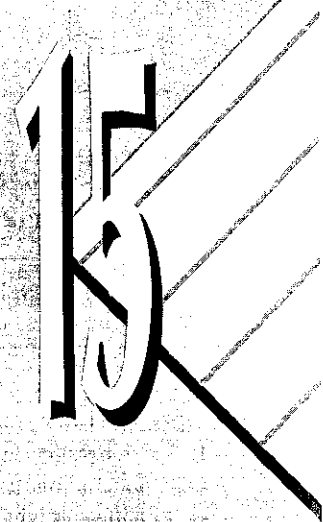


# Sistemas Trifásicos



## Introducción

*A diferencia de los sistemas monofásicos de C.A., estudiados hasta ahora, que utilizan dos conductores eléctricos para su distribución y consumo, los sistemas trifásicos utilizan tres o cuatro conductores. En la práctica, no existen alternadores monofásicos para la producción de grandes cantidades de energía. Las centrales eléctricas se valen de alternadores trifásicos para la generación de la electricidad que posteriormente se consume en el sector industrial y doméstico, tanto en forma trifásica como monofásica. Como estudiaremos a continuación, las líneas monofásicas se obtienen a partir de un sistema trifásico.*

## Contenido

- Generación de un sistema trifásico.
- Tensiones simples y compuestas.
- Conexión en estrella y triángulo de cargas equilibradas.
- Corrección del factor de potencia.
- Cálculo de instalaciones trifásicas de varios receptores.
- Caída de tensión en líneas trifásicas de C.A.
- Cálculo de la sección de conductores en líneas trifásicas.

## Objetivos

- Distinguir los sistemas trifásicos de los monofásicos, describiendo los procesos de generación de la energía eléctrica de los primeros.
- Enumerar las ventajas de los sistemas trifásicos de C.A. frente a otro tipo de sistemas de producción, transporte y consumo de la electricidad.
- Resolver problemas prácticos de instalaciones eléctricas con redes trifásicas de C.A.: cálculo de protecciones, sección de conductores, corrección del factor de potencia, etc.

## 15.1 Ventajas del uso de sistemas trifásicos

Lo más característico de los sistemas trifásicos es que las líneas utilizan tres o cuatro hilos (tres fases más el neutro), y con lo que se pueden obtener dos tensiones diferentes.

En la Figura 15.1 se muestra el aspecto de una línea de C.A. trifásica. Los conductores marcados con los números 1, 2 y 3 pertenecen a cada una de las tres fases del sistema. El conductor marcado con el número 0 pertenece al neutro. En esta línea se han conectado tanto receptores trifásicos como monofásicos.

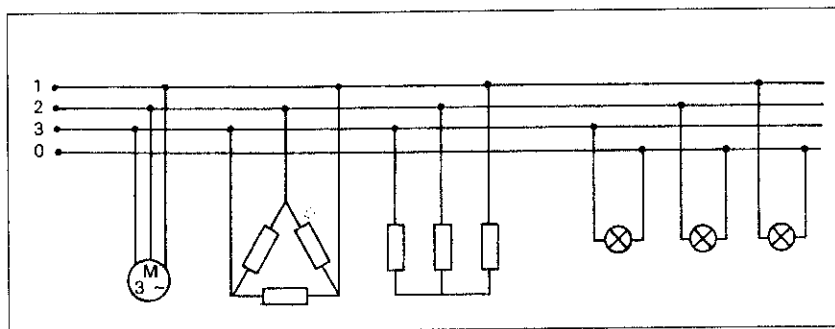


Figura 15.1. Receptores conectados a una línea trifásica.

Se puede comprobar experimentalmente que en un sistema trifásico existen dos tensiones diferentes. Así, por ejemplo, si tomamos un voltímetro y medimos la tensión que existe entre cualquiera de las fases y el neutro de un sistema de distribución de baja tensión (por ejemplo, en el cuarto de contadores de un edificio de viviendas) obtendremos un resultado de 230 V. Sin embargo, si medimos la tensión que aparece entre cualquiera de las fases, comprobaremos que existe una tensión de 400 V.

De aquí se deduce que en un sistema trifásico existen en una misma línea dos tensiones diferentes. También se puede comprobar que la tensión entre fases es  $\sqrt{3}$  veces mayor que la que aparece entre las fases y el neutro:

$$\frac{400 \text{ V}}{230 \text{ V}} = \sqrt{3}$$

El hecho de que en una misma línea tengamos dos tensiones resulta muy ventajoso, ya que por ejemplo podemos utilizar la tensión más elevada en el sector industrial y, por seguridad, la tensión más baja en el sector doméstico.

Aparte de esta ventaja que nos aportan los sistemas trifásicos existen otras muchas más, que expondremos a continuación:

Tanto los alternadores, transformadores y motores de C.A. trifásica poseen un mayor rendimiento y, por lo general, son mucho más sencillos y económicos que los monofásicos. Esto se aprecia fundamentalmente en los motores trifásicos de inducción, que es uno de los más utilizados en el sector industrial. Este motor posee unas características mucho mejores que el monofásico, como son: par de arranque muchísimo más fuerte, mejor rendimiento y mejor factor de potencia.

Los sistemas trifásicos consiguen transportar la energía eléctrica con un ahorro considerable en la sección de los conductores.

Todas estas ventajas hacen que en la actualidad toda la energía eléctrica se produzca, transporte, distribuya y consuma en forma de C.A. alterna trifásica.

## 15.2 Generación de un sistema de C.A. trifásica

Para conseguir una C.A. monofásica se hacía girar una espira en el seno de un campo magnético fijo.

En un sistema trifásico se hacen girar tres espiras en torno a un eje común en el seno de un campo magnético (Figura 15.2). Estas espiras se sitúan repartidas equitativamente sobre un núcleo cilíndrico de chapas de hierro, es decir, cada:

$$360^\circ/3 = 120^\circ$$

La corriente puede pasar desde las espiras al circuito exterior por medio de un sistema de anillos colectores y escobillas frotantes.

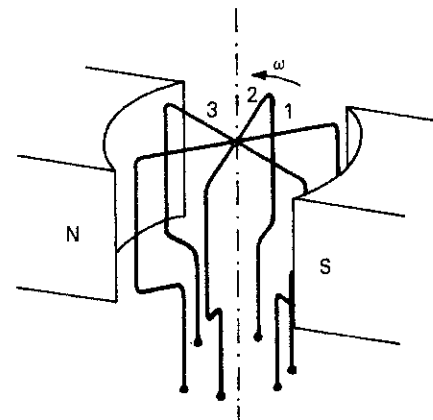


Figura 15.2. Alternador trifásico elemental.

Al moverse cada una de las espiras en el seno del campo magnético se inducirá en cada una de ellas una f.e.m. senoidal del mismo valor eficaz y frecuencia. Al estar situadas cada espira  $120^\circ$  en el rotor, cada una de las f.e.m. ( $e_1$ ,  $e_2$  y  $e_3$ ) inducidas quedan desfasadas temporalmente entre sí también  $120^\circ$  eléctricos.

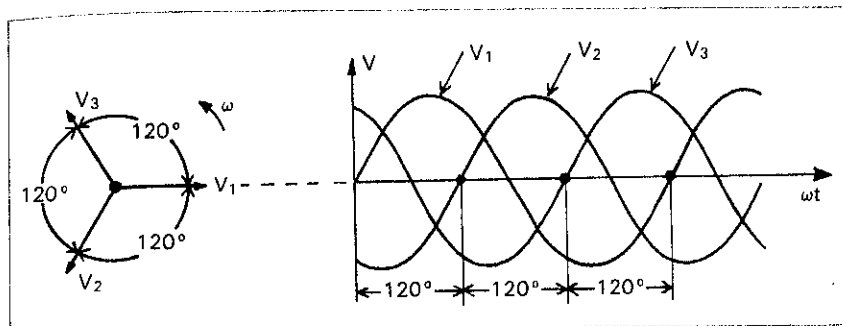
El valor instantáneo de cada una de estas f.e.m. tendrá la siguiente forma:

$$e_1 = E_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t$$

$$e_2 = E_{\text{máx}} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ)$$

$$e_3 = E_{\text{máx}} \text{ sen } (\omega t - 240^\circ)$$

En la Figura 15.3 se muestran los diagramas vectoriales pertenecientes a estas fuerzas electromotrices.



La forma más utilizada, y la que estudiaremos a continuación, es la conexión en estrella, ya que permite el uso del conductor neutro (0) y, con él, el uso de dos tensiones diferentes. El neutro se conecta a tierra junto con el chasis del alternador para garantizar la seguridad eléctrica de las instalaciones.

Figura 15.3. Diagrama vectorial de las fuerzas electromotrices generadas por un alternador trifásico.

Como se puede comprobar en los diagramas vectoriales, la suma de las tres f.e.m. es cero en cualquier momento. Esto constituye una de las características principales del sistema trifásico.

En los alternadores modernos se sitúan las tres bobinas en el estator, evitando así el complejo sistema de anillos colectores para la extracción de la gran energía eléctrica que se produce en las mismas (las tensiones son del orden de los 10 a 20 KV y las corrientes de hasta cientos de amperios) (Figura 15.4).

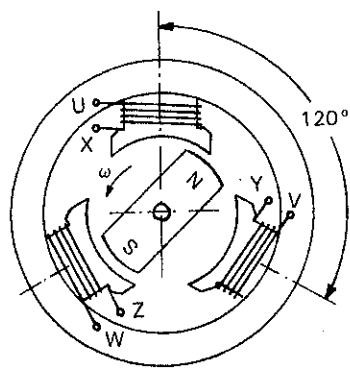


Figura 15.4. Alternador trifásico con campo magnético inductor móvil.

En el rotor se sitúa un potente electroimán que, al ser alimentado por una corriente continua genera el campo magnético. En su movimiento de rotación, el campo magnético corta los conductores de las tres bobinas consecutivamente, induciendo en las mismas las tres f.e.m desfasadas entre sí 120°.

De las tres bobinas del alternador se consiguen seis terminales. Existen dos formas básicas de conexión de estas bobinas: conexión en estrella y conexión en triángulo (Figura 15.5).

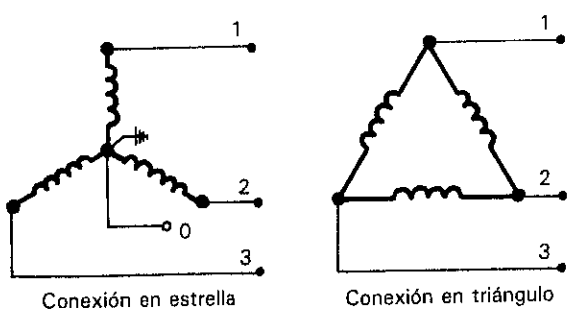


Figura 15.5. Conexiones de los bobinados de un alternador.

## 15.3 Conexión del alternador en estrella

En esta conexión se han unido los tres terminales libres de las bobinas del alternador a un punto común, formando el conductor neutro (0). Las otras partes activas de las bobinas (1), (2) y (3) forman los conductores de cada una de las fases del sistema trifásico. Para hacer un estudio completo de esta conexión, se ha conectado el alternador a un receptor que consta de tres cargas óhmico inductivas ( $Z_1, Z_2$  y  $Z_3$ ) conectadas entre sí en estrella, tal como se muestra en la Figura 15.6.

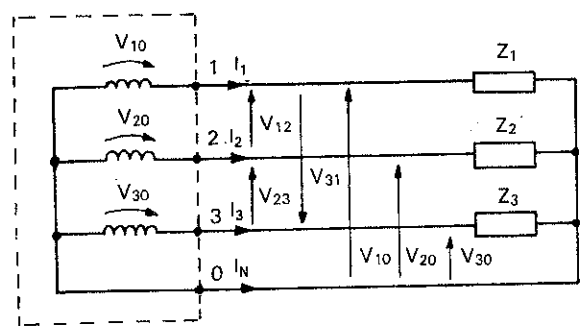


Figura 15.6. Tensiones y corrientes en un alternador en estrella.

**Tensiones simples o de fase:** Cada bobina del alternador trifásico se comporta como un generador monofásico, generando entre sus terminales una tensión denominada simple o de fase ( $V_s$ ):  $V_{10}, V_{20}$  y  $V_{30}$ .

**Intensidades de línea:** Las tensiones simples quedan aplicadas a cada una de las cargas del receptor, apareciendo una corriente por cada conductor de línea ( $I_L$ ):  $I_1, I_2$  y  $I_3$ . La suma de estas tres corrientes dará como resultado la corriente de retorno del neutro  $I_N$ . En un principio podría parecer que el conductor del neutro debe conducir una gran corriente eléctrica. Como ya podremos comprobar en los diagramas vectoriales, en el caso de que las cargas sean todas iguales (cargas equilibradas) esta corriente es cero, lo que podría llevar a la anulación de este conductor en determinadas aplicaciones.

**Tensiones compuestas:** Son las tensiones que aparecen entre cada una de las fases ( $V_c$ ):  $V_{12}, V_{23}$  y  $V_{31}$ . Estas tensiones reciben el nombre de tensiones compuestas porque aparecen gracias a la composición de las tensiones simples. Con ayuda de las leyes de Kirchoff y del diagrama vectorial, demostraremos que todas estas tensiones poseen el mismo valor eficaz y que están desfasadas entre sí 120°, así como que se cumple que  $V_c = \sqrt{3} V_s$ .

Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a cada una de las mallas que se forman entre las tensiones simples y compuestas, tendremos que (Figura 15.7):

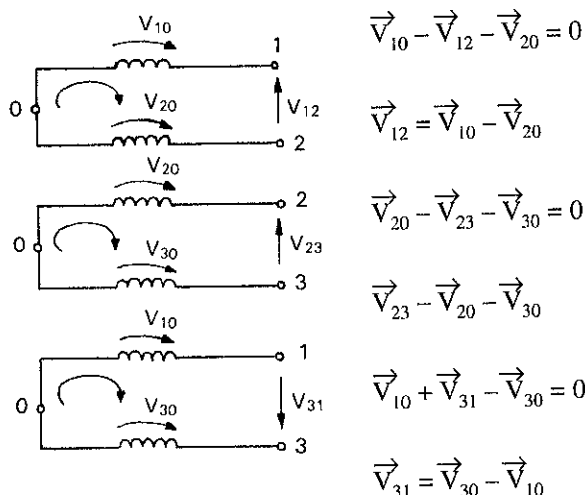


Figura 15.7. Obtención de las tensiones compuestas.

Ahora dibujamos el diagrama vectorial (Figura 15.8) con las tensiones simples desfasadas unas de otras 120°. Al ser las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes eléctricas retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones simples un ángulo  $\varphi$ . Como se ha supuesto que las cargas son iguales, las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  y  $I_3$  son también iguales en valor modular y desfasadas entre sí 120°. Se puede comprobar con facilidad el hecho de que la suma de estas intensidades es cero:

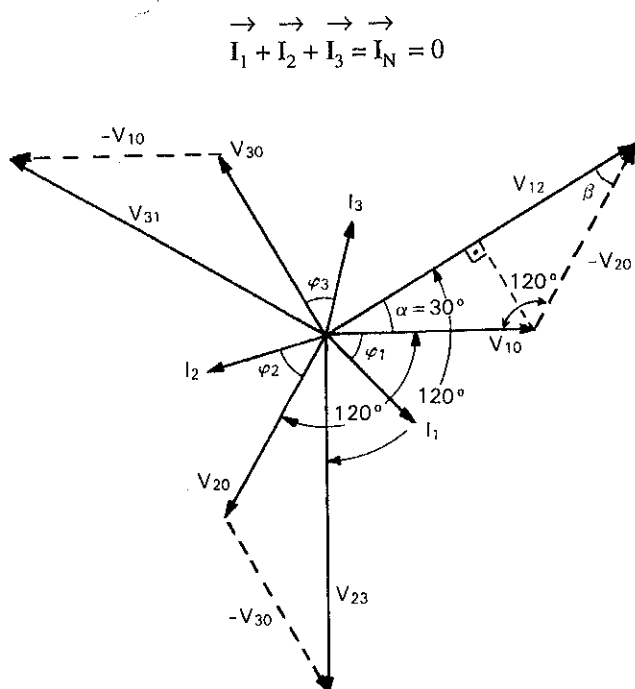


Figura 15.8. Diagrama vectorial de tensiones e intensidades.

Las tensiones compuestas se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas tensiones simples (ver las relaciones de tensiones obtenidas con anterioridad en Figura 15.7).

Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las tensiones simples y las compuestas es de 30° (aparece un triángulo isósceles donde  $\alpha = \beta$ ; en el triángulo se cumple que  $180^\circ = \alpha + \beta + 120^\circ$ , de donde se deduce que  $\alpha = 30^\circ$ ). Aprovechando esta relación y por simple trigonometría determinaremos la relación que existe entre las tensiones simples y las compuestas (Figura 15.9).

$$\cos 30^\circ = \frac{V_{12}/2}{V_{10}} \Rightarrow V_{12} = 2 V_{10} \cos 30^\circ$$

$$V_{12} = 2 V_{10} \sqrt{3}/2 = V_{10} \sqrt{3}, \text{ en conclusión:}$$

$$V_c = \sqrt{3} \cdot V_s$$

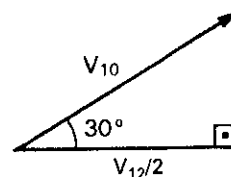


Figura 15.9. Relación entre tensiones simple y compuestas

**Ejemplo: 15.1**

Determinar la tensión compuesta que corresponde a un sistema trifásico que posee una tensión simple de 127 V.

Solución:  $V_c = \sqrt{3} V_s = \sqrt{3} 127 = 220 \text{ V}$

¿y para  $V_s = 230 \text{ V}$ ?  $V_c = \dots$

## 15.4 Conexión de los receptores

Una vez que disponemos de un sistema trifásico, podemos conectar al mismo cargas conectadas entre sí en triángulo, en estrella, o incluso cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro o entre fases (véase Figura 15.1). En los primeros casos se tratará, en la mayoría de los ocasiones, de cargas trifásicas equilibradas como, por ejemplo, motores trifásicos, hornos trifásicos, etc. Las cargas monofásicas vendrán constituidas por lámparas y todo tipo de receptores monofásicos. En este caso conviene siempre repartir por igual las cargas monofásicas entre cada una de las fases, en caso contrario el sistema sería desequilibrado, produciéndose diferentes corrientes por cada fase, que desestabilizan notablemente el sistema.

Seguidamente estudiaremos las cargas trifásicas conectadas en estrella y en triángulo, y demostraremos que la potencia de estas conexiones para cargas equilibradas es siempre igual a:

$$P = \sqrt{3} V_c \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

$P$  = potencia activa de la carga trifásica

$V_c$  = tensión compuesta

$I_L$  = intensidad de línea

$\cos \varphi$  = factor de potencia de la carga

# 15.5 Carga equilibrada en estrella

En la Figura 15.10 se puede apreciar un receptor trifásico con tres cargas conectadas en estrella.

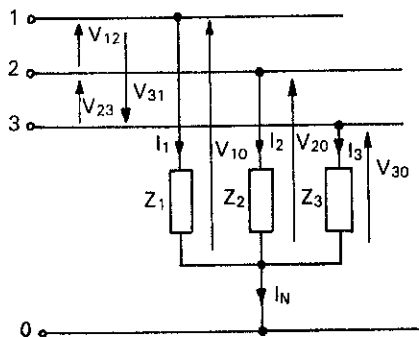


Figura 15.10. Carga equilibrada en estrella.

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_1 \angle \phi_1 = Z_2 \angle \phi_2 = Z_3 \angle \phi_3 = Z \angle \phi$$

Aplicando la ley de Ohm a cada una de estas cargas tenemos que las corrientes por cada fase de las mismas, son:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_{10}}{Z_1 \angle \phi_1} \quad \vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_{20}}{Z_2 \angle \phi_2} \quad \vec{I}_3 = \frac{\vec{V}_{30}}{Z_3 \angle \phi_3}$$

Como las tensiones simples están desfasadas 120°, las corrientes también quedarán desfasadas entre sí 120° y un ángulo φ respecto a cada una de su respectiva tensión simple. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las mismas son del mismo valor modular, las corrientes también lo serán:

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_L$$

Como se podrá apreciar en el diagrama vectorial de la Figura 15.11 en esta situación se cumple que:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_N = 0$$

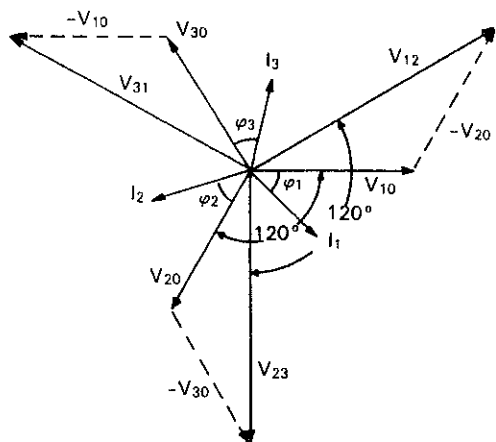


Figura 15.11. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en estrella.

En este caso se puede eliminar el neutro. Al hacerlo se forma un neutro artificial en el punto común de las cargas conectadas en estrella, que permite que se mantenga la tensión simple entre las fases y el neutro sin necesidad del conductor neutro. Por supuesto, esto sólo ocurre cuando las cargas están equilibradas.

**Potencia del sistema trifásico:** Para calcular la potencia que desarrolla la carga bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = V_{10} I_1 \cos \phi_1 + V_{20} I_2 \cos \phi_2 + V_{30} I_3 \cos \phi_3$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones simples, como las corrientes de fase, como los factores de potencia son iguales (para cargas en estrella la corriente de fase y de línea es la misma).

$$P = 3 V_s I_L \cos \phi, \text{ como}$$

$$V_s = \frac{V_c}{\sqrt{3}} \Rightarrow P = 3 \frac{V_c}{\sqrt{3}} I_L \cos \phi \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} V_C \cdot I_L \cos \phi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica

V<sub>c</sub> = Tensión compuesta

I<sub>L</sub> = Intensidad de línea

cos φ = Factor de potencia de la carga

Para el cálculo de la potencia reactiva y aparente, el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

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

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

### Ejemplo: 15.2

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en estrella. Determinar la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red con una tensión entre fases de 400 V desarrolla una potencia de 10 KW con un FP de 0,8. Averiguar la potencia reactiva y aparente del mismo (véase circuito equivalente en la Figura 15.12).

**Solución:** Como los motores son cargas equilibradas no será necesario conectar el neutro al punto común de la estrella para que aparezca la tensión simple entre el neutro y cualquiera de las fases.

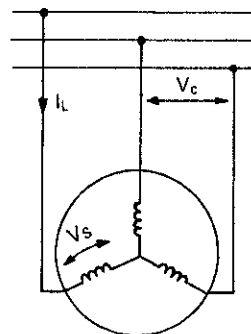


Figura 15.12

Para determinar la corriente aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 18 \text{ A}$$

$$\varphi = \arccos 0,8 = 36,9^\circ$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 18 \cdot \sin 36,9^\circ = 7.488 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 12.471 \text{ VA}$$

¿Qué tensión y qué corriente aparece en cada una de las bobinas del motor?

Como las bobinas están conectadas en estrella y son cargas equilibradas, aparece en cada una de ellas la tensión simple, es decir:

$$V_s = V_c / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ V}$$

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase) es la misma que aparece en la línea: 18 A.

**Ejemplo: 15.3**

Se conectan en estrella tres bobinas iguales a una red trifásica de 220 V, 50 Hz. Cada una de las mismas posee 10 Ω de resistencia óhmica y 30 Ω de reactancia inductiva (Figura 15.13). Calcular:  $I_L$ ,  $\cos \varphi$ , P, Q y S.

Solución:

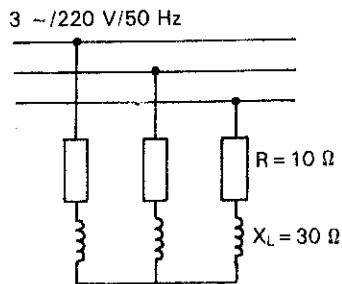


Figura 15.13

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 30^2} = 31,6 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{30}{10} = 71,6^\circ$$

Cada una de estas impedancias está sometida a la tensión simple, luego la corriente que se establecerá por cada una de ellas y por la línea será:

$$I_L = \frac{V_s}{Z} = \frac{127}{31,6} = 4 \text{ A} \quad (V_s = V_c / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ V})$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi = \dots = 481 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \sin \varphi = \dots = 1.446 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 1.524 \text{ VA}$$

$$FP = \cos \varphi = \cos 71,6^\circ = 0,32$$

**Ejemplo: 15.4**

Se desea conectar a una red trifásica, con neutro y con una tensión entre fases de 400 V, 30 lámparas fluorescentes de 40 W, 230 V,  $\cos \varphi = 0,6$ . Mostrar la conexión de las mismas para conseguir que la carga esté equilibrada y averiguar la corriente por la línea que las alimenta, así como la potencia del conjunto y por fase.

Solución: Como las lámparas funcionan a 230 V, es decir a la tensión simple ( $V_s = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ V}$ ), se han conectado 3 grupos de 10 lámparas entre cada fase y neutro con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.14).

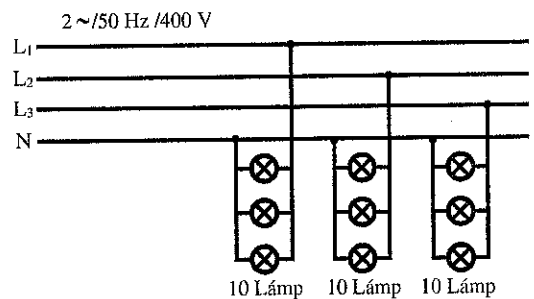


Figura 15.14

La potencia conectada a cada fase será entonces:

$$P' = 10 \cdot 40 \text{ W} = 400 \text{ W}$$

La potencia total conectada a la red trifásica es de:

$$P = 30 \cdot 40 \text{ W} = 1.200 \text{ W}$$

Para calcular la intensidad de línea nos valemos de la fórmula general de potencia trifásica:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{1.200}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,6} = 2,9 \text{ A}$$

Esta corriente también la podríamos haber averiguado tomando la potencia de una de las fases:

$$P' = V_s I_L \cos \varphi \Rightarrow I_L = \frac{P'}{V_s \cos \varphi} = \frac{400}{230 \cdot 0,6} = 2,9 \text{ A}$$

¿Se podría eliminar la conexión del neutro en las lámparas?

Evidentemente, mientras el sistema permanezca equilibrado, la tensión que aparecerá entre el punto común de las lámparas y la fase será la simple. Ahora bien, en el momento que alguna lámpara se funda, el sistema se desequilibrará, con la consecuencia de que la tensión simple no se mantendrá en su valor nominal. La única forma de evitar este hecho es tener siempre conectado el neutro en estos casos.

### 15.6 Carga equilibrada en triángulo

Al conectar las cargas en triángulo (Figura 15.15), éstas quedan sometidas a cada una de las respectivas tensiones compuestas. Por cada una de las cargas aparece una corriente:  $I_{12}$ ,  $I_{23}$  e  $I_{31}$ , que llamaremos **corriente de fase ( $I_f$ )**.

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_{12} \angle \varphi_{12} = Z_{23} \angle \varphi_{23} = Z_{31} \angle \varphi_{31} = Z \angle \varphi$$

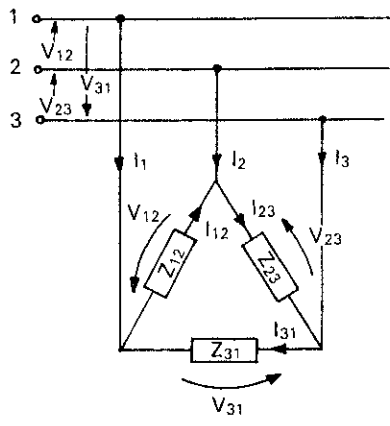


Figura 15.15. Carga equilibrada en triángulo.

$$\vec{I}_{12} = \frac{\vec{V}_{12}}{Z_{12} \angle \varphi_{12}} \quad \vec{I}_{23} = \frac{\vec{V}_{23}}{Z_{23} \angle \varphi_{23}} \quad \vec{I}_{31} = \frac{\vec{V}_{31}}{Z_{31} \angle \varphi_{31}}$$

Como las tensiones compuestas están desfasadas entre sí  $120^\circ$ , las corrientes también quedarán desfasadas entre sí  $120^\circ$  y un ángulo  $\varphi$  respecto a cada una de su respectiva tensión compuesta. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las mismas son del mismo valor modular, las corrientes también lo serán:

$$|I_{12}| = |I_{23}| = |I_{31}| = I_f$$

En la línea que alimenta a las cargas aparecen otras tres corrientes:  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , que llamaremos corrientes compuestas o de línea ( $I_L$ ). Para determinar la relación de estas corrientes con las de fase vamos a aplicar la primera ley de Kirchhoff a cada uno de los nudos que se forman en las conexiones de las cargas en triángulo:

$$\text{Nudo 1} \Rightarrow \vec{I}_1 = \vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}$$

$$\text{Nudo 2} \Rightarrow \vec{I}_2 = \vec{I}_{23} - \vec{I}_{12}$$

$$\text{Nudo 3} \Rightarrow \vec{I}_3 = \vec{I}_{31} - \vec{I}_{23}$$

Ahora dibujamos el diagrama vectorial con las tensiones compuestas desfasadas entre sí  $120^\circ$  (Figura 15.16). Al suponer las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes de fase retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones compuestas un ángulo  $\varphi$ .

Las corrientes de línea se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas intensidades de fase (ver relaciones obtenidas anteriormente).

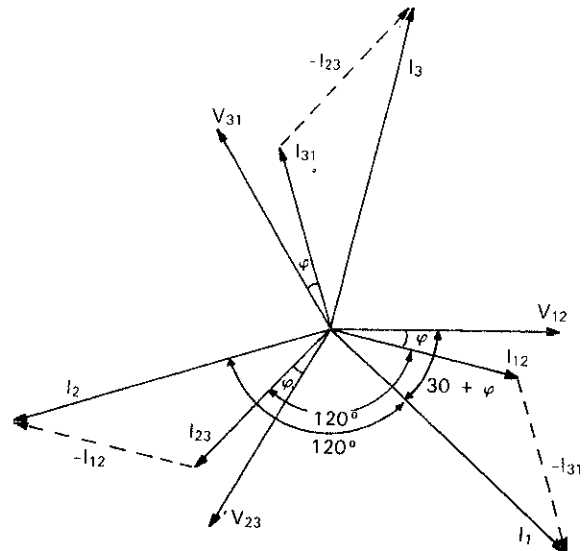


Figura 15.16. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en triángulo.

Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las corrientes de fase y las de línea es de  $30^\circ$  (aparece un triángulo isósceles donde  $\alpha = \beta$ ; en el triángulo se cumple que  $180^\circ = \alpha + \beta + 120^\circ$ , de donde  $\alpha = 30^\circ$ ). Aprovechando esta relación, y por simple trigonometría, determinaremos la relación que existe entre las corrientes de fase y las de línea (Figura 15.17).

$$\cos 30^\circ = \frac{I_f/2}{I_L} \Rightarrow I_L = 2 I_f \cos 30^\circ$$

$$I_L = 2 I_f \frac{\sqrt{3}}{2} = I_f \sqrt{3}, \text{ en conclusión:}$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$$

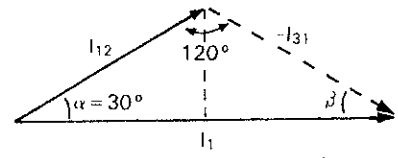


Figura 15.17. Relación entre las corrientes de fase y de línea.

Las corrientes de línea poseen todas un valor igual en módulo, están desfasadas entre sí un ángulo de  $120^\circ$  y son  $\sqrt{3}$  mayores que las corrientes de fase.

**Potencia del sistema trifásico:** Para calcular la potencia que desarrolla la carga conectada en triángulo bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = V_{12} I_{12} \cos \varphi_{12} + V_{23} I_{23} \cos \varphi_{23} + V_{31} I_{31} \cos \varphi_{31}$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones compuestas, como las corrientes de fase y de línea y los factores de potencia son iguales.

$$P = 3 V_c I_f \cos \varphi \text{ como } I_f = I_L / \sqrt{3} \Rightarrow P = 3 V_c \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} V_c \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

$P$  = Potencia activa de la carga trifásica

$V_c$  = Tensión compuesta

$I_L$  = Intensidad de línea

$\cos \varphi$  = Factor de potencia de la carga

Para el cálculo de la potencia reactiva el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_c \cdot I_L \cdot \text{sen} \varphi$$

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

En conclusión, las fórmulas para el cálculo de la potencia en un sistema trifásico equilibrado son las mismas para cargas conectadas en estrella que en triángulo.

### Ejemplo 15.5

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en triángulo. Determinar la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red, con una tensión entre fases de 400 V, desarrolla una potencia de 15 KW con un FP de 0,7. Averiguar la potencia reactiva y aparente del mismo.

*Solución:*

Para determinar la corriente de línea aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,7} = 31 \text{ A}$$

$$\varphi = \arccos 0,7 = 45,6^\circ$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \text{sen} \varphi = \dots = 15.345 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 21.477 \text{ VA}$$

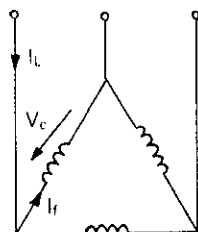


Figura 15.18

¿Qué tensión y qué corriente aparece en cada una de las bobinas del motor? (Figura 15.18).

Como las bobinas están conectadas en triángulo, aparece en cada una de ellas la tensión compuesta, es decir: 400 V.

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase), es:

$$I_f = I_L / \sqrt{3} = 31 / \sqrt{3} = 17,9 \text{ A}$$

### Ejemplo: 15.6

Se conectan en triángulo las tres bobinas del Ejemplo 15.3 a una red trifásica de 400 V, 50 Hz (Figura 15.19). Calcular:  $I_f$ ,  $I_L$ ,  $\cos \varphi$ ,  $P$ ,  $Q$  y  $S$ .

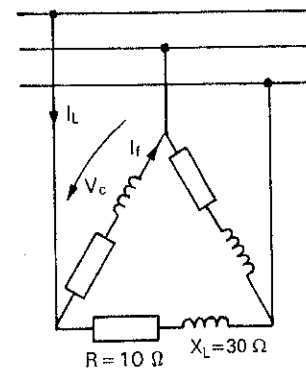


Figura 15.19.

*Solución:* Al calcular la impedancia correspondiente a cada una de las cargas obtuvimos el resultado:  $Z = 31,6 \angle 71,6^\circ$ .

Cada una de estas impedancias está sometida a la tensión compuesta, luego la corriente de fase que se establecerá por cada una de ellas será:

$$I_f = \frac{V_c}{Z} = \frac{400}{31,6} = 12,7 \text{ A} \quad I_L = I_f \sqrt{3} = 12,7 \cdot \sqrt{3} = 22 \text{ A}$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi = \dots = 4.811 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \text{sen} \varphi = \dots = 14.463 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 15.242 \text{ VA}$$

$$\text{FP} = \cos \varphi = \cos 71,6^\circ = 0,32$$

### Ejemplo: 15.7

Se desea conectar 60 lámparas incandescentes de 100 W, 220 V, a una red trifásica con una tensión entre fases de 220 V. Mostrar la conexión de las mismas para conseguir que la carga esté equilibrada, y averiguar la corriente por la línea que las alimenta, así como la potencia del conjunto y por fase.

*Solución:* Como las lámparas funcionan a 220 V, es decir a la tensión compuesta, se han conectado 3 grupos de 10 lámparas entre cada dos fases con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.20).



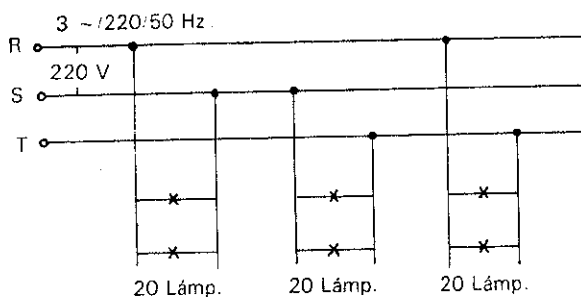


Figura 15.20

La potencia conectada a cada fase será entonces:

$$P' = 20 \cdot 100 \text{ W} = 2.000 \text{ W}$$

La potencia total conectada a la red trifásica es de:

$$P = 60 \cdot 100 \text{ W} = 6.000 \text{ W}$$

Para calcular la intensidad de línea nos valemos de la fórmula general de potencia trifásica:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{6.000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1} = 15,7 \text{ A}$$

(Las lámparas incandescentes son resistivas  $\Rightarrow \cos \varphi = 1$ ).

Esta corriente también la podríamos haber averiguado tomando la potencia de una de las fases:

$$P' = V_c I_f \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_f = \frac{P'}{V_c \cos \varphi} = \frac{2.000}{220 \cdot 1} = 9,1 \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 9,1 = 15,7 \text{ A}$$

## 15.7 Corrección del factor de potencia

Por las mismas razones que se mejora el factor de potencia en las redes de C.A. monofásicas, también se lleva a cabo en las trifásicas. La corrección se lleva a cabo mediante baterías de condensadores, conectados en estrella o en triángulo, que se acoplan en derivación a la red eléctrica a compensar. La forma más habitual de compensar la energía reactiva es mediante baterías automáticas trifásicas de condensadores (Figura 15.21).

El procedimiento a seguir para el cálculo de la batería de condensadores trifásica es prácticamente igual que el llevado a cabo para las monofásicas. Dependiendo de si conectamos las baterías en estrella o en triángulo cambiarán algunas de sus características.

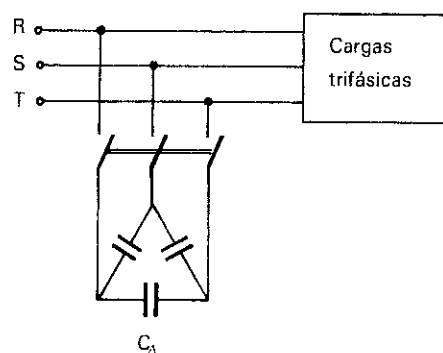


Figura 15.21. Batería de condensadores en triángulo para la corrección del factor de potencia.

### Ejemplo: 15.8

El alumbrado de una sala de dibujo se compone de 60 lámparas fluorescentes de 40 W/230 V en BF (bajo factor de potencia) con un FP de 0,6. Las lámparas se han conectado de forma equilibrada a una red trifásica de 400 V entre fases (Figura 15.22). Dimensionar la batería de condensadores en estrella que será necesario conectar a la línea general que alimenta a esta instalación para corregir el FP a 0,97.

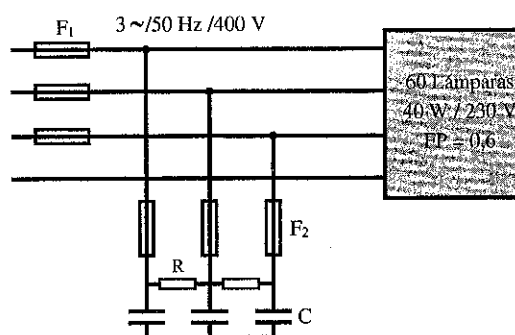


Figura 15.22

Averiguar el calibre de los fusibles generales. ¿Cuál será el calibre de los fusibles para la protección de la batería de condensadores? ¿En cuánto se ha conseguido reducir la intensidad en la instalación al corregir el FP?

**Solución:** La potencia total instalada es  $60 \cdot 40 \text{ W} = 2.400 \text{ W}$ .

$$\varphi = \arccos 0,6 = 53,13^\circ$$

$$\varphi' = \arccos 0,97 = 14,07^\circ$$

$$Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') = 2.400 (\operatorname{tg} 53,13^\circ - \operatorname{tg} 14,07^\circ) = 2.598 \text{ VAR}$$

La potencia de cada una de las fases de la batería de condensadores será la tercera parte de la total:

$$Q_C' = 2.598/3 = 866 \text{ VAR}$$

La corriente de fase de cada condensador la calculamos partiendo de esta potencia y de que el condensador está sometido a la tensión de fase por estar conectado en estrella:

$$Q_C' = V_s I_{FC} \Rightarrow I_{FC} = \frac{Q_C'}{V_s} = \frac{866}{230} = 3,77 \text{ A}$$

Ahora ya podemos calcular la reactancia y la capacidad del condensador:

$$X_C = \frac{V_s}{I_{FC}} = \frac{230}{3,77} = 61 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 61} = 52 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

La batería trifásica deberá poseer una potencia reactiva de 2.598 VAR a 400 V y está compuesta por 3 condensadores de 52  $\mu\text{F}$  a 230 V conectados en estrella.

**\*Nota:** Las resistencias de descarga, que se han conectado entre las fases de la batería de condensadores, son para que los condensadores se descarguen por ellas cuando se desconecta la misma de la red.

Calibre de los fusibles F2 de la batería de condensadores:

$$3,77 \cdot 1,6 \text{ veces} = 6 \text{ A} \Rightarrow \text{F2 (10 A)}$$

Calibre de los fusibles generales de línea F1:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{2.400}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,6} = 5,8 \text{ A}$$

F1 (10 A)

La intensidad por la línea cuando se conecta la batería automática será de:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L' \cos \varphi' \Rightarrow I_L' =$$

$$\frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi'} = \frac{2.400}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,97} = 3,6 \text{ A}$$

Se ha conseguido una reducción de corriente del:

$$\frac{(5,8-3,6)}{5,8} \cdot 100 = 38 \%$$

#### Ejemplo: 15.9

Determinar las características de la batería de condensadores en triángulo que sería necesario conectar para corregir el FP del ejemplo 15.8.

**Solución:** La potencia reactiva de la batería será exactamente igual, incluso la corriente de la línea que alimenta a la misma. Lo que sí que será diferente es la tensión a la que trabaja cada condensador (en este caso los condensadores quedan sometidos a la tensión compuesta) y, por consiguiente, se verá afectada la capacidad de cada uno de ellos.

$$I_{FC} = \frac{Q_C'}{V_c} = \frac{866}{400} = 2,17 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_c}{I_{FC}} = \frac{400}{2,17} = 184,3 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 184,3} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Batería trifásica de condensadores de 2.598 VAR/400 V compuesta por condensadores de 17  $\mu\text{F}$  a 400 V.

Con la batería en triángulo se consiguen condensadores de menor capacidad pero de mayor tensión nominal que con una batería en estrella.

## 15.8 Instalaciones trifásicas de varios receptores

Al igual que para las instalaciones monofásicas, en este caso se trata de calcular la potencia total instalada, el factor de potencia y la intensidad total de una instalación trifásica de la que se conectan varias cargas de potencia activa y FP conocidas. El procedimiento a seguir es exactamente el mismo que el utilizado para cargas monofásicas: se obtiene la potencia activa y reactiva de todas las cargas y se procede a obtener la potencia aparente total, así como el FP del conjunto y la intensidad.

#### Ejemplo: 15.10

La instalación eléctrica de un pequeño taller consta de los siguientes receptores, conectados a una línea trifásica de 400 V, 50 Hz: (1) motor trifásico de 10 KW,  $\cos \varphi = 0,75$ ; (2) horno trifásico consistente en tres resistencias de 50  $\Omega$  conectadas en triángulo; (3) 30 lámparas de vapor de mercurio de 500 W, 230 V,  $\cos \varphi = 0,6$  conectadas equitativamente entre cada fase y neutro; (4) 3 motores monofásicos de 2 KW, 400 V,  $\cos \varphi = 0,7$  conectados entre fases (Figura 15.23).

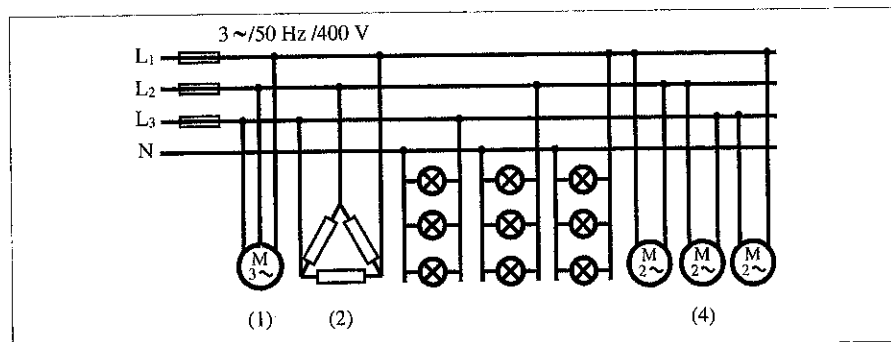


Figura 15.23

Averiguar: a) potencia total de la instalación y FP; b) calibre de los fusibles generales de la línea; c) sección de los conductores, teniendo en cuenta que la línea consta de tres conductores unipolares de PVC más el neutro instalados bajo tubo; d) características de la batería de condensadores conectada en triángulo para corregir el FP hasta 0,95; e) calibre de los fusibles de la batería de condensadores; f) corriente eléctrica por la línea con la batería de condensadores conectada.

**Solución:**

(1) Determinamos primero la potencia reactiva del motor, que según el triángulo de potencias:

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 41,4^\circ = 8.819 \text{ VAR}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0,75 = 41,4^\circ$$

(2) Calculamos ahora la potencia activa del horno trifásico:

$$I_f = \frac{V_c}{R} = \frac{400}{50} = 8 \text{ A,}$$

la potencia es tres veces la de una R

$$P_2 = 3 V_c I_f \cos \varphi = 3 \cdot 400 \cdot 8 \cdot 1 = 9.600 \text{ W}$$

$Q_2 = 0 \text{ VAR}$  (las cargas resistivas no producen potencia reactiva)

(3) Para las 30 lámparas de vapor de mercurio:

$$P_3 = 30 \cdot 500 \text{ W} = 15.000 \text{ W}$$

$$Q_3 = P_3 \operatorname{tg} \varphi_3 = 15.000 \cdot \operatorname{tg} 53^\circ = 19.905 \text{ VAR}$$

$$\varphi_3 = \arccos 0,6 = 53^\circ$$

(4) Para los tres motores monofásicos:

$$P_4 = 3 \cdot 2.000 \text{ W} = 6.000 \text{ W}$$

$$Q_4 = P_4 \operatorname{tg} \varphi_4 = 6.000 \cdot \operatorname{tg} 45,6^\circ = 6.121 \text{ VAR}$$

$$\varphi_4 = \arccos 0,7 = 45,6^\circ$$

Ahora sumamos las potencias:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 10.000 + 9.600 + 15.000 + 6.000 = 40.600 \text{ W}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 8.819 + 0 + 19.905 + 6.121 = 34.845 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{40.600^2 + 34.845^2} = 53.503 \text{ VA}$$

$$S_T = \sqrt{3} V_c I_L \Rightarrow I_L = \frac{S_T}{\sqrt{3} V_c} = \frac{53.503}{\sqrt{3} \cdot 400} = 77 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{40.600}{53.503} = 0,76$$

a) Potencia instalada: 40,6 KW; FP = 0,76

b) Calibre de los fusibles: 100 A

d) Calculamos ahora la batería de condensadores:

$$Q_C = P_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi_T') = 40.600 \cdot (\operatorname{tg} 40,54^\circ - \operatorname{tg} 18,19^\circ) = 21.384 \text{ VAR.}$$

$$\varphi_T = \arccos 0,76 = 40,54^\circ$$

$$\varphi_T' = \arccos 0,95 = 18,19^\circ$$

La potencia de cada una de las fases de la batería de condensadores es la tercera parte de la total:

$$Q_C' = 21.384/3 = 7.128 \text{ VAR}$$

$$I_{fC} = \frac{Q_C'}{V_c} = \frac{7.128}{400} = 18 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_c}{I_{fC}} = \frac{400}{18} = 22 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22} = 145 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Características de la batería trifásica de condensadores en  $\Delta$ :

21,4 KVAR a 400 V; condensadores de 145  $\mu\text{F}$ , 400 V.

(Consultando en un catálogo de baterías automáticas podríamos elegir una con tres escalones de: 5 KVAR; 7,5 KVAR; 10 KVAR)

e) Para calcular el calibre de los fusibles de los condensadores tenemos en cuenta la corriente de línea por la batería y que es recomendable sobredimensionar su calibre en 1,6 veces para evitar la fusión intempestiva de los mismos.

$$I_{LC} = \sqrt{3} I_{fC} = \sqrt{3} \cdot 18 = 31 \text{ A}$$

$$1,6 \cdot 31 = 50 \text{ A} \Rightarrow (63 \text{ A})$$

f) Intensidad con la batería de condensadores conectada:

$$P_T = \sqrt{3} V I_T' \cos \varphi_T' \Rightarrow I_T' = \dots = \dots = 62 \text{ A}$$

c) Sección de los conductores de la línea general: 25 mm<sup>2</sup> (para este cálculo sólo se ha tenido en cuenta la  $I_{\text{máx. adm.}}$  por los conductores una vez mejorado el FP).

## 15.9 Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A.

Al igual que ocurría en las líneas monofásicas, en las líneas trifásicas aparece una caída de tensión en cada uno de los conductores de línea igual a:  $(\Delta V_s = R_L I_L \cos \varphi)$ . Esta tensión se restará a la tensión simple. La caída de tensión que

aparecerá entre fases será  $\sqrt{3}$  mayor que la simple ( $\Delta V_c = \sqrt{3} \Delta V_s$ ), resultando:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot R_L \cdot I_L \cos \phi$$

$\Delta V$  = Caída de tensión compuesta (V)

$R_L$  = Resistencia de la línea ( $\Omega$ )

$I_L$  = Intensidad eficaz por la línea

$\cos \phi$  = FP de la carga

Como en otras ocasiones, la sección del conductor la deducimos a partir de la expresión de la resistencia de un conductor:

$$R_L = \rho \frac{L}{S}$$

que, al sustituirla en la expresión anterior, dará el valor de la sección:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I_L \cdot \cos \phi}{\Delta V}$$

$S$  = Sección del conductor ( $\text{mm}^2$ )

$\rho$  = Resistividad del conductor ( $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ )

$L$  = Longitud de la línea (m)

$I_L$  = Intensidad eficaz por la línea (A)

$\cos \phi$  = FP de la carga

$\Delta V$  = caída de tensión compuesta (V)

**Ejemplo: 15.11**

La línea general que alimenta al pequeño taller del ejemplo 15.10 posee una longitud de 150 m. ¿Cuál será la sección más recomendable si se pide que la caída de tensión en la línea no supere el 2% de la de alimentación?

*Solución:* Primero calculamos la caída de tensión en voltios:

$$\Delta V = \frac{400}{100} \cdot 2\% = 8 \text{ V}$$

Ahora calculamos la sección teniendo en cuenta la corriente con el factor de potencia mejorado ( $I_L = 62 \text{ A}$ ,  $\cos \phi = 0,95$ ).

$$S = \frac{\sqrt{3} \rho L I_L \cos \phi}{\Delta V} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,017 \cdot 150 \cdot 62 \cdot 0,95}{8} = 32,5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 35  $\text{mm}^2$ .

Como la corriente permitida para tres conductores unipolares bajo tubo de 35  $\text{mm}^2$  es de 77 A, se cumple también esta condición.

**Ejemplo: 15.12**

La acometida de una factoría une el transformador de distribución con el cuadro general de distribución mediante una línea trifásica de 125 m (línea tripolar + neutro) instalada al aire de polietileno reticulado. La tensión entre fases en el primario del mismo es de 10.000 V y en secundario de 380 V a 50 Hz. En la Figura 15.24 aparece el esquema unifilar correspondiente a dicho cuadro.

Las previsiones de las cargas que se van a dar en los diferentes circuitos son las siguientes: (tomas) 10 KW, 380 V; (calefacción) 9 calefactores monofásicos de 2 KW, 380 V; (taller A) 20 KW, 380 V,  $\cos \phi = 0,8$ ; (taller B) 30 KW, 380 V,  $\cos \phi = 0,85$ ; (soldadura) 8 KW, 380 V,  $\cos \phi = 0,9$ ; (depuradora) motor trifásico de 5 KW, 660 /380 V,  $\cos \phi = 0,9$ ; (servicios auxiliares) 3 KW,  $\cos \phi = 0,85$ , 380 V; (alumbrado) (1) 30 lámparas de vapor de mercurio de 400 W, 220 V,  $\cos \phi = 0,72$ ; (2) 60 lámparas fluorescentes de 40 W, 220 V,  $\cos \phi = 0,9$ ; (3) 15 lámparas incandescentes de 60 W. Con estos datos: a) calcular la potencia a tener en cuenta para la elección del transformador de distribución si se tiene en cuenta un factor de simultaneidad de las cargas del 0,65; b) determinar la corriente prevista por el primario y por el secundario de dicho transformador; c) averiguar la sección de los conductores de la línea general si se prevé una caída de tensión máxima admisible del 5%.

*Solución:* a) Calculamos primero todas las potencias:

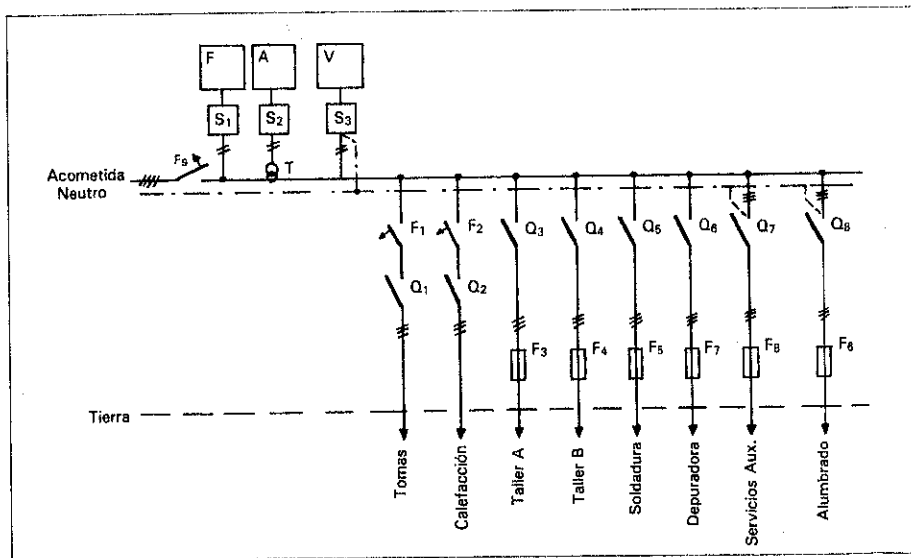


Figura 15.24

(Tomas)  $P = 10 \text{ KW}$ ,  $Q = 0 \text{ VAR}$

(Calefacción)  $P = 9 \cdot 2 = 18 \text{ KW}$ ,  $Q = 0 \text{ VAR}$

(Taller A)  $P = 20 \text{ KW}$ ,  $Q = P \text{ tg } \phi = 20 \cdot 0,75 = 15 \text{ KVAR}$

(Taller B)  $P = 30 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 18,6 \text{ KVAR}$

(Soldadura)  $P = 8 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 3,87 \text{ KVAR}$

(Depuradora)  $P = 5 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 2,42 \text{ KVAR}$

(Servicios auxiliares)  $P = 3 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 1,86 \text{ KVAR}$

(Alumbrado) (1)  $P = 30 \cdot 0,4 = 12 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 11,57 \text{ KVAR}$

(2)  $P = 60 \cdot 0,04 = 2,4 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 1,15 \text{ KVAR}$

(3)  $P = 15 \cdot 0,06 = 0,9 \text{ KW}$ ,  $Q = \dots = 0 \text{ KVAR}$

$$P_T = \Sigma P = 109,3 \text{ KW}$$

$$Q_T = \Sigma Q = 54,47 \text{ KVAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{109,3^2 + 54,47^2} = 122,12 \text{ KVA}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{109,3}{122,12} = 0,9$$

Para calcular la potencia nominal del transformador tendremos que tener en cuenta el factor de simultaneidad de las cargas. ¿Qué nos indica este factor?

En cualquier instalación eléctrica siempre hay una diferencia entre la suma de la potencia instalada y la potencia que se prevé se va a utilizar de una forma simultánea. Hay que pensar que no siempre se van a poner en funcionamiento todos los receptores de la instalación a la vez; por eso conviene realizar un estudio previo de la instalación para averiguar el porcentaje de cargas que se van a utilizar simultáneamente. De esta forma, se dimensionan las instalaciones en función de la potencia máxima que realmente se va a utilizar, consiguiendo con ello un ahorro considerable en el aparellaje eléctrico a utilizar.

En nuestro caso nos indican un factor de simultaneidad de 0,65, que nos indica que se prevé una utilización simultánea de las cargas del 65 % de toda la potencia instalada.

$$S_{\text{transformador}} = 122,2 \cdot 0,65 = 79 \text{ KVA}$$

b) Ahora calculamos la corriente por el primario y por el secundario:

$$I_{L \text{ secund. del transf.}} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{c \text{ secund.}}} = \frac{79.000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 120 \text{ A}$$

Para calcular la corriente por el primario del transformador aplicamos la misma expresión, pero teniendo en cuenta que la potencia aparente se mantiene igual y que la tensión en el primario es de 10 KV.

$$I_{L \text{ prim. del transf.}} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{c \text{ prim.}}} = \frac{79.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000} = 4,56 \text{ A}$$

c) Calculamos ahora la sección de la línea

$$\Delta V = \frac{380}{100} \cdot 5 \% = 19 \text{ V}$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \rho L I_L \cos \varphi}{\Delta V} =$$

$$\frac{\sqrt{3} \cdot 0,017 \cdot 125 \cdot 120 \cdot 0,9}{19} = 20,9 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 25 mm<sup>2</sup>.

Consultando en la Tabla 4.2, la intensidad máxima admisible para un cable de 25 mm<sup>2</sup> 3x XLPE (cables multiconductores al aire libre) es de 116 A. La solución será seleccionar una sección superior = 35 mm<sup>2</sup> que admite una intensidad de 144 A.

## Actividades

1. Mediante un sencillo montaje vamos a comprobar experimentalmente las relaciones existentes entre las corrientes de línea y de fase, así como la validez de las expresiones generales de potencia trifásica.

Consigue tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en triángulo a una red trifásica de 230 V entre fases. Conecta un amperímetro en una de las líneas ( $A_L$ ) y otro en una de las lámparas ( $A_f$ ) con el objeto de medir la intensidad de línea y de fase respectivamente. Conecta también un voltímetro entre fases para comprobar el valor de la tensión compuesta (Figura 15.25).

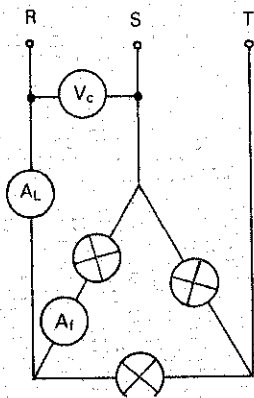


Figura 15.25

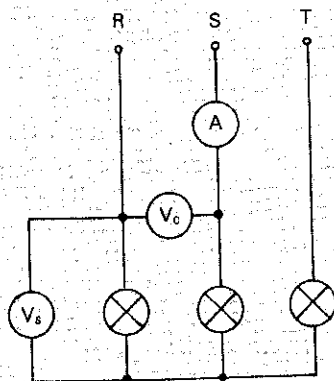


Figura 15.26

Con los datos obtenidos comprueba si:

$$A_L / A_f = \dots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi = \dots = 3 \cdot 60 \text{ W} = 3 V_c I_f \cos \varphi$$

(para las lámparas incandescentes se toma un  $\cos \varphi = 1$ .)

Ahora consigue tres lámparas incandescentes de 60 W a 127 V y conéctalas en estrella a una red trifásica de 220 V entre fases. Conecta un voltímetro entre las fases ( $V_c$ ) y otro entre los bornes de una de las lámparas ( $V_s$ ) con el objeto de medir la tensión compuesta y simple, respectivamente. Conecta también un amperímetro (A) en una de las líneas para comprobar el valor de la corriente de línea y de fase (Figura 15.26).

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$V_c / V_s = \dots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi = \dots = 3 \cdot 60 \text{ W} = 3 V_s I_f \cos \varphi$$

Desconecta una de las lámparas. ¿Qué ocurre? ¿y si desconectamos dos?

¿Ocurriría lo mismo si conectásemos el neutro al punto común de la estrella?

2. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

## Autoevaluación

- 1) ¿Qué ventajas presenta el alternador conectado en estrella frente al conectado en triángulo?
  - a)  Presenta un mejor rendimiento
  - b)  Disponibilidad del conductor neutro y posibilidad de puesta a tierra del mismo
  - c)  Reduce considerablemente la distorsión en las tensiones de fase
- 2) En una carga trifásica conectada en triángulo:
  - a)  La tensión de fase es igual que la de línea
  - b)  La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea
  - c)  La corriente de línea es igual que la de fase
- 3) En una carga conectada en estrella:
  - a)  La tensión de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea
  - b)  La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea
  - c)  La corriente de fase es igual que la de línea
- 4) ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de fase de un alternador?
  - a)   $30^\circ$
  - b)   $90^\circ$
  - c)   $120^\circ$
- 5) ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de línea y de fase que proporciona un alternador conectado en estrella?
  - a)   $30^\circ$
  - b)   $90^\circ$
  - c)   $120^\circ$
- 6) En un sistema trifásico con carga equilibrada se mide una intensidad en la línea de 30 A con un factor de potencia de 0,75. Si la tensión entre fases es 230 V, averiguar las potencias de la carga.
- 7) En un sistema trifásico con carga equilibrada a tres hilos se mide una potencia en la línea de 36 KW, una intensidad de 97,4 A y una tensión de 225 V. Averiguar el factor de potencia de la carga.
- 8) Una instalación industrial de 50 KW, con un factor de potencia de 0,65, se alimenta a través de un transformador trifásico con una tensión en el primario entre fases de 24 KV y de 400 V en el secundario. Averiguar:
  - a) la potencia nominal del transformador en KVA, así como la corriente por el primario y el secundario;
  - b) nuevas características del transformador si se corrige el FP de la instalación a 0,98 mediante una batería automática de condensadores conectada en el lado de baja tensión.
- 9) Un aparato de calefacción trifásico consta de tres resistencias de  $10 \Omega$  conectadas en estrella. Determinar la potencia que desarrollarán cuando se les aplique 230 V entre fases, así como la corriente de fase y de línea.
- 10) ¿Y si conectamos en triángulo las mismas resistencias que en el ejercicio anterior?
- 11) Un motor trifásico de 3.990 W,  $\cos \varphi = 0,65$  se conecta a una red de 380 V, 50 Hz. Se trata de averiguar la corriente de línea y de cada fase del motor cuando está conectado en triángulo, así como su potencia reactiva y aparente. ¿Si a cada una de las fases del motor se le puede considerar como una inductancia en serie con una resistencia óhmica, determinar los valores de las mismas?
- 12) Se conectan en triángulo tres bobinas iguales de  $16 \Omega$  de resistencia óhmica y 0,2 H de coeficiente de autoinducción cada una. Si se conectan a un sistema trifásico de 240 V entre fases y 50 Hz, determinar: a) corriente por cada fase y por la línea; b) la potencia activa y el FP de la carga trifásica.
- 13) Un motor trifásico conectado a 400 V consume 56 A. Su potencia es de 29,4 KW. Determinar el factor de potencia, potencia reactiva y aparente.
- 14) Una red trifásica alimenta tres motores monofásicos de inducción de 5 CV,  $\cos \varphi = 0,78$ , 220 V cada uno, conectados entre cada fase y el neutro. Determinar la corriente por la línea y por el neutro, así como la potencia reactiva que deberá poseer la batería de condensadores para corregir el FP a 0,9.
- 15) Una empresa demanda una potencia de 700 KVA a 10 KV en corriente alterna trifásica. Las lecturas del consumo en dos meses son para el contador de activa de 205.000 KWh y para el de reactiva de 150.000 KVARh. Calcular: a) el FP medio en dicho período de facturación; b) intensidad por la línea; c) característica de batería de condensadores conectados en estrella para mejorar el FP hasta 0,93; d) porcentaje de reducción de la corriente de línea al conectar la batería de condensadores.
- 16) Una línea trifásica con neutro alimenta la instalación eléctrica de una nave de industria pesada comercial. Las cargas, que se conectan de una forma equilibrada son las siguientes: (1) motor trifásico de 50 KW, 240 V,  $\cos \varphi = 0,8$ ; (2) motor trifásico de 40 KW, 240 V,  $\cos \varphi = 0,85$ ; (3) 375 lámparas incandescentes de 40 W, 240 V; (4) 250 lámparas fluorescentes de 40 W,  $\cos \varphi = 0,9$ . Determinar las potencias, el FP y la intensidad de línea de el conjunto de la instalación.
- 17) En la Figura 15.27 se muestra el esquema general de distribución de una instalación industrial.

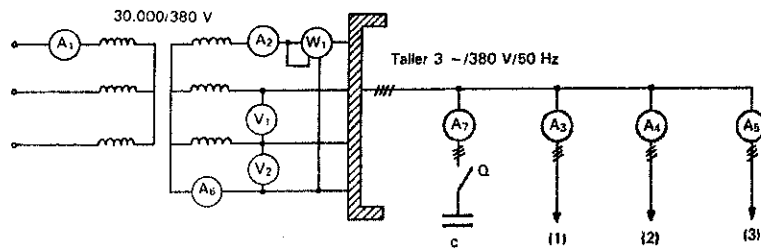


Figura 15.27

- Seguidamente se indican las cargas que alimentan cada uno de los circuitos: (1) motor trifásico de 8.660 W, 380 V/220 V,  $\cos \varphi = 0,75$ ; (2) 30 lámparas de vapor de mercurio de 250 W, 380 V,  $\cos \varphi = 0,6$  cada una; (3) 90 lámparas incandescentes de 60 W, 220 V cada una. Con estos datos averiguar: a) lectura de los aparatos de medida con el interruptor Q de la batería de condensadores abierto; b) características de la batería de condensadores conectados en triángulo para mejorar el FP a 0,95; c) lectura de los aparatos de medida con el interruptor cerrado (condensadores conectados).
- 18) La línea general de alimentación en las instalaciones eléctricas de edificios destinados a viviendas, es la línea que une la Caja General de Protección con la centralización de contadores que alimenta. Según el REBT la caída de tensión máxima que se admite para estas líneas es del

0,5% para contadores totalmente concentrados. Según estos datos, calcular la sección de los conductores de la línea general de alimentación de un edificio de viviendas en el que se prevé una demanda de potencia de 100 KW con un  $\cos \varphi = 0,9$ . La línea es trifásica a 400 V entre fases y con una longitud de 15 m; consta de 3 cables unipolares de cobre más el neutro de XLPE instalados bajo tubo.

- 19) Para la acometida de una pequeña factoría se ha instalado una línea trifásica de 200 m de longitud y con una sección de  $35 \text{ mm}^2$ . La tensión entre fases es de 500 V y la potencia instalada es de 50 KW con un  $\cos \varphi = 0,7$ . Determinar el valor porcentual de la caída de tensión que produce esta línea, así como la pérdida de potencia. ¿Cuánto se reducirá la pérdida de potencia en la línea si se corrige el FP a 0,95?