Incremento de la vida útil de las instalaciones

Beneficios económicos:

- Reducción de los costos por facturación eléctrica
- Eliminación del cargo por bajo factor de potencia

10.1 Principio de compensación

Las cargas inductivas requieren potencia reactiva para su funcionamiento. Esta demanda de reactivos se puede reducir e incluso anular si se colocan capacitores en paralelo con la carga. Cuando se reduce la potencia reactiva, se mejora el factor de potencia.

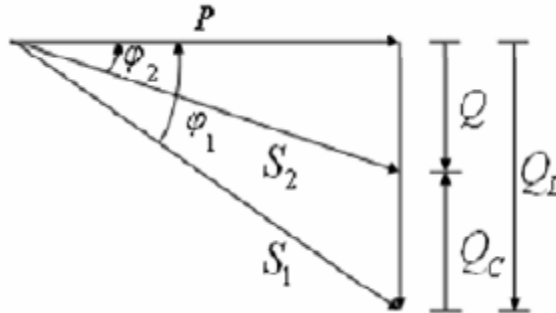


Figura 20 Compensación del factor de potencia

En la figura 20 se tiene que:

Q_L : es la demanda de reactivos de un motor y S la potencia aparente correspondiente.

Q_C : es el suministro de reactivos del capacitor de compensación

La compensación de reactivos no afecta el consumo de potencia activa, por lo que P es constante. Como efecto del empleo de los capacitores, el valor del ángulo φ_1 se reduce a φ_2 . La potencia aparente S_1 también disminuye, tomando el valor de S_2 . Al disminuir el valor del ángulo se incrementa el factor de potencia.

La Compensación del factor de potencia en un circuito monofásico: en el cual las cargas inductivas requieren potencia reactiva para su funcionamiento. Esta demanda de potencia reactiva se puede reducir e incluso anular si se colocan condensadores en paralelo con la carga. Cuando se reduce la potencia reactiva, se mejora el factor de potencia.

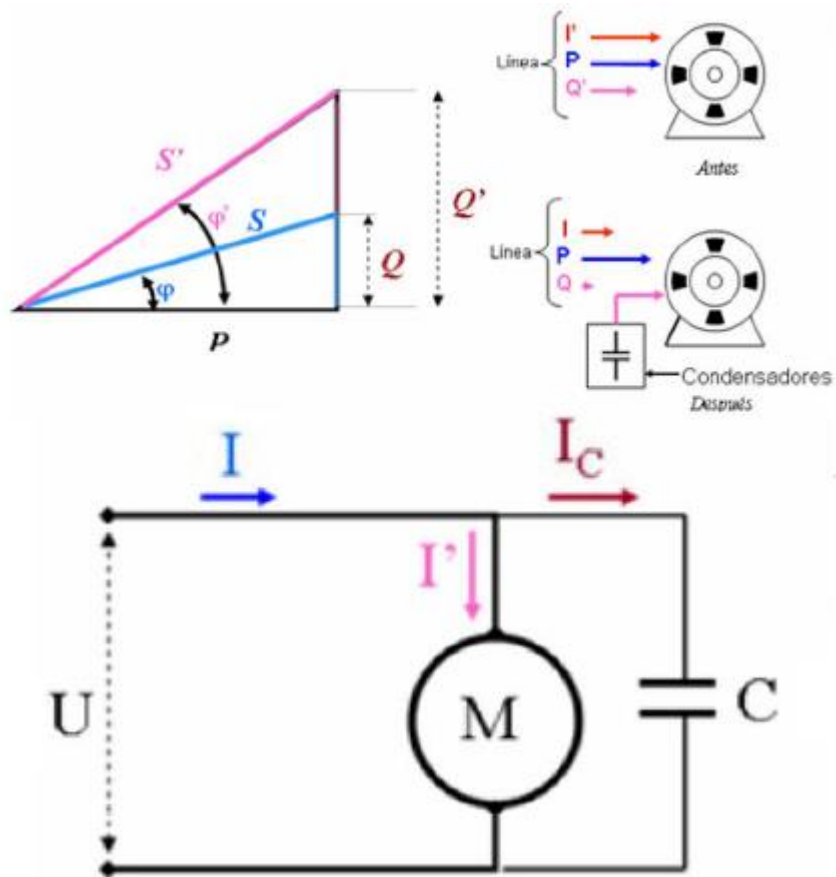


Figura 21 Compensación en un motor monofásico

La compensación del factor de potencia en un circuito trifásico: en el cual las cargas inductivas requieren potencia reactiva para su funcionamiento. Esta demanda de potencia reactiva se puede reducir e incluso anular si se colocan condensadores en paralelo con la carga. Cuando se reduce la potencia reactiva, se mejora el factor de potencia.

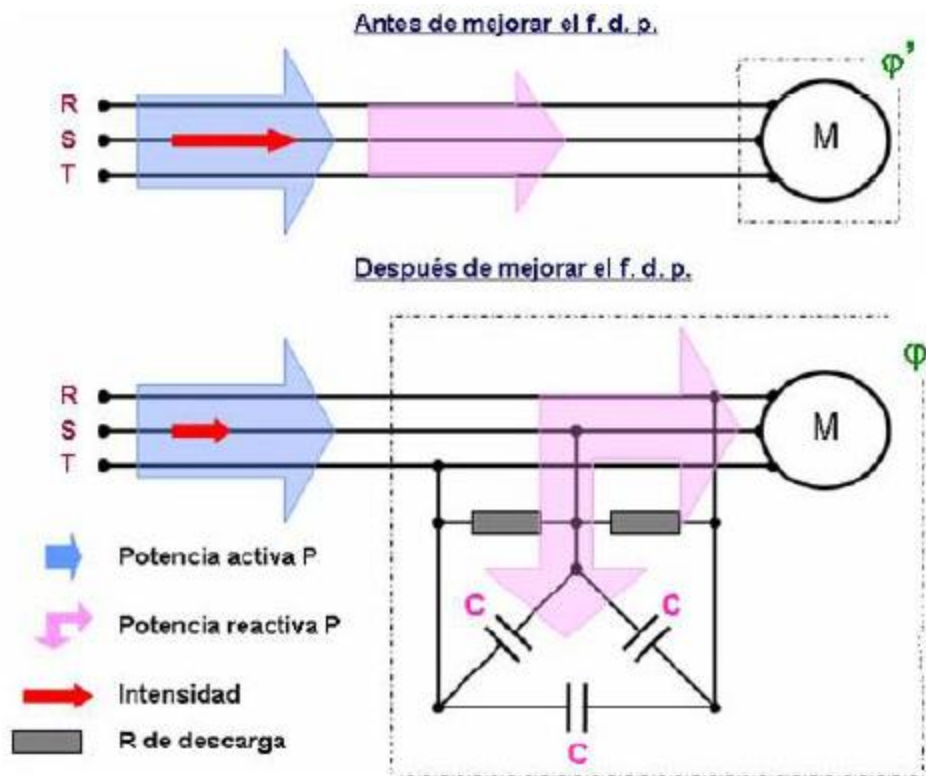


Figura 22 Compensación en un motor trifásico

10.2 Determinación del valor del capacitor

Para determinar la potencia óptima del banco de condensadores, es necesario tener en cuenta los elementos siguientes:

- Facturas de electricidad antes de instalar el banco
- Facturas provisionales de electricidad después de instalar el banco de condensadores
- Gastos relativos a la compra del banco de condensadores y su instalación

Se proponen 3 métodos simplificados para el cálculo de la potencia del equipo de Compensación.

10.2.1 Método simplificado

Un cálculo muy aproximado es suficiente. Consiste en considerar que el $\text{Cos}\phi$ de una instalación es en promedio de 0,8 sin compensación. Se considera que hay que subir el factor de potencia a $\text{Cos}\phi = 0,93$ para eliminar las penalizaciones y compensar las pérdidas habituales de energía reactiva de la instalación. Para subir de este modo el $\text{Cos}\phi$ en la tabla de multiplicadores de los kilowatts para corregir el factor de potencia (ver tabla 3.3) indica que, para pasar de $\text{Cos}\phi = 0,8$ a $\text{Cos}\phi = 0,93$, es necesario proporcionar 0,355 kVAR por kW de carga. La potencia del banco de condensadores a instalar (a la cabeza de la instalación). Será:

$Q \text{ (kVAR)} = \text{factor de corrección (tabla de multiplicadores de los kilowatts para corregir el factor de potencia)} * P \text{ (kW)}$.

TABLA PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA												
REL. KVARh/ KWh	F.P. ACTUAL	FACTOR DE POTENCIA DESEADO										
		0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
1,732	0,50	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,440	1,481	1,529	1,590	1,732
1,687	0,51	1,202	1,231	1,261	1,291	1,324	1,358	1,395	1,436	1,484	1,544	1,687
1,643	0,52	1,158	1,187	1,217	1,247	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643
1,600	0,53	1,116	1,144	1,174	1,205	1,237	1,271	1,308	1,349	1,397	1,458	1,600
1,559	0,54	1,074	1,103	1,133	1,163	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,559
1,518	0,55	1,034	1,063	1,092	1,123	1,156	1,190	1,227	1,268	1,315	1,376	1,518
1,479	0,56	0,995	1,024	1,053	1,084	1,116	1,151	1,188	1,229	1,276	1,337	1,479
1,441	0,57	0,957	0,986	1,015	1,046	1,079	1,113	1,150	1,191	1,238	1,299	1,441
1,405	0,58	0,920	0,949	0,979	1,009	1,042	1,076	1,113	1,154	1,201	1,262	1,405
1,368	0,59	0,884	0,913	0,942	0,973	1,006	1,040	1,077	1,118	1,165	1,226	1,368
1,333	0,60	0,849	0,878	0,907	0,938	0,970	1,005	1,042	1,083	1,130	1,191	1,333
1,299	0,61	0,815	0,843	0,873	0,904	0,936	0,970	1,007	1,048	1,096	1,157	1,299
1,265	0,62	0,781	0,810	0,839	0,870	0,903	0,937	0,974	1,015	1,062	1,123	1,265
1,233	0,63	0,748	0,777	0,807	0,837	0,870	0,904	0,941	0,982	1,030	1,090	1,233
1,201	0,64	0,716	0,745	0,775	0,805	0,838	0,872	0,909	0,950	0,998	1,058	1,201
1,169	0,65	0,685	0,714	0,743	0,774	0,806	0,840	0,877	0,919	0,966	1,027	1,169
1,138	0,66	0,654	0,683	0,712	0,743	0,775	0,810	0,847	0,888	0,935	0,996	1,138
1,108	0,67	0,624	0,652	0,682	0,713	0,745	0,779	0,816	0,857	0,905	0,966	1,108
1,078	0,68	0,594	0,623	0,652	0,683	0,715	0,750	0,787	0,828	0,875	0,936	1,078
1,049	0,69	0,565	0,593	0,623	0,654	0,686	0,720	0,757	0,798	0,846	0,907	1,049
1,020	0,70	0,536	0,565	0,594	0,625	0,657	0,692	0,729	0,770	0,817	0,878	1,020
0,992	0,71	0,508	0,536	0,566	0,597	0,629	0,663	0,700	0,741	0,789	0,849	0,992
0,964	0,72	0,480	0,508	0,538	0,569	0,601	0,635	0,672	0,713	0,761	0,821	0,964
0,936	0,73	0,452	0,481	0,510	0,541	0,573	0,608	0,645	0,686	0,733	0,794	0,936
0,909	0,74	0,425	0,453	0,483	0,514	0,546	0,580	0,617	0,658	0,706	0,766	0,909
0,882	0,75	0,398	0,426	0,456	0,487	0,519	0,553	0,590	0,631	0,679	0,739	0,882
0,855	0,76	0,371	0,400	0,429	0,460	0,492	0,526	0,563	0,605	0,652	0,713	0,855
0,829	0,77	0,344	0,373	0,403	0,433	0,466	0,500	0,537	0,578	0,626	0,686	0,829
0,802	0,78	0,318	0,347	0,376	0,407	0,439	0,474	0,511	0,552	0,599	0,660	0,802
0,776	0,79	0,292	0,320	0,350	0,381	0,413	0,447	0,484	0,525	0,573	0,634	0,776
0,750	0,80	0,266	0,294	0,324	0,355	0,387	0,421	0,458	0,499	0,547	0,608	0,750
0,724	0,81	0,240	0,268	0,298	0,329	0,361	0,395	0,432	0,473	0,521	0,581	0,724
0,698	0,82	0,214	0,242	0,272	0,303	0,335	0,369	0,406	0,447	0,495	0,556	0,698
0,672	0,83	0,188	0,216	0,246	0,277	0,309	0,343	0,380	0,421	0,469	0,530	0,672
0,646	0,84	0,162	0,190	0,220	0,251	0,283	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503	0,646
0,620	0,85	0,135	0,164	0,194	0,225	0,257	0,291	0,328	0,369	0,417	0,477	0,620
0,593	0,86	0,109	0,138	0,167	0,198	0,230	0,265	0,302	0,343	0,390	0,451	0,593
0,567	0,87	0,082	0,111	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,316	0,364	0,424	0,567
0,540	0,88	0,055	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397	0,540
0,512	0,89	0,028	0,057	0,086	0,117	0,149	0,184	0,221	0,262	0,309	0,370	0,512

Figura 23 Tabla de multiplicadores de los kilowatts para corregir el factor de potencia

Esta relación permite hallar rápidamente un valor muy aproximado de la potencia de condensadores a instalar.

Ejemplo

Se desea pasar el $\text{Cos}\phi = 0,75$ de una instalación de 665 kVA a un $\text{Cos}\phi = 0,928$. La potencia activa de la instalación es $665 \times 0,75 = 500$ kW. Se lee, en la tabla de multiplicadores de los kilowatts para corregir el factor de potencia en la intersección de la línea $\text{Cos}\phi = 0,75$ (antes de compensar) con la columna $\text{Cos}\phi = 0,93$ (después de compensar) que hay que instalar 0,487 KVAR por KW. Los KVAR a instalar, independientes de la tensión de la red, serán de utilizando la ecuación $500 \times 0,487$ Ó sea 244 KVAR.

10.2.2 Método basado en los datos del recibo de electricidad

Datos obtenidos del recibo

- El periodo del recibo (1 mes, 2 meses,...)
- El consumo de energía activa (Kwh.), (suma de Kwh. correspondientes a activa, punta, valle y llano)
- Consumo de energía reactiva (KVARh)

Datos obtenidos en la instalación

- Cálculo de horas efectivas de funcionamiento al mes: (Ejemplo: $h = 22\text{días} \times 9$ h/día = 189 h/mes)
- Cálculo según estos datos:

$$\text{Cos}\phi_{\text{inicial}} = \frac{\text{kWh}}{\sqrt{(\text{kWh})^2 + (\text{kVARh})^2}}$$

Potencia activa consumida en el periodo

$$P = \frac{\text{kWh (consumo de energía activa en el periodo)}}{\text{Periodo recibo} \times \text{horas efectivas de funcionamiento}}$$

A partir de la potencia activa, el $\text{Cos}\phi$ inicial y el $\text{Cos}\phi$ deseado, según los puntos Método simplificado o Método basado en el cálculo de potencias se podrá calculara Q necesaria.

10.2.3 Método basado en el cálculo de potencias

Datos conocidos

- Potencia activa (kW)
- $\cos\phi$ inicial
- $\cos\phi$ deseado

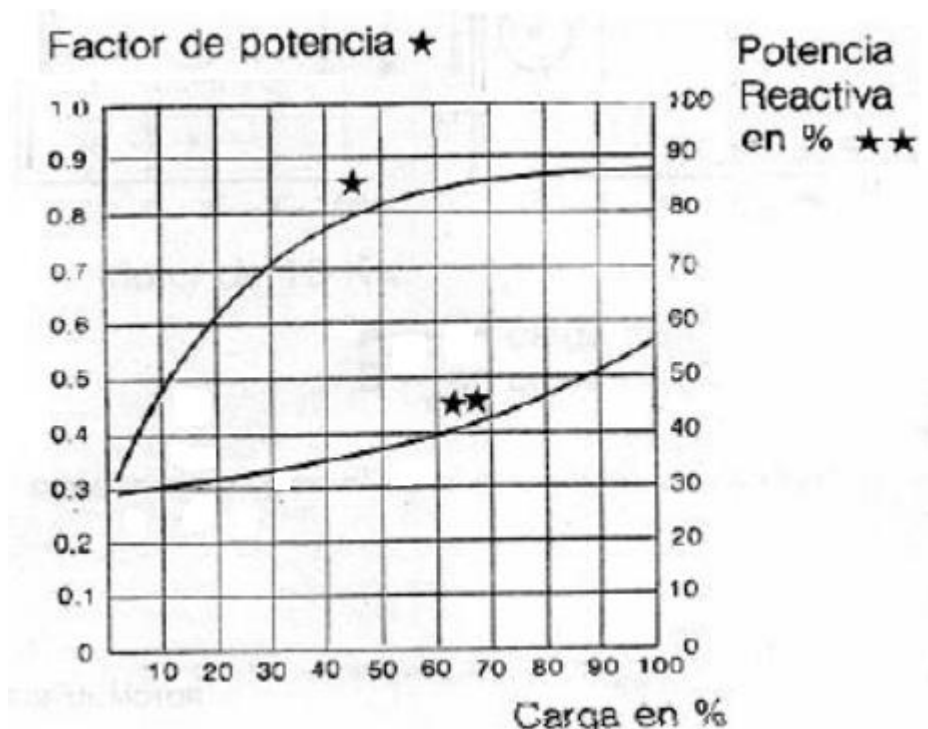
Cálculo

$$Q \text{ (KVAR)} = \text{Potencia activa (kW)} * (\tan\phi \text{ inicial} - \tan\phi \text{ deseada})$$

10.3 Problemas con motores

10.3.1 Factor de potencia de motores asíncronos

Además de la potencia activa, el motor asíncrono también requiere potencia reactiva para la magnetización de los bobinados. Esta potencia reactiva es prácticamente independiente de la carga del motor. Ello supone que la relación entre la potencia activa y la potencia reactiva, disminuye con la carga y que el factor de potencia también disminuye.



Al mismo tiempo, un aumento en la corriente de magnetización obtenido por el aumento del voltaje aplicado, conducirá a una disminución del factor de potencia, por otro lado para valor de potencia iguales, un motor operando en baja velocidad demandará una corriente de magnetización alta en relación con un motor de alta velocidad, el motor en baja velocidad tendrá, por lo tanto, un factor de potencia bajo en relación con un motor de alta velocidad.

10.3.2 Compensación central

El caso más desfavorable ocurre cuando existe un solo motor conectado a la red de alimentación. En el instante de conmutación aparece un sobre voltaje que puede ser evaluado con los diagramas dados previamente. Este voltaje cae rápidamente a cero. La velocidad del motor y la frecuencia, disminuyen. Es posible que pueda haber resonancia entre la inductancia de fuga y el capacitor en un cierto valor de esta frecuencia variable (en función de la velocidad). Un nuevo sobre voltaje aparecerá de repente, este sobre voltaje puede causar ruptura en el motor, en el capacitor, etc. En resumen esta demanda de potencia repentina bloqueará el rotor y puede conducir a un daño mecánico.

Este sobre voltaje puede ser producido considerablemente si la carga tiene un valor suficientemente alto o si existen bobinas saturadas en el circuito. Este caso de compensación general con capacitores fijos, es deseable conectar los capacitores a la salida del transformador, por ejemplo, antes del interruptor de bajo voltaje.

También es posible diseñar el circuito del capacitor con un relevador de voltaje mínimo o usar bancos automáticos (que en nuestro caso tiene un relevador de voltaje cero) y los cuales serán en cualquier momento adaptables a la potencia capacitiva de acuerdo al requerimiento del sistema evitando así, la auto-excitación de los motores.

10.4 Instalación de capacitores

Veamos el caso de una pequeña fábrica que puede ser como se describe a Continuación:

El propietario quiere incrementar sus beneficios instalando un capacitor, un mes después de haberlo instalado, se da cuenta de que su factor de potencia ha disminuido de 0.4 a 0.18... ¿Qué ha sucedido? Durante las horas de trabajo el capacitor de 50 KVAR ciertamente ha mejorado su potencia, pero durante las horas restantes, por ejemplo, 16 horas por día ha permanecido conectado y ha ganado potencia reactiva. No olvide que algunos medidores de energía reactiva miden tanto energía capacitiva, como inductiva. La última meta en la corrección del factor de potencia es reducir o aún eliminar el costo de la energía reactiva en la lectura de la electricidad. Para hacer esto es necesario distribuir las unidades capacitoras, dependiendo de su utilización, en el lado del usuario del medidor de potencia.

Las unidades capacitoras pueden ser instaladas en varios puntos de la red de alimentación de una planta. Cuatro tipos de instalaciones principales pueden distinguirse:

- compensación individual
- Compensación en grupo
- Compensación central
- Compensación combinada

10.4.1 Compensación individual

La compensación individual se refiere a que cada consumidor de potencia inductiva se le asigna un capacitor que suministre potencia reactiva para su compensación. La compensación individual es empleada principalmente en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo inductivo es representativo.

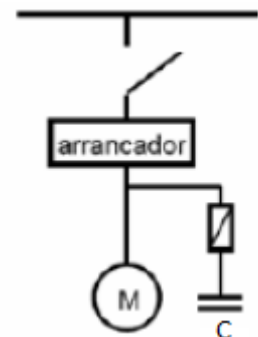


Figura 24 Diagrama de compensación individual

10.4.2 Compensación en grupo

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando éstas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante, o bien cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos.

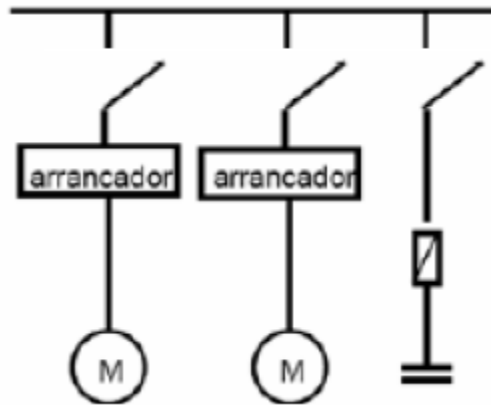


Figura 25 Diagrama de compensación en grupo

10.4.3 Compensación central

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia ya que la potencia total del banco de capacitores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales, suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación. La potencia total del banco de capacitores se divide en varios bloques que están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado en dicho regulador.

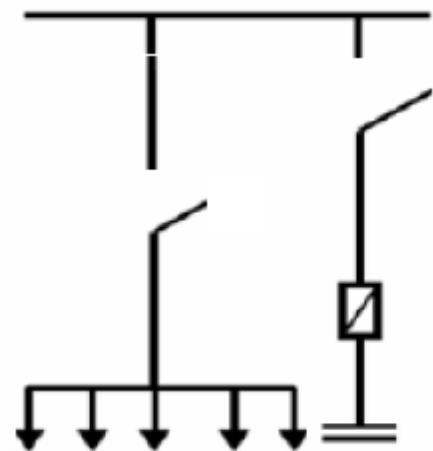


Figura 26 Diagrama de compensación central

10.4.4 Compensación combinada

Este tipo de compensación es aquella en la cual se utilizan dos o más de las expuestas anteriormente, es decir, compensación individual, compensación central o compensación en grupo.

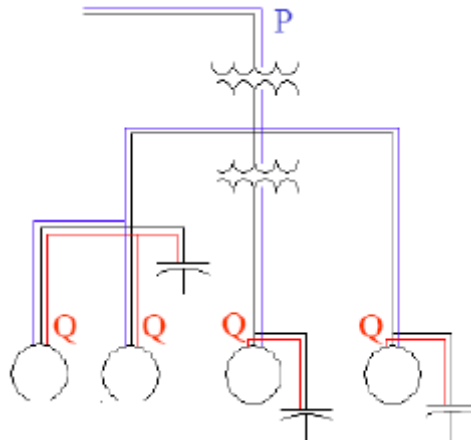


Figura 27 Diagrama de compensación combinada

10.4.5 Localización de capacitores

Para la instalación de los capacitores deberán tomarse en cuenta diversos factores que influyen en su ubicación como lo son: La variación y distribución de cargas, el factor de carga, tipo de motores, uniformidad en la distribución de la carga, la disposición y longitud de los circuitos y la naturaleza del voltaje. Se puede hacer una corrección del grupo de cargas conectando en los transformadores primarios y secundarios de la planta, por ejemplo, en un dispositivo principal de distribución o en una barra conductora de control de motores. La corrección de grupo es necesaria cuando las cargas cambian radicalmente entre alimentadores y cuando los voltajes del motor son bajos, como por ejemplo, 230 V.

Cuando los flujos de potencia cambian frecuentemente entre diversos sitios de la planta y cargas individuales, se hace necesario efectuar la corrección primero en una parte de la planta, verificar las condiciones obtenidas y después compensar en la otra. Sin embargo, es más ventajoso usar un capacitor de grupo ubicado lo más equidistante que se pueda de las cargas. Esto permite la desconexión de una parte de los capacitores de acuerdo a condiciones específicas de cargas variables.

Cuando la longitud de los alimentadores es considerable, se recomienda la instalación de capacitores individuales a los motores, por supuesto se necesitarán varios condensadores de diferentes capacidades, resultando esto en un costo mayor. Sin embargo deberá evaluarse el beneficio económico obtenido con la compensación individual. Considerando que el costo de los capacitores para bajos voltajes es más del doble que los de altos voltajes. Por esto, cuando el voltaje de los circuitos de motores es de 230 V, es más económico usar una instalación de grupo si es que ésta se puede efectuar en el primario a 2.400 ó 4.160 V. Debemos también considerar que, cuando los capacitores se instalan antes del banco principal de transformadores, éstos no se benefician y no se alivia su carga en KVA. Esta es una buena razón para usar capacitores de 230 V a pesar de su alto costo. Correcciones aisladas: La corrección aislada del factor de potencia se debe hacer conectando los capacitores tan cerca como sea posible de la carga o de las terminales de los alimentadores.

Debe recordar que la corrección se lleva a cabo sólo del punto considerado a la fuente de energía y no en dirección opuesta. Los capacitores instalados cerca de las cargas pueden dejar de operar automáticamente cuando las cargas cesan, incrementan el voltaje y por ende el rendimiento del motor.

10.4.6 Aspectos a ser tomados en cuenta

Capacidad de conducción de corriente de la instalación

La corriente nominal de los cables o barras conductoras, equipos de conexión y desconexión, cuchillas, etc. Debe ser, como mínimo, el 135% de la corriente nominal capacitiva que soportan. Con excepción de los fusibles cuya corriente nominal no debe ser inferior al 165% de la corriente nominal de los condensadores.

Voltaje nominal del equipo accesorio

El voltaje nominal de los contactores, interruptores, cuchillas, desconectores, fusibles, etc. no debe ser inferior al voltaje de línea a la que estén conectados a los condensadores.

Tipos de instalación

Los condensadores pueden ser instalados al interior, o a la intemperie, si han sido fabricados por soportar este tipo de operaciones.

Instalación al interior

Las partes vivas de los condensadores quedan protegidos por medio de cubiertas o gabinetes que impidan el contacto directo con personas u otros equipos.

Instalaciones a la intemperie

En caso de no usarse cubiertas de protección o gabinetes, los condensadores deben instalarse protegidos por medio de una cerca o montados sobre una estructura elevada que deje las partes vivas a la altura reglamentaria correspondiente, según el voltaje. Los condensadores tipo intemperie deben contar con un acabado, clase aislado y nivel básico de impulso para este uso. Se consideran recomendable 1,2 KV. De su aislamiento y 30 KV. De nivel básico de impulso.

Dispositivo de descarga

Los condensadores deben contar con un dispositivo de descarga que asegure que el voltaje entre bornes de baja a 50 voltios o menos durante el primer minuto después de su desconexión. Este dispositivo puede ser interno o externo a los tanques de los condensadores y pueden estar conectado permanentemente, o bien conectarse automáticamente al salir de la operación los condensadores. El accionamiento de los dispositivos de descarga no debe efectuarse manualmente. Los devanados de motores o transformadores, conectados en paralelo con los condensadores, pueden considerarse como dispositivos de descarga eficaces, siempre que no exista un equipo de desconexión o fusibles internos entre dichos devanados y los condensadores.

Operación rápida de conexión y desconexión

No es recomendable volver a conectar en línea un condensador que se encuentre todavía cargado. Estas implicaciones especiales, tales como la corrección del factor de potencia de motores para grúas y elevadores, bancos de condensadores de secciones desconectables que entran y salen rápidamente de operación, por medio de un control automático, que es posible que haya que volver a conectar condensadores que acaban de salir de operación. En estos casos es recomendable instalar dispositivos especiales de descarga rápida, que sean capaces de descargar los condensadores en pocos segundos antes de que vuelvan a entrar en operación, o bien, usar equipo de conexión y desconexión provisto de un aditamento capaz de limitar las sobre corrientes y sobre voltajes transitorios asociados con la conexión de los condensadores.

Bancos de condensadores fijos

Al instalar bancos de condensadores fijos, o bancos que van a quedar permanentemente conectados a la línea deben instalarse cuchillas desconectores que permitan desconectar los condensadores durante las operaciones de mantenimiento sin que sea necesario paralizar el resto de la instalación.

Bancos de condensadores desconectables

Al instalar bancos desconectables, es decir, bancos que entran y salen de operación con cierta frecuencia operado manual o automáticamente, deben conectarse cuchillas desconectores que permitan desconectar tanto condensadores y equipos de conexión y desconexión, a fin de facilitar el mantenimiento de ambos equipos.

Disposición de los condensadores

Los condensadores deben instalarse respetando las distancias mínimas entre condensador y condensador que recomienda los fabricantes de los mismo y en una disposición tal que sean fácilmente desconectables y reemplazables, a fin de facilitar la buena y continua operación de los condensadores.

Puesta a tierra de los tanques

Los tanques de condensadores así como la cubierta o gabinetes que sirvan de protección de sus partes vivas, deben instalarse conectados a tierra.

Corrección de factor de potencia para motores de inducción

Cuando se compensan individualmente motores de inducción instalándose condensadores entre el motor y su equipo de arrastre y parada, la potencia reactiva de los condensadores no debe exceder a la necesaria corrección del factor de potencia del motor por unidad, en condiciones de marcha en vacío.

Recalibración de los elementos térmicos de motores de inducción compensados por condensadores

Cuando se compensan individualmente motores de inducción instalándose los condensadores entre el motor y su dispositivo de protección térmica, deben recalibrarse los elementos teniendo en cuenta la nueva corriente que toma el motor con el factor de potencia corregido.

Compensación de transformadores

Cuando se corrige el factor de potencia de un transformador con un condensador instalado en el secundario del mismo, y existe la posibilidad de que los condensadores y el transformador trabajen en vacío, la potencia reactiva de los condensadores expresada en KVAR no debe exceder del 10% de la potencia nominal del transformador, expresada en KVA.

Ventilación

Los condensadores deben instalarse de forma que la ventilación por convección no quede entorpecida por ningún obstáculo. Cuando los condensadores se instalen dentro de un gabinete, puede ser conveniente hacerlo funcionar con ventilación forzada. En cualquier caso, las temperaturas ambiente del local o del interior del gabinete donde se encuentren funcionando los condensadores, no deben sobrepasar los límites recomendados por las normas del fabricante del mismo. No es recomendable instalar los condensadores cerca de superficies radiadoras de calor cuya temperatura sea superior a la temperatura ambiente.

Frecuencia y voltaje de operación

Los condensadores pueden ser operados a frecuencias y voltajes inferiores a sus valores nominales. Esto implica una disminución de la potencia reactiva proporcionada, que es directamente proporcional a la frecuencia y al cuadrado del voltaje.

Sin embargo, los condensadores, no deben colocarse en frecuencias o voltajes superiores a sus valores nominales. La fluctuaciones de voltaje no deben exceder los límites superiores permitidos especificados por los fabricantes de los condensadores. En condensadores tipo intemperie este límite será 10% de sobre voltaje, con respecto al voltaje nominal de los condensadores.

Protección

Los condensadores deben instalarse con dispositivos de protección contra sobre corrientes que provengan tanto de fallas de un condensador, como cualquier cortocircuito de la instalación. La capacitancia interruptiva de estos dispositivos debe ser la adecuada para magnitud de sobre corrientes que deban relevar y debe planearse el que actúen con mayor velocidad que resulta práctica. Cuando los condensadores se instalen entre un motor eléctrico y su dispositivo de protección, no es necesario instalar un dispositivo especial para los condensadores.

Protección con fusibles

Pueden usarse fusibles de potencia tipo estándar tanto para la protección general de la instalación como para la protección individual de los condensadores. La protección general debe efectuarse con tantos fusibles como líneas energizadas existan. Las protecciones individuales de los condensadores monofásicos pueden efectuarse con un solo fusible por condensador y la de los condensadores trifásicos con dos fusibles por condensador. Si los condensadores llevan instalados fusibles internos, pueden instalarse la protección individual. La corriente nominal de los fusibles no debe ser inferior al 165% de la corriente nominal capacitiva que soporten.

Protección con interruptores

Pueden usarse interruptores magnéticos o termo-magnéticos. O cualquier otro tipo de interruptores de potencia para baja tensión de uso estándar siempre que se tomen en cuenta los márgenes de corriente especificados por el fabricante de los equipos al ser operados con cargas capacitivas puras. La corriente nominal del interruptor en ningún caso debe ser inferior al 135% de la corriente nominal de los condensadores.

Conexión y desconexión

Los condensadores deben instalarse con un dispositivo de desconexión capaz de interrumpir la corriente de cada uno de los conductores energizados, con la excepción del caso en que los condensadores se instalen entre un motor eléctrico y su dispositivo de conexión y desconexión. En este caso, el dispositivo de conexión y desconexión del motor pueden servir para operar el motor y los condensadores juntos. No es necesario que el dispositivo de desconexión interrumpa al mismo tiempo la corriente de todos los conductores de energizados.

Como dispositivo de conexión y desconexión pueden usarse cuchillas, contactores magnéticos o termo-magnéticos, o cualquier tipo de interruptores de potencia para baja tensión de uso estándar, siempre que se tome en cuenta las especificaciones del fabricante en estos equipos al ser operados para cargas capacitivas puras.

La corriente nominal del dispositivo de conexión y desconexión en ningún caso debe ser inferior al 135% de la corriente nominal de los condensadores.

El dispositivo de conexión y desconexión debe ser capaz de soportar en posición de contactores cerrados, la corriente de cortocircuito del sistema en el punto donde se encuentren instalados los condensadores, aun cuando no esté planeado o no sea capaz de interrumpir dichas corrientes de cortocircuito.

Control

Cuando se instalen condensadores que entren y salgan de operación automáticamente, debe tenerse especial cuidado en la selección según las fluctuaciones de los valores del factor de potencia a fin de cumplir con los niveles y esquemas de compensación reactiva que se deseen. Instalación en condiciones anormales de operación. Se considera como condiciones anormales de operación:

- Exposición a choques mecánicos o vibraciones
- Exposición a superficies radiadoras de calor, que se encuentran a temperaturas superiores a la temperatura ambiente
- Montaje que dificulte la ventilación de los condensadores
- Operación a temperaturas ambientes más altas que la temperatura ambiente permisible según la norma de fabricación de los condensadores
- Operación a altitudes mayores de los 1800 metros sobre el nivel del mar
- Operaciones de redes con forma de onda de voltaje distorsionada

En estos casos, se considera recomendable que el fabricante de los condensadores sea puesto en antecedentes de las condiciones en que se pretende operar.

Instalación en zonas peligrosas

Se consideran zonas peligrosas:

- Atmósferas con humo o vapores corrosivos
- Atmósferas con polvo o vapores conductores, inflamables o explosivos

En estos casos deben tomarse medidas de seguridad reglamentarias y poner antecedentes al fabricante de los condensadores.

Datos de placa de características

Los condensadores deben ir provistos de placas de características que indiquen:

- Nombre del fabricante
- Voltaje nominal del condensador(voltaje aplicable entre bornes)
- Potencia reactiva nominal, o bien corriente nominal por fase
- Frecuencia
- Numero de fases
- Tipo de conexión cuando los condensadores sean trifásicos
- Numero de catálogo o especificación del fabricante
- Número de serie del condensador
- Tipo de impregnaste y numero de litros cuando este sea combustible
- Indicación de si el condensador cuenta o no con un dispositivo de descarga interno

Precauciones con condensadores impregnados con askareles

Los condensadores impregnados con askareles deben llevar una placa especial en donde se indique que el impregnante es un elemento contaminante del medio ambiente y que no debe ser arrojado a los caños del drenaje.

10.4.7 Compensación de un motor individual

El método de compensación individual es el tipo de compensación más efectivo ya que el capacitor se instala en cada una de las cargas inductivas a corregir, de manera que la potencia reactiva circule únicamente por los conductores cortos entre el motor y el capacitor. La compensación individual presenta las siguientes ventajas:

-
- Los capacitores son instalados cerca de la carga inductiva, la potencia reactiva es confinada al segmento más pequeño posible de la red
 - El arrancador para el motor puede también servir como un interruptor para el capacitor eliminando así el costo de un dispositivo de control del capacitor solo
 - El uso de un arrancador proporciona control semiautomático para los capacitores, por lo que no son necesarios controles complementarios
 - Los capacitores son puestos en servicio sólo cuando el motor está trabajando
 - Todas las líneas quedan descargadas de la potencia reactiva
 - El costo de varios capacitores por separado es mayor que el de un capacitor individual de valor equivalente
 - Existe subutilización para aquellos capacitores que no son usados con frecuencia

Es importante mencionar que para no incurrir en una sobre compensación de la potencia inductiva que provoque alteraciones en el voltaje que puedan dañar la instalación eléctrica, la potencia del banco de capacitores deberá limitarse al 90% de la potencia reactiva del motor en vacío.

Tamaño del capacitor

La potencia del capacitor a conectar directamente con el motor puede ser determinado de acuerdo a uno de los siguientes métodos:

- Multiplicar por 1/3 el valor del motor expresado en hp
- El 40% de la potencia del motor en Kw
- Consultar tablas con valores recomendados por NEMA (National Electrical Manufacturers Association)

Existen tablas que contienen las potencias máximas sugeridas de los capacitores (kVAR) para la compensación individual de motores en baja tensión. Cabe destacar que la compensación individual de motores menores de 10 kW generalmente no se utiliza.

10.4.8 Compensación de un transformador individual

Compensación e incremento de la potencia de un transformador

La instalación de una batería de condensadores puede evitar el cambio de un transformador por una simple ampliación de carga. La potencia activa disponible en el secundario de un transformador es mayor a medida que el factor de potencia se acerque al máximo $\cos\phi$. Es interesante este fenómeno, puesto que puede darse el caso que para una pequeña ampliación no sea necesario cambiar el transformador, sólo mejorar el factor de potencia. La tabla 3.6. Da los valores de potencia de un transformador a plena carga en función del $\cos\phi$ de la instalación.

Ejemplo

Una instalación es alimentada por un transformador de: Potencia de 630 kVA . La potencia activa necesaria por la carga es $P_1 = 450 \text{ kW}$ Factor de potencia medio de la carga es de $\cos\phi = 0,8$

La potencia aparente que necesita la carga será: $S_1 = \frac{450}{0.8} = 562 \text{ kVA}$

La potencia reactiva de esta carga será: $Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 336 \text{ KVAR}$

Una ampliación de la industria necesita una:

Potencia activa de $P_2 = 100 \text{ kW}$

Factor de potencia $\cos\phi = 0,7$

La potencia aparente de la ampliación será: $S_2 = \frac{100}{0.7} = 143 \text{ KVA}$

La potencia reactiva de la ampliación será:

$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 102 \text{ KVAR}$$

La potencia aparente instalada y la potencia aparente de la ampliación son:

$$S_T = S_1 + S_2 = 705 \text{KVA}$$

Superiores a la potencia del transformador:

$$S_T = 705 \text{KVA} > S = 630 \text{KVA}$$

La potencia activa total necesaria será:

$$P_T = P_1 + P_2 = 550 \text{KW}$$

¿Cuál será la potencia de la batería de condensadores necesaria para que la potencia aparente del transformador pueda suministrar la potencia activa de la instalación actual más la de la ampliación?

Para que con la potencia del transformador ($S = 630 \text{ kVA}$) se pueda suministrar, la potencia activa de la instalación existente más la de la ampliación se ha de limitar la potencia reactiva a un máximo. El máximo posible será:

$$Q_{MAX} = \sqrt{S^2 - P_T^2} = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307 \text{KVAR}$$

La potencia reactiva que necesita la instalación más la ampliación es:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Si la que necesita la instalación es de 439 KVAR y la máxima que puede suministrar el transformador es de 307 KVAR, el resto lo debemos suministrar con una batería de condensadores:

$$Q_C = Q_1 - Q_{MAX} = 439 - 307 = 132 \text{KVAR}$$

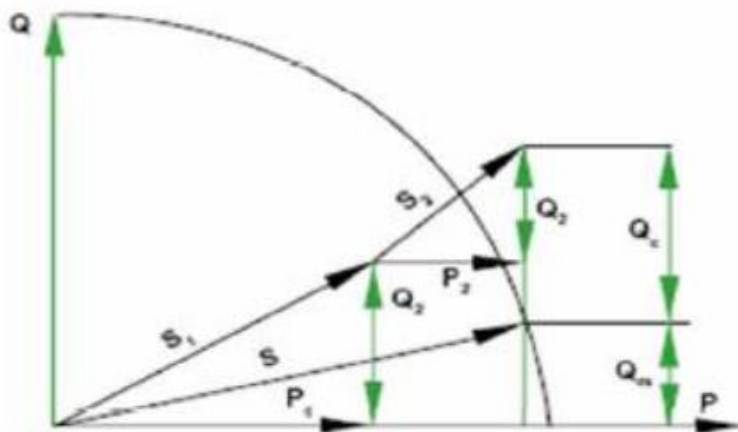


Figura 28 La compensación Q_C permite la ampliación S_2 sin tener que cambiar el transformador

10.4.9 **Compensación de la energía reactiva propia de un transformador**

La energía reactiva que consume un transformador no es despreciable (del orden del 5%); ella puede ser suministrada por una batería de condensadores. La cantidad de energía (reactiva) que absorbe es función de la corriente magnetizante en vacío o en carga. Para los transformadores de alimentación y la contratación en MT, es importante, para reducir los recargos y las pérdidas, compensar dicho consumo. Por tanto sólo consideraremos la función de los transformadores para cambios de tensión BT/BT o de régimen de neutro. La compensación de los BT/BT puede realizarse a los bornes del transformador sin regulación automática, para el valor en vacío y las variaciones correspondientes a la carga por una compensación general regulable. Un transformador absorbe energía (reactiva) para asegurar su función.

11. Diseño y cálculo del banco de capacitores en la industria Annic SA

11.1 Características de los equipos en la instalación

10.1.1 Valores nominales

Extrusora			
40 HP	220Δ/440Y	126/38A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Extrusora			
40 HP	220Δ/440Y	110/58A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Gabachera			
12HP	220Δ/440Y	110/58A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Gabachera			
12 HP	220Δ/440Y	50/20A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Gabachera			
12 HP	220Δ/440Y	50/20A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Molino			
10 HP	220Δ/440Y	25/12,5A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Figura 29 Valores nominales

11.1.2 Diagrama unifilar

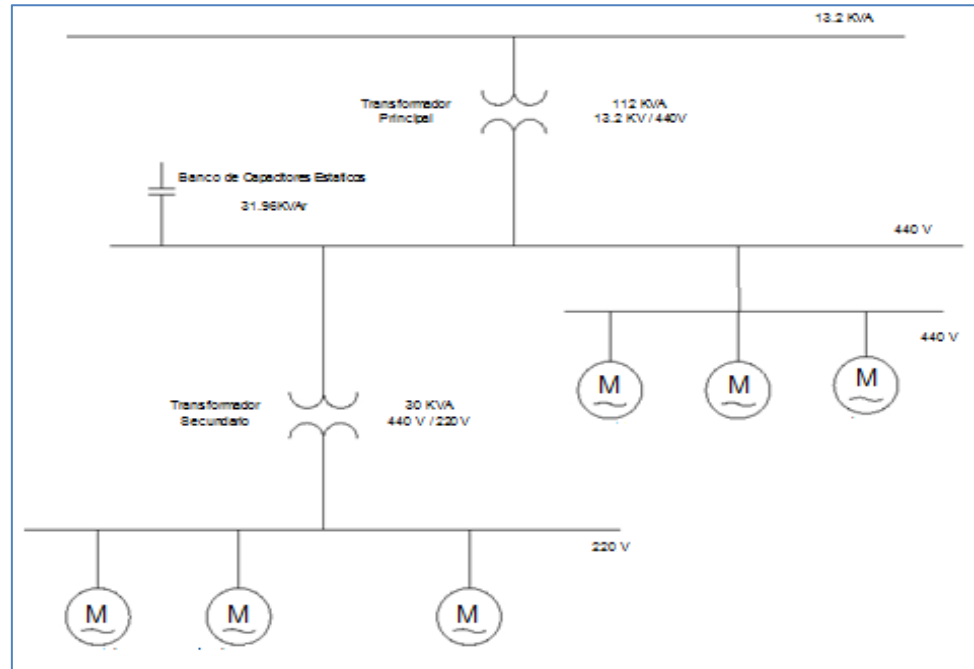


Figura 30 Diagrama unifilar

11.2 Análisis Teórico

11.2.1 Cálculo de la potencia activa, reactiva mediante los parámetros nominales de los equipos

Extrusora			
40 HP	220Δ/440Y	110/58A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Extrusora			
40 HP	220Δ/440Y	110/58A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Gabachera			
10HP	220Δ/440Y	25/12,5A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Gabachera			
10 HP	220Δ/440Y	25/12,5A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Gabachera			
10 HP	220Δ/440Y	25/12,5A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

Molino			
10 HP	220Δ/440Y	25/12,5A	F.P=0.84
60HZ	1800RPM	3 FASES	

POTENCIA ACTIVA TOTAL (P_T)	86.54 KW
POTENCIA REACTIVA TOTAL (Q_T)	59.29 KVAr
FACTOR DE POTENCIA DE OPERACIÓN	F.P. = $\cos(\tan^{-1} Q_{TOTAL}/P_{TOTAL})$
F.P. DE OPERACIÓN	0.82
POTENCIA APARENTE TOTAL (S_T)	$S_T = P_T/F.P.$
POTENCIA APARENTE TOTAL (S_T)	105.54 KVA

En donde:

F.P.: Factor de Potencia

Q: Potencia Reactiva

P: Potencia Activa

S: Potencia Aparente

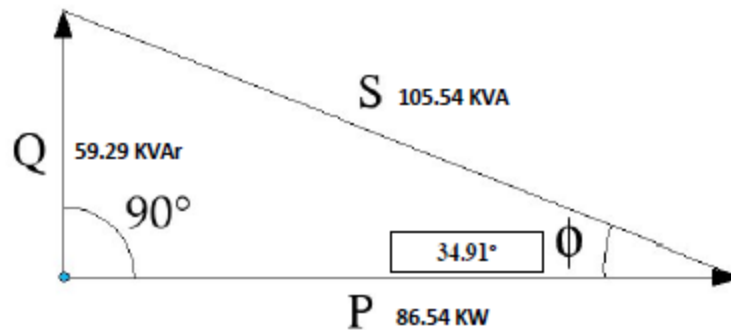


Figura 31 Triángulo de potencia de la instalación industrial

11.2.2 Cálculo de pérdidas en los alimentadores con el factor de potencia inicial en el sistema (FP=0.82)

La corriente de la línea antes de conectar los capacitores es:

La demanda total (86.54 KW) de los cuales hay 3 equipos que trabajan a un nivel de tensión de 440 V, es decir una demanda de 67.14 KW.

Por tanto se puede decir que: $KVA = KW/\cos\theta_1$

$$KVA = (67.14KW)/(\cos 0.82) = 81.87 KVA$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} =$$

$$Q = \sqrt{81.87^2 - 67.14^2} = 46.85 \text{ KVAr}$$

Ahora

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\theta$$

Despejando:

$$I_L = (P) / (\sqrt{3} * V_L * \cos\theta)$$

A partir de ahí se establece:

$$I_L = 67.14 \text{ KW} / \sqrt{3} * 440 * 0.82 = 107.43 \text{ A}$$

Ahora bien, con este valor de corriente y sabiendo que la distancia del transformador de 112.5 KVA 13.2 KV/440V al tablero principal de (440 V) es de 18 metros y que el conductor utilizado es calibre 2/0 AWG THWN 600 V 90°. Con este dato se puede calcular la resistencia del conductor para luego poder determinar las pérdidas por Efecto Joule.

El cálculo se realiza de la siguiente forma: $R_C = \rho_c * L / A_C$

R_C : Resistencia del conductor en Ω

ρ_c : Resistividad del cobre ($1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$)

A: Área del conductor en m^2

L: Longitud del conductor en m^2

Para un conductor calibre 2/0 AWG THWN 600 V 90° el área en mm^2 es de 67.42 mm^2 , esto es igual a $6.742 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Se tiene el siguiente resultado:

$$R_C = (1.7 * 10^{-8} \Omega\text{-m}) * (18\text{m}) / 6.742 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Las pérdidas por Efecto Joule son las que se manifiestan en forma de calor en los conductores, están dimensionadas en watts y se calculan de la siguiente manera:

$$P_{EJ} = I^2 * R_C$$

Dónde:

P_{EJ} : Pérdidas por Efecto Joule (W)

I: Corriente que circula por el conductor (A)

R_C : Resistencia del conductor (Ω)

Calculando las pérdidas de línea:

$$P_{EJ} = (107.43A)^2 * (4.54 * 10^{-3}\Omega) = 52.38W$$

Se tiene luego en las tres líneas:

$$P_{EJ} = 52.38W * 3 = 157.14 W$$

La demanda restante de la planta es de 19.40 KW a un nivel de tensión de 220 V con un factor de potencia de 0.82 en atraso. Por tanto se puede decir que:

$$KVA = 19.4KW / 0.82 = 23.66KVA$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{23.66^2 - 19.40^2} = 13.54 KVAR$$

Ahora se tiene que:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\Theta$$

Despejando la corriente de línea: $I_L = (19.4KW) / (\sqrt{3} * 220 * 0.82) = 62.10A$

Con este valor de corriente y sabiendo que la distancia del transformador de 30 KVA 440V/220V al tablero principal de (440 V) es de 19 metros y que el conductor utilizado es calibre 1/0 AWG THWN 600 V 90°. Con este dato se puede calcular la resistencia del conductor para luego poder determinar las pérdidas por Efecto Joule. El cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$R_C = \rho_c * L / A_c$$

R_C : Resistencia del conductor en Ω

ρ_C : Resistividad del cobre ($1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$)

A: Área del conductor en m^2

L: Longitud del conductor en m

Para un conductor calibre 1/0 AWG THWN 600 V 90° el área en mm^2 es de 53.49 mm^2 , esto es igual a $5.349 \times 10^{-5} \text{m}^2$. Se tiene el siguiente resultado:

$$R_C = (1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}) \cdot (19\text{m}) / 5.349 \times 10^{-5} \text{m}^2 = 6.04 \times 10^{-3} \Omega$$

$$P_{EJ} = I^2 \cdot R_C$$

Dónde:

P_{EJ} : Pérdidas por Efecto Joule (W)

I: Corriente que circula por el conductor (A)

R_C : Resistencia del conductor (Ω)

Calculando:

$$P_{EJ} = (62.10\text{A})^2 \cdot (6.04 \times 10^{-3} \Omega) = 23.29\text{W}$$

Calculando pérdidas en las tres líneas:

$$P_{EJ} = 23.29\text{W} \cdot 3 = 69.87 \text{W}$$

Después de esto podemos decir que las pérdidas en los alimentadores principales suman un total de

$$P_{\text{pérdidas totales en alimentadores}} = P_{2/0} + P_{1/0}$$

$$P_{\text{pérdidas totales en alimentadores}} = 157.14 + 69.87 = 227.01\text{W}$$

11.2.3 Cálculo la caída de voltaje en los alimentadores con el factor de potencia inicial en el sistemas (FP=0.82)

Al circular una corriente eléctrica a través de los conductores de una instalación; se produce en ellos una caída de tensión que responde a la siguiente expresión:

$$V_P = I \cdot R_C$$

V_P : Voltaje de pérdida en el conductor (V)

I: Corriente de carga (A)

R_C : Resistencia del conductor (Ω)

Calculando la caída de voltaje en el conductor calibre 2/0 AWG

$$V_P = 107.43A \cdot 4.54 \times 10^{-3} \Omega = 0.50V$$

Para calcular el porcentaje de perdida se realiza de la siguiente manera:

$$\%V = V_P / V_N \cdot 100$$

Dónde:

$\%V$: Porcentaje de variación de voltaje

V_P : Voltaje de Pérdidas

V_N : Voltaje Nominal

Calculando:

$$\% V = 0.50/440 \cdot 100 = 0.11\%$$

- Calculando la caída de voltaje en el conductor calibre 1/0 AWG

$$V_P = 62.10A \cdot 6.04 \times 10^{-3} \Omega = 0.38 V$$

- Calculando:

$$\% V = 0.38/220 \cdot 100 = 0.17\%$$

11.2.4 Cálculo de la corrección del factor de potencia para el valor del banco de capacitores

Para corregir el factor de potencia debemos primero de establecer cuál será nuestro nuevo factor de potencia y este lo seleccionamos en un valor en el cual ya no paguemos una penalización económica por bajo factor de potencia y en donde técnicamente la instalación se vuelva más eficiente. En este caso el valor al que queremos llegar es a 0.95 y para lograrlo se debe primero calcular el tamaño del banco de capacitores. Para este cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{CAP} = KW * \left[\left[\frac{1}{(\cos \theta_1)^2} - 1 \right]^{1/2} - \left[\frac{1}{(\cos \theta_2)^2} - 1 \right]^{1/2} \right]$$

Q_{CAP} : Potencia reactiva de los capacitores (KVAr)

KW: Potencia activa de la carga (KW)

$\cos \theta_1$: Factor de potencia inicial o actual

$\cos \theta_2$: Factor de potencia final o deseada

$$Q_{CAP} = 86.54KW * \left[\left[\frac{1}{(0.82)^2} - 1 \right]^{1/2} - \left[\frac{1}{(0.95)^2} - 1 \right]^{1/2} \right] = 31.96 KVAr$$

De este resultado se concluye que se debe instalar un banco de condensadores de 35 KVAR que es un valor comercial a un nivel de tensión de 440 V.

11.2.5 Cálculo de pérdidas en los alimentadores con el factor de potencia deseado en el sistema. (FP=0.95)

Luego de conectar el banco de capacitores se tiene un factor de potencia de 0.95, este cambio afecta a todo el sistema por lo que se deben de recalculan las pérdidas en los conductores por Efecto Joule y la caída de voltaje para poder comparar económicamente los ahorros y la viabilidad del proyecto.

Por tanto se dice que:

$$KVA = 67.14KW/\cos0.95 = 70.67 \text{ KVA}$$

$$Q=\sqrt{70.67^2-67.14^2}= 22.05 \text{ KVAr}$$

$$I_L=67.14 \text{ KW} / \sqrt{3} * 440 * 0.95 = 92.73 \text{ A}$$

$$P_{EJ} = (92.73 \text{ A})^2 * (4.54 \times 10^{-3} \Omega) = 39.04 \text{ W}$$

Calculando las pérdidas en las tres líneas, se tiene:

$$P_{EJ} = 39.04 \text{ W} * 3 = 117.13 \text{ W}$$

La demanda restante de la planta es de 19.40 KW a un nivel de tensión de 220 V con un factor de potencia de 0.95 en atraso. Por tanto se puede decir que:

$$KVA = 19.4 \text{ KW} / 0.95 = 20.42 \text{ KVA}$$

$$Q = \sqrt{20.42^2 - 19.40^2} = 6.37 \text{ KVAR}$$

$$I_L = 19.40 \text{ KW} / \sqrt{3} * 220 * 0.95 = 53.6 \text{ A}$$

$$P_{EJ} = (53.60 \text{ A})^2 * (6.04 \times 10^{-3} \Omega) = 17.35 \text{ W}$$

Calculando las pérdidas en las tres líneas, se tiene:

$$P_{EJ} = 17.35 \text{ W} * 3 = 52.05 \text{ W}$$

Después de esto se puede decir que las pérdidas en los alimentadores principales suman un total de:

$$P_{\text{pérdidas totales de alimentadores}} = 117.13 + 52.05 = 169.18 \text{ W}$$

11.2.6 Cálculo la caída de voltaje en los alimentadores con el factor de potencia deseado en el sistemas (FP=0.95)

Calculando la caída de voltaje en el conductor calibre 2/0 AWG

$$V_P = 92.73 \text{ A} * 4.54 \times 10^{-3} \Omega = 0.42 \text{ V}$$

Para calcular el porcentaje de pérdida de voltaje se realiza de la siguiente manera:

$$\%V = 0.42 / 440 * 100 = 0.095 \%$$

Calculando la caída de voltaje en el conductor calibre 1/0 AWG

$$V_P = 53.60 \text{ A} * 6.04 \times 10^{-3} \Omega = 0.32 \text{ V}$$

Calculando el porcentaje de pérdida de voltaje:

$$\%V = 0.32 / 220 * 100 = 0.14 \%$$

12 Conclusiones

Un ahorro anual del 7.40% se obtendrá evitando las penalizaciones mensuales al corregir el factor de potencia de 0.82 a 0.95.

La conexión en estrella con neutro sólidamente conectado a tierra fue utilizada debido a que esta conexión tiene la ventaja de proveer el conductor neutro, el cual tiene la función de eliminar cualquier desbalance en las fases debido a fallas o cambios repentinos de corrientes.

Al corregir el factor de potencia disminuyen las corrientes que circulan por los conductores, al mismo tiempo disminuyen las pérdidas por Efecto Joule, que al final, se traducen en un ahorro anual de 0.75% del total de la factura.

La armónica que predominó en el estudio teórico concuerda con la teoría de los variadores de frecuencia de 6 pulsos, ya que la quinta armónica es la que predomina y la que más efecto tiene en el sistema.

13 Recomendaciones

En los casos en donde la distorsión armónica represente un exceso de potencia total del 20%, no debe utilizarse un banco de capacitores equipado con filtros, para evitar la amplificación de las corrientes armónicas presentes en la red y limitar de esta forma la polución electromagnética de baja frecuencia.

Controlar el consumo de potencia reactiva para determinar cuál es el rango de operación del factor de potencia y poder reducir la factura por consumo de potencia reactiva.

Efectuar un estudio de costo/beneficio para evaluar la factibilidad de disminuir las pérdidas por Efecto Joule en los conductores.

Hacer un estudio de campo con equipo de medición para conocer realmente cuáles son los valores nominales y los valores de los factores que afectan la instalación.

Hacer el análisis de los efectos del factor de potencia en las instalaciones industriales para poder utilizar menor sección transversal de conductores en motores, acometidas y el resto de equipos.

14 Bibliografía

1. Capacitores de potencia tipo seco de baja tensión. Luminex
2. Guía de utilización de los condensadores BT. Merling Gering.
3. Reactive power compensation and harmonic filtering. Rectiphase LV capacitors and banks. Merling Gering.
4. Características eléctricas de transformadores trifásicos. Ecuatran.
5. Effect of power factor on equipment size. Bulletin D-412C. Square company
6. Guía para la corrección del factor de potencia para el ingeniero de planta. manual SPRAGUE Electric Com.
7. Westinghouse consulting application guide. 1991-1992
8. Aclaraciones técnicas sobre aparatos de maniobra de baja tensión, instalaciones y distribuciones. Catalogo NS0/NV0 1978 Sienes.
9. Centro de Formación. CT-142. Aparamenta de maniobra para baterías de condensadores H.T. Grupo Schneider. Denis Koch. Edición de agosto 93.
10. Condensadores de potencia. CYDESA.
11. Nassir sapag chain . Preparación y Evaluación de Proyectos 2da Edición.
12. Roberto Hernández Sampieri. Metodología de la investigación. Editorial, MCGRAW HILL.