
BOLETIN ENERGETICO



Organización Latinoamericana
de Energía

OCTUBRE/DICIEMBRE/1980

USO RACIONAL DE LA ENERGIA UN ENFOQUE DE INTERES PARA
AMERICA LATINA **olade** MANERA DE IMPLEMENTAR UN PROGRAMA
DE CONSERVACION DE ENERGIA **olade** AHORRO DE ENERGIA ELEC-
TRICA EN LA INDUSTRIA **olade** LA POTENCIALIDAD DE LA CAÑA DE
AZUCAR COMO RECURSO ENERGETICO RENOVABLE

AHORRO DE ENERGIA ELECTRICA EN LA INDUSTRIA

INTRODUCCION

Los artículos que a continuación se presentan han sido tomados del libro "Manual de Ahorro de Energía en la Industria" desarrollado por "Interconexión Eléctrica S.A." ISA y la "Asociación Nacional de Industriales ANDI de la República de Colombia.

El libro en mención presenta un excelente análisis de los diferentes sectores industriales en donde se pueden realizar ahorros sustanciales en el Consumo de Energía Eléctrica y específicamente se refiere a:

Fuerza Motriz

- Operación y mantenimiento
- Adecuación de instalaciones existentes
- Nuevas instalaciones

Iluminación

- Operación
- Mantenimiento
- Diseño de nuevas instalaciones y adecuación de las existentes.

Aplicaciones Térmicas

- Mejoras de aislamiento
- Control de temperatura
- Ineficiencia en trabajo discontinuo
- Inspección del producto
- Procesos de fundición

* Sistema de Distribución

- Operación
- Mantenimiento
- Adecuación instalaciones existentes
- Diseño de nuevas instalaciones

* Factor de Potencia

- Principios
- Ahorro al mejorar el factor de potencia
- Como mejorar el factor de potencia
- Instalaciones de Capacitores

En razón a las limitaciones del espacio que tiene el "Boletín Energético" y además por considerarlos temas prioritarios, únicamente ha sido posible incluir los capítulos seleccionados con: Aplicaciones Térmicas y Factor de Potencia. Sin embargo, las personas interesadas en todos los temas mencionados anteriormente, pueden dirigirse directamente a:

INTERCONEXION ELECTRICA S.A.
Calle 50 N° 50-21
Medellín, Colombia
Télex: 6559 ISA CO
Teléf: 317600

II.— APLICACIONES TERMICAS

Un aspecto muy importante de ahorro de energía eléctrica en un sistema de calefacción, refrigeración, aire acondicionado y vapor, son los aislamientos térmicos ya que por cada BTU que se escape se están perdiendo 2.928×10^{-4} kilovatios-hora.

Antes de enfrentar el problema del aislamiento, se deben conocer los siguientes aspectos.

- El calor se transfiere de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura.
- La unidad de calor es el BTU (Abreviatura de British thermal unit, Unidad térmica Británica).
- BTU se define como la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una libra de agua un grado Fahrenheit.

Si partimos del hecho, que el calor se transfiere de un cuerpo de mayor temperatura a un cuerpo de menor temperatura nos daremos cuenta de que siempre estaremos enfrentados a mantener la temperatura uniforme y en forma efectiva con relación al medio ambiente y en lugares cerrados; además de tener la necesidad de trasladar al calor del lugar donde se genera al lugar donde se necesita. Para solucionar esto, debemos ayudarnos de un material que permite aislar el sistema del medio para controlar su temperatura, y este material son los denominados aislantes o calorífugos. Estos materiales o combinación de materiales cuando se usan apropiadamente mantienen temperatura uniforme dentro del lugar que se necesita.

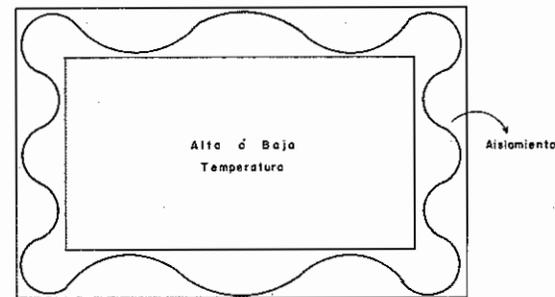
Estos aislamientos térmicos consisten de los siguientes materiales básicos:

- 1 Fibras minerales ó materiales celulosos tales como vidrio, asbestos, rocas, lana, silicato de calcio y productos de tipo cerámico.
- 2 Materiales de fibras orgánicas tales como algodón, pelo animal, madera, o fibras sintéticas y materiales celulares orgánicos tales como corcho, caucho en espuma, poliestileno y poliuretano.
3. Membranas reflectivas orgánicas metalizadas (las cuales deben ir expuestas al aire, a un gas o a un espacio vacío).

1.— ESTUDIO DE MEJORAS EN EL AISLAMIENTO

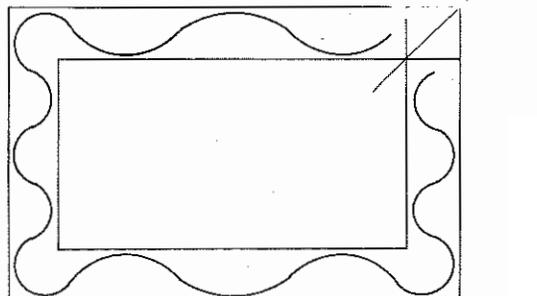
Si tenemos pérdidas de calor o refrigeración por defecto en aislamientos o por tener un aislamiento no apropiado, habrá una baja en la eficiencia, lo que hará que todo el sistema trate de corregirla, traducándose esto en un incremento de consumo de energía eléctrica. Por esta razón sería aconsejable chequear de nuevo si los aislamientos que tenemos son los apropiados, para esto podemos basarnos en:

FIG.



Como se aprecia en la fig. 1, bien sea temperatura alta o baja se mantendrá dentro de la cámara, en relación al medio ambiente, debido al aislamiento, pero si se presentara una comunicación directa con el ambiente, las temperaturas (ambiente-interior) tenderían a igualarse produciendo una transferencia indeseable de calor, entre el sistema y el ambiente como se aprecia en la fig. 2. Para recuperar la temperatura perdida en la transferencia necesitaríamos mayor consumo de energía.

FIG. 2



Mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, mayor es la tendencia a un incremento de pérdida de calor.

Esta pérdida de la cual hablamos se puede expresar como:

$$Q = \frac{TA}{R} \quad (1)$$

En donde:

- Q = Pérdida total de calor
- T = Diferencia de temperatura
- R = Resistencia térmica
- A = Area a través de la cual se pierde el calor

La resistencia térmica a su vez se puede expresar como:

$$R = \frac{L}{K}$$

En donde:

- L = Espesor del material
- K = Conductividad térmica

Por lo tanto si quisiéramos aumentar la resistencia a la pérdida de calor podríamos:

1. Hacer L más grande.
2. Hacer K más pequeña.
3. Aumentar L y disminuir K al tiempo.

Sin embargo como es más difícil mejorar continuamente el aislamiento disminuyendo el valor de K (conductividad térmica) tendremos que aumentar L (espesor del aislamiento) cuando sea necesario.

La fórmula (1) puede expresarse como:

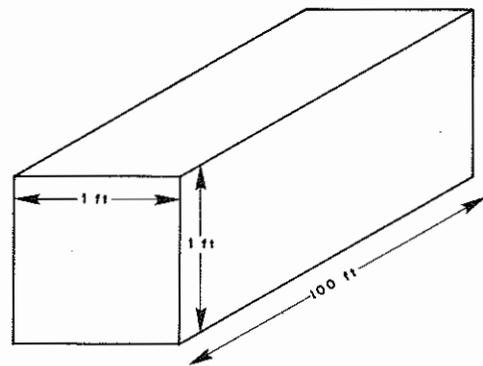
$$Q = A \frac{(t_1 - t_2)}{L/K}$$

donde:

- Q = Pérdida total del calor.
- t₁ = Temperatura de operación.
- t₂ = Temperatura ambiente del lugar.
- L = Espesor del aislamiento.
- K = Conductividad térmica.
- A = Area a través de la cual se pierde el calor.

Ejemplo:

Veremos a continuación como con el incremento de espesor del aislamiento obtendremos reducción en los kw - h de pérdida. Si tenemos un horno de 100 ft de longitud, con una conductancia de .25 BTU/ft² hr x °F, para un espesor de 1" en el aislamiento. La transferencia de calor será:



$$Q = \text{Area} \times U \times \text{Diferencia de temperatura}$$

$$\text{Area} = 100 \text{ ft}^2$$

$$U = 25 \text{ BTU/ft}^2 \text{ hr} \times \text{°F}$$

$$Dt = 515 \text{ °F}$$

Por lo tanto

$$Q = 100 \text{ ft}^2 \times \frac{.25 \text{ BTU}}{\text{ft}^2 \text{ hr} \text{ °F}} \times 515 \text{ °F}$$

$$Q = 12.875 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

Por lo tanto para un aislamiento de 1" y una resistencia de 4 la pérdida en Kw h será de: 3,774 Kw h.
1 BTU = 0.2932 Watt - h.

Si aumentamos el espesor a 2 pulgadas, aumentaremos la resistencia y por lo tanto disminuirémos la pérdida de calor.

En la siguiente tabla se observa como al aumentar

el espesor en el aislamiento vamos reduciendo las pérdidas en Kwh.

$$R (1'' \text{ de espesor}) = 4 \quad Q = 12.800 \text{ BTU} = \frac{3,774 \text{ Kw-h}}{h}$$

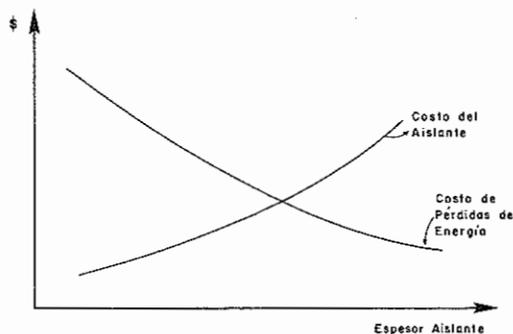
$$R (2'' \text{ de espesor}) = 8 \quad Q = 6437 \text{ BTU} = \frac{1,887 \text{ Kw-h}}{h}$$

$$R (3'' \text{ de espesor}) = 12 \quad Q = 4291 \text{ BTU} = \frac{1,258 \text{ Kw-h}}{h}$$

Este aumento en el espesor del aislamiento está limitado por dos variables que son tamaño y costo. No podemos ir aumentando el espesor del aislamiento indefinidamente ya que con seguridad tendremos problemas de espacio ni tampoco podemos olvidarnos del factor costo. Esto nos lleva a que el aislamiento se debe ir aumentando hasta que los dos factores anteriores nos lo permitan, si no se logró solucionar el problema entonces es bueno pensar en cambiar las características del aislamiento.

Una manera de visualizar esto es por medio de la gráfica de la fig. (3) en donde se ilustran el costo del aislante y el costo de la energía perdida, el punto de equilibrio será donde se presenta el corte de las dos curvas.

FIG. 3 - COSTO AISLAMIENTO



2.— CONTROL DE TEMPERATURA

En los sistemas de modificación ambiental, como refrigeración, aire acondicionado, calefacción, etc., uno de los aspectos más importantes para lograr una adecuada eficiencia energética es la de mantener un buen control de la temperatura dentro del sistema. Esto puede lograrse con relativa facilidad y a un costo que cada día se reduce más gracias a los modernos controles electrónicos automáticos o semi-automáticos que se incluyen en casi todos los equipos.

Como ejemplo, veamos el caso de un horno industrial.

Un adecuado control de temperatura dentro de un horno de resistencias implica la regulación de la corriente eléctrica a través de los elementos calefactores, con el fin de aumentar o disminuir, según se necesite, la cantidad de energía entregada al ambiente interior del horno.

Esta regulación implica la existencia de un controlador de "lazo cerrado o realimentación", cuya misión será: detectar la temperatura real dentro del horno, por medio del dispositivo sensor adecuado (termómetro, termocupla, etc.); conocer la temperatura deseada de trabajo, establecida por el operario del equipo; con base en la diferencia existente entre estas dos temperaturas ("señal de error") deberá tomar la acción adecuada para tratar de igualarlas, accionando en el momento oportuno, los reguladores de corriente de las resistencias.

Este controlador puede ser de dos tipos, según sea su operación:

a. Manual: En este caso el controlador es un ser humano, quien deberá inspeccionar visualmente los termómetros y de acuerdo a la comparación mencionada anteriormente, deberá encender o apagar oportunamente los interruptores de las resistencias.

Este tipo de control es ineficiente y lento, pues debido a la inercia térmica del horno (es decir, a la lentitud con la cual se propaga el calor dentro de él y a la demora en obtener una temperatura deseada) se presentará una variación notable de la temperatura alrededor del punto de operación deseado, además de la

propia lentitud de reacción del operador humano. La fig. 4 ilustra esta situación:

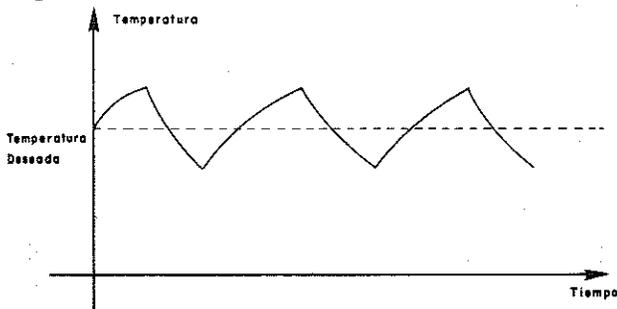


FIG. 4 — CONTROL MANUAL DE TEMPERATURA

Además este tipo de control requiere atención permanente de parte del operario, haciéndose la operación muy dificultosa cuando se trata, como es el caso normal, de grandes hornos industriales con varias decenas de metros en longitud.

b. Automática: Este indudablemente es el tipo de controlador más recomendable pues en él no interviene el operario humano más que para establecer la temperatura deseada. Todas las acciones de control son realizadas posteriormente en forma automática por el controlador, generalmente de tipo electrónico.

El controlador automático puede ser de tipo "ON — OFF" (como un termóstato), es decir, que conecta y desconecta la carga a intervalos, regulando así la temperatura pero en un rango más estrecho que el que puede lograr el operador humano. La fig. 5 ilustra estas variaciones de temperatura dentro del horno.

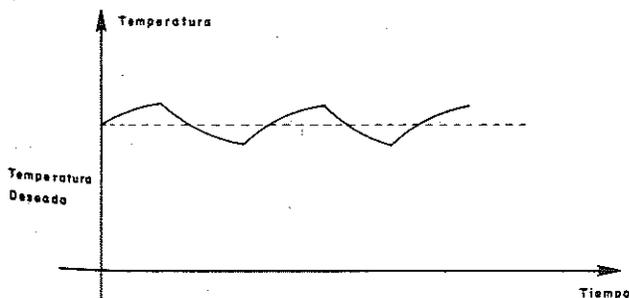


FIG. 5 — CONTROL AUTOMATICO

El controlador también podría ser de tipo proporcional, variando en forma continua y no discontinua la corriente a través de cada elemento calefactor, con la ventaja de obtener una regulación más precisa de la temperatura. La desventaja de este tipo regulador estriba en el elevado costo, puesto que se precisa la utilización de elementos electrónicos como tiristores, aún muy caros y de complicada utilización.

3.— INEFICIENCIA EN TRABAJO DISCONTINUO

Este problema hace referencia más directamente a las condiciones de operación del horno y se plantea como una de las limitaciones más importantes que ha de tenerse en cuenta si se pretende ahorrar energía eléctrica.

Como ya hemos dicho, éste método de calentamiento exhibe una gran inercia térmica, lo cual, dicho en palabras sencillas, significa que el horno se demora mucho en calentarse hasta la temperatura de operación normal y se demora mucho en enfriarse una vez que se apaga. Esto nos indica que para trabajar con la mayor eficiencia posible, debe operarse el horno en forma continua, evitando los frecuentes encendidos y apagados que implicarán un desperdicio energético, debido a que la gran cantidad de calor acumulado dentro del horno en el momento de apagarlo (y que alguna vez fue energía, eléctrica que pasó a través de nuestros contadores) no tendrá otro destino que el de disiparse en la atmósfera sin realizar ningún trabajo útil.

Según esto, puede ser más económico para una fábrica operar un horno eléctrico durante varios días seguidos en el mes, y después pararlo durante un lapso similar, que trabajarlo durante todo el mes, pero en forma discontinua.

4.— INSPECCION DEL PRODUCTO

No debe inspeccionarse el producto calentado dentro del horno abriendo en forma permanente portezuelas o aberturas que permitan escapar una buena cantidad de energía a la atmósfera, enfriando el horno, con aumento en el consumo de electricidad para reponer el calor perdido. En lugar de esto, debe colocarse

en lugares convenientes una serie de ventanillas de observación, con vidrio especial y con una fuente de iluminación adecuada que permitan examinar el producto sin pérdidas de calor.

5.— EL AHORRO DE ENERGIA EN LO PROCESOS DE FUNDICION

Se expone los factores que gobiernan el uso eficiente de la energía eléctrica y que deben tenerse en cuenta para el diseño y la operación de hornos eléctricos y de inducción.

Existen muchos factores a considerar, así:

El control de las cargas, la inyección de oxígeno, el manejo de la cal y los aditivos, el control mediante el computador, el entrenamiento a los operarios, el mantenimiento preventivo, la calibración de los instrumentos y otros que trataremos a continuación.

5.1 Control de la demanda

Las demandas máximas durante un período de tiempo determinado (actualmente es de 15 minutos), las potencias activas y reactivas son factores que se registran y se tienen en cuenta para el cobro mensual. Es importante entonces, que el consumidor de la energía estudie la forma de lograr demandas máximas promedio bajas y evitar en cuanto sea posible los picos altos de consumo de potencia, mediante un programa de entrada de potencia en los hornos teniendo en cuenta cual es el consumo de cada horno al comenzar su operación. Los hornos pueden ser programados para operar durante horas de menos carga y en empresas donde posean varios, procurar no comenzar simultáneamente la operación de todos ellos sino establecer horarios para el encendido y trabajo secuencial de los hornos, obteniéndose con ello que el pico de demanda máxima sea más bajo y se mejore entonces el promedio, ahorrándose energía y dinero.

La eficacia con la cual una industria usa su demanda de energía es estimada en términos de **factor carga**, (relación entre el consumo promedio de potencia y la potencia máxima en un intervalo de tiempo determinado), mientras más bajo sea el factor de car-

ga, más alto será el costo por servicio eléctrico. El mejoramiento del factor de carga se logra mediante la programación de la carga.

5.2 Programa de Potencia

El cambiador de taps y los selectores de voltaje en serie permiten variar las corrientes de tal manera que cuando se inicie el rompimiento de la carga, las corrientes no sean muy altas, aumentando a medida que se va fundiendo la carga hasta lograr el 100%, hay que tener en cuenta que el ciclo de fundición se inicia a la máxima potencia y que luego se va rebajando gradualmente cuando el ciclo va llegando a su terminación.

Es importante entonces, estudiar detalladamente un programa y determinar cuando se cambia de nivel de entrada de energía y cuanto tiempo ha de mantenerse en un voltaje dado.

Además, con base en los controles eléctricos y el control de temperatura el horno es versátil en su funcionamiento y por lo tanto se pueden suprimir los trabajos por breves períodos de tiempo sin causar rompimiento en los procesos de producción. Y una vez se ha identificado las cargas controlables, las prioridades establecidas y los efectos negativos estudiados, se puede obtener reducciones de consumo de energía con dicho programa.

5.3 Calibración

Un aspecto importante a considerar para lograr un ahorro en el consumo de energía es conservar en los hornos una regulación bien calibrada y ajustada de lo contrario habrán gastos innecesarios e indebidos de energía, ya que una mala calibración trae consigo múltiples problemas entre otros: respuestas lentas del horno que implican amperajes altos durante tiempos comparativamente largos, también, se pueden presentar arcos largos en el calentamiento del metal que daña el revestimiento y acorta el tiempo de su duración, ello implica en una forma indirecta un mayor consumo de energía y un aumento en los costos.

Para comprender mejor la importancia que tiene una buena calibración en un horno tenemos a conti-

nuación un ejemplo concreto que nos muestra como después de realizar unos ajustes en un horno se mejoró considerablemente el consumo de energía y en eficiencia. La tabla que sigue muestra una serie de datos que indican valores específicos antes y después de hacer los ajustes de calibración a la regulación del horno.

CONCEPTO	ANTES	DESPUES
Horno	NT -12.5	NT -12.5
Transformador	12.5MVA	12.5MVA
Colada	697	701
Toneladas de carga	27.04	28
KWH-Fusión	12.700	12.600
KWH-Refinación	2.500	2.000
KWH-Totales	15.200	14.600
KWH/T.C. Fusión	469.67	450
KWH/T.C. Refinación	92.46	71.43
MW-Fusión	7.33	7.56
MW-Refinación	6.0	6.67
Tiempo-Fusión (Mint.)	104	100
Tiempo-Refinación (Mint.)	25	18
Tiempo-Conectado	129	118
Tiempo-Vaciado y	185	158
Productividad T.C./hr	8.77	10.63

Con los ajustes se logró un aumento en la productividad de 1.86 toneladas por hora, lo que representa el 21% de incremento, así mismo el consumo de energía tuvo una disminución de 40.7KWH/T.C.M. que representa un ahorro de 7.2% por dicho concepto.

El ejemplo es un caso particular pero que bien puede dar una idea clara de cuan necesario es calibrar los hornos y tener un programa de mantenimiento preventivo en ellos.

5.4 Longitud de Arco

La regulación del horno cobija también el control de la longitud del arco tanto para romper carga como para fundir y calentar el metal. De lo contrario se tendrá el gasto continuo del revestimiento y a su vez se encontrarán escapes del calor debido a capas muy delgadas dándose los llamados puntos calientes. Dichos

puntos se deben evitar ya que conducen a un escape de calor por radicación que nos representa desperdicios y a su vez necesidad de energía, ellos se pueden anular mediante una colocación adecuada de los electrodos guardando la condición del triángulo equilátero y su perpendicularidad.

5.5 Calidad de la Materia Prima

De sumo cuidado tanto para el ahorro de energía como para la economía misma de la empresa, es el control de la calidad de la materia prima (chatarra), pues se presentan innumerables casos de chatarras con alto contenido de carbono, azufre, etc., que ya fundida no se puede equilibrar para dar el metal que se desea y se debe proceder a votar parte para reajustar con más chatarra hasta alcanzar dicho equilibrio, demo-

No solamente estudiar la calidad sino también la forma y volumen para encontrar un acomodo adecuado dentro del horno son necesarios pues hay casos en los cuales se presenta "el baño" ocasionando caídas bruscas de la chatarra no fundida quedando en contacto con los electrodos, produciendo altos valores de corrientes, elevando así los picos de demanda y por lo tanto el consumo de energía.

5.6 Control de Tiempo

El tiempo que hay entre vaciada y vaciada es una variable importante a medir y supervisar pues muestra que tanto se está aprovechando la potencia disponible en el transformador y al mismo tiempo el consumo de energía eléctrica en la operación del horno. El consumo de energía es directamente proporcional al tiempo entre colada y colada.

Y así como el rendimiento de horno se puede presentar de la siguiente forma: Al suministrarle al 100% de potencia, el calor útil aprovechado por él es del 70 a 75%. Las pérdidas están entre el 15 al 20% y son debidas al calentamiento de refractario y hay un 10% aproximadamente debidas a los elementos propios del horno como cables, transformador, mordazas, etc.

Cuando menores sean las pérdidas por calor se obtendrá una mejor utilización de horno para lo cual

se debe reducir el tiempo entre colada y colada disminuyendo por consiguiente el consumo de energía.

5.7 Otras prácticas

Ya varias empresas industriales han logrado algo positivo dando los primeros pasos, entre otros:

- Usando equipos que limiten la demanda de los hornos.
- Mejorando el factor de potencia, colocando bancos capacitores.
- Reduciendo el calor perdido en la puerta y su alrededor, cuidando no se trabaje con capas de refractario delgadas.
- Realizando limpieza continua de abrazaderas y soportes de electrodos y llevando un control continuo de temperaturas en los transformadores.
- Revisando diariamente las fijaciones y tornillería y cuidando no encontrar partes flojas tanto en las barras como en las entradas de corriente.
- Realizando un mantenimiento preventivo a los controles y motores por lo menos cada 8 días, chequeando que la regulación esté ajustada y comprobando en la siguiente operación del horno.

III FACTOR DE POTENCIA

1. PRINCIPIOS

Los aparatos eléctricos "Inductivos", tales como motores de inducción, transformadores, equipos de soldadura, lámparas fluorescentes, anuncios de neón, hornos de inducción, etc., "consumen" sólo una parte de la corriente que toman de la línea que los alimenta, siendo ésta la corriente "activa" o "productiva". El resto de la corriente total sirve para alimentar los campos magnéticos del equipo y se conoce como corriente "magnetizante reactiva" o "no productiva".

El "factor de potencia" de un circuito es simplemente el nombre dado a la relación entre la corriente "productiva" y la corriente total suministrada, o lo que es lo mismo a la relación entre la "potencia activa real o verdadera" que es usada en un circuito para producir calor o trabajo, expresada en vatios o kilo-

watios (KW) y la "potencia aparente" que es tomada de la línea, expresada en voltio-amperios o kilovoltio-amperios (KVA).

Para encontrar la "potencia aparente" requerida por un equipo eléctrico, es práctica común en circuitos monofásicos, multiplicar la corriente de carga por el voltaje aplicado a los terminales de entrada. Por medio de un vatímetro se determina la potencia "verdadera", que nunca es mayor que la potencia "aparente" pero a menudo es menor.

La potencia "verdadera" en vatios consumida por un equipo eléctrico es también el producto de la corriente de carga por el voltaje aplicado y por el coseno del ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente.

$$P (\text{vatios}) = \text{Voltios} \times \text{Amperios} \times \cos\phi$$

El coseno del ángulo de desfase aparece en la ecuación debido a que la inductancia o la capacitancia producen una diferencia en tiempo entre el pico del voltaje aplicado a la carga y el pico de la corriente tomada por la carga.

La fig. N° 1 ilustra el desfase en tiempo de un circuito puramente "inductivo".

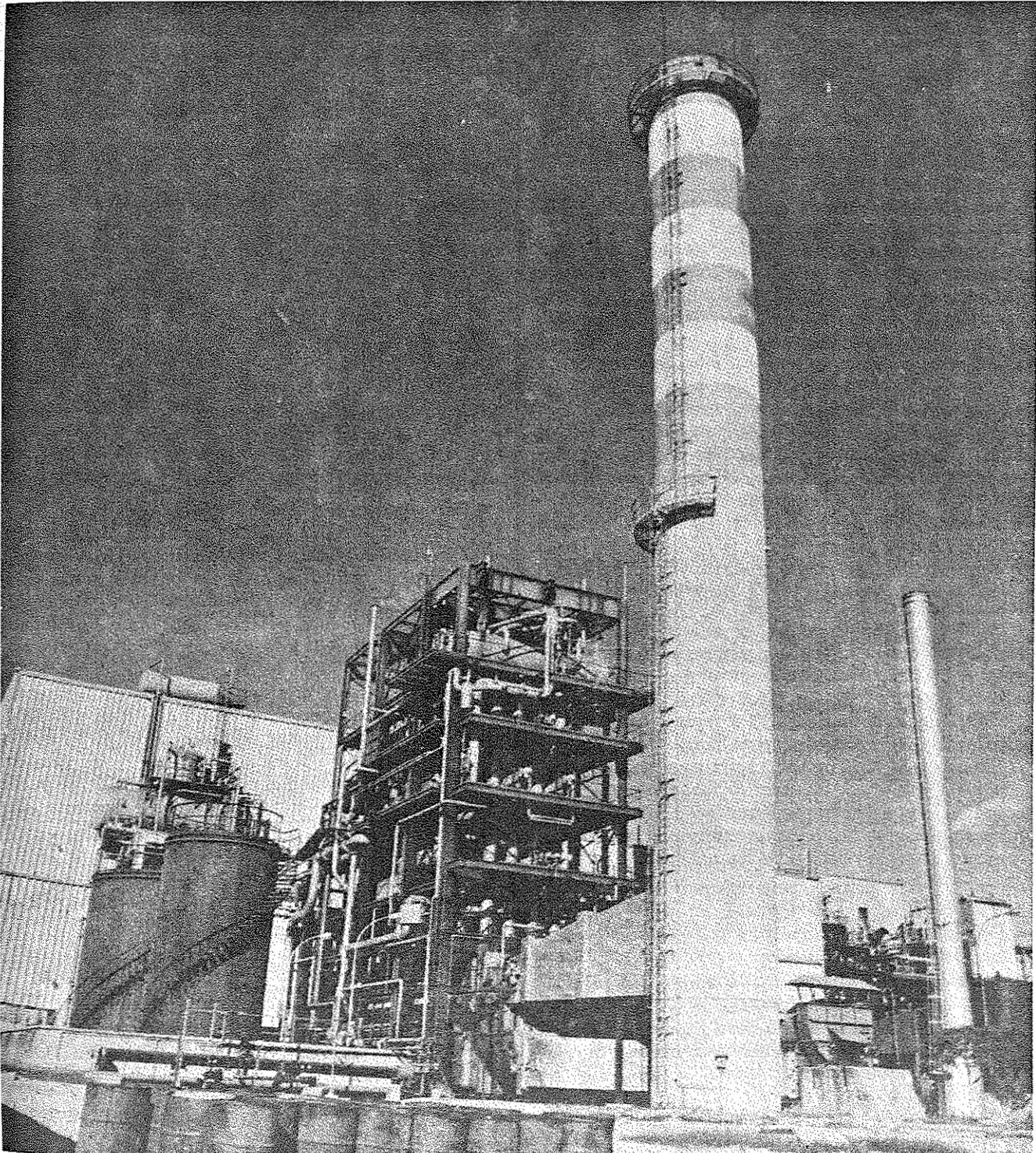
En circuitos inductivos el pico de voltaje ocurre primero y la corriente está por lo tanto "atrasada". En circuitos capacitivos el pico de corriente ocurre primero y por lo tanto la corriente está "adelantada". El "adelanto" o el "atraso" se mide en grados y es el ángulo de desfase. En la figura N° 1, 0 corresponde a un ángulo de "atraso" de 90°.

En circuitos puramente resistivos, sin inductancias o capacitancias, los picos de voltaje y corriente ocurren simultáneamente y se dice estar "en fase". El ángulo 0 es siempre igual al cero.

En circuitos conteniendo resistencia conjuntamente con inductancia, el ángulo de "atraso" es siempre inferior a 90°, dependiendo de las cantidades relativas de cada una o más precisamente a la relación de la inductancia con respecto a la resistencia. Cuanto mayor sea la inductancia con respecto a una dada resistencia, mayor será el ángulo de "atraso". Sin embargo, éste ángulo nunca llega a ser 90° debido a que siempre alguna resistencia está presente en cada circuito.

El hecho de que una mayor inductancia produce un mayor ángulo de "atraso" puede ser matemática-

Una Compañía de electricidad debe suministrar la potencia necesaria a todos sus consumidores.
Foto: Central Termo -Barrancabermeja- Colombia.



mente explicado. En trigonometría, el coseno de cualquier ángulo entre 0° y 90° tiene los valores de 1 y 0 respectivamente. Cuando θ sea igual a 0° (como en un circuito puramente resistivo), $\cos \theta$ es igual a 1 y por lo tanto:

Potencia verdadera en watios = Voltios x Amperios x 1

En este caso las potencias verdadera y aparente son iguales. Cuando θ sea igual a 90° (como en un circuito puramente inductivo o capacitivo), el coseno θ es igual a 0 (cero) y por lo tanto:

Potencia verdadera en watios = Voltios x Amperios x 0

En este caso sería cero (0), sin embargo 90° es únicamente un límite teórico como se explicó anteriormente.

De lo anterior se deduce:

Factor de potencia = Potencia verdadera/Potencia aparente

Factor de potencia = Voltios x Amperios x $\cos \theta$ / voltios x amperios.

Factor de potencia = $\cos \theta$

Cuando el ángulo de desfase se aumenta, sumándole más inductancia, el valor representado por el coseno θ es más pequeño, dando un valor inferior para el factor de potencia.

El triángulo de la figura N° 2 representa la potencia requerida por grupo de cargas inductivas.

En esta figura, la potencia reactiva es relativamente pequeña y se puede observar fácilmente que la línea del triángulo que representa la potencia "verdadera" es un poco inferior a la línea que representa la potencia "aparente", así, la relación de las potencias ($\cos \theta$) se aproxima a la unidad.

El triángulo de la figura N° 3 representa la potencia requerida por un grupo "mayor" de cargas inductivas.

En esta figura, el ángulo θ ha aumentado y las líneas de las potencias "verdadera" y "reactiva" han aumentado; la línea de la potencia "aparente" llega a ser relativamente más larga. De esta manera la relación entre las potencias "verdadera" y "aparente" ha disminuído. Ya que la relación es igual a $\cos \theta$, que es el factor de potencia, la causa de un bajo factor de potencia se entiende más fácilmente.

"Cuando la carga inductiva aumenta, la potencia reactiva aumenta y la relación de potencia verdadera a potencia aparente (factor de potencia) disminuye, causando un efecto indeseable en el sistema".

La potencia reactiva, medida en voltio-amperios reactivos (VARS ó KVARs), es simplemente el producto del voltaje aplicado a un circuito por la corriente tomada para magnetización. Esta corriente es conocida como corriente reactiva. Circuitos "inductivos", que toman corrientes magnetizantes, consumen potencia reactiva inductiva mientras que los circuitos "capacitivos", que toman corrientes de carga, consumen potencia reactiva capacitiva.

Para equipos únicamente con resistencias, las potencias "verdadera" y "aparente" son iguales y por lo tanto la relación es 1:1 ó 1.0 y el factor de potencia será 100%, que es el más alto que se puede obtener.

Para equipos que emplean bobinas a alambre eléctrico enrollado de varias maneras alrededor de núcleos de hierro, la inductancia de las bobinas causa desigualdad entre la potencia "verdadera" y la "aparente" pues consume menos potencia "útil" que la indicada por el producto de la corriente por el voltaje. Así por ejemplo, si un equipo eléctrico tiene un consumo de 400 watios en contraste con una demanda "aparente" de 1000 voltio-amperios, la relación será de 400:1000, ó sea que tiene un factor de potencia del 40%, que es "bajo" con respecto al máximo del 100%. En cambio, si la relación de potencias es superior al 90%, se puede decir que el equipo tiene un factor de potencia adecuado.

Así pues, cuando un gran porcentaje de la corriente total consiste en corrientes magnetizantes, el factor de potencia es "bajo", pero será mas "alto" a medida que una proporción más grande de la corriente total suministrada, sea "activa" o "productiva". Un circuito de factor de potencia "bajo" es ineficiente y un circuito de factor de potencia "alto" es eficiente.

2. AHORROS AL MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA

Los principales ahorros o beneficios al mejorar el factor de potencia son:

2.1 Reducción de las pérdidas del sistema

Las pérdidas en un sistema, que son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente que circula, son reducidas debido a que la corriente disminuye cuando se mejora el factor de potencia. La reducción de pérdidas da como resultado una disminución en las temperaturas de operación de los componentes del sistema y en una reducción en la energía tomada de la fuente principal. Un bajo factor de potencia produce pérdidas de potencia en las líneas de distribución. La corriente a un bajo factor de potencia es alta debido a la presencia de la corriente reactiva. Cualquier reducción en esta corriente da como resultado una disminución de las pérdidas de potencia en las líneas de distribución.

En la tabla N° 1 se pueden apreciar los efectos de un bajo factor de potencia en las líneas de distribución.

2.2 Aumento de la capacidad del sistema

La potencia reactiva utilizada por los circuitos inductivos es el producto de la corriente reactiva, llamada también magnetizante o no productiva, por el voltaje aplicado a la línea.

La potencia total reactiva aumenta, mientras el factor de potencia disminuye, cuando el número de equipos inductivos que requieren potencia reactiva aumentan. Cada equipo inductivo aumentado al sistema contribuye a los requisitos de la potencia reactiva del sistema.

Cuando el factor de potencia es mejorado, la cantidad de corriente reactiva que inicialmente circulaba por los transformadores, alimentadores, tableros de potencia, cables, etc., es disminuída.

Equipos para mejorar el factor de potencia, instalados directamente en los terminales de los equipos inductivos, tales como motores, producen la mayor parte de la potencia reactiva necesaria para producir los campos magnéticos, reduciendo o eliminando la necesidad de suministrar esta potencia desde el sistema de distribución.

Así por ejemplo, si a cuatro motores operando a un factor de potencia del 75%, se le mejora el factor

de potencia al 95%, aumenta la capacidad del sistema en un valor tal, que permite alimentar otro motor de las mismas características.

Cuando los transformadores y circuitos están sobrecargados, al mejorar el factor de potencia, aumenta la capacidad del sistema y se reduce la sobrecarga, permitiendo la instalación de nuevos equipos y evitando la instalación de transformadores más grandes y también la necesidad de sobredimensionar los alimentadores, cables, etc. Por ejemplo, supongamos un transformador trifásico de 1.000 KVA completamente cargado a un factor de potencia del 80%. Así, la carga consiste de 800 KW y 600 KVARs inductivos que combinados da una carga total de 1.000 KVA. Asumamos que una potencia de 400 KVARs capacitivos se conectan directamente al secundario del transformador. La carga total del transformador es ahora de 825 KVA, compuesta de 800 KW y 200 KVARs. El factor de potencia original del 80% es aumentado al 97% ($800/825$) y la carga total del transformador es reducida al 82.5%.

Gráfico N° 1 — Aumento de la capacidad del sistema al mejorar el factor de potencia.

2.3 Mejoramiento de la regulación del voltaje

Las caídas de voltaje ocurren en un sistema como resultado de la circulación de la corriente por las impedancias. Se puede considerar que las caídas de voltaje tienen una componente activa y una componente reactiva. La componente activa se calcula multiplicando la componente de la corriente, correspondiente a los KW, por la resistencia del circuito.

La componente reactiva se calcula multiplicando la componente reactiva de la corriente, correspondiente a los KVARs, por la reactancia del circuito.

La componente activa de la caída del voltaje es relativamente baja y cambia solamente por los cambios de la potencia de salida del sistema y por los cambios del voltaje del sistema.

La componente reactiva de la caída de voltaje siempre disminuye al mejorar el factor de potencia.

El mejoramiento del voltaje como resultado del mejoramiento del factor de potencia es siempre un

aumento del nivel de voltaje y no una disminución entre los valores de máximo y mínimo voltaje.

2.4 Disminución de los costos de energía

Una Compañía de electricidad debe suministrar la potencia necesaria a todos sus consumidores. Esto incluye las necesidades de potencia reactiva, que no es registrada en los contadores de KWH de los consumidores.

Para suplir estas necesidades, las compañías de electricidad deben gastar dinero extra para instalar generadores, líneas de transmisión, transformadores y otros equipos más grandes y de mayor capacidad, sobre los cuales la Compañía no recibe dinero de compensación.

Equipos de menor capacidad, suficiente para la potencia medida por los contadores, se podrían sobrecargar por las corrientes adicionales tomadas por la potencia reactiva. Como los conductores de calibres pequeños presentan mayor resistencia que los de calibres grandes, las pérdidas de potencia y las caídas de voltaje en los sistemas de distribución serán excesivos.

Consecuentemente, la totalidad de las Compañías de electricidad incluyen dentro de las cuentas de tarifa industrial una penalización por el factor de potencia. El costo de la potencia reactiva ó, como es mas comunmente conocido, el consumo de KVARSH, representa una parte importante de la cuenta mensual.

El consumidor que suministra sus propios KVARs goza de ahorros inusitados. Para determinar los ahorros o ganancias posibles al mejorar el factor de potencia, consideramos el caso de una planta industrial típica que tenga un factor de potencia del 68%. Las tarifas de energía de la Compañía de electricidad que alimenta esta planta incluye un cargo por demanda máxima de \$ 100 por cada KW/mes, más un cargo por consumo de energía de:

\$ 1.00 por KWH diurno
\$ 0.72 por KWH nocturno

Los cargos por consumo de energía son basados en el número total de KWH de potencia "verdadera" que las compañías de electricidad deben suministrar durante un período de tiempo.

Además, por la cláusula de penalización por bajo factor de potencia, se requiere que, con un factor de potencia de 0.9 mínimo autorizado, los KVARs-H no sean superiores a la mitad de los KWH consumidos. Cuando sean superiores a este valor se cobran como si fueran KWH diurnos.

Las cuentas de energía muestran que durante un mes promedio, esta planta tiene una demanda máxima de 500 KW (demanda promedio de 400 KW), un consumo diurno de 160.000 KWH, un consumo nocturno de 80.000 KWH y un consumo de reactiva de 260.000 KVARs-H.

La cuenta de energía será la siguiente:

a. Demanda: 500 KW x \$ 100	—	\$ 50.000,00
b. Consumo diurno: 160.000 KWH a \$ 1,00	—	160.000,00
c. Consumo nocturno: 80.000 KWH a \$ 0,72	—	57.600,00
d. Penalización por factor de potencia (160.000 + 80.000) = 120.000 KWH 260.000 KVARs-H — 120.000 KWH = 140.000 KVARs-H 140.000 KVARs-H x \$ 1,00	—	140.000,00
Total cuenta energía		\$ 307.600,00

Si el factor de potencia se mejora hasta el 90% actualmente exigido por la Empresa de electricidad, el consumo de reactiva será de 120.000 KVARs-H y no habrá penalización por bajo factor de potencia. Así, una reducción de \$ 140.000,00/mes ha sido obtenida al mejorar el factor de potencial del 68% al 90%.

La capacidad en KVARs necesaria para mejorar el factor de potencia del 68% al 90% para una demanda máxima de 500 KW, se puede calcular así:
 $500 \text{ KW} \times 0.594 = 297 \text{ KVARs} \text{ ó } 300 \text{ KVARs}$

El costo de instalación de los 300 KVARs a razón de \$ 900,00/ KVAR a 440 voltios será de \$ 270.000,00 y será pagado en los dos primeros meses. Para 220 voltios el costo unitario es de \$ 2.000/KVAR y por lo tanto el costo de la instalación será de \$ 600.000 que será pagado en los 5 primeros meses.

3. COMO MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA

3.1 Operación de motores de inducción a plena carga

La potencia nominal del motor debe aproximarse lo más posible a la demanda de potencial de la má-



quina accionada. Si el motor está dimensionado en exceso resultan las siguientes consecuencias:

- a. Mayor intensidad de arranque, por lo cual se necesitan arrancadores y protecciones mayores y una mayor sección en el conductor.
- b. Servicio antieconómico, puesto que el factor de potencia y, bajo ciertas circunstancias, el rendimiento a carga parcial es inferior que a plena carga. Entre 75% y 100% de la carga, varía poco el rendimiento.

Cuando la potencia de la máquina accionada es inferior a la potencia nominal del motor, éste tendrá valores de servicio más desfavorables que los indicados en las tablas de selección que figuran en los catálogos, que siempre son referidos a la potencia nominal o sea al 100% de carga, al voltaje y a la potencia nominales.

En la tabla N° 2, se indican los valores de factor de potencia a varios porcentajes de carga de la potencia nominal.

De la tabla anterior se desprende que para mejorar el factor de potencia los motores eléctricos deben operar lo más cerca posible a la potencia nominal o sea a plena carga.

3.2 Motores sincrónicos

Los motores sincrónicos se usan algunas veces en lugar de los motores de inducción debido a su habilidad de mantener un alto factor de potencia. Estos motores pueden hacer muchos de los trabajos que hacen los motores de inducción y, si trabajan descargados, no necesitan corrección del factor de potencia. Cuando su carga es baja o cuando no se les aplica ninguna carga el motor sincrónico puede compensar el bajo factor de potencia de los otros equipos del mismo sistema de distribución.

Generalmente, el costo de la instalación de un motor sincrónico es muy alto comparado con el costo de la instalación de un motor de inducción equivalente con su correspondiente equipo corrector del factor de potencia.

3.3 Capacitores

Los capacitores o condensadores son las fuentes más comunes de KVARs capacitivos para mejorar

el factor de potencia. Usualmente llamados capacitores "Shunt", se conectan en paralelo o "Shunt" con la carga. Son equipos estáticos, sin partes móviles que se desgasten, que tienen alta eficiencia, larga vida y son económicos para instalar y mantener.

Los capacitores proporcionan un método altamente flexible para corregir el factor de potencia ya que pueden ser instalados en cualquier parte y en cualquier cantidad; sirven para mejorar el factor de potencia de uno o de todos los motores y pueden ser instalados en los puntos de un sistema donde sean más necesarios. No requieren fundaciones especiales ya que no tienen partes móviles y no vibran.

Las pérdidas de los capacitores son despreciables y se dejan conectados a la línea cuando los motores se apagan, su consumo de potencia es insignificante.

Los capacitores se pueden obtener para instalaciones interiores y exteriores y para cualquier nivel de voltaje. Pueden ser monofásicos o trifásicos.

Los capacitores deben localizarse apropiadamente en el sistema si se desean obtener máximos beneficios.

Para tres de los cuatro beneficios explicados anteriormente (reducción de las pérdidas, aumento de capacidad y regulación del voltaje) los capacitores deberán ser localizados tan cerca como sea posible a las cargas que requieran los KVARs capacitivos. Si es únicamente para disminuir el costo de la energía, la localización de los capacitores puede ser alterada.

La selección de la localización incluye además las consideraciones de los factores económicos y del tipo de instalación requerido en cada industria. Las economías son afectadas por factores tales como el voltaje de cada industria, la cantidad de capacitores requeridos en cada industria y del equipo de conexión requerido.

Para entender como los capacitores mejoran el factor de potencia, es necesario regresar a la figura N° 1 y a la explicación de lo que es una corriente atrasada en los circuitos inductivos. En esa figura, los picos de corriente y voltaje están desplazados por un ángulo máximo teórico de 90°.

Cuando una corriente alterna se aplica a un circuito teniendo capacitancia, un campo electrostático, en vez de un campo magnético, sigue el mismo ciclo de

aumentar y disminuir como el campo de un circuito inductivo. En este caso, la corriente del capacitor alcance su pico, resultando una corriente adelantada. Entonces, cuando una inductancia y una capacitancia están conectadas en paralelo, una corriente circulará atrás y adelante entre el inductor y el capacitor. Si las corrientes fueran iguales y no ocurrieran pérdidas en el circuito, ninguna corriente se tomaría de la fuente de la potencia.

En la práctica actual, la fuente de potencia debe suministrar la corriente para la resistencia del circuito y para otras pérdidas, así como para cualquier diferencia que pueda ocurrir entre las corrientes del inductor y del capacitor.

Lo anterior significa que con la correcta selección del capacitor, ninguna corriente reactiva inductiva circulará entre una máquina inductiva (motor de inducción) y la fuente de potencia, pero sí entre el capacitor y el motor. El sistema de transmisión de potencia es liberado de corrientes innecesarias si el capacitor es localizado cerca al motor. Sin importar en que punto se encuentra el capacitor los beneficios siempre son obtenidos desde el punto de la instalación hacia la fuente de potencia.

En la figura N° 4A, se muestra un motor de inducción trabajando parcialmente cargado sin corrección de factor de potencia. Aquí el alimentador debe suplir tanto la corriente magnetizante (reactiva) como la corriente útil.

En la figura N° 4B, se muestra el resultado de instalar un capacitor cerca al mismo motor para suministrar la corriente magnetizante requerida por el motor. La corriente total requerida ha sido reducida al valor de la corriente útil únicamente reduciendo al mismo tiempo los costos de la energía y permitiendo el uso de otros equipos eléctricos en el mismo circuito.

Existen pues dos métodos para corregir el factor de potencia por medio de capacitores. El primero es una instalación de un banco o grupo de capacitores en el cual muchos capacitores se conectan a la línea en algún punto central tal como a una subestación o a un tablero de distribución. Generalmente este método sólo sirve para reducir la penalización de la Empresa de energía.

El segundo método pero más efectivo es la instalación de capacitores individuales directamente a la fuente del bajo factor de potencia, lo que es, cerca a los motores. Este tiene la ventaja de la instalación en grupo, más las ventajas de aumentar la capacidad del sistema, mejorar los niveles de voltaje y reducir las pérdidas de potencia.

La instalación de capacitores individuales proporciona los más grandes beneficios en las industrias donde los alimentadores y cables están sobrecargados por los motores de inducción.

Esto es más propio de industria antiguas pero también se aplica a nuevas instalaciones donde por ensanches es necesario adicionar más motores. La corrección del factor de potencia puede, en muchos casos, significar la diferencia entre realamborrar enteramente la planta y la simple adición del nuevo equipo a las líneas viejas.

La corrección más efectiva se obtiene si los capacitores individuales son conectados directamente a los terminales de los motores, transformadores y otros equipos inductivos.

La corriente reactiva causa pérdidas entre el equipo inductivo y el equipo corrector del factor de potencia y cuando éste se conecta en la fuente, entre el equipo inductivo y la fuente. Así, si el capacitor está más cerca a la máquina, las pérdidas serán menores y los beneficios más grandes. Otra ventaja de instalar los capacitores directamente a los terminales del motor es que ambos pueden ser conectados con el mismo interruptor. Esta conexión, asegura que el motor no puede trabajar sin su capacitor corrector y que éste es usado únicamente cuando se necesita. Otra ventaja es obtenida con este método porque, diferente a la instalación en grupo, no se necesitan interruptor adicional para conectar los capacitores a la línea. El capacitor es conectado con el control del motor.

No se necesitan estudio de ingeniería complicados cuando el capacitor y el motor de inducción están conectados para operar como una unidad. El tamaño del capacitor necesario por cada motor puede ser determinado muy fácilmente de la tabla N° 3, teniendo en cuenta la potencia del motor y su velocidad. Los valores de KVARs pueden mejorar el factor de potencia hasta el 95%.

La flexibilidad de la instalación es otra de las ventajas de la conexión individual de los capacitores a los motores. Cuando la organización de los equipos de una planta deba ser cambiada o cuando la maquinaria deba ser relocalizada, el motor con su capacitor puede ser movidos con un mínimo de inconvenientes.

Resumiendo, las ventajas obtenidas con la instalación individual de capacitores son como sigue:

- a. Las caídas de voltaje a los motores individuales se reducen, disminuyendo el calor debido a corrientes excesivas.
- b. Los capacitores son conectados o desconectados cuando sea necesario. De esta manera, el factor de potencia se ajusta a los requisitos de la carga total y se obtiene mejor regulación de voltaje.
- c. Las capacidades de los capacitores requeridas para los motores individuales son fácilmente obtenidas de tablas, reduciendo así los problemas de ingeniería.
- d. Motores y otras máquinas corregidas individualmente tienen una gran flexibilidad en caso de reorganizaciones de las plantas. No importa donde el motor sea localizado pues la corrección está asegurada.

La principal desventaja de la corrección por medio de los capacitores individuales es que entre más pequeños sean los capacitores tienen un precio más alto por cada KVAR. Cuando varios motores pequeños están conectados a un mismo circuito, necesitan ser corregidos, puede ser más económico corregirlos por grupos, usando capacitores más grandes conectados a las líneas de alimentación. Una práctica común es corregir por medio de capacitores individuales a motores de más de 10HP y los más pequeños corregirlos por grupos.

Cuando la principal razón para corregir el factor de potencia es reducir la cuenta de energía o reducir la corriente en los alimentadores primarios del generador o del transformador principal, la instalación de capacitores en grupo es más económica. En este caso el banco de capacitores se conecta a la subestación principal o al generador. El factor de potencia general de la planta es mejorando pero no se obtienen beneficios en el sistema de distribución de la planta.

Otras dos ventajas de la instalación de capacitores en bancos son que capacitores más grandes tienen un menor precio por KVAR que las unidades pequeñas y que es menos costosa su instalación. El costo de los interruptores o breakers necesarios para estas unidades puede, sin embargo, compensar el bajo costo de su instalación.

Todo o parte del banco puede ser conectado o desconectado manual o automáticamente, dependiendo de los requisitos de la carga. De esta manera, únicamente la cantidad de corrección necesitada por la carga en un determinado momento es conectada al sistema.

Resumiendo, las ventajas obtenidas con la instalación de capacitores en grupo son como sigue:

- a. La instalación en grupos mejora el factor de potencia general de la planta, reduciendo las cuentas de energía.
- b. El banco de capacitores tiene un costo inferior por KVAR que los capacitores individuales.
- c. El costo de la instalación del banco es inferior por KVAR que el costo de la instalación individual de los capacitores a sus respectivos motores.

En un gran número de casos, los resultados más favorables se obtienen cuando se instalan capacitores individuales a los motores más grandes y bancos de capacitores a los alimentadores principales o subestaciones. Para determinar la corrección necesaria, primero se deben determinar los KVARs necesarios para toda la planta, luego seleccionar los capacitores individuales para los motores más grandes y restar sus capacidades del total de KVARs; la diferencia puede ser instalada en un solo banco, conectado a la subestación o dividirlo en varios bancos conectados a los puntos críticos del sistema de distribución. Recordar que la corrección más óptima se obtiene cuando los capacitores son colocados tan cerca como sea posible a la fuente del bajo factor de potencia.

Es necesario tener en cuenta que los capacitores suministran corrientes reactivas opuestas a la dirección de las corrientes reactivas de los equipos inductivos. Es necesario evitar la sobrecorrección debido a que, tener mucha corriente adelantada de los capacitores,

es tan indeseable como tener mucha corriente atrasada de las máquinas inductivas.

Como en la corrección por medio de capacitores individuales, por medio de tablas es fácil seleccionar la cantidad apropiada de corrección necesaria para cualquier sistema particular.

De la tabla N° 4 se puede obtener la cantidad de corrección necesaria cuando el factor de potencia promedio de la planta y la carga en KW son conocidos. Ejemplo:

Considerar una planta con un factor de potencia promedio del 76% y un consumo de potencia de 400 KW. De acuerdo a los requisitos de la Compañía de Energía, el factor de potencia debe mejorarse al 90%.

Para encontrar el número de KVARs necesarios para alcanzar el factor de potencia solicitado se procede como sigue:

- a. Bajo la primera columna de la izquierda marcada "Factor de potencia original", localizar el 0.76 (76%).
- b. Seguir la serie de números a la derecha del 0.76 hasta llegar a un número debajo del 0.90 de la columna marcada "Factor de potencia deseado". Este número es 0.371.
- c. Multiplicar el número 0.371 por los 400 KW de carga. El producto es el número de KVARs necesarios para la corrección, que en este caso son 148.4 KVARs. Los valores estándar de KVARs y los voltajes se pueden obtener de los catálogos de los fabricantes.

4. INSTALACION DE CAPACITORES

Los capacitores proporcionan un medio flexible, efectivo y económico para la corrección del factor de potencia. Ellos tienen una larga vida y casi no requieren mantenimiento; pero para obtener los máximos beneficios se requiere una apropiada instalación. Entre los puntos que se deben considerar están la temperatura del medio ambiente, una adecuada ventilación y una correcta conexión y protección.

4.1 Ventilación

Los capacitores deben ser localizados donde la temperatura del aire ambiente no exceda de 40°C.

Deben ser bien ventilados ya que los capacitores siempre operan a plena carga y generan calor que debe ser removido para que tengan una operación duradera.

Por razones económicas, los capacitores son diseñados para trabajar cerca al límite de la resistencia eléctrica de sus materiales aislantes. El material aislante de un capacitor se llama dieléctrico y debe soportar los esfuerzos eléctricos del voltaje aplicado. Combinado con una alta temperatura por un largo período de tiempo, los altos esfuerzos eléctricos pueden causar un debilitamiento o una falla en el dieléctrico. La libre circulación de aire es lo más importante para mantener una baja temperatura prolongando así la vida del capacitor.

Se recomienda que los capacitores no se instalen en cuartos pequeños, cerca a radiadores o a otros tipos de equipos calefactores, donde la ventilación sea restringida o a la intemperie donde los rayos directos del sol puedan elevar la temperatura del capacitor excesivamente. La temperatura de la carcasa o cubierta del capacitor no debe pasar de 55°C. bajo las condiciones normales de operación como son los valores del voltaje y frecuencia para los cuales se diseñó el capacitor.

La elevación de la temperatura depende de las tolerancias del capacitor en cuanto a la frecuencia de la línea y al voltaje de operación.

La temperatura como una función de la frecuencia no se considera puesto que la frecuencia es constante en los sistemas de potencia modernos. La frecuencia de diseño del capacitor en cuanto a la frecuencia de la línea voltaje de operación.

La temperatura como una función de la frecuencia no se considera puesto que la frecuencia es constante en los sistemas de potencia modernos. La frecuencia de diseño del capacitor debe ser igual a la del sistema al cual se conecta.

Sobrecalentamiento a un voltaje normal de operación es prácticamente imposible pero cuando el voltaje excede el 110% del de diseño del capacitor puede causar daño. Un 10% de sobrevoltaje representa un 21% de incremento en los KVARs, lo que puede exceder las condiciones máximas de operación. Cuando el voltaje de operación es 10% o más del voltaje de diseño del

capacitor, el voltaje de la línea debe reducirse o desconectarse los capacitores durante los períodos de carga baja.

También es importante evitar montar los capacitores muy cerca uno de otro ya que el calor de uno puede afectar al siguiente.

4.2 Tolerancias

Los capacitores pueden suministrar por lo menos la cantidad de KVARs para lo cual fueron diseñados, a los voltajes y frecuencias de diseño, pero por tolerancias de los fabricantes pueden suministrar hasta un 15% más. En otras palabras, un capacitor de 10 KVARs puede suministrar 1.5 KVARs más.

4.3 Protecciones

Algunos capacitores de potencia se suministran con fusibles para proteger el sistema de distribución en caso de corto-circuitos internos. Estos fusibles son dimensionados desde el 165% hasta el 250% de la corriente nominal, para permitir las máximas condiciones de operación, más algunos incrementos momentáneos de la corriente. Equipo adyacente requiere protección, debido a que un capacitor en corto ofrece el peligro de una ruptura de la carcasa o cubierta. Los fusibles desconectan el capacitor del circuito antes de que la presión del gas aumente dentro del capacitor debido al corto y produzca la ruptura de la carcasa.

Una ventaja de esta protección de fusibles es que pueden desconectar del circuito cualquier celda dañada, permitiendo que el resto del capacitor continúe en operación.

4.4 Alambrado

Los cables o alambres utilizados para instalar los capacitores deben tener una capacidad de corriente del 135% de la corriente nominal del capacitor para permitir las máximas condiciones de operación.

4.5 Equipos de conexión

Los códigos eléctricos recomiendan que los capacitores sean equipados con algún medio de desco-

nexión para que puedan ser aislados del circuito durante los períodos de carga baja o durante los períodos de mantenimiento del equipo.

Los interruptores usados deben tener por lo menos una capacidad de corriente del 165% de la corriente nominal del capacitor.

4.6 Tablas para la instalación de capacitores

De la tabla N° 5 se pueden obtener, a diferentes voltajes, los calibres de los conductores y los amperajes de los fusibles y de los interruptores para la instalación de los capacitores individuales y de la tabla N° 6 los mismos datos para la instalación de los capaci-

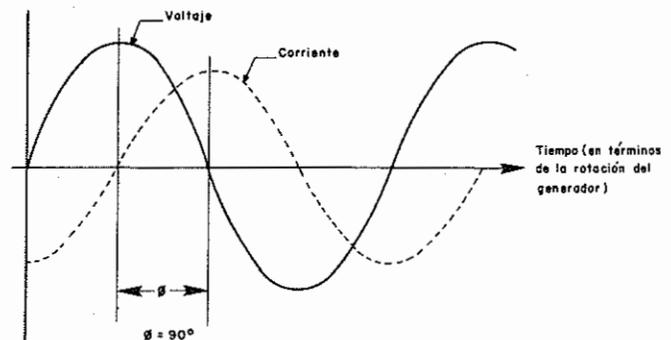


FIGURA No. 1

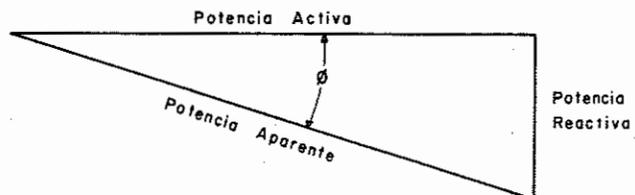


FIGURA No. 2

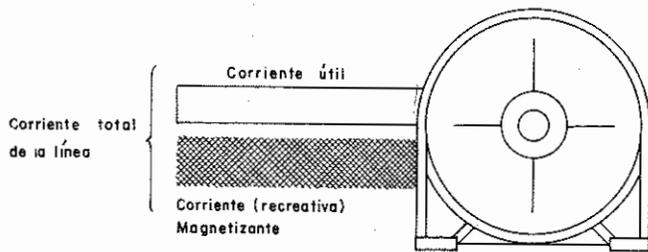


FIGURA No. 4A

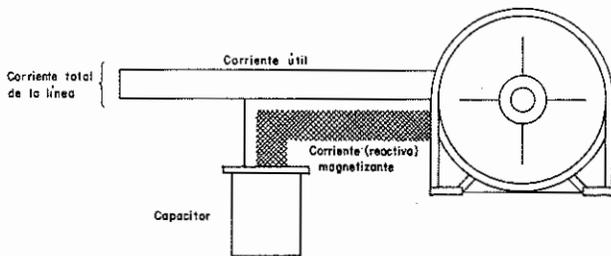


FIGURA No. 4B

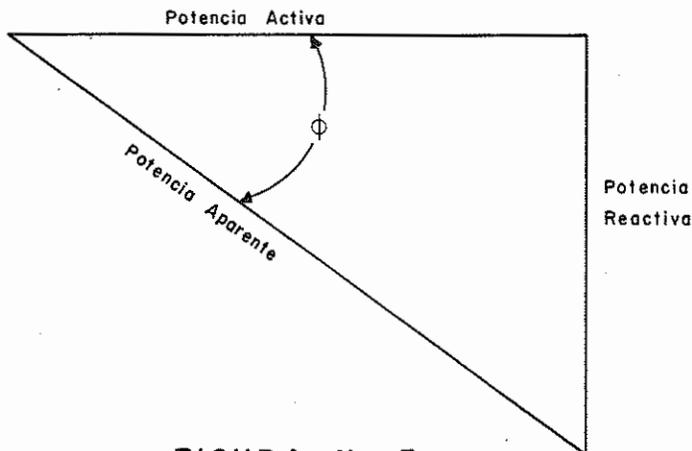


FIGURA No. 3

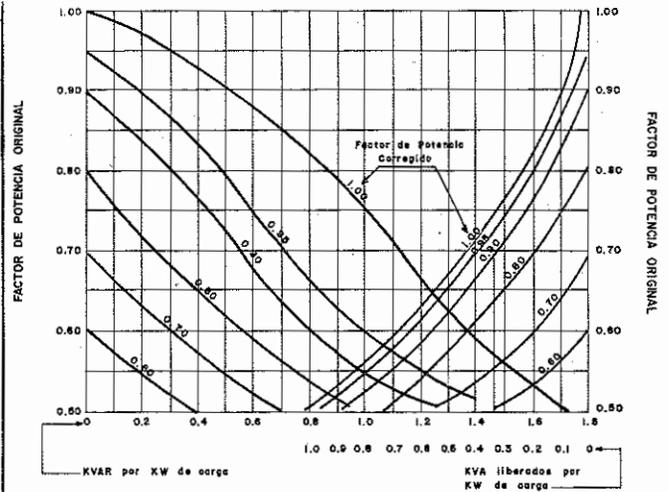


GRAFICO No. 1

Ejemplo:

1. Demanda de la planta: 300KW
2. Factor de potencia promedio: 0.70
3. Factor de potencia deseado: 0.90
4. KVARs por KW de carga: 054 (lado izquierdo del gráfico).
5. KVARs requeridos para mejorar el factor de potencia:
 $300 \times 0.54 = 12 \text{ KVARs}$
6. KVA liberados por KW de carga = 0.32 (lado derecho del gráfico).
7. KVA liberados al mejorar el factor de potencia:
 $300 \times 0.32 = 96 \text{ KVA}$

TABLA No. 1

VENTAJAS ADICIONALES DE LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Efectos del factor de potencia bajo, en las líneas de distribución Sistemas de 1, 2 ó 3 fases				
Factor de Potencia %	Corriente Total Amperios	Aumento en la corriente %	Tamaño relativo del alambre, para la misma pérdida R1%	Aumento en las pérdidas por calentamiento para el mismo tamaño de alambre %
100	100	0	100	0
90	111	11	123	23
80	125	25	156	56
70	143	43	204	104
60	167	67	279	179
50	200	100	400	300
40	250	150	625	525

El hecho de que la Corrección de Factor de Potencia le permita reducir apreciablemente sus cuentas de energía eléctrica, no es la única ventaja que usted obtiene. También, al reducir la corriente que pasa por su sistema eléctrico, elimina la necesidad de instalar transformadores más grandes, o alambres más gruesos, o desconectadores de mayor capacidad.

Muy importante también, es la disminución de las pérdidas y del sobrecalentamiento en alambres y transformadores. Estas pérdidas están incluidas en los KW de demanda y en los KWH de consumo por los cuales usted está pagando.

TABLA No. 2

FACTOR DE POTENCIA DE LOS MOTORES A CARGA PARCIAL DE LA POTENCIA NOMINAL

220, 440 voltios, 3 fases, 60 ciclos, Motores de inducción jaula de ardillo

H.P.	Velocidad R.P.M.	% Factor de Potencia		
		1/2 carga	3/4 carga	Plena carga
1	1720	61	72	80
1	1135	51	66	74
1	855	44	56	63
1-1/2	3500	61	74	80
1-1/2	1740	62	75	82
1-1/2	1125	62	74	80
1-1/2	875	45	56	65
2	3470	68	77	83
2	1740	68	76	84
2	1140	60	71	78
2	865	51	65	72
3	3420	73	82	86
3	1720	71	82	87
3	1160	60	72	81
3	860	56	68	73.5
5	3460	72	80	86
5	1735	75	83	88
5	1155	64	77	83
5	860	59	71	77
7-1/2	3450	75	84	89
7-1/2	1745	82	87	88
7-1/2	1180	70	80	83
7-1/2	865	58	71	76
10	3470	82	89	91
10	1750	75	83	86
10	1160	75	82	86
10	875	59	71	77
15	3500	81	87	88
15	1740	81	85	85
15	1165	74	82	83
15	875	60	71	77
20	1760	72	82	86
20	1170	74	82	85
20	875	63	74	78
25	1760	75	83	87
25	1170	74	82	85
25	880	69	78	81
30	1760	81	87	88.5
30	1175	74	82	85
30	880	70	79	83
40	1765	83	88	89.5
40	1175	76	83.5	86
40	875	65	75	80
50	1785	84	89	89.5
50	1170	77	84	87
50	875	70	79	82
60	1775	80	87	88.5
60	1175	75	83	87
60	875	70	78.5	83
75	1775	80	86	90
75	1180	75	83	86
75	875	70	82	85
100	1770	79	87	89
100	1180	78	85	88
100	870	71	83	86
100	705	64	76	81
125	1770	80	88	89.5
125	1180	75	84	88
125	890	70	81	85
125	705	66	78	83
150	1770	81	88	90
150	1175	78	86	89
150	875	70	81	85
150	700	66	78	83
200	1770	80	88	90
200	1180	78	86	89.5
200	885	80	88	89
200	705	70	81	85

1 TABLA No. 4

MULTIPLICADORES DE LOS KW PARA DETERMINAR LOS KVARs REQUERIDOS PARA LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Factor de Potencia Original	Factor de Potencia Deseado															
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
0.56	0.730	0.756	0.782	0.808	0.834	0.860	0.887	0.913	0.940	0.968	0.996	1.024	1.054	1.085	1.117	1.151
0.57	0.692	0.718	0.744	0.770	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.986	1.016	1.047	1.079	1.113
0.58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.979	1.010	1.042	1.076
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.776	0.802	0.829	0.857	0.885	0.913	0.943	0.974	1.006	1.040
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.740	0.766	0.793	0.821	0.849	0.877	0.907	0.938	0.970	1.004
0.61	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970
0.62	0.516	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.673	0.699	0.726	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.721	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904
0.64	0.451	0.477	0.503	0.529	0.555	0.581	0.608	0.634	0.661	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.743	0.774	0.806	0.840
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809
0.67	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.485	0.511	0.538	0.566	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.371	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607
0.74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580
0.75	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553
0.76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.526
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.403	0.434	0.466	0.500
0.78	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.209	0.235	0.262	0.290	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473
0.79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447
0.80	0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421
0.81		0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395
0.82			0.000	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369
0.83				0.000	0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343
0.84					0.000	0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317
0.85						0.000	0.027	0.053	0.080	0.108	0.136	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291
0.86							0.000	0.026	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264
0.87								0.000	0.027	0.055	0.083	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238
0.88									0.000	0.028	0.056	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211
0.89										0.000	0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183
0.90											0.000	0.028	0.058	0.089	0.121	0.155

TABLA No. 4

MULTIPLICADORES DE LOS KW PARA DETERMINAR LOS KVARS REQUERIDOS PARA LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Factor de Potencia Original	Factor de Potencia Deseado															
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
0.56	0.730	0.756	0.782	0.808	0.834	0.860	0.887	0.913	0.940	0.968	0.996	1.024	1.054	1.085	1.117	1.151
0.57	0.692	0.718	0.744	0.770	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.986	1.016	1.047	1.079	1.113
0.58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.979	1.010	1.042	1.076
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.776	0.802	0.829	0.857	0.885	0.913	0.943	0.974	1.006	1.040
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.740	0.766	0.793	0.821	0.849	0.877	0.907	0.938	0.970	1.004
0.61	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970
0.62	0.516	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.673	0.699	0.726	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.721	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904
0.64	0.451	0.477	0.503	0.529	0.555	0.581	0.608	0.634	0.661	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.743	0.774	0.806	0.840
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809
0.67	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.485	0.511	0.538	0.566	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.371	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607
0.74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580
0.75	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553
0.76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.526
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.403	0.434	0.466	0.500
0.78	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.209	0.235	0.262	0.290	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473
0.79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447
0.80	0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421
0.81		0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395
0.82			0.000	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369
0.83				0.000	0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343
0.84					0.000	0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317
0.85						0.000	0.027	0.053	0.080	0.108	0.136	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291
0.86							0.000	0.026	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264
0.87								0.000	0.027	0.055	0.083	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238
0.88									0.000	0.028	0.056	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211
0.89										0.000	0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183
0.90											0.000	0.028	0.058	0.089	0.121	0.155

TABLA No. 5

CABLES, FUSIBLES E INTERRUPTORES RECOMENDADOS PARA LA INSTALACION DE CAPACITORES INDIVIDUALES

KVAR	Una Fase				Tres Fases			
	Corriente Nominal	Calibre de cables AWG ó MCM	Fusibles Amperios	Interruptor Amperios	Corriente Nominal	Calibre de cables AWG ó MCM	Fusibles Amperios	Interruptor Amperios
240 Voltios								
0.5	2.08	14	6	30	1.20	14	3	30
1.0	4.17	14	10	30	2.41	14	6	30
1.5	6.25	14	15	30	3.61	14	6	30
2.0	8.33	14	15	30	4.81	14	10	30
2.5	10.4	14	20	30	6.01	14	10	30
3	12.5	12	25	30	7.22	14	15	30
4	16.7	10	30	30	9.62	14	20	30
5	20.8	10	35	60	12.0	12	20	30
6	25.0	8	45	60	14.4	12	25	30
7.5	31.2	6	60	60	18.0	10	30	30
8	33.3	6	60	60	19.2	10	35	60
10	41.7	4	70	100	24.1	8	40	60
12.5	52.1	3	90	100	30.1	6	50	60
15	62.5	2	110	200	36.1	6	60	60
480 Voltios								
1.0	2.08	14	6	30	1.20	14	3	30
1.5	3.12	14	6	30	1.80	14	3	30
2.0	4.17	14	10	30	2.41	14	6	30
2.5	5.21	14	10	30	3.00	14	6	30
3.0	6.25	14	15	30	3.61	14	6	30
4	8.33	14	15	30	4.81	14	10	30
5	10.4	14	20	30	6.02	14	10	30
6	12.5	12	25	30	7.22	14	15	30
7.5	15.6	10	30	30	9.02	14	15	30
8	16.7	10	30	30	9.62	14	20	30
10	20.8	10	35	60	12.0	12	20	30
12	25.0	8	45	60	14.4	12	25	30
12.5	26.0	8	45	60	15.0	10	25	30
15	31.2	6	60	60	18.0	10	30	30
20	41.7	4	70	100	24.1	8	40	60

TABLA No. 6

CABLES, FUSIBLES E INTERRUPTORES RECOMENDADOS PARA LA INSTALACION DE CAPACITORES EN BANCO

KVAR	Una Fase				Tres Fases			
	Corriente Nominal	Calibre de cables AWG ó MCM	Fusibles Amperios	Interruptor Amperios	Corriente Nominal	Calibre de cables AWG ó MCM	Fusibles Amperios	Interruptor Amperios
240 Voltios								
20	83.3	3	150	200	48.1	6	80	100
25	104	1	175	200	60.2	4	100	100
30	125	0	225	400	72.2	4	125	200
40	167	000	300	400	96.2	2	175	200
45	188	0000	350	400	108	1	200	200
60	250	300	450	600	144	00	250	400
75	312	500	600	600	180	000	300	400
80	333	500	600	600	192	0000	350	400
90	375	600	800	800	216	250	400	400
100	417	750	800	800	241	300	400	400
105	438	800	800	800	253	300	450	600
120	500	1000	1000	1200	289	350	600	600
135	562	1500	1000	1200	325	500	600	600
150	—	—	—	—	361	600	600	600
180	—	—	—	—	434	250	800	800
240	—	—	—	—	578	350	1000	1200
270	—	—	—	—	675	300	1200	1200
360	—	—	—	—	868	400	—	—
480 Voltios								
25	52.1	6	90	100	30.1	10	50	60
30	62.5	4	110	200	36.1	8	60	60
40	83.3	3	150	200	48.1	6	80	100
45	93.8	2	175	200	54.1	6	90	100
60	125	0	225	400	72.2	4	125	200
75	156	00	300	400	90.2	2	150	200
80	167	000	300	400	96.2	2	175	200
90	188	0000	350	400	108	1	200	200
100	208	250	350	400	120	0	200	200
105	219	250	400	400	126	0	225	400
120	250	300	450	600	144	00	250	400
135	281	350	500	600	162	000	300	400
140	292	400	500	600	168	000	300	400
150	312	500	600	600	180	000	300	400
160	333	500	600	600	192	0000	350	400
240	—	—	—	—	288	00	600	600
320	—	—	—	—	384	0000	800	800
360	—	—	—	—	432	00	800	800
480	—	—	—	—	576	0000	1000	1200