

## **Corrección de factor de potencia con bancos de capacitores distribuidos en la industria maquiladora**

Carlos Garza, Sergio Ramón y Roberto Martínez

C. Garza, S. Ramón y R. Martínez  
Universidad Tecnológica de Tamaulipas Norte, Av. Universidad Tecnológica #1555 . Col. La Escondida. Ciudad Reynosa,  
Tamaulipas. Cp. 88770. México  
sarm45@hotmail.com

M. Ramos., V.Aguilera., (eds.) .Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago,  
Guanajuato, 2014.

## Abstract

A methodology to correct the power factor by measuring power parameters on branch circuits and feeders with an electrical network analyzer equipment for sizing distributed capacitors banks in the main electrical charges, stemming from the need to industrial companies, to bring down production costs and directly competing in the global world market.

The methodology is based on the principles of shunt compensation, taking into account, that although heat losses in the conductors, the best voltage regulation and increased availability of boards, switches and feeders would be the main technical trigger in utilizing this method, the main interest of corporate leaders, is to reduce the amount of electrical energy billing/costs, either by performing actions that lead to a more efficient use of energy, to avoid fees and get bonuses electricity billing by increasing the power factor of the electricity system as previously explained.

Even though the criteria widely disseminated and applied criteria, indicated that both technical and economically, the best way to raise the power factor was by installing central automatic capacitor banks, it has been proven during bank investment of distributed capacitors banks in combination with small automatic capacitor banks for power factor correction is a highly cost-effective option for manufacturing factories.

## 4 Introducción

El Consejo Nacional de Energía (integrado por los titulares de los organismos administrativos descentralizados del sector energético y la Comisión Nacional del Agua) determinó los tres ejes rectores que constituyen el núcleo de la Estrategia Nacional de Energía (ENE) 2012-2026:

- Seguridad Energética.
- Eficiencia Económica y Productiva.
- Sustentabilidad Ambiental.
- Asociada a los tres ejes rectores, la ENE plantea siete objetivos con sus respectivas líneas de acción:
- Restituir reservas, incrementar la producción de crudo y de gas natural.
- Diversificar las fuentes de energía, dando prioridad al incremento en la participación de tecnologías no fósiles.
- Incrementar los niveles de eficiencia en el consumo de energía de todos los sectores.
- Reducir el impacto ambiental del sector energético.
- Operar de forma eficiente, confiable y segura la infraestructura energética.
- Fortalecer y modernizar la infraestructura del sector energético.
- Impulsar el desarrollo de la industria petroquímica nacional.

El tercer objetivo tiene como fin impulsar acciones dirigidas a incrementar la eficiencia en el consumo de energía en todos los sectores del país, habiéndose identificado áreas de oportunidad en materia de ahorro de energía que permitiría evitar la generación ineficiente de energía.

Las estadísticas de la Secretaría de Energía para el 2010, indican que el sector industrial es el segundo consumidor en importancia (29.3%), el cual empleó 4.7% más de energía que en el 2009.

El marco legal en México para la eficiencia energética se soporta en la “Ley para el aprovechamiento sustentable de la energía”, su reglamento, y 22 Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética que fomentan los estándares de los equipos en diferentes áreas del sector industrial.

El ahorro energético y la eficiencia energética son temas que hoy en día son de gran interés en el mundo. Los recursos energéticos de una compañía juegan un papel importante dentro de la canasta de insumos necesarios para la producción de bienes y servicios en cualquier actividad económica y por lo tanto se convierten en un punto clave de análisis en la búsqueda de eficiencia.

Una buena estrategia puede lograr controlar los energéticos que se requieren para determinado proceso, disminuir pérdidas técnicas en el sistema de distribución de energía eléctrica, obtener una mayor eficiencia en sistemas térmicos como calderas y quemadores, disminuir pérdidas en fuerza motriz e iluminación, alcanzar diseños eficientes en sistemas de bombeos, etc.

Los conceptos “Ahorro” y “Eficiencia” se definen de la siguiente manera: El ahorro de energía se define como el dejar de consumir una potencia demandada requerida para cualquier trabajo en determinado tiempo, mientras que la eficiencia energética de un proceso, máquina, etc., se define como la menor relación entre kWh y unidad de producto. Cuando se alcanza una mayor eficiencia energética en un proceso productivo, se está también ahorrando energía. Una técnica que ha sido usada por muchos años para promover el uso eficiente de la energía eléctrica es la elevación del factor de potencia.

Al reducir las pérdidas eléctricas en las redes de transmisión y de distribución, y además al abatir las emisiones de CO<sub>2</sub>, esta tecnología está ya haciendo una contribución activa a la protección del clima global.

El Artículo 64 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) obliga a los usuarios con suministros en los que intervenga el factor de potencia a mantenerlo entre noventa centésimos atrasado y uno, con una penalización de hasta el 120% de la facturación por mantenerlo por debajo de 90 centésimos atrasado o una bonificación de hasta el 2.5% de la facturación por mantenerlo por arriba de 90 centésimos atrasado.

En consecuencia, la motivación principal para elevar el factor de potencia en cualquier empresa, es la de evitar la penalización que puede ser muy alta, y los fabricantes y comercializadores de equipo eléctrico tienden a promover los bancos de capacitores automáticos (centralizados) que se instalan antes del equipo de medición, y que además de evitar la penalización tienen la ventaja de poder mantener el factor de potencia en un valor muy cercano a 1, pero sin llegar a él, ya que entonces podría tenerse el efecto indeseado de ferresonancia, lo cual podría causar graves daños a los equipos e instalaciones eléctricas.

Además de lo anterior, los fabricantes de equipos eléctricos han permeado en el medio de la ingeniería, que la elevación del factor de potencia con bancos de capacitores centralizados es más económico que la elevación del factor de potencia individual (distribuida), esto es, en los equipos que demandan energía reactiva de tipo inductivo para su operación.

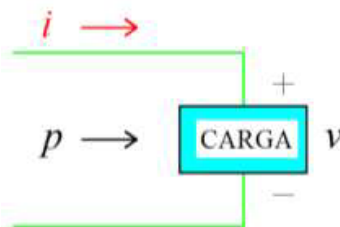
Es factible calcular e instalar capacitores individuales una vez conocidas las cargas internas y su funcionamiento y cuyo costo debía ser menor al de instalar bancos de capacitores centralizados, con la ventaja adicional de reducir las corrientes eléctricas en los circuitos derivados y alimentadores con una disminución marginal de las pérdidas  $I^2R$  en los conductores e incremento en la disponibilidad de carga en los tableros eléctricos y en los circuitos alimentadores.

#### 4.1 Marco Referencial

Desde el surgimiento de los sistemas eléctricos de corriente alterna se observaron los efectos nocivos del desfase entre la corriente y la tensión producido por la presencia de bobinas y capacitores en el sistema y caracterizados por la potencia reactiva.

La potencia proporcionada a una carga en cualquier instante es igual al producto del voltaje aplicado y la corriente resultante, es decir,  $p = vi$ .

**Figura 4** Esquema típico de carga eléctrica



En general:

$$v = V_m \text{ sen } (\omega t + \theta_v)$$

$$i = I_m \text{ sen } (\omega t + \theta_i) \quad (4)$$

De donde

$$p = V_m I_m \text{ sen } (\omega t + \theta_v) \text{ sen } (\omega t + \theta_i) \quad (4.1)$$

Si consideramos:

$$\theta = \theta_v - \theta_i \quad (4.2)$$

$$p = VI \cos \theta - VI \cos \theta \cos 2\omega t + VI \text{ sen } \theta (\text{sen } 2\omega t) \quad (4.3)$$

V e I son valores RMS

$$P = VI \cos \theta \quad (4.4)$$

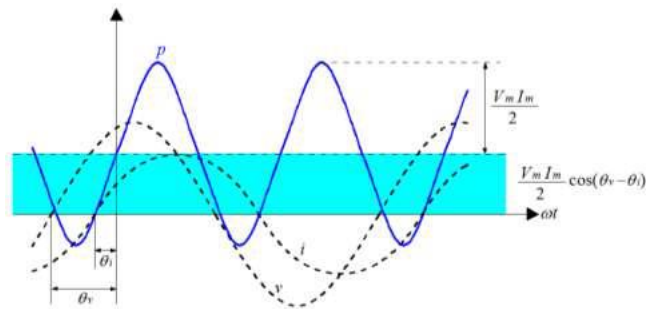
Se conoce como potencia promedio o potencia activa en Watts (W) y es la potencia disipada por los elementos resistivos del sistema, y:

$$Q = V I \text{ sen } \theta \quad (4.5)$$

Se conoce como la potencia reactiva en Volts Amperes Reactivos (VAR) y es la potencia que se necesita para magnetizar las inductancias del sistema y que retorna a la alimentación.

En la figura 3, se muestra la curva de potencia instantánea. El área entre la curva de potencia y el eje horizontal representa la energía que consume el circuito. La potencia que el circuito regresa a la fuente es igual al valor del área comprendida entre la porción negativa de la curva de potencia y el eje horizontal.

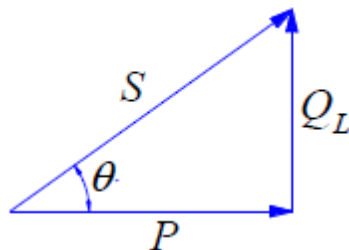
**Figura 4.1** Curva de Potencia Instantánea



La potencia activa P, es aquella que al actuar en un periodo de tiempo, se transforma en otro tipo de energía como calorífica, mecánica y radiante. La potencia reactiva Q, se establece como el flujo senoidal de energía eléctrica que no se transforma en otra forma de energía, la cual es demandada por las inductancias de las cargas para generar el campo magnético en los motores y transformadores principalmente.

Las respectivas potencias se representan por vectores en cuadratura de fase, las cuales sumadas vectorialmente dan lugar a la Potencia Aparente S, cuyas unidades están en Volts Amperes (VA).

**Figura 4.2** Triángulo de Potencias



Definida por:  $S = VI$

O bien:

$$S = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.6)$$

El ángulo que forman las potencias P y S, es el mismo que el desfase existente entre el voltaje y la intensidad de corriente, y al coseno de este ángulo se le denomina Factor de Potencia:

$$FP = \cos \theta \quad (4.7)$$

Para el caso de un sistema trifásico, las potencias se determinan de la siguiente manera:

$$P = \sqrt{3} VI \cos \theta \quad (4.8)$$

$$Q = \sqrt{3} VI \sin \theta \quad (4.9)$$

$$S = \sqrt{3} VI \quad (4.10)$$

Factor de Potencia

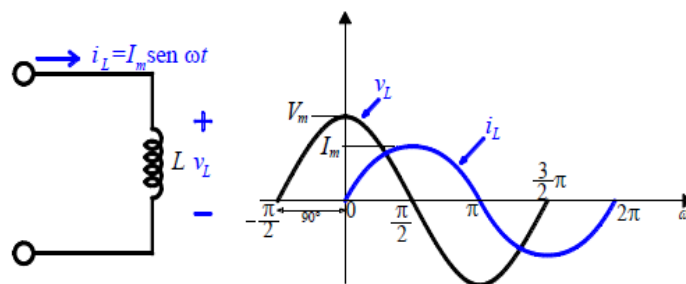
El factor de potencia se conoce como el cociente entre la potencia activa P y la potencia aparente S, definido por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (4.11)$$

Causas del bajo factor de potencia

Las cargas inductivas como motores, balastos, transformadores, etc., son el origen del bajo factor de potencia. En este tipo de equipos, la intensidad de corriente se atrasa en relación al voltaje. Al ser el factor de potencia el coseno del ángulo existente entre el voltaje y la corriente, si la corriente está atrasada al voltaje (como es común en prácticamente toda instalación eléctrica), se dice que el factor de potencia es atrasado. En dado caso de que el voltaje se atrase a la corriente se dice que el factor de potencia es adelantado.

**Figura 4.3** Diagrama Senoidal de Carga Inductiva



$$i_L = I_m \sin \omega t \quad (4.12)$$

$$v_L = V_m \sin (\omega t + 90) \quad (4.13)$$

### Efectos del bajo factor de potencia.

Las instalaciones eléctricas que operan con un factor de potencia menor a 1, afectan a la red eléctrica tanto en baja como en alta tensión, además, tiene las siguientes consecuencias en la medida que el factor de potencia disminuye:

- Incremento de las pérdidas por efecto Joule ( $I^2R$ ) al aumentar la corriente eléctrica.
- Sobrecarga de los generadores, transformadores, tableros y líneas de distribución al aumentar la potencia aparente.
- Aumento de la caída de tensión.
- Incremento en la facturación eléctrica.

Debido a que un bajo factor de potencia implica pérdidas de energía en la red eléctrica, la empresa suministradora de energía eléctrica penaliza al usuario haciendo que pague más por la energía eléctrica consumida.

### Cargos y bonificaciones por factor de potencia.

En México, de acuerdo al Artículo 64 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, se deberá conservar el factor de potencia entre noventa centésimos atrasado y uno. En el Diario Oficial de la Federación del día 10 de Noviembre de 1991, se determinó que cuando el factor de potencia tenga un valor inferior a 0.9, el suministrador de energía eléctrica tendrá derecho a cobrar al usuario una penalización o cargo por la cantidad que resulte de aplicar al monto de la facturación el porcentaje de recargo que se determine según la siguiente ecuación:

$$\text{Penalización} = \frac{3}{5} \times \left[ \frac{0.9}{FP} - 1 \right] \times 100 \quad (4.14)$$

En el caso de que el factor de potencia tenga un valor superior a 0.9, el suministrador tendrá la obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación según la siguiente ecuación:

$$\text{Penalización (\%)} = \frac{1}{4} \times \left[ 1 - \frac{0.9}{FP} \right] \times 100 \quad (4.15)$$

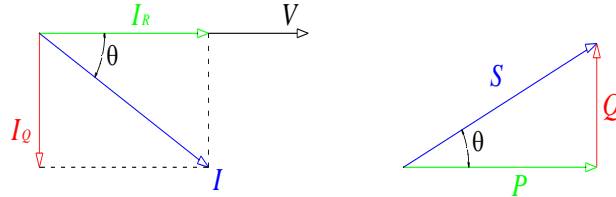
### Corrección del Factor de Potencia

En una instalación eléctrica es necesario generar y transportar, además de la potencia activa  $P$ , una cierta potencia reactiva  $Q$ , indispensable para la conversión de la energía eléctrica que no es utilizada por el elemento sino intercambiada con la red. El complejo de la potencia generada y transportada constituye la potencia aparente  $S$ .

El factor de potencia  $\cos\theta$  se define como la relación entre la componente activa  $IR$  y el valor total de la corriente  $I$ , siendo  $\theta$  el ángulo de fase entre la tensión y la corriente. Con una tensión  $V$  dada de fase resulta:

$$\cos \theta = \frac{I_R}{I} = \frac{P}{S} \quad (4.16)$$

**Figura 4.4** Diagramas fasoriales



“Corregir” significa actuar para incrementar el factor de potencia en una sección específica de la instalación, proporcionando localmente la potencia reactiva necesaria para reducir, a igual potencia útil requerida, el valor de la corriente y, por tanto, de la potencia que transita la red aguas arriba. De esta forma, las líneas, los generadores y los transformadores pueden ser dimensionados para un valor de potencia aparente  $S$  inferior.

Ventajas técnicas de la corrección del factor de potencia.

Al aplicar la corrección en una instalación, proporcionando localmente la potencia reactiva necesaria, se reduce el valor de la corriente, (a igual potencia útil requerida), y, por lo tanto, la potencia global consumida aguas arriba; esto conlleva numerosas ventajas, entre ellas, un uso optimizado de las máquinas (generadores y transformadores) y de las líneas eléctricas (transmisión y distribución).

En el caso de formas de onda sinusoidales, la potencia reactiva necesaria para pasar de un factor de potencia  $\cos\theta_1$  a un factor de potencia  $\cos\theta_2$  es expresada por la relación (válida tanto para sistemas trifásicos como monofásicos):

$$Q_C = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (4.17)$$

$P$  es la potencia activa;

$\theta_1$  es el ángulo de desfase antes de la corrección;

$\theta_2$  es el ángulo de desfase tras la corrección;

$Q_C$  es la potencia reactiva capacitiva de corrección.

Las ventajas principales de la corrección pueden resumirse de la siguiente manera:

a) Uso optimizado de las máquinas eléctricas:

Los generadores y los transformadores son dimensionados a partir de la potencia aparente  $S$ .

Esta, a igual potencia activa  $P$ , es más pequeña cuanto menor es la potencia reactiva  $Q$  suministrada. Por lo tanto, compensando la instalación, las máquinas pueden ser dimensionadas en relación con una potencia aparente inferior, aun proporcionando la misma potencia activa.

b) Uso optimizado de las líneas eléctricas:



La corrección del factor de potencia permite obtener ventajas con respecto al dimensionamiento de los cables. Aumentándolo se reduce la corriente, a igual potencia útil. Esta reducción de la corriente puede permitir la elección de conductores de sección inferior.

c) Reducción de las pérdidas:

Las pérdidas de potencia en un conductor eléctrico dependen de la resistencia del conductor y del cuadrado de la corriente que lo atraviesa; dado que a igual potencia activa transmitida más alto es el  $\cos\theta$  y más baja es la corriente, al crecer el factor de potencia disminuyen las pérdidas en el conductor ubicado aguas arriba respecto al punto en el que se lleva a cabo la corrección.

d) Reducción de la caída de tensión.

Se obtiene una mejor regulación de voltaje.

e) Reducción de la temperatura de los conductores:

La disminución de la temperatura de los conductores al circular una menor corriente, aumenta la vida del aislamiento del conductor.

### Métodos de Compensación de Factor de Potencia

A partir de las modalidades de ubicación de los condensadores, son tres los métodos de corrección.

Corrección individual (distribuida).

La corrección distribuida se realiza conectando un banco de capacitores debidamente dimensionado directamente a los terminales del dispositivo que necesita la potencia reactiva. El capacitor y la carga pueden beneficiarse de las mismas protecciones contra sobrecorriente y se insertan o desconectan a la vez. Se dice que es aconsejable para grandes aparatos con carga y factor de potencia constantes y tiempos de conexión prolongados; por lo general, es utilizado para motores y lámparas fluorescentes.

Con este tipo de corrección, toda la red aguas arriba de la carga trabaja con un factor de potencia elevado, la corriente en los circuitos derivados y alimentadores es mínima y la regulación de voltaje en la carga es máxima.

Corrección por grupos.

Consiste en corregir localmente grupos de cargas con características de funcionamiento similares mediante la instalación de un banco de capacitores.

Este método se dice que se encuentra en el punto medio entre la solución económica y el correcto servicio de la instalación, ya que los beneficios de la corrección afectan solo a las líneas aguas arriba respecto al punto en el que se encuentra instalado el banco de capacitores.

### Corrección centralizada.

En la corrección centralizada se emplean normalmente complejos automatismos (corrección automática), con bancos de capacitores fraccionados en escalones, instalados directamente en los tableros de distribución principales; el uso de un banco de capacitores conectado permanentemente, solo es posible si la demanda de energía reactiva es lo suficientemente regular durante todo el día.

La solución centralizada es la más comúnmente usada, porque se dice que permite optimizar los costos del banco de capacitores, pero presenta la desventaja de que los circuitos derivados y alimentadores de la instalación, aguas abajo del dispositivo de corrección deben estar dimensionados, teniendo en cuenta la totalidad de la potencia reactiva demandada por las cargas.

### Selección de Motores y Puntos de Conexión

- Seleccionar un motor con muchas horas de uso, de modo que el capacitor tenga un alto factor de trabajo y esté en línea en el momento de carga máxima.
- Elegir los motores más grandes y de más baja velocidad. Cuanto más baja la velocidad del motor, mayor el par y más grande el valor del capacitor a utilizar.
- Nunca conectar capacitores directamente al motor cuando:
  - Se usa un arrancador de estado sólido.
  - Se usa un arrancador en pasos.
  - Esté sujeto a arranques continuos.
  - Sea de velocidad múltiple.
  - Se use en reversa.
  - Esté acoplado a una carga con alta inercia.

### Selección de Capacitor

En el caso de no tener disponible las recomendaciones de los fabricantes, la selección correcta del capacitor puede determinarse mediante la obtención de la corriente sin carga del motor del fabricante o efectuando una medición. Cuando esto no sea posible, las Tablas 8-3, 8-4 y 8-5 de IEEE-Std-141-1993 servirán como base para la selección del capacitor correcto.

En 14.44.3 del Estándar “NEMA MG 1-2006”, se recomienda que en caso de requerir corregir el factor de potencia a motores individuales, la potencia reactiva de los capacitores se calcule con la siguiente fórmula:

$$kVAR = \frac{0.746 \times HP}{Eff} \times \left[ \frac{\sqrt{1 - (FP)^2}}{FP} - \frac{\sqrt{1 - (FP_1)^2}}{FP_1} \right] \quad (4.18)$$

Donde:

- kVAR = Valor del capacitor trifásico de corrección de factor de potencia.
- HP = Potencia mecánica en el eje del motor.
- Eff = Eficiencia por unidad nominal a plena carga.
- FP = Factor de potencia por unidad del motor a plena carga.
- FP<sub>i</sub> = Factor de potencia unitario deseado para la combinación motor-capacitor.

### **Determinación del Factor de Potencia**

Para dimensionar el banco de capacitores a instalar para corregir la instalación, hay que determinar de manera precisa el factor de potencia a partir de los consumos de energía o del ciclo de carga de la instalación; así se evita la inyección de excesiva energía reactiva de tipo capacitiva, que representa una sobre inversión.

Si se desea efectuar una corrección distribuida o por grupos, es necesario determinar el  $\cos \theta$  de la carga o del grupo de cargas; esto puede llevarse a cabo de los siguientes modos:

- directamente, mediante medida directa por medio de un cosfímetro;
- indirectamente, a través de la lectura de los medidores de energía activa y reactiva.

Si se dispone de las lecturas de energía activa y reactiva absorbidas en un ciclo de trabajo por la carga o por el conjunto de las cargas que constituyen la instalación, el factor de potencia medio puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\cos \theta = \cos \left[ \tan^{-1} \left( \frac{E_{Qf} - E_{Qi}}{E_{Pf} - E_{Pi}} \right) \right] \quad (4.19)$$

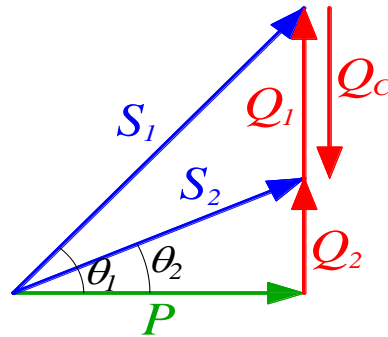
donde:

- E<sub>Pi</sub> y E<sub>Qi</sub> son los valores de la energía activa y reactiva leídos al comienzo del ciclo de trabajo;
- E<sub>Pf</sub> y E<sub>Qf</sub> son los valores de la energía activa y reactiva leídos al término del ciclo de trabajo.

Si se pretende efectuar una compensación centralizada, el factor de potencia medio mensual puede extraerse siguiendo el procedimiento descrito anteriormente o directamente de los recibos de la compañía suministradora de energía eléctrica.

### **Determinación Matemática de la Potencia Reactiva Necesaria**

Conocido el factor de potencia de la instalación ( $\cos \theta_1$ ) y el que se quiere obtener ( $\cos \theta_2$ ), es posible determinar la potencia reactiva necesaria del banco de capacitores para alcanzar la corrección.

**Figura 4.5** Diagrama fasorial de corrección de FP

Siendo:

- $P$  la potencia activa instalada
- $\theta_1$  el ángulo de desfase antes de la corrección
- $\theta_2$  el ángulo de desfase que se quiere obtener con la corrección

La potencia del banco de capacitores  $Q_c$  es igual a:

$$Q_c = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

Determinación Clásica de la Potencia Reactiva Necesaria

Se efectúa de acuerdo a los datos obtenidos en los recibos de facturación de Comisión Federal de Electricidad (CFE), de acuerdo al siguiente procedimiento:

Debido a que CFE mide la energía activa y la energía reactiva, obtiene el factor de potencia medido (FPM) con la siguiente fórmula:

$$FP_M = \cos \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\text{kVARh}}{\text{kWh}} \right) \right] \quad (4.20)$$

La potencia reactiva que está demandando el sistema (kVARD) se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\text{kVAR}_D = \text{kW} \times \tan(\cos^{-1} FP_M) \quad (4.21)$$

Finalmente, la potencia reactiva del banco de capacitores (kVAR) para un factor de potencia deseado (FPD), se obtiene de:

$$\text{kVAR} = \text{kW} \times [\tan(\cos^{-1} FP_M) - \tan(\cos^{-1} FPD)] \quad (4.22)$$

## 4.2 Materiales y Métodos

De un análisis efectuado en diversas maquiladoras de la región, se determinó que las cargas que consumen el 60% de energía eléctrica son los equipos de aire acondicionado, los compresores de aire y las bombas de agua. A continuación se presenta el procedimiento propuesto para corregir el factor de potencia con bancos de capacitores distribuidos.

Situación Actual de la empresa. Obtener los datos siguientes:

Copias de recibos de pagos de CFE.

Plano eléctrico del diagrama unifilar.

Ubicación y datos característicos de los equipos suministradores y las cargas de principal consumo.

Procedimiento técnico. Con el analizador de redes, obtener:

Medición de potencias en subestaciones.

Medición de potencias en tableros principales.

Medición de potencias en equipos de mayor consumo.

### **Diseño de solución técnica.**

Diseño y cálculos con modelos matemáticos, datos medidos y datos nominales de las cargas para sugerir la mejor opción tanto en capacitores individuales como en bancos de capacitores automáticos o fijos para la corrección del factor de potencia.

El artículo 460 de la NOM-001-SEDE-2012, establece los requerimientos normativos de las instalaciones eléctricas para la conexión de los capacitores.

De un análisis preliminar de las cargas y de un estudio minucioso de los capacitores para corrección de factor de potencia existentes en el mercado, se consideró que además de la corrección del factor de potencia con bancos automáticos, existía la posibilidad de instalar capacitores en los equipos con alto consumo, por lo que se determinó realizar una serie de combinaciones de ambos tipos de corrección, para encontrar el de mejores resultados técnicos y financieros.

El proceso para el cálculo de los bancos de capacitores a utilizar y su costo, se obtiene aplicando la siguiente metodología:

Determinar en diagrama unifilar la manera en que están conectadas las cargas.

Determinar los equipos a los que se les podría instalar bancos de capacitores fijos.

Obtener los diagramas de control y fuerza para determinar la ubicación y la distribución de los bancos de capacitores distribuidos.

Con las mediciones efectuadas con el analizador de redes, obtener la demanda de potencia reactiva individual y determinar los bancos necesarios de acuerdo a las condiciones de operación de los equipos.

Determinar los equipos y materiales de protección y alimentación de los bancos de capacitores, que cumplan con la NOM-001-SEDE-2005.

Obtener los costos de los bancos de capacitores, de los materiales para su alimentación, protección e instalación y los costos de mano de obra así como indirectos de una empresa de instalaciones eléctricas.

Analizar el impacto de los bancos de capacitores en la corrección del factor de potencia.

Determinar diferentes alternativas de corrección de FP.

Obtener los rendimientos financieros de las diferentes alternativas.

### Adquisición de Datos

El analizador de redes es un equipo de medición que realiza funciones para localizar, predecir, prevenir y resolver problemas en sistemas de distribución de energía eléctrica monofásicos y trifásicos.

**Figura 4.6**



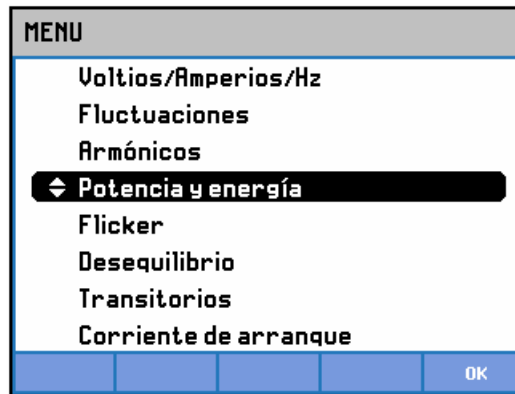
Con este equipo se pueden realizar estudios de consumo de energía y análisis de cargas eléctricas, así como realizar registros de la calidad eléctrica.

Algunas de las funciones del analizador permiten obtener una visión general del funcionamiento del sistema eléctrico, mientras que otras sirven para examinar detalles específicos. Es un instrumento que mide prácticamente todos los parámetros del sistema eléctrico: tensión, corriente, frecuencia, potencia, consumo,  $\cos \phi$  o factor de potencia, desequilibrio, transitorios, armónicos e interarmónicos.

La configuración del analizador se ajusta a las características del sistema que se desea comprobar y los accesorios utilizados.

En el analizador de redes se usa la pantalla de potencia y energía, para tomar el registro de los datos de las subestaciones, alimentadores y las principales cargas, en donde se muestran los datos de la potencia para cada fase y el total: potencia real o activa en kW, potencia aparente en kVA, potencia reactiva en kVAR y factor de potencia.

Figura 4.7



Los símbolos de una bobina y un capacitor que aparecen en el renglón de la potencia reactiva kVAR, indican si la carga es inductiva o capacitiva respectivamente. De un análisis preliminar de las cargas y de un estudio minucioso de los capacitores para corrección de factor de potencia existentes en el mercado, se considera que además de la corrección del factor de potencia con bancos automáticos, existe la posibilidad de instalar capacitores en los equipos con alto consumo, por lo que se puede determinar realizar una serie de combinaciones de ambos tipos de corrección, para encontrar el de mejores resultados técnicos y financieros.

Figura 4.8

Potencia y energía				
FUND	0:00:23			
	A	B	C	Total
kW	7.2	9.4	9.8	26.4
kVA	9.2	11.5	11.0	31.7
kVAR	5.7	6.7	5.0	17.4
PF	0.78	0.81	0.89	0.83
DPF	0.78	0.81	0.89	0.83
A rms	34	42	41	
	A	B	C	
U <sub>rms</sub>	268.2	273.0	268.5	
06/19/12 13:33:05 277V 60Hz 3Ø WYE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

### 4.3 Análisis y Resultados

Se decide obtener como productos financieros, el Tiempo de Recuperación de la Inversión y la Tasa Interna de Rendimiento, que son los más indicados para la evaluación de este tipo de proyectos de inversión.

El Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI), es uno de los métodos para evaluar los proyectos de inversión y se define como el número de años en que se recupera la inversión, mediante la resta sucesiva de las utilidades futuras, hasta el punto en que se iguala o sobrepasa la inversión. La principal ventaja de este indicador, es la de conocer la velocidad a la que la inversión es reembolsada y su principal desventaja, es la de ignorar los beneficios o pérdidas después de superado el periodo de recuperación de la inversión.

En forma matemática se expresa de la siguiente manera:

$$TRI = \frac{I_i}{I_p - E_p} \quad (4.23)$$

Donde:

$I_i$  es el monto de la inversión inicial

$I_p$  son los ingresos de flujo de capital por periodo anual

$E_p$  son los egresos de flujo de capital por periodo anual

Para el caso de la corrección del factor de potencia:

$I_i$  es el costo de la inversión de los bancos de capacitores  $I_p$  son las bonificaciones anuales por la elevación del factor de potencia sumada a los cargos que se dejarán de erogar

$E_p$  serían los costos que se erogarían por alguna causa (por ejemplo por mantenimiento)

La Tasa Interna de Rendimiento (TIR), es la tasa de descuento o rendimiento de un proyecto de inversión que a través de los flujos de caja futuros netos hacen que el Valor Actual Neto sea igual a cero.

Normalmente la TIR se compara con un tipo de interés sin riesgo y en caso de ser superior la TIR, se acepta el proyecto o en caso contrario se rechaza al ser evidente invertir sin riesgo. La principal ventaja de este indicador es que ajusta el valor del dinero en el tiempo y la principal desventaja es la dificultad de predecir los flujos de caja futuros.

El modelo matemático se presenta a continuación.

$$\sum_{t=1}^n \left[ \frac{A_t}{(1+r)^t} \right] = 0 \quad (4.24)$$

Donde:

$R$  es la TIR

$A_t$  es el flujo de efectivo para el periodo  $t$

$N$  es el último periodo donde se espera un flujo de efectivo

$A_t$ , son las bonificaciones anuales por elevación del factor de potencia sumada a los cargos que se dejarán de erogar.  $n$ , son los años de vida, que se determinan en base a la garantía de los fabricantes de capacitores. No se está evaluando las ventajas que tiene la corrección de factor de potencia distribuida debido a la disminución de las pérdidas por calentamiento en conductores y tableros eléctricos, así como la disponibilidad de capacidad de ellos al disminuir las corrientes eléctricas.

En caso de efectuar el cálculo del ahorro de energía, el TRI disminuiría y la TIR se incrementaría. Por otro lado, el análisis financiero se efectúa considerando una vida de los bancos de capacitores de 5 años (garantizado por el fabricante), no obstante que su vida promedio es de alrededor de 15 años, por lo que se esperaría que su rendimiento financiero sea muy superior al que se estime.



#### 4.4 Conclusiones

Después de un análisis efectuado en dos empresas maquiladoras, se comprobó como cierta la hipótesis a partir de las mediciones eléctricas efectuadas en la empresa analizada, se encontró que los equipos de aire acondicionado, son los que más demandaban energía reactiva de tipo inductivo y que era factible calcular e instalar capacitores individuales una vez conocidas las cargas internas y su funcionamiento y cuyo costo resultó ser menor al de instalar bancos de capacitores centralizados, con la ventaja adicional de reducir las corrientes eléctricas en los circuitos derivados y alimentadores con una disminución marginal de las pérdidas I<sup>2</sup>R en los conductores e incremento en la disponibilidad de carga en los tableros eléctricos y en los circuitos alimentadores.

La instalación de bancos de capacitores distribuidos (en los equipos consumidores de energía reactiva de tipo inductivo) en combinación con pequeños bancos de capacitores automáticos, corrigen el factor de potencia eficazmente (con todas las ventajas de corrección en ese punto) y a un costo sumamente menor al de instalar grandes bancos de capacitores automáticos en la industria maquiladora.

A continuación se muestran los rendimientos financieros en las dos empresas evaluadas:

**Tabla 4** Valeo Sistemas Electrónicos S.de R.L. de C.V.

Propu- esta	Tipo de capacito res	Subestación Eléctrica 1		Subestación Eléctrica 2		Facto r de Poten cia Inicia l	Factor de Potenc ia Correg ido	Inversió n Total	Bonifica ción Anual	Tiempo Recupera ción Inversión (años)	Tasa Interna de Rendimi ento (anual)
		Cap. Bco. de Capa c. (kVA R)	Inversió n	Cap. Bco. de Capa c. (kVA R)	Inversió n						
1	Automát ico	360	\$411 176.04	180	\$183 162.00	89.68 %	98.81 %	\$594 338.04	\$264 815.83	2.24	44.81%
2		30	\$ 43 725.00	30	\$ 43 725.00	89.68 %	98.38 %	\$172 049.58	\$253 274.10	0.68	303.22%
3	Automát ico Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53	89.68 %	98.68 %	\$197 204.58	\$259 701.62	0.76	248.61%
	3	50	\$ 68 880.00	30	\$ 43 725.00						
4	Automát ico Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53	89.68 %	98.95 %	\$206 637.11	\$266 644.08	0.77	239.86%
	4	70	\$ 78 312.53	30	\$ 43 725.00						
5	Automát ico Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53	89.68 %	99.18 %	\$227 043.23	\$271 243.36	0.84	212.75%
	5	90	\$ 98 718.65	30	\$ 43 725.00						
		290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						

6	Automático	110	\$126 001.50	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.38 %	\$254 326.08	\$278 522.26	0.91	181.67%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
7	Automático	130	\$148 540.80	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.54 %	\$276 865.38	\$281 943.23	0.98	163.10%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
8	Automático	150	\$169 050.00	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.67 %	\$297 374.58	\$285 670.54	1.04	147.97%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
9	Automático	180	\$183 162.00	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.81 %	\$311 486.58	\$288 633.17	1.08	139.73%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
10	Automático	240	\$256 798.49	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.93 %	\$385 123.07	\$291 592.66	1.32	102.65%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
11	Automático	270	\$278 248.49	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.96 %	\$406 573.07	\$292 676.40	1.39	95.02%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
12	Automático	300	\$298 115.34	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.98 %	\$426 439.92	\$292 676.40	1.46	88.44%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						
13	Automático	330	\$356 595.77	30	\$ 43 725.00	89.68 %	99.99 %	\$484 920.35	\$293 760.14	1.65	73.04%
	Fijos	290.6	\$ 70 097.05	160	\$ 14 502.53						

**Tabla 4.1** Emerpowsys S. de R.L. de C.V. (Planta 4)

Propu-esta	Tipo de capacitores	Subestación Eléctrica	Factor de Potencia Inicial	Factor de Potencia Corregido	Inversión Total	Bonificación Anual	Tiempo Recuperación Inversión (años)	Tasa Interna de Rendimiento (anual)
1	Automático	Cap. Bco. de Capac. (kVA R) 210	88.12 %	99.99%	\$217,217.64	\$143,152.92	1.52	84.46%
2	Automático Fijos	30 \$ 305.4	88.12 %	99.99%	\$181,004.10	\$143,152.92	1.26	111.34%

## 4.5 Referencias

Estrategia Nacional de Energía 2012-2016, Febrero de 2012. Secretaría de Energía.

Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, Diario Oficial de la Federación, 09-04-2012.

Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, Diario Oficial de la Federación, 30-11-2012.

NOM-001-SEDE-2005 Instalaciones Eléctricas – Utilización, Diario Oficial de la Federación, 13-03-2006.

NOM-029-STPS-2005, Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo – Condiciones de seguridad, Diario Oficial de la Federación, 31-05-2005.

“IEEE-Std 141-1993 Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Chapter 8 – Power factor and related considerations)” ANSI/IEEE Std 141-1986, IEEE, New York, NY, 1994.

“Cuaderno de aplicaciones técnicas No. 8 – Corrección de factor de potencias y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas”, 1TXA9SB004B0701-0405, Asea Brown Boveri S.A., [www.abb.es/bajatension](http://www.abb.es/bajatension).

“Nema Standards Publication MG-1-2006 Revision 1 – Motors and Generators”, National Electrical Manufacturer Association, Rosslyn, VA, 2006.

“Catálogo de Automatización/Corrección de factor de potencia”, Cod: 50034873 | Rev: 00 | Fecha: 12/2011, Weg Equipamientos Eléctricos S.A., Jaragúa do Sul – SC – Brasil, [www.weg.net](http://www.weg.net).

Compendiado\_se\_2010, Schneider Electric, México, DF, [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com).

Davel Borges/Vicente León, Evaluación y desarrollo de los dispositivos compensadores de potencia reactiva, Revista Técnica Energética Vol. XXVI, No. 2/2005.

Irwin Lazar, Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales, Limusa Noriega Editores.

Boylestad, Robert L., Introducción al análisis de circuitos, Pearson Educación, Mexico, 2004.

Wildi, Theodore, Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia, Pearson Educación, Mexico, 2007.