

CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA MEDIANTE CONDENSADORES EN INSTALACIONES ELECTRICAS CONSUMIDORAS. CRITERIO ECONOMICO (*)

Por ANTONIO ANGULO ALVAREZ
Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

Se estudia el aspecto económico de la corrección del factor de potencia por los propios consumidores, que se ven obligados a pagar un sobreprecio de la energía cuando es bajo el factor de potencia de su consumo. Se trata de un estudio original, que presenta la característica de su novedad, ya que hasta la fecha sólo existen gráficos o fórmulas para deducir la potencia (aparente) de los condensadores que resulta precisa para que el factor de potencia del consumo, que es un dato, se rectifique hasta alcanzar otro valor, pero no definen el factor de potencia, corregido, que resulte más económico. En el artículo se analizan las repercusiones económicas de las posibles correcciones del factor de potencia, y en función de unos cuantos datos conocidos se define el factor de potencia corregido que da lugar a la mayor economía. Presenta primero un estudio riguroso, incluyendo además unos cuadros y gráficos de sencilla aplicación que dan precisión sobrada para las aplicaciones normales.

OBJETO

Como es sabido, los consumos definidos por un bajo factor de potencia o $\cos \varphi$ (siendo este ángulo φ el que mide el desfase entre la tensión y la intensidad), dan lugar (entre otras consecuencias) a caídas de tensión y pérdidas de potencia notablemente mayores que las que se producen en líneas, transformadores y generadores, si los consumos tienen un factor de potencia más elevado.

Como tales hechos repercuten desfavorablemente en el conjunto de instalaciones de producción y distribución de energía eléctrica es normal que las tarifas de energía eléctrica impongan un sobreprecio a ésta, tanto mayor cuanto más bajo sea el factor de potencia de la carga.

A fin de evitar dicho mayor coste de la energía eléctrica se emplean equipos consumidores de energía reactiva capacitiva, la cual compensa la de los consumos normales, que absorben energía reactiva inductiva, puesto que ambas tienen signo contrario.

Existen dos posibilidades para compensar la energía reactiva (por supuesto inductiva) de los consumos normales: instalar condensadores o compensadores síncronos.

Los compensadores síncronos son máquinas costosas y delicadas que, aun siendo utilizadas en grandes instalaciones, no se aplican por los consumidores normales de energía eléctrica.

Por el contrario, cada vez se extiende más el empleo de condensadores, pues su coste y volumen específicos se han reducido con el sistema de fabricación de papel metalizado. Se pretende fijar el criterio, en el presente estudio, que sirva para definir el límite hasta el cual resulta económico compensar el factor de potencia.

Como es lógico, y si el coste de los condensadores fuera despreciable, convendría establecer la corrección del factor de potencia hasta que éste llegara a valer la unidad, para así obtener el precio más bajo de la energía. Como el valor de la

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de junio de 1970.

adquisición e instalación de condensadores es apreciable, la solución más económica será la correspondiente a un coste mínimo, teniendo presentes ambas circunstancias.

Se publica en la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS el estudio que sigue, en la idea de que no existe publicado ningún trabajo orientado al mismo fin.

Es destacable que se pretende encontrar la instalación de condensadores que en cada caso resulte más beneficiosa para el usuario, lo que es independiente de otros estudios sobre compensación de energía reactiva, llevada a cabo en las instalaciones de distribución que no afecten al coste de la energía eléctrica para cada consumidor.

MAYOR PRECIO DE LA ENERGIA, CAUSADO POR UN BAJO FACTOR DE POTENCIA DE LA ENERGIA CONSUMIDA

En las vigentes *Tarifas Tope Unificadas*, establecidas en España por Decreto de 12 de enero de 1951, se fija un coeficiente multiplicador, en función del factor de potencia, aplicable al importe de cada suministro de energía eléctrica, cuyo importe depende, a su vez, de diversas variables.

Se espera que la contextura de las actuales *Tarifas* sea modificada a partir de 1971. El estudio que se detalla es adecuado para las tarifas actuales, y también lo será para las que se establezcan en 1971, si se conservan los coeficientes multiplicadores del importe de la energía, en función del factor de potencia del consumo. De no ser así habrá que ajustar el criterio a los valores concretos que se establezcan.

En la figura 1 se reflejan, en su parte izquierda, los consumos efectuados por

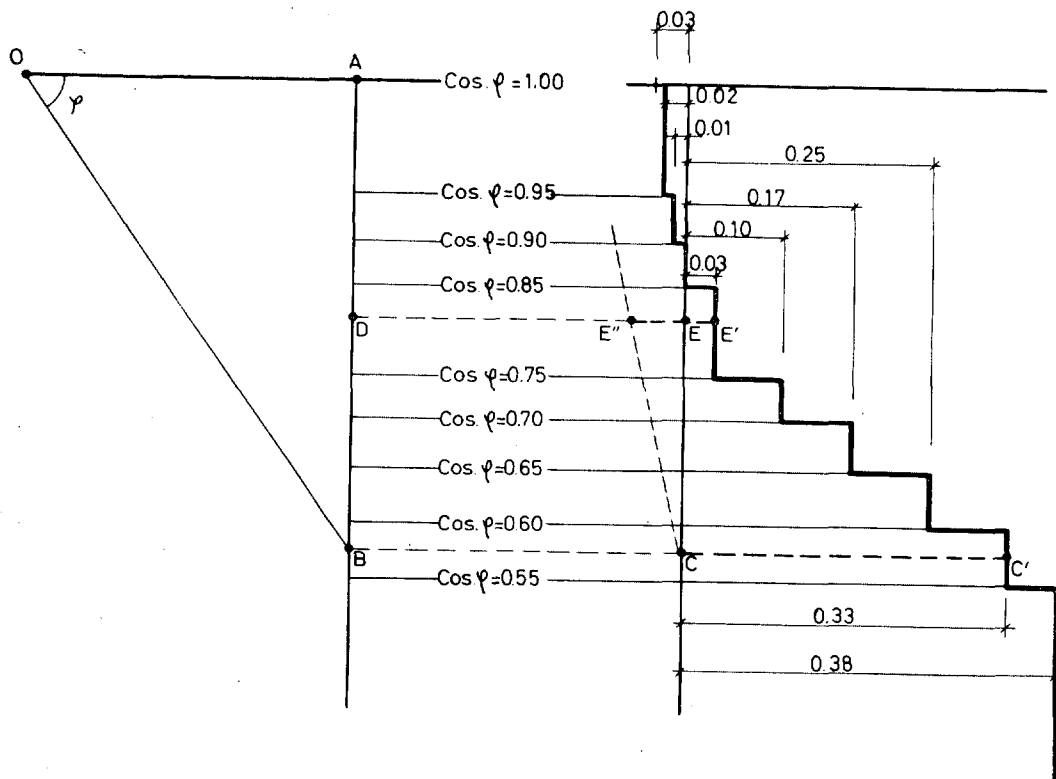


Figura 1.

un usuario durante un lapso de tiempo determinado (un mes, un año). Según la notación normal se toma en un eje de abscisas la distancia OA a partir del origen O , que mide la energía consumida (KWh.) según las lecturas del contador correspondiente.

En la vertical de A , y hacia abajo (por tratarse de energía inductiva), se toma la distancia AB , representativa del consumo de energía reactiva durante el mismo tiempo. El punto B , representativo de la totalidad de energía consumida, define a su vez el factor de potencia

$$\cos \varphi = \frac{OA}{OB}$$

Se llega a la misma expresión tomando el valor de OA igual a la *unidad*, y AB igual al cociente

$$AB = \frac{\text{Energía reactiva consumida (KVAR-h)}}{\text{Energía activa consumida (KW-h)}}$$

Con este criterio, y sean cualesquiera los consumos, tanto activo como reactivo en la parte izquierda de la figura 1, el punto B define al ángulo φ , cuyo coseno es el factor de potencia correspondiente.

Las tarifas vigentes en España fijan unos coeficientes para los consumos comprendidos entre distintos valores del factor de potencia que representan recargos para los bajos factores de potencia, y en algún caso bonificaciones cuando son elevados.

En la parte derecha de la figura 1 se ha representado la ley poligonal que define los citados recargos y bonificaciones en función de los diversos factores de potencia para el caso concreto de las tarifas correspondientes a usos industriales.

A los consumos definidos por el mismo punto B antes citado, con un factor de potencia comprendido entre 0,55 y 0,599, les corresponde un recargo CC' que en este caso vale 0,33.

Aplicando el recargo citado al importe de la energía activa consumida, incluyendo toda clase de recargos e impuestos, salvo el correspondiente a tener bajo factor de potencia, dará el exceso de coste motivado por el bajo factor de potencia; es decir, la magnitud del segmento CC' es un índice del mayor coste de la energía, causado porque el factor de potencia es bajo.

FUNDAMENTO

Es deseable que el punto B esté situado lo más alto posible, por ejemplo en la posición del punto D , pues entonces el exceso de coste, por ser reactivo el consumo sería el EE' , notablemente menor que el CC' . En el ejemplo indicado en la figura 1, la magnitud EE' representa el 0,03 de recargo.

La distancia vertical DB representa una diferencia de energía reactiva (si se conserva inalterable la energía activa consumida) que es precisamente la que habrían derivado los condensadores si se hubiesen conectado en la misma instalación.

Si se llama N a la potencia total de los condensadores instalados, expresada en

KVAR y el tiempo en que hayan actuado fuere de n horas dentro del mismo tiempo en que se realizó el consumo, la magnitud del segmento BD será

$$BD = \frac{N (\text{KVAR}) \times n (\text{n}^\circ \text{ de horas de actuación de los condensadores})}{\text{Energía activa consumida (KW-h)}}$$

Instalando condensadores se ha reducido el coste total de la energía conseguida, pero como contrapartida debe aumentarse tal coste con el derivado de la adquisición, montaje y amortización de los condensadores.

Este conjunto de costes de los condensadores se ha de obtener partiendo del precio de los mismos, del de su montaje, del porcentaje de interés que haya de tenerse en cuenta y del correspondiente a su amortización y conservación, que ha de ser forzosamente bajo por razón de la larga vida de los condensadores.

Este coste anual de los citados condensadores es una cantidad concreta de dinero que se ha de añadir al coste de la energía eléctrica. Por ser más cómodo de aplicar es preferible referir esta cantidad como fracción del importe de la energía activa consumida, incluyendo toda clase de recargos, salvo el debido a tener bajo factor de potencia, puesto que es la cifra sobre la que se aplican los recargos (o bonificaciones) debidos a la energía reactiva.

Dicha fracción tendrá por expresión

$$\frac{\text{Coste anual de los condensadores}}{\text{Coste anual de la energía (activa)}}$$

y si se toma en la misma horizontal del punto D , en el tramo $E''E$ a continuación del EE' , se tiene que el segmento $E''E'$ representa la fracción del coste total anual derivado de la energía reactiva en el caso de haber instalado los condensadores.

Si la longitud del segmento $E''E'$ es menor que la del CC' (así ocurre generalmente) resulta económico instalar los condensadores. El ahorro anual obtenido vendrá fijado por la expresión

$$\text{Ahorro anual} = \text{Coste anual de la energía (activa)} \cdot (CC' - E''E')$$

Como se trata de alcanzar el mayor ahorro posible deben tantearse diversos tamaños (potencias) de condensadores hasta localizar uno para el cual la longitud del segmento correspondiente $E''E'$ sea la menor posible.

En el caso de que el coste anual de los condensadores fuese proporcional a su potencia, los puntos análogos al E'' estará en la recta $E''C$, puesto que la magnitud

$$BD = CE$$

es proporcional a la potencia de los condensadores por reflejar un consumo durante el mismo número de horas, y la distancia $E''E$ también sería proporcional a la potencia de los condensadores.

GRAFICOS DE APLICACION

En la figura 2 se han agrupado los elementos fundamentales para la aplicación del método, cuya "receta" de modo de operar se desarrolla a continuación.

Los datos son:

La energía activa consumida (al mes, al año).

La energía reactiva consumida (al mes, al año).

La facturación (incluyendo todos los recargos e impuestos) de la energía activa.

El número de horas (al mes, al año) que estarán en funcionamiento los condensadores.

ENERGIA UTILIZADA PARA USOS INDUSTRIALES

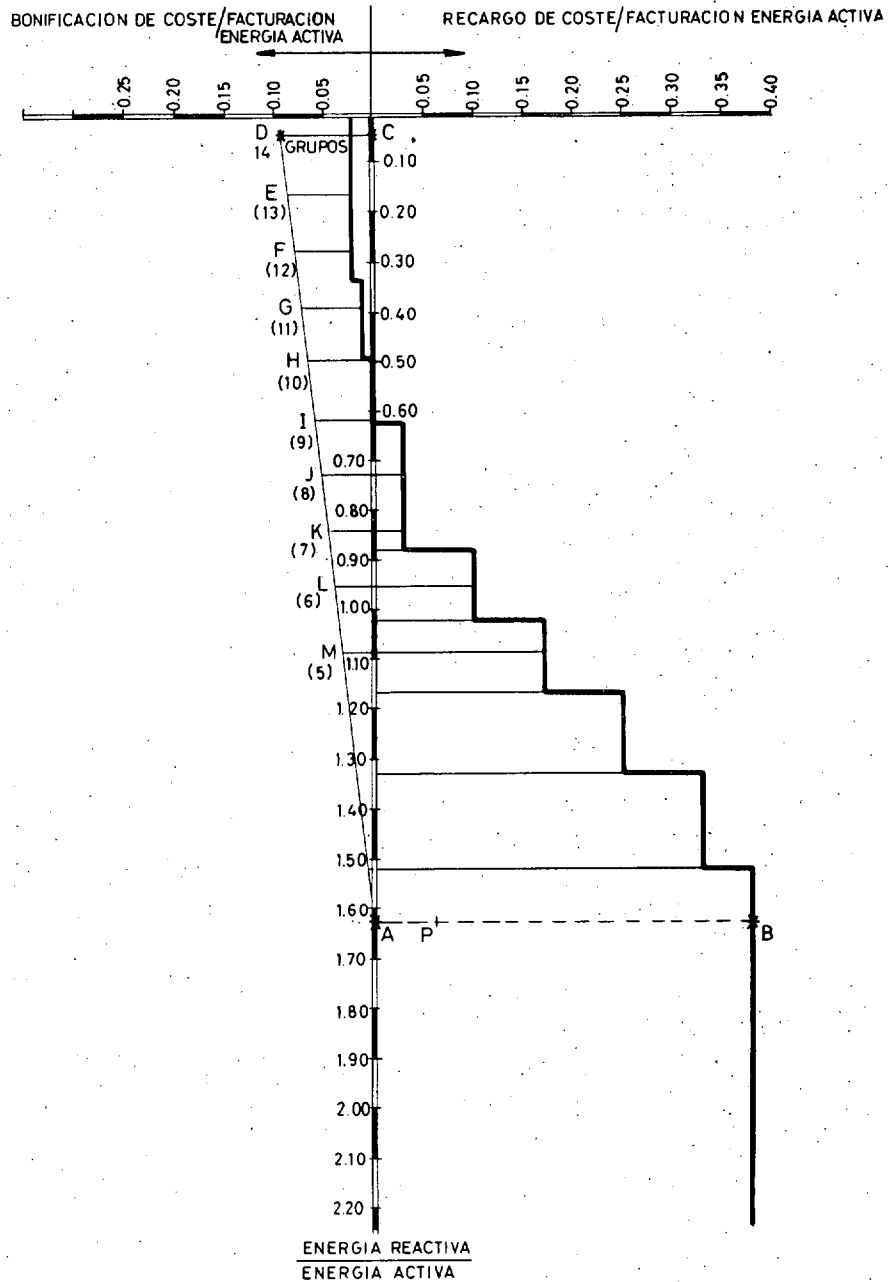


Figura 2.

El coste de los condensadores, instalados, en pesetas por KVAR., incluyendo intereses, amortización y conservación.

Se comenzará por calcular el cociente $\frac{\text{energía reactiva}}{\text{energía activa}}$ y se situará en la línea vertical del gráfico (punto A). Se traza por dicho punto una horizontal, que corta la línea escalonada en B.

Se divide la energía reactiva consumida, por el número de horas de funcionamiento de los condensadores. Resulta una potencia reactiva que se redondea en un múltiplo de la potencia de cada grupo de condensadores (de tres condensadores, si la instalación fuese trifásica). Se multiplica esta potencia, redondeada por el número de horas de funcionamiento, y se divide por la energía activa consumida. Resulta una cifra que se toma sobre la vertical del punto A obteniendo el punto C, que a su vez, define una horizontal.

Sobre esta horizontal y hacia la izquierda del punto C se tomará a la escala correspondiente, el cociente de dividir el coste mensual o anual de los condensadores considerados (interés, amortización y conservación) por la facturación de energía activa. Se une el punto D, así obtenido con el A, dividiendo esta recta AD en tantas partes como grupos de condensadores se consideraron. Se marcan los puntos resultantes E-F-G-H-I-J-K-L-M por los que se trazan horizontales, hacia la derecha, hasta que corten a la línea escalonada.

Debe escogerse la más corta de estas líneas, que define el número de condensadores (o grupos de condensadores) a utilizar. La magnitud de esta línea, restada de la AB, indica un número en la escala de horizontales. Multiplicando este número por la facturación de energía activa se obtiene el ahorro (mensual, anual) resultante.

Ejemplo:

Datos: 80 000 KW h/mes
 130 000 KVAR-h/mes
 60 000 pts./mes por energía activa
 200 horas/mes

Grupo de: { 45 KVAR
 105 pts./KVAR-año
 8,75 pts./KVAR-mes

Resolución:

$\frac{\text{Energía reactiva}}{\text{Energía activa}} = \frac{130\ 000}{80\ 000} = 1,625$ (Punto A)

$\frac{130\ 000}{200} = 650$ KVAR » $\frac{650}{45} = 14,4$ grupos

Redondeo en 14 grupos de 45 KVAR » 630 KVAR

$630 \times 200 = 126\ 000$ KVAR-h » $\frac{126\ 000}{80\ 000} = 1,575$

Llevando 1,575 sobre A se tiene C

$14 (\text{grupos}) \times 45 (\text{KVAR}) \times 8,75 (\text{pts./KVAR-mes}) = 5\ 570$ pts./mes

$\frac{5\ 570}{60\ 000} = 0,0929$ (distancia CD) » Queda fijado D » Se divide AD en 14 trozos

Los puntos I (9 grupos) y F (12 grupos) dan análogo valor horizontal hasta la línea escalonada (0,06).

Se lleva esta magnitud a la derecha de A (AP). La economía mensual relativa es $BP \approx 0,32$.

ECONOMIA $\approx 0,32 \times 60\ 000 = 19\ 200$ pts. mensuales

En la figura 3 se han dibujado las líneas análogas, correspondientes a los recargos establecidos en las Tarifas vigentes, debidos al consumo de energía reactiva, cuando se utilice la energía para alumbrado.

ENERGIA UTILIZADA PARA ALUMBRADO

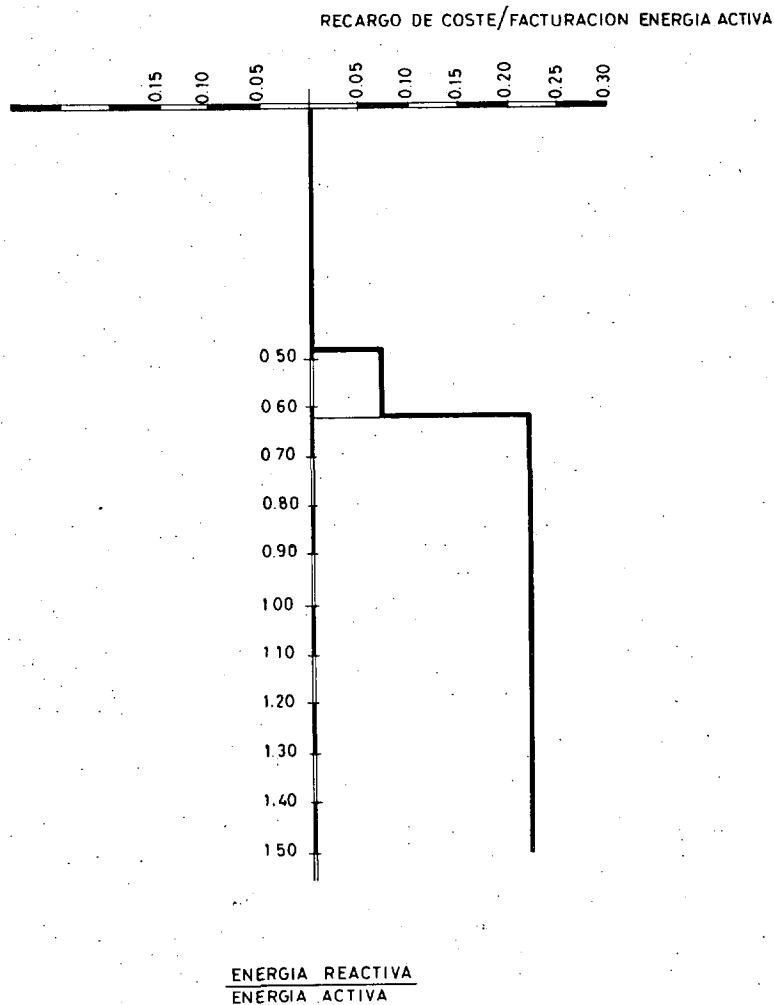


Figura 3.

CRITERIOS SIMPLIFICADOS

El modo de proceder que se ha descrito conduce, con todo rigor, a la solución más conveniente dando por buenos los datos de los que se ha partido.

Sin embargo, no se puede asegurar que los consumos, tanto activos como reactivos sean para el futuro iguales a aquellos de los que se han utilizado en el cálculo.

Por esta razón, fundamentalmente, y también para simplificar la resolución más económica de la compensación de energía reactiva se han pensado unos criterios de más sencilla y directa aplicación, que son consecuencia del método de cálculo mencionado anteriormente.

Haciendo referencia a la figura 4, en la que se han representado esquemáticamente las partes fundamentales del método descrito, se trata de encontrar la cota que tendrá la horizontal $E'' E'$ de tal modo que resulte mínima la longitud del citado segmento rectilíneo $E'' E'$.

Se admite la hipótesis, evidentemente simplificada, de que el punto E'' se puede situar en cualquier punto de la recta $A D$. Equivale a suponer que la capacidad de los condensadores que se empleen, pueda ser cualquiera, en lugar de ser "bloques" correspondientes a determinada cantidad de condensadores, cada uno con capacidad determinada.

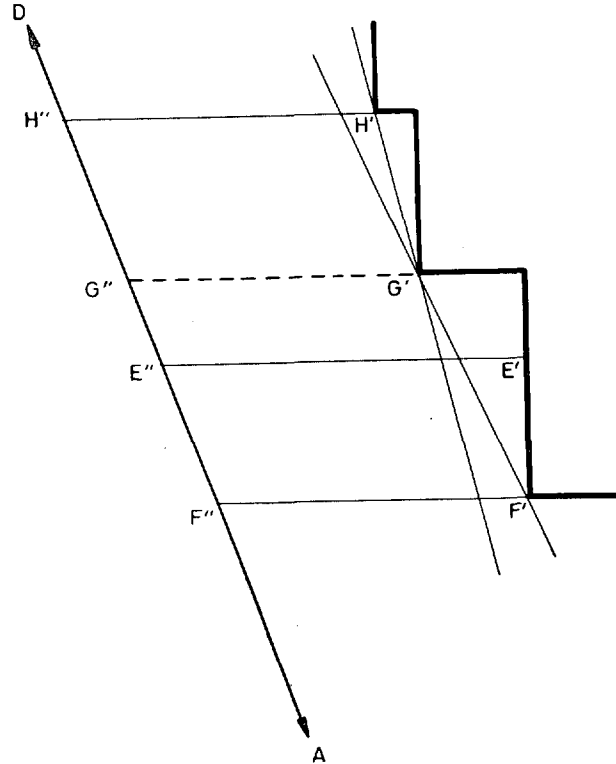


Figura 4.

Observando la citada figura 4 se aprecia que la horizontal que de lugar a la compensación más ventajosa ha de ser alguna correspondiente a los puntos F' , G' o H' en donde se produce una brusca variación del coeficiente de recargo por energía reactiva. Prácticamente convendrá compensar algo más, pues si la compensación resultase escasa se caería en la aplicación del coeficiente de recargo inmediatamente más elevado.

Queda por averiguar qué punto de los F' , G' o H' es el más conveniente. Evidentemente depende de la inclinación de la recta $A D$. Será preferible el punto G' siempre que la inclinación de la recta $A D$ esté comprendida entre las de las rectas $F' G'$ y $G' H'$.

Los valores de las respectivas inclinaciones de las rectas análogas a las $F' G'$ vienen definidos por las tarifas, y respecto a la vertical, tales inclinaciones valen:

$$\frac{\text{Diferencia entre los valores del coeficiente de recargo}}{\text{Diferencia entre los valores de } \operatorname{tg} \varphi \text{ (definidos por } \cos \varphi)}$$

La inclinación de la recta AD , también respecto a la vertical, tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Coste anual de los condensadores (N-KVAR)/coste anual de la energía activa}}{\text{Energía reactiva anualmente consumida por los condensadores (N-KVAR)/energía activa consumida anualmente}}$$

que se puede simplificar, resultando:

$$\frac{\text{Coste anual de 1 kVAR de condensadores}}{\text{N.º de horas anuales de actuación de los condensadores}} \times \frac{1}{\text{Coste medio anual de 1 kW-h de energía activa}}$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{C}{n \cdot p}$$

en la que se ha adoptado la siguiente notación:

C , es el coste medio anual de 1 KVAR de condensadores, contando interés, amortización, conservación, etc.

n , es el número de horas anuales de actuación de los condensadores. Es destacable que los contadores de energía reactiva tienen un mecanismo por el que sólo cuentan la potencia inductiva consumida en cada instante, sin registrar ninguna potencia reactiva capacitiva.

p , es el precio medio resultante anualmente del Kw-hora de energía activa incluyendo todos los recargos e impuestos, salvo el correspondiente a consumo de energía reactiva.

Por tanto, según resulte el valor de la citada fracción, así convendrá compensar el factor de potencia hasta uno u otro valor.

Concretamente, una vez efectuados los cálculos con arreglo a las directrices que se acaban de indicar se llega a los valores que se indican en el cuadro siguiente.

| ENERGIA UTILIZADA EN USOS INDUSTRIALES | | |
|--|---|--|
| Valor de $\frac{C}{n \cdot p}$ | Factor de potencia corregido, que resulta más económico | Cociente $\frac{\text{Energía reactiva}}{\text{Energía activa}} = \text{tg } \varphi$, correspondiente al factor de potencia de la columna anterior |
| Menor de 0,0305 | 1,00 | 0,00 |
| entre 0,0305 y 0,065 | 0,95 | 0,328 |
| » 0,065 y 0,0725 | 0,90 | 0,482 |
| » 0,0725 y 0,115 | 0,85 | 0,620 |
| » 0,115 y 0,47 | 0,75 | 0,881 |
| Mayor de 0,47 | no resulta económico corregir el factor de potencia | |

Es destacable que el factor de potencia que se debe alcanzar, mediante su corrección con condensadores, no depende del que se tuviese antes de hacer la corrección. La única condición exigible en este aspecto, es que la relación entre la energía reactiva, y la activa, antes de hacer la corrección, sea *superior* al valor de $\text{tg } \varphi$ correspondiente a la situación corregida, que se menciona en el cuadro anterior.

Se realiza a continuación el desarrollo de un *ejemplo*, utilizando los mismos datos que se citan en la figura 2.

La fracción $\frac{C}{n \cdot p}$ vale

$$\frac{105}{12 \times 200 \cdot \frac{60\,000}{80\,000}} = 0,058$$

Según el cuadro anterior debe alcanzarse un factor de potencia de 0,95, dando entonces lugar a un valor límite de potencia reactiva consumida al mes, de

$$80\,000 \text{ (KW-h)} \times \text{tg } \varphi = 80\,000 \times 0,328 = 26\,240 \text{ KVAR}$$

Como el consumo normal alcanza 130 000 kVAR al mes, los condensadores deberán consumir mensualmente la diferencia, que son 103 760 KVAR. Como cada grupo tiene 45 KVAR y funciona durante doscientas horas al mes, harán falta

$$\frac{103\,760}{45 \times 200} = 11,5 \text{ grupos}$$

Habrá que instalar 12 grupos, a cuyo mismo resultado se llega en una de las soluciones indicadas en la figura 2.

Se puede calcular el ahorro mensual, de modo numérico. Se logra una bonificación del 2 por 100, al estar comprendido el factor de potencia entre 0,95 y 1,0, y como antes de corregirle existía un recargo del 38 por 100, resulta una diferencia del 40 por 100 aplicable a las 60 000 pesetas que vale la energía consumida mensualmente. Esta diferencia alcanza un valor de 24 000 pesetas.

El coste mensual de los condensadores será de

$$12 \text{ (grupos)} \times 45 \text{ (KVAR cada grupo)} \times 8,75 \text{ (pts./KVAR)} = 4\,725 \text{ pts.}$$

El ahorro resultante ha de ser la diferencia

$$24\,000 - 4\,725 = 19\,275 \text{ pts.}$$

En el caso de energía destinada a alumbrado, las tarifas vigentes no prevén bonificación alguna. Solamente un recargo del 22 por 100, si el factor de potencia es inferior a 0,85, y del 7 por 100 si el factor de potencia resulta comprendido entre 0,85 y 0,90.

Se han realizado los cálculos correspondientes, análogos a los citados para el caso de energía para usos industriales, y se llega a las conclusiones que se indican en el cuadro siguiente:

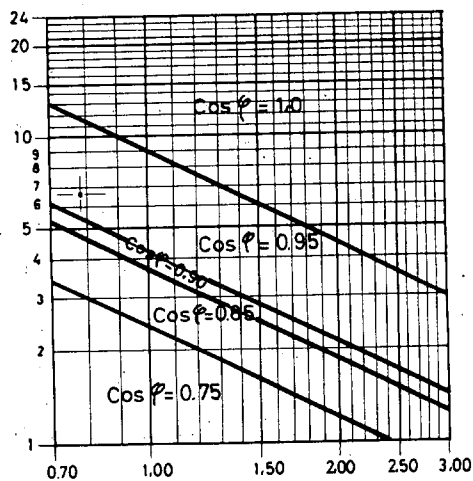
| ENERGIA UTILIZADA EN ALUMBRADO | | |
|--------------------------------|---|--|
| Valor de $\frac{C}{n \cdot p}$ | Factor de potencia corregido, que resulta más económico | Cociente $\frac{\text{Energía reactiva}}{\text{Energía activa}} = \text{tg } \varphi$, correspondiente al factor de potencia de la columna anterior |
| menor de 0,506 | 0,90 | 0,482 |
| mayor de 0,506 | 0,85 | 0,620 |

Aun cuando es bastante sencilla la utilización de los cuadros anteriores se ha preparado el gráfico de la figura 5, en la cual se ha estimado que el valor de C (coste medio anual de 1 KVAR de condensador) sea de 100 pesetas anuales, por ser una cifra bastante próxima a la realidad de los precios actuales, y también por ser muy sencilla.

HIPOTESIS DE

$$C = 100 \frac{\text{PTS.}}{\text{KVAR y AÑO}}$$

$\frac{n}{\text{PROMEDIO ANUAL DE HORAS DIARIAS DE UTILIZACION.}}$



$\frac{p}{\text{PRECIO TOTAL DEL KW-HORA, EN PESETAS INCLUYENDO IMPUESTOS Y RECARGOS, SALVO EL DEBIDO A CONSUMO DE ENERGIA REACTIVA.}}$

Figura 5.

El valor de n resulta más expresivo refiriéndole a las horas de cada día en los que, como promedio anual, se utilicen los condensadores, y en abscisas se ha señalado el precio total p del kW.-hora, salvo los recargos debidos a consumo de energía reactiva.

Conociendo el citado precio p de la energía, y el número medio de horas diarias de utilización, la figura 5 facilita, de modo inmediato, el factor de potencia que debe alcanzarse para obtener la mayor economía. En el caso de que C no se considerase con valor 100 (que es el utilizado para hacer el gráfico de la figura 5) puede también utilizarse el gráfico de la figura 5 multiplicando cualquiera de los datos n o p por la proporción

$$\frac{C}{100}$$

Repitamos el ejemplo, con los mismos datos utilizados anteriormente. Doscientas horas mensuales, equivalen a un promedio de

$$n = \frac{200 \times 12}{365} = 6,6 \text{ horas diarias}$$

El precio medio de la energía (sin contar el recargo por consumo reactivo) es de

$$\frac{60\,000 \text{ pts.}}{80\,000 \text{ kW-h}} = 0,75 \text{ pts./kW-h}$$

Teniendo en cuenta que el coste medio anual de 1 kVAR de condensadores es de 105 pesetas (dato fijado) resulta el siguiente valor corregido de p

$$p = 0,75 \times \frac{105}{100} = 0,79$$

El punto correspondiente se ha marcado con una cruz en la figura 5, la cual está en la zona en la que el factor de potencia (corregido) es el mismo de 0,95, obtenido por cálculos numéricos.

La observación del gráfico de la figura 5 permite sacar la consecuencia que para los precios normales de la energía en la actualidad *resulta económico corregir el factor de potencia aun para escaso número medio de horas diarias de utilización.*

La línea límite con la zona en que no merece la pena corregir el factor de potencia, se sale fuera de los límites de la figura 5, lo que quiere decir que cuando únicamente no interesa corregir el factor de potencia, es cuando la energía fuese muy barata y, además, se utilizasen los condensadores durante muy poco tiempo en cada día.

La mencionada figura 5 se ha estudiado para los recargos correspondientes a tarifas de usos industriales. No hace falta un gráfico análogo para las tarifas de *alumbrado*, ya que en la *gran mayoría* de los casos, *interesa corregir el factor de potencia hasta 0,90*, precisando únicamente estudiar el caso concreto si coincidiera un coste muy bajo de la energía (del orden de 1,00 ptas./kWh.) con un tiempo diario muy bajo, de utilización de los condensadores (del orden de *media hora diaria*), lo cual no es normal.