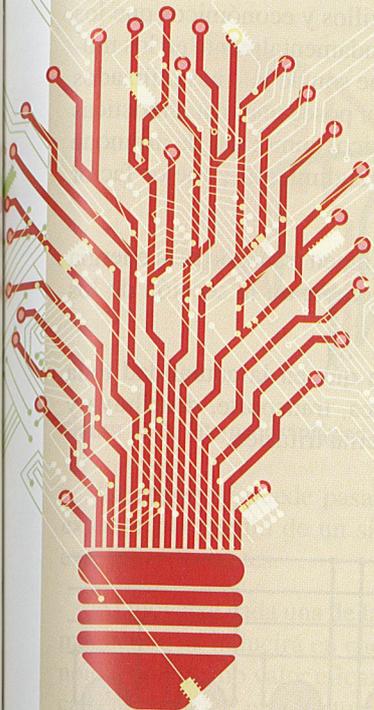


# 15

## Sistemas trifásicos



### Contenidos

- 15.1. Ventajas del uso de sistemas trifásicos
- 15.2. Generación de un sistema de C.A. trifásica
- 15.3. Conexión de los receptores
- 15.4. Corrección del factor de potencia
- 15.5. Instalaciones trifásicas de varios receptores
- 15.6. Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A.
- 15.7. Cálculo de la sección de conductores en líneas con varios receptores según el REBT
- 15.8. Componentes armónicas en C.A.

### 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, etcétera.

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.

### 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), 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.

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 (Figura 15.2).

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 que expondremos a continuación:

Tanto los alternadores como los 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 son de los más utilizados en el sector industrial. Este motor posee unas características mucho mejores que el monofásico, como: 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.

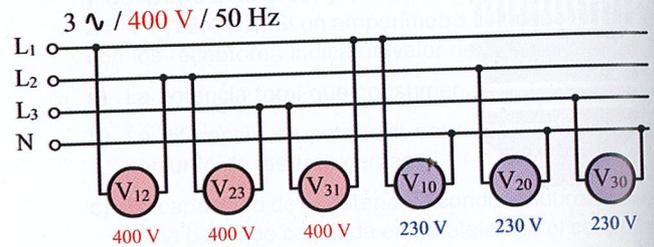


Figura 15.2. Red trifásica de 400/230 V.

### 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 15.3). Estas espiras se sitúan repartidas equitativamente sobre un núcleo cilíndrico de chapas de hierro, es decir, cada:

$$\frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$$

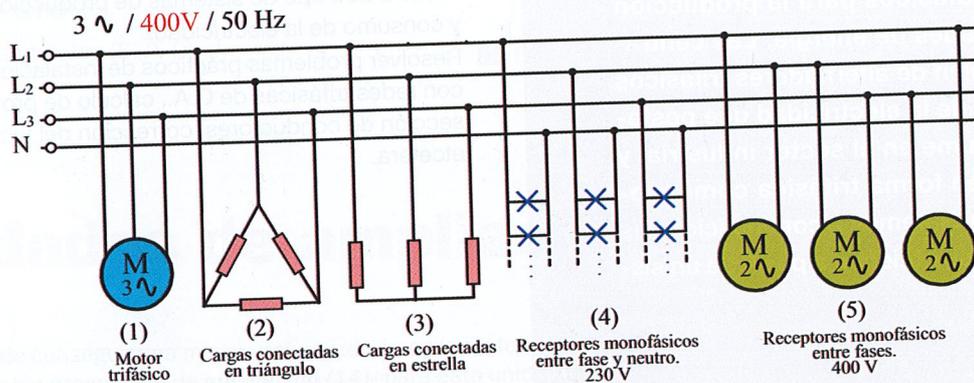


Figura 15.1. Receptores conectados a una línea trifásica.

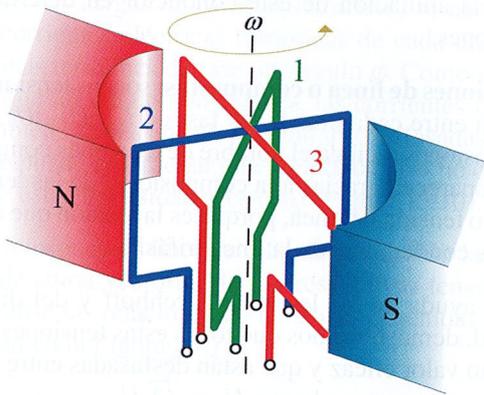


Figura 15.3. Alternador trifásico elemental.

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

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 situada 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 15.4 se muestran los diagramas vectoriales pertenecientes a estas fuerzas electromotrices.

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.

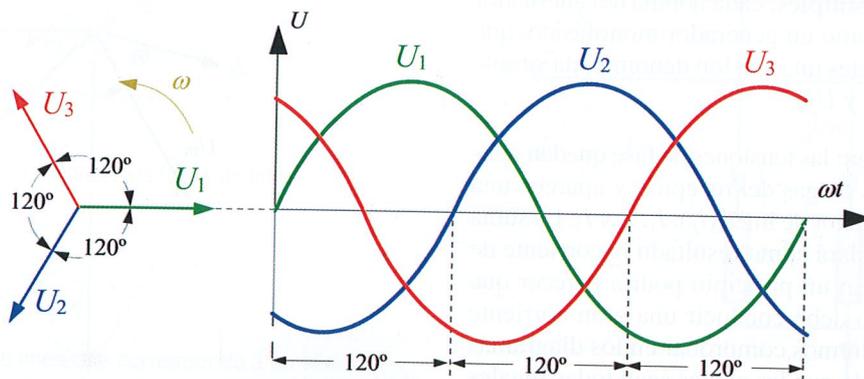


Figura 15.4. Diagrama vectorial de las fuerzas electromotrices generadas por un alternador trifásico.

En los alternadores modernos se sitúan las tres bobinas en el estator, con lo que se evita el complejo sistema de anillos colectores para la extracción de la gran energía eléctrica que se produce en las bobinas (las tensiones son del orden de los 10 a 20 kV y las corrientes de hasta cientos de amperios) (Figura 15.5).

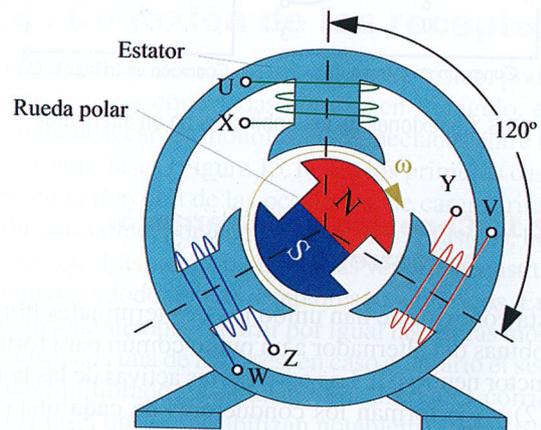


Figura 15.5. Alternador trifásico con campo magnético inductor móvil.

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 ellas las tres f.e.m. desfasadas entre sí  $120^\circ$ .

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 15.6).

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.

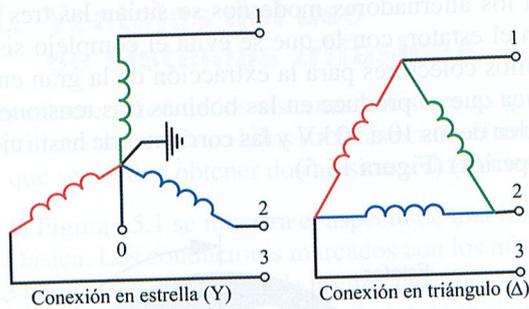


Figura 15.6. Conexiones de los bobinados de un alternador.

### 15.2.1. Conexión del alternador en estrella

En esta conexión se han unido los tres terminales libres de las bobinas del alternador a un punto común para formar 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 óhmicas inductivas ( $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$ ) conectadas entre sí en estrella, tal como se muestra en la Figura 15.7.

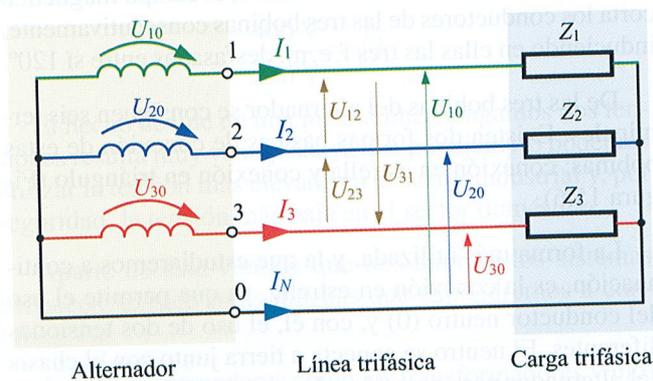


Figura 15.7. Tensiones y corrientes en un alternador en estrella.

**Tensiones de fase o simples:** cada bobina del alternador trifásico se comporta como un generador monofásico, que genera entre sus terminales una tensión denominada simple o de fase ( $U_f$ ):  $U_{10}$ ,  $U_{20}$  y  $U_{30}$ .

**Intensidades de línea:** las tensiones de fase quedan aplicadas a cada una de las cargas del receptor, y aparece 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 de línea o compuestas:** son las tensiones que aparecen entre cada una de las fases ( $U_L$ ):  $U_{12}$ ,  $U_{23}$  y  $U_{31}$ . Estas tensiones reciben el nombre de tensiones compuestas porque aparecen gracias a la composición de las tensiones de fase, o tensión de línea, porque es la tensión que aparece entre los conductores de la línea trifásica.

Con ayuda de las leyes de Kirchhoff y del diagrama vectorial, demostraremos que todas estas tensiones poseen el mismo valor eficaz y que están desfasadas entre sí  $120^\circ$ , así como que se cumple que  $U_L = \sqrt{3} U_f$ .

Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a cada una de las mallas que se forman entre las tensiones de fase y las de línea, tendremos que (Figura 15.8):

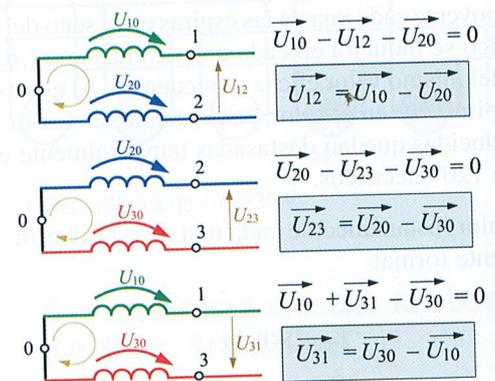


Figura 15.8. Obtención de las tensiones de línea.

Ahora dibujamos el diagrama vectorial (Figura 15.9) con las tensiones de fase desfasadas unas de otras  $120^\circ$ .

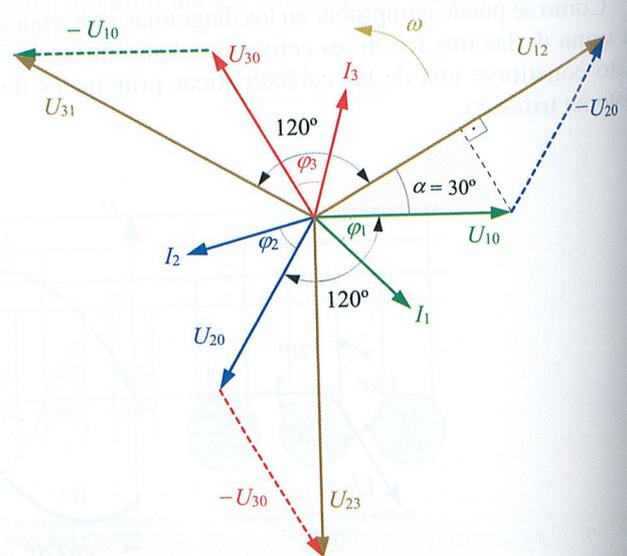
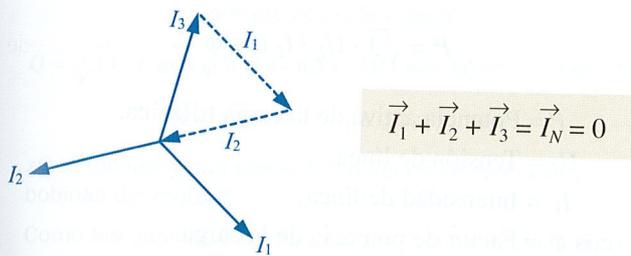


Figura 15.9. Diagrama vectorial de tensiones e intensidades.



Al ser las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes eléctricas retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones de fase un ángulo  $\varphi$ . Como se ha supuesto que las cargas son iguales, las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  son también iguales en valor modular y desfasadas entre sí  $120^\circ$ . Se puede comprobar con facilidad el hecho de que la suma de estas intensidades es cero (Figura 15.10).



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

**Figura 15.10.** La suma vectorial de las corrientes de un sistema equilibrado es igual a cero.

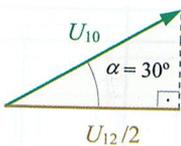
Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las tensiones de fase y las de línea es de  $30^\circ$  (aparece un triángulo isósceles donde  $\alpha = \beta$ ; en el triángulo se cumple que  $180^\circ = \alpha + \beta + 120^\circ$ , de donde se deduce que  $\alpha = 30^\circ$ ). Aprovechando esta relación y por simple trigonometría determinaremos la relación que existe entre las tensiones de fase y las de línea (Figura 15.11).

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

$$U_{12} = 2U_{10} \sqrt{3}/2 = U_{10} \sqrt{3}$$

en conclusión:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_f$$



**Figura 15.11.** Relación entre tensiones de fase y de línea.

### Actividad resuelta 15.1

Determina la tensión de línea que corresponde a un sistema trifásico que posee una tensión de fase de 133 V.

**Solución:**

$$U_L = \sqrt{3} U_f = \sqrt{3} \cdot 133 = 230 \text{ V}$$

$\Rightarrow$  ¿y para  $U_f = 230 \text{ V}$ ?  $U_L = \dots$

## 15.3. Conexión de los receptores

Una vez que disponemos de un sistema trifásico, podemos conectarle cargas conectadas entre sí en triángulo, en estrella, o incluso cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro o entre fases (Figura 15.1). En los primeros casos se tratará, en la mayoría de las ocasiones, de cargas trifásicas equilibradas como, por ejemplo, motores trifásicos, hornos trifásicos, etc. Las cargas monofásicas vendrían 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:

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

$P$  = Potencia activa de la carga trifásica.

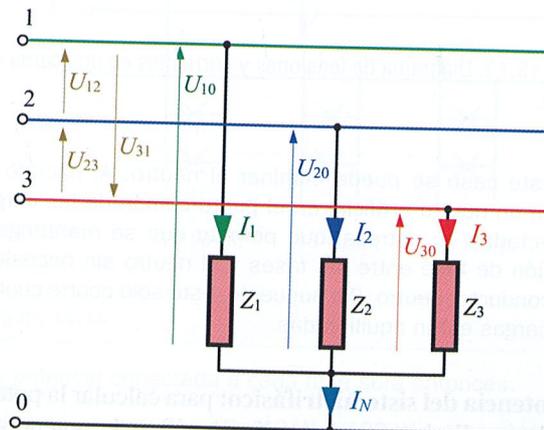
$U_L$  = Tensión de línea.

$I_L$  = Intensidad de línea.

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

### 15.3.1. Carga equilibrada en estrella

En la Figura 15.12 se puede apreciar un receptor trifásico con tres cargas conectadas en estrella.



**Figura 15.12.** Carga equilibrada en estrella.

## 15. SISTEMAS TRIFÁSICOS

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_1 \angle \varphi_1 = Z_2 \angle \varphi_2 = Z_3 \angle \varphi_3 = Z \angle \varphi$$

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

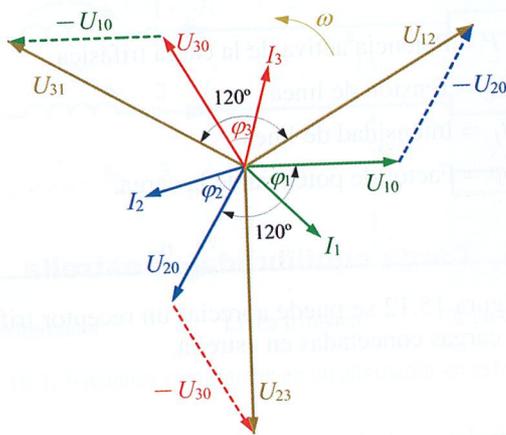
$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{U}_{10}}{Z_1 \angle \varphi_1} \quad \vec{I}_2 = \frac{\vec{U}_{20}}{Z_2 \angle \varphi_2} \quad \vec{I}_3 = \frac{\vec{U}_{30}}{Z_3 \angle \varphi_3}$$

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

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

Como se podrá apreciar, al igual que ocurría con el alternador conectado en estrella (Figura 15.10), en el diagrama vectorial de la Figura 15.13, correspondiente a las magnitudes de una carga equilibrada en estrella, se cumple que:

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



**Figura 15.13.** 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 de fase entre las fases y el neutro sin necesidad del conductor neutro. Por supuesto, esto solo 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:

$$P = U_{10} I_1 \cos \varphi_1 + U_{20} I_2 \cos \varphi_2 + U_{30} I_3 \cos \varphi_3$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones de fase, 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), por lo que se puede afirmar que:

$$P = 3U_f I_L \cos \varphi$$

como:

$$U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \Rightarrow P = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

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

$P$  = Potencia activa de la carga trifásica.

$U_L$  = Tensión de línea.

$I_L$  = Intensidad de línea.

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

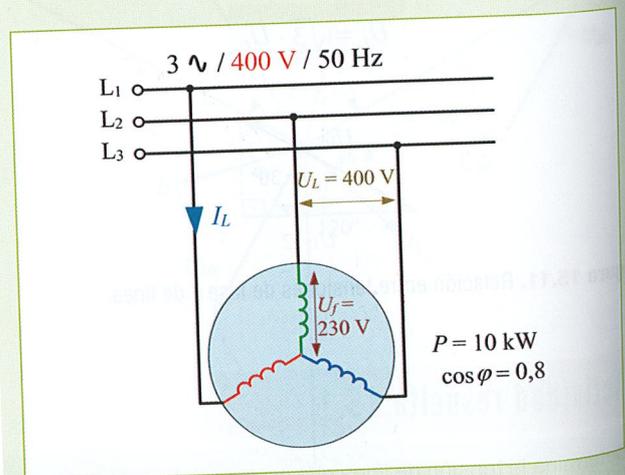
Para el cálculo de la potencia reactiva y aparente, el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \sin \varphi$$

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

### Actividad resuelta 15.2

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en estrella. Determina la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red con una tensión de línea de 400 V desarrolla una potencia de 10 kW con un FP de 0,8. Averigua la potencia reactiva y aparente del motor (véase circuito equivalente en la Figura 15.14).



**Figura 15.14.**



**Solución:**

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

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

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

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

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

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

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

¿Qué tensión y qué corriente aparecen 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 de fase, es decir:

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

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

**Actividad resuelta 15.3**

Se conectan en estrella tres bobinas iguales a una red trifásica con una tensión de línea de 230 V, 50 Hz. Cada una de las bobinas posee 10 Ω de resistencia óhmica y 30 Ω de reactancia inductiva (Figura 15.15). Calcula:  $I_L$ ,  $\cos \varphi$ ,  $P$ ,  $Q$  y  $S$ .

**Solución:**

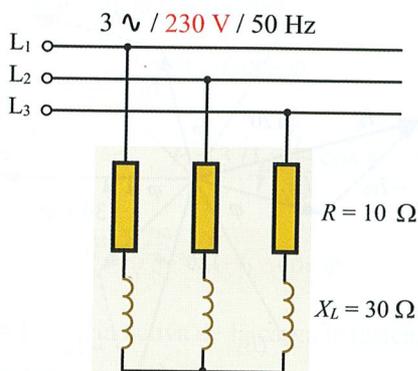


Figura 15.15.

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

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

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

$$I_L = \frac{U_f}{Z} = \frac{132,8}{31,6} = 4,2 \text{ A}$$

$$(U_f = U_L / \sqrt{3} = 230 / \sqrt{3} = 132,8 \text{ V})$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi = \dots = 528 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi = \dots = 1.588 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} U_L I_L = \dots = 1.673 \text{ VA}$$

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

**Actividad resuelta 15.4**

Se desea conectar a una red trifásica, con neutro y con una tensión de línea de 400 V, 30 lámparas fluorescentes de 40 W, 230 V,  $\cos \varphi = 0,6$ . Muestra la conexión de las lámparas para conseguir que la carga esté equilibrada y averigua 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 de fase ( $U_f = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ V}$ ), se han conectado 3 grupos de 10 lámparas entre cada fase y neutro con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.16).

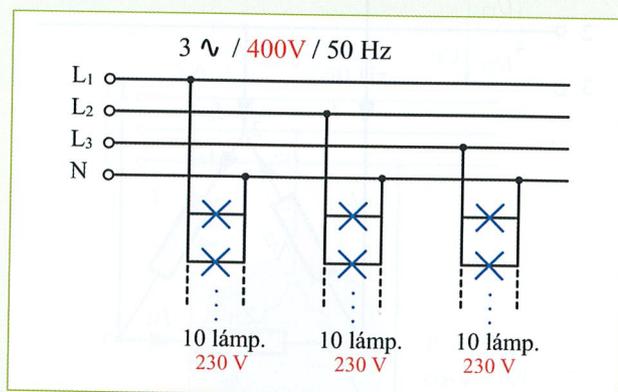


Figura 15.16.

La potencia conectada a cada fase será entonces:

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

## 15. SISTEMAS TRIFÁSICOS

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:

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

$$\Rightarrow I_L = \frac{P}{\sqrt{3} U_L \cos \varphi} = \frac{1.200}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,6} = 2,87 \text{ A}$$

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

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

$$\Rightarrow I_f = \frac{P'}{U_f \cos \varphi} = \frac{400}{230 \cdot 0,6} = 2,87 \text{ A}$$

¿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 de fase. Ahora bien, en el momento en que alguna lámpara se funda, el sistema se desequilibrará, con la consecuencia de que la tensión de fase no se mantendrá en su valor nominal. La única forma de evitar este hecho es tener siempre conectado el neutro en estos casos.

### 15.3.2. Carga equilibrada en triángulo

Al conectar las cargas en triángulo (Figura 15.17), estas quedan sometidas a cada una de las respectivas tensiones de línea. Por cada una de las cargas aparece una corriente:  $I_{12}$ ,  $I_{23}$  e  $I_{31}$ , que llamaremos **corriente de fase ( $I_f$ )**.

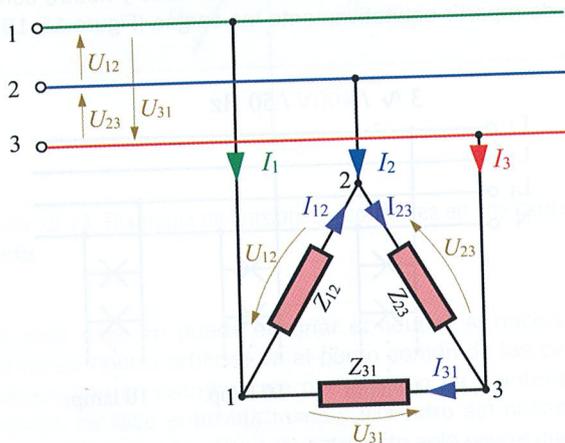


Figura 15.17. Carga equilibrada en triángulo.

Como el sistema es equilibrado:

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

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

$$\vec{I}_{12} = \frac{\vec{U}_{12}}{Z_{12} \angle \varphi_{12}}$$

$$\vec{I}_{23} = \frac{\vec{U}_{23}}{Z_{23} \angle \varphi_{23}}$$

$$\vec{I}_{31} = \frac{\vec{U}_{31}}{Z_{31} \angle \varphi_{31}}$$

Como las tensiones de línea 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 de línea. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las corrientes 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 se corresponden con las corrientes 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 de línea desfasadas entre sí  $120^\circ$  (Figura 15.18). Al suponer las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes de fase retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones de línea un ángulo  $\varphi$ .

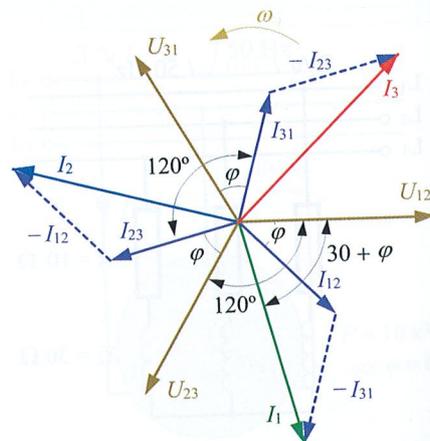


Figura 15.18. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en triángulo.



Las corrientes de línea se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas intensidades de fase (véanse las relaciones obtenidas antes en los nudos).

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 15.19).

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

$$I_L = 2 I_f \sqrt{3}/2 = I_f \sqrt{3}$$

en conclusión:

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

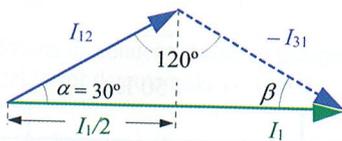


Figura 15.19. Relación entre las corrientes de fase y de línea.

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

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

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

$$P = 3 U_L I_f \cos \varphi$$

como:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \Rightarrow P = 3 U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi \Rightarrow$$

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

$P$  = Potencia activa de la carga trifásica.

$U_L$  = Tensión de línea.

$I_L$  = 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, por lo que se cumple que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$

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

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.

### Actividad resuelta 15.5

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en triángulo. Determina 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. Averigua la potencia reactiva y aparente del motor.

#### Solución:

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

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

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

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi = \dots = 15.345 \text{ VAR}$$

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

¿Qué tensión y qué corriente aparecen en cada una de las bobinas del motor? (Figura 15.20).

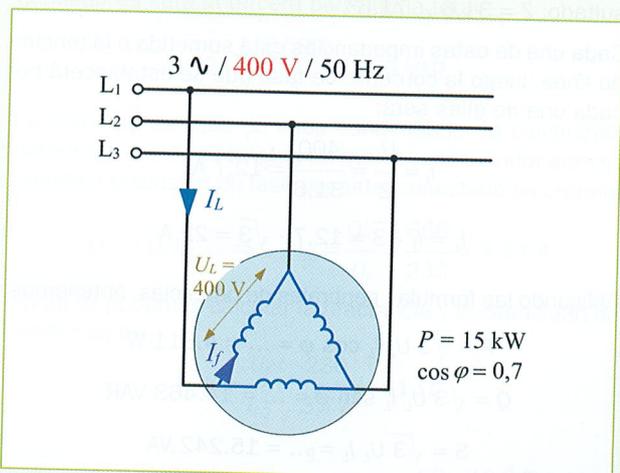


Figura 15.20.

## 15. SISTEMAS TRIFÁSICOS

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

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

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

### Actividad resuelta 15.6

Se conectan en triángulo las tres bobinas de la Actividad resuelta 15.3 a una red trifásica de 400 V, 50 Hz (Figura 15.21). Calcula:  $I_f$ ,  $I_L$ ,  $\cos \varphi$ ,  $P$ ,  $Q$  y  $S$ .

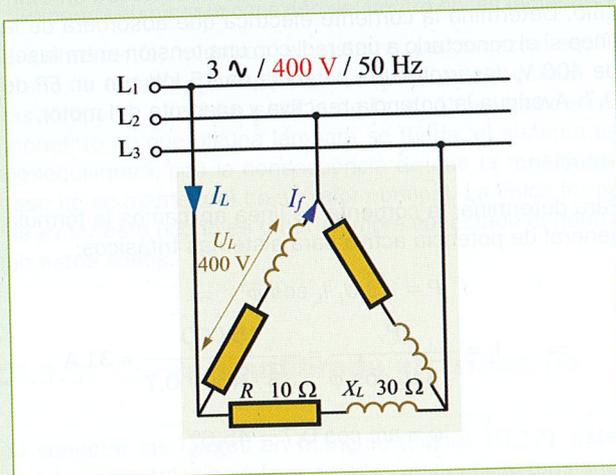


Figura 15.21.

#### Solución:

Al calcular la impedancia correspondiente a cada una de las cargas, en la Actividad resuelta 15.3, obtuvimos el resultado:  $Z = 31,6 \angle 71,6^\circ$ .

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

$$I_f = \frac{U_L}{Z} = \frac{400}{31,6} = 12,7 \text{ A}$$

$$I_L = I_f \sqrt{3} = 12,7 \cdot \sqrt{3} = 22 \text{ A}$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

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

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi = \dots = 14.463 \text{ VAR}$$

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

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

### Actividad resuelta 15.7

Se desea conectar 60 lámparas incandescentes de 100 W, 230 V, a una red trifásica con una tensión de línea de 230 V. Muestra la conexión de las lámparas para conseguir que la carga esté equilibrada, y averigua 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 de línea, se han conectado 3 grupos de 20 lámparas entre cada dos fases con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.22).

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:

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

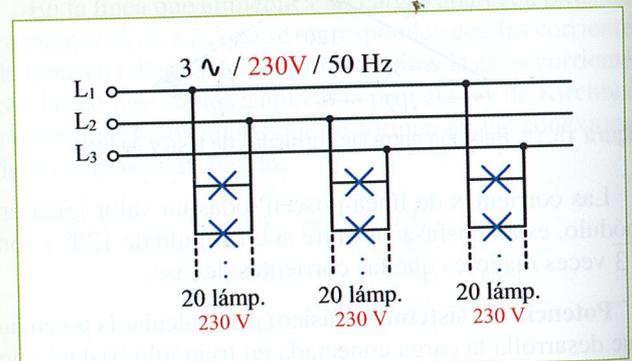


Figura 15.22.

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

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} U_L \cos \varphi} = \frac{6.000}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 1} = 15,1 \text{ A}$$

(Las lámparas incandescentes se consideran receptores resistivos puros  $\Rightarrow \cos \varphi = 1$ ).

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

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

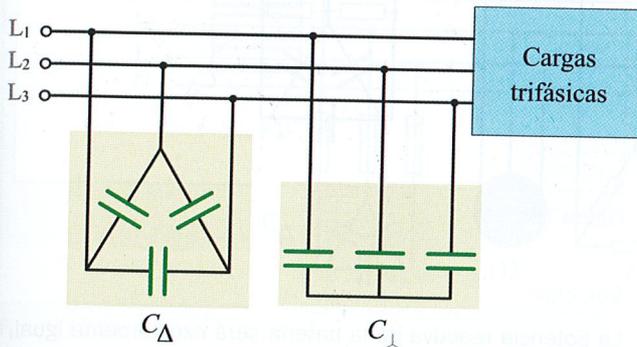
$$\Rightarrow I_f = \frac{P'}{U_f \cos \varphi} = \frac{2.000}{230 \cdot 1} = 8,7 \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 8,7 = 15,1 \text{ VA}$$



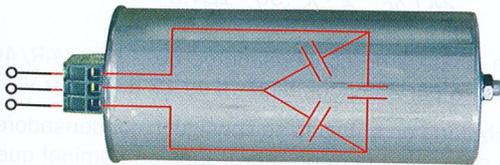
## 15.4. Corrección del factor de potencia

Por las mismas razones por las 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 (Figura 15.23).



**Figura 15.23.** Batería de condensadores en triángulo y en estrella para la mejora del factor de potencia.

La forma más habitual de compensar la energía reactiva es mediante baterías automáticas trifásicas de condensadores (véase la Figura 13.37 en la Unidad 13). En la práctica, lo habitual es montar los tres condensadores, conectados en estrella o triángulo, dentro de una misma envolvente; de esta forma surge lo que se conoce por el nombre de condensadores trifásicos para la mejora del factor de potencia (Figura 15.24).



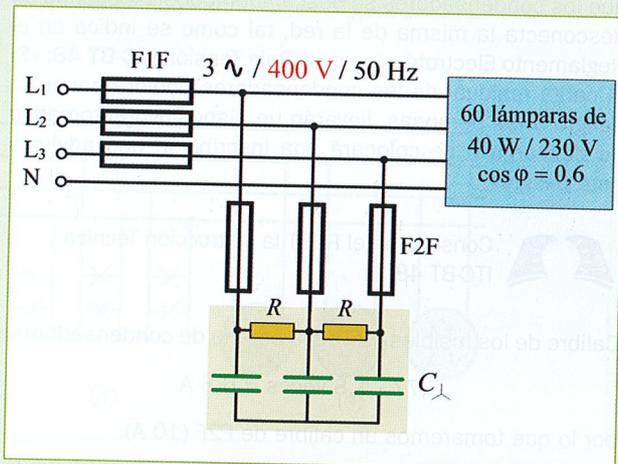
**Figura 15.24.** Condensador trifásico compuesto por tres condensadores conectados en triángulo.

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 que conectemos las baterías en estrella o en triángulo cambiarán algunas de sus características.

### Actividad resuelta 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 conec-

tado de forma equilibrada a una red trifásica de 400 V de tensión de línea (Figura 15.25). Dimensiona 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 15.25.**

Averigua 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:

$$Q'_c = \frac{2.598}{3} = 866 \text{ VAR}$$

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:

$$Q'_c = U_f I_{fc} \Rightarrow I_{fc} = \frac{Q'_c}{U_f} = \frac{866}{230} = 3,77 \text{ A}$$

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

$$X_c = \frac{U_f}{I_{fc}} = \frac{230}{3,77} = 61 \Omega$$

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

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, tal como se indica en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión **ITC-BT 48**: «Si la carga residual de los condensadores pudiera poner en peligro a las personas, llevarán un dispositivo automático de descarga o se colocará una inscripción que advierta este peligro».



Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 48.

Calibre de los fusibles F2F de la batería de condensadores:

$$3,77 \cdot 1,8 \text{ veces} = 6,8 \text{ A}$$

por lo que tomaremos un calibre de F2F (10 A).

Calibre de los fusibles generales de línea F1F que alimenta a las lámparas de descarga:

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

Calibre de los fusibles F1F =  $1,8 I_L = 1,8 \cdot 5,8 = 10,4 \text{ A}$ , por lo que tomaremos un calibre de F2F (16 A).

**Nota:** El factor de multiplicación de 1,8 veces se debe a la recomendación que se da en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión para evitar la desconexión intempestiva de las protecciones por la punta de conexión de las lámparas de descarga. **ITC-BT 44**: «Para receptores con lámparas de descarga, la carga mínima prevista en voltiamperios será de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas».



Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 44.

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

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

Se ha conseguido una reducción de corriente del:

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

### Actividad resuelta 15.9

Determina las características de la batería de condensadores en triángulo que sería necesario conectar para corregir el FP de la Actividad resuelta 15.8 (Figura 15.26).

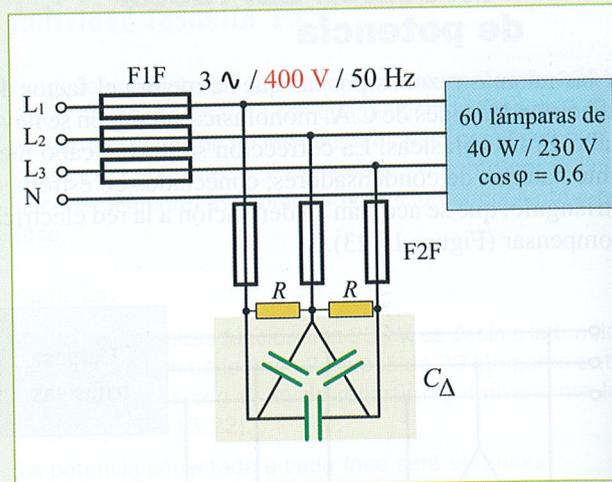


Figura 15.26.

#### Solución:

La potencia reactiva de la batería será exactamente igual, incluso la corriente de la línea que alimenta a la batería. 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 de línea) y, por consiguiente, se verá afectada la capacidad de cada uno de ellos.

$$I_{rc} = \frac{Q_C}{U_L} = \frac{866}{400} = 2,17 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U_L}{I_{rc}} = \frac{400}{2,17} = 184,3 \Omega$$

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

Batería trifásica de condensadores de 2.598 VAR/400 V compuesta por 3 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.

## 15.5. Instalaciones trifásicas de varios receptores

Al igual que se procedía en el cálculo 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. Para ello, primero se calcula la potencia activa y reactiva de todas las cargas y con estos datos se procede a obtener la potencia aparente total, así como el FP del conjunto y la intensidad.



### Actividad resuelta 15.10

La instalación eléctrica de un pequeño taller consta de los siguientes receptores, conectados a una línea trifásica de 400 V de tensión de línea, 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 15.27).

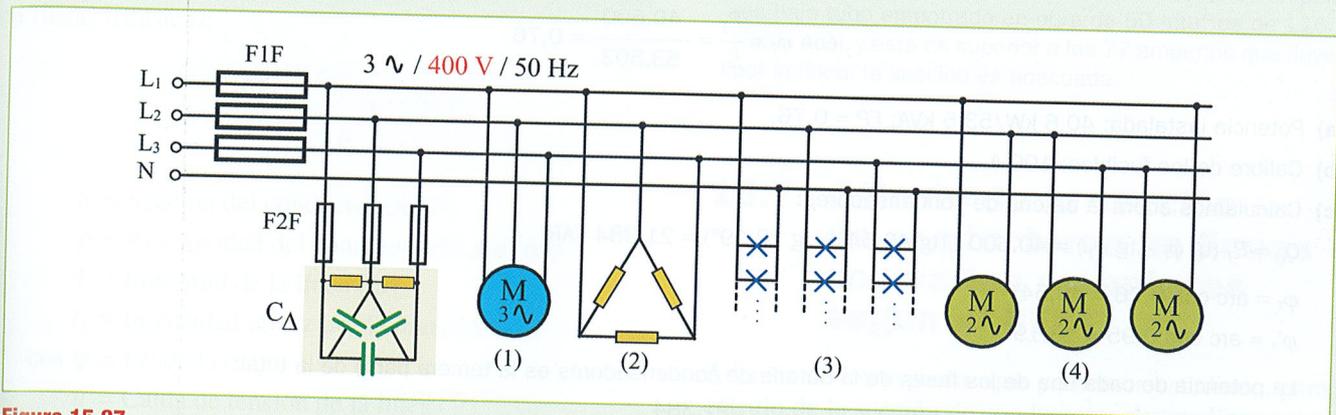


Figura 15.27.

Averigua: **a)** potencia total de la instalación y el FP; **b)** calibre de los fusibles generales de la línea; **c)** características de la batería de condensadores conectada en triángulo para corregir el FP hasta 0,95; **d)** calibre de los fusibles de la batería de condensadores; **e)** 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:

$$I_r = \frac{U_L}{R} = \frac{400}{50} = 8 \text{ A}$$

La potencia es tres veces la de una R.

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

$Q_2 = 0 \text{ VAR}$  (las cargas resistivas no producen potencia reactiva; el factor de potencia es 1)

(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:

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

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

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

$$S_T = \sqrt{3} U_L I_{LT} \Rightarrow I_{LT} = \frac{S_T}{\sqrt{3} U_L} = \frac{53.503}{\sqrt{3} \cdot 400} = 77 \text{ A}$$

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

a) Potencia instalada: 40,6 kW/53,5 kVA; FP = 0,76.

b) Calibre de los fusibles: 100 A.

c) Calculamos ahora la batería de condensadores:

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

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

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

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

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

$$I_{rc} = \frac{Q_C'}{U_L} = \frac{7.128}{400} = 18 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U_L}{I_{rc}} = \frac{400}{18} = 22 \Omega$$

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

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.)

d) 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 1,8 veces para evitar la fusión intempestiva de los fusibles.

$$I_{LC} = \sqrt{3} I_{rc} = \sqrt{3} \cdot 18 = 31 \text{ VA}$$

$$1,8 \cdot 31 = 55,8 \text{ A} \Rightarrow (63 \text{ A})$$

e) Intensidad por la línea con la batería de condensadores conectada:

$$P_T = \sqrt{3} U_L I_{CT} \cos \varphi_T' \Rightarrow I_{LT} = \dots = \dots = 62 \text{ A}$$

## 15.6. 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 ( $u_f = R_L I_L \cos \varphi$ ). Esta tensión se restará a la tensión de fase. La caída de tensión que aparecerá entre las fases de la línea será  $\sqrt{3}$  veces mayor que la de fase ( $u_L = \sqrt{3} U_f$ ), resultando:

$$u = \sqrt{3} \cdot R \cdot I_L \cos \varphi$$

$u$  = Caída de tensión de línea (V).

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

$I_L$  = Intensidad eficaz por la línea.

$\cos \varphi$  = 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:

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

Si sustituimos esta expresión en la de la caída de tensión, podremos obtener la fórmula para el cálculo de la sección en líneas trifásicas:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I_L \cdot \cos \varphi}{u}$$

$S$  = 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).

$\cos \varphi$  = FP de la carga.

$u$  = Caída de tensión de la línea (V).

En el caso de utilizar aquí el concepto de conductividad ( $\gamma$ ) en vez del de resistividad ( $\rho$ ), obtendríamos la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot I_L \cdot L \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot u}$$

$\gamma$  = Conductividad del conductor en función de su temperatura máxima de funcionamiento (norma UNE 20460-5-523).

### Actividad resuelta 15.11

La línea general que alimenta al pequeño taller de la Actividad resuelta 15.10 consta de tres conductores unipolares + neutro de PVC instalados bajo tubo empotrado en obra, y posee una longitud de 150 m. ¿Cuál será la sección más recomendable si se exige que la caída de tensión en la línea no supere el 2 % de la de alimentación?

#### Solución:

Primero calculamos la caída de tensión de la línea en voltios:

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

Ahora calculamos la sección teniendo en cuenta la corriente con el factor de potencia sin mejorar ( $I_L = 77 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0,76$ ).

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L_L \cdot I \cos \varphi}{\gamma_{70^\circ\text{C}} \cdot u} = \frac{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 77 \cdot 0,76}{48 \cdot 8} = 39,6 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es  $50 \text{ mm}^2$ .

**Nota:** La conductividad que se ha tomado es la del conductor de PVC de cobre en unas condiciones de temperatura máxima de operación de  $70^\circ\text{C}$ , tal como se indica en la correspondiente norma UNE.

Como la corriente permitida para tres conductores unipolares bajo tubo empotrado en obra de  $50 \text{ mm}^2$  es de  $116 \text{ A}$  (Tabla 4.3), y esta es superior a los  $77$  amperios que fluyen por la línea, la sección es adecuada.

### 15.7. Cálculo de la sección de conductores en líneas con varios receptores según el REBT

Además de los aspectos que ya hemos estudiado, para el cálculo de la sección de conductores de una línea que alimenta varios receptores el REBT nos apunta las siguientes indicaciones:

**Motores (ITC-BT 47):** cuando existe un solo motor, los conductores deberán estar dimensionados para una intensidad del 125 % a plena carga del motor. En el caso de que existan varios motores, los conductores se dimensionarán para una intensidad no inferior a la suma del 125 % de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga de los demás.

**Lámparas de descarga (ITC-BT 44):** para receptores con lámparas de descarga, la carga mínima prevista en voltiamperios será de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas.

**Conductor neutro:** a pesar de que en un sistema equilibrado, como el de la Actividad resuelta 15.11, la intensidad de la corriente por el neutro es igual a cero, la sección para este conductor será la misma que las de fase, tal como se indica en la instrucción técnica (ITC-BT 19) del REBT: «En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas debidas a cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del conductor neutro será como mínimo igual a la de las fases».



Consulta en el REBT las Instrucciones Técnicas ITC-BT 47, ITC-BT 4 y la ITC-BT 19.

### Actividad resuelta 15.2

Calcula la sección de los conductores de la línea de la Actividad resuelta 15.11 teniendo en cuenta las Instrucciones Técnicas del REBT mencionadas.

**Solución:**

En el caso de los motores se aplica el 125 % para el motor de más potencia:

$$(1) P_1 = 1,25 \cdot 10.000 = 12.500 \text{ W}$$

$$Q_1 = 1,25 \cdot 8.819 = 11.024 \text{ VAR}$$

Para las lámparas de descarga se aplica el coeficiente de 1,8 veces la potencia:

$$(3) P_3 = 1,8 \cdot 15.000 = 27.000 \text{ W}$$

$$Q_3 = 1,8 \cdot 19.995 = 35.991 \text{ VAR}$$

Ahora sumamos las potencias con los nuevos valores:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 12.500 + 9.600 + 27.000 + 6.000 = 55.100 \text{ W}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 11.024 + 0 + 35.991 + 6.121 = 53.136 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{55.100^2 + 53.136^2} = 76.547 \text{ VA}$$

$$I_{LT} = \frac{S_T}{\sqrt{3} U_L} = \frac{76.547}{\sqrt{3} \cdot 400} = 110,5 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{55.100}{76.547} = 0,72$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L_L \cdot I \cdot \cos \varphi}{\gamma_{70^\circ \text{C}} u} = \frac{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 110,5 \cdot 0,72}{48 \cdot 8} = 53,8 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es 70 mm<sup>2</sup>.

Como la corriente permitida para tres conductores unipolares bajo tubo empotrado en obra de 70 mm<sup>2</sup> es de 148 A (Tabla 4.3), y esta es superior a los 110,5 amperios que fluyen por la línea, damos por válido este resultado.

### Actividad propuesta 15.1

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 transformador es de 10.000 V y en el secundario, de 400 V a 50 Hz. En la Figura 15.28 se muestra 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, 400 V; (calefacción) 9 calefactores monofásicos de 2 kW, 400 V; (taller A) 20 kW, 400 V,  $\cos \varphi = 0,8$ ; (taller B) 30 kW, 400 V,  $\cos \varphi = 0,85$ ; (soldadura) 8 kW, 400 V,  $\cos \varphi = 0,9$ ; (depuradora) motor trifásico de 5 kW, 690/400 V,  $\cos \varphi = 0,9$ ; (servicios auxiliares) 3 kW,

$\cos \varphi = 0,85$ , 400 V; (aluminado) (1) 30 lámparas de vapor de mercurio de 400 W, 230 V,  $\cos \varphi = 0,72$ ; (2) 60 lámparas fluorescentes de 40 W, 230 V,  $\cos \varphi = 0,9$ ; (3) 15 lámparas incandescentes de 60 W/230V.

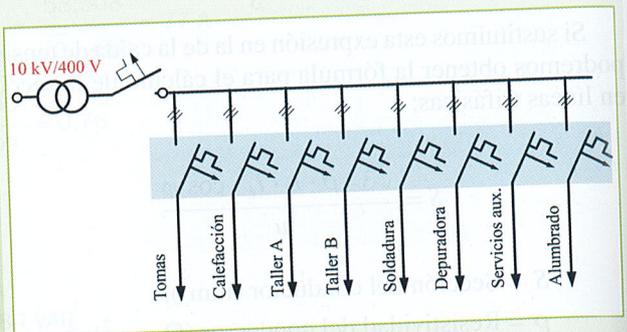


Figura 15.28.

Con estos datos: **a)** calcula 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)** determina la corriente prevista por el primario y por el secundario de dicho transformador; **c)** averigua la sección de los conductores de la línea general si se prevé una caída de tensión máxima admisible del 5 %.

### Actividad propuesta 15.2

La línea general de alimentación (LGA) de un edificio conecta la caja general de protección (CGP) con el cuarto de contadores (véase la Figura 4.8 de la Unidad 4). Se trata de calcular la sección de los conductores de la línea trifásica correspondientes a la LGA de un edificio de viviendas alimentado a 400 V y que consta de:

- 16 viviendas con un total de 88 kW y un  $\cos \varphi = 0,8$  (coeficiente de simultaneidad ya aplicado).
- 2 locales comerciales con una potencia prevista de 12 kW y  $\cos \varphi = 0,8$ .

Para los servicios generales del edificio:

- 150 lámparas incandescentes de 60 W para el alumbrado de escalera.
- 20 tubos fluorescentes de alto factor 40 W y  $\cos \varphi = 0,8$  para alumbrado de portal.
- 1 ascensor de 3 kW y  $\cos \varphi = 0,8$ .
- 1 montacargas de 7 kW y  $\cos \varphi = 0,85$ .
- 2 grupos de presión de 4 kW cada uno y  $\cos \varphi = 0,8$ .
- Garaje compuesto por 200 tubos fluorescentes de 20 W y  $\cos \varphi = 0,8$ .

La línea general de alimentación tiene una longitud de 25 metros y está compuesta por tres cables unipolares + neutro de XLPE instalados bajo tubo empotrado en obra. Los contadores de energía están totalmente con-



centrados, por lo que la caída de tensión máxima que se admite según el REBT es del 0,5 %.

**Nota:** Dado que todas las cargas poseen practicante el mismo factor de potencia de 0,8, se sugiere utilizar el mismo factor de potencia para el cálculo de la previsión de la carga total del edificio, lo que simplifica bastante los cálculos. Esto no afectará significativamente al resultado final del cálculo de la sección. Por otro lado, hay que pensar que en este tipo de instalaciones se está realizando una estimación de la potencia prevista, por lo que en la práctica también se realiza una estimación aproximada del factor de potencia, siempre y cuando los factores de potencia de las diferentes cargas sean similares. En relación con el cómputo de las potencias de las lámparas de descarga y motores se sugiere consultar las Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-BT 44 e ITC-BT 47 del REBT.



La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

## 15.8. Componentes armónicas en C.A.

Las tensiones senoidales que generan las centrales eléctricas son prácticamente puras; sin embargo, estas sufren alteraciones en las líneas de alimentación de los usuarios que hacen que aparezcan componentes de alta frecuencia.

Estas deformaciones de la tensión senoidal han ido aumentando en los últimos años debido al uso de cargas no lineales. Las cargas no lineales se refieren a un tipo de receptores que al ser conectados a la red eléctrica absorben intensidades de corrientes en impulsos bruscos. Estos cambios bruscos de corriente producen fluctuaciones en la tensión y corriente dando lugar a distorsiones en la forma de onda de las mismas, o lo que se conoce por armónicos.

Las cargas lineales que más habitualmente producen distorsiones armónicas suelen ser las que incorporan equipos de control electrónico. Estas trocean la señal senoidal con semiconductores de potencia, con el fin de conseguir la regulación deseada, a base de impulsos a una determinada frecuencia (hay corriente-no hay corriente). Entre otras, destacamos seguidamente las cargas no lineales que más habitualmente producen armónicos.

- Alumbrado con balastos electrónicos.
- Fuentes de alimentación conmutadas, ordenadores personales, TV, etcétera.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI-UPS).
- Rectificadores de potencia para la alimentación de tracción eléctrica con motores de C.C.

- Reguladores electrónicos de tensión.
- Hornos de arco.
- Transformadores.
- Variadores de velocidad para motores trifásicos de C.A.

El concepto de los armónicos se basa en la teoría matemática de las series de Fourier. Según esta teoría, una función periódica no senoidal (como la que aparece distorsionada en las líneas eléctricas) puede ser descompuesta en la suma de una función senoidal de la frecuencia fundamental y de otras funciones senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas funciones adicionales se denominan armónicos (Figura 15.29).

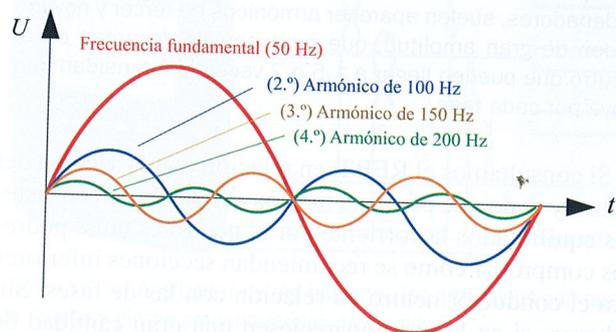


Figura 15.29. Tensión distorsionada y desglosada en su frecuencia principal y armónicos.

Los armónicos son tensiones o corrientes alternas cuya frecuencia resulta ser un múltiplo entero de la frecuencia de la señal senoidal fundamental. Así, por ejemplo, si la frecuencia de la red es 50 Hz, los armónicos podrían ser 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etcétera.

### 15.8.1. Características de los armónicos

Las características que definen un armónico son:

#### Amplitud

Es el valor de la tensión o intensidad del armónico.

#### Orden

Es el valor de su frecuencia referido a la fundamental (50 Hz). Así, por ejemplo, un armónico de orden 3 posee una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir,  $3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$ . En la Tabla 15.1 se expone una clasificación de los armónicos según su orden y frecuencia.

Tabla 15.1. Frecuencia de los armónicos en función de su orden

Orden	1	2	3	4	5	6	N
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	$50 \cdot N$

En la práctica los armónicos que más afectan a la calidad de energía eléctrica son de orden impar, y de forma especial los que son múltiplos de tres.

Así, por ejemplo, en un sistema trifásico equilibrado a cuatro hilos lo normal es que la corriente por el conductor neutro sea cero, ya que la suma vectorial de las tres corrientes de fase se anulan. Esto es válido para la componente fundamental, pero no se cumple para los armónicos múltiplos de tres, ya que en este caso se suman, lo que da lugar a intensidades de corriente por el neutro que pueden llegar a ser más elevadas que las de las fases.

En las líneas eléctricas que alimentan equipos no lineales de tipo electrónico, como por ejemplo salas con muchos ordenadores, suelen aparecer armónicos de tercer y noveno orden de gran amplitud, que producen sobrecargas en el neutro que pueden llegar a 1,5 o 2 veces la intensidad que fluye por cada fase.

Si consultamos el REBT, en relación con la sección del neutro, y dado que para una tensión senoidal pura en sistemas equilibrados la corriente por el neutro es nula, podremos comprobar cómo se recomiendan secciones inferiores para el conductor neutro en relación con las de fases. Sin embargo, si en la línea apareciesen una gran cantidad de armónicos habría que tener en cuenta esta circunstancia para dimensionar la sección del neutro.

### Porcentaje de tasa de armónico

Es la relación que existe entre la amplitud del armónico de un determinado orden ( $U_n$ ) y la de la componente fundamental ( $U$ ) expresada en tantos por ciento:

$$U_n \% = 100 \cdot U_n / U$$

En la Figura 15.30 se muestra la forma de onda de una tensión distorsionada que posee un armónico de tercer orden con una tasa del 20 %.

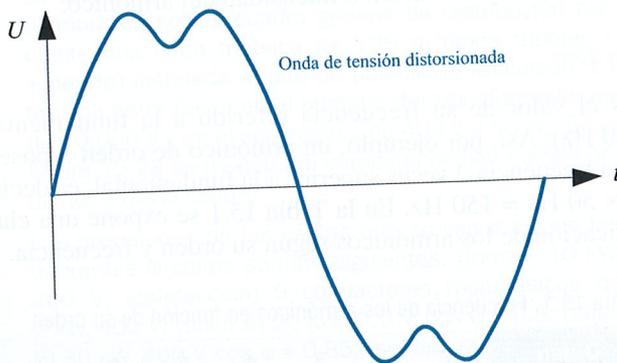


Figura 15.30. Onda de tensión distorsionada por un armónico de tercer orden.

Según Fourier, esta onda sería la suma de una tensión senoidal pura de 50 Hz con un 80 % de amplitud más el armónico de tercer orden de 150 Hz con una amplitud del 20 %, tal como se muestra en la Figura 15.31.

En la Tabla 15.2 se exponen los niveles máximos permitidos de porcentaje de tasa de armónico ( $U_n$  %) en función del número de orden del armónico ( $N$ ) para baja y media tensión.

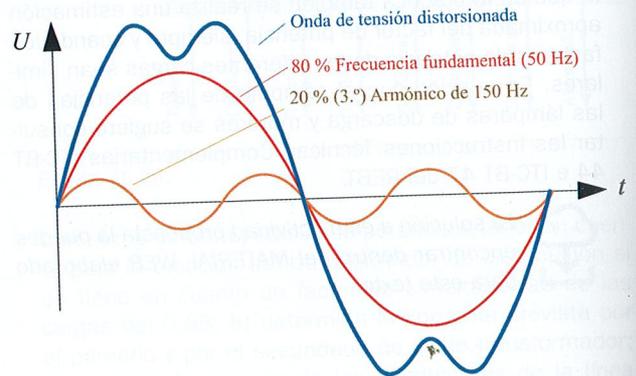


Figura 15.31. Descomposición de la onda de tensión principal.

Tabla 15.2. Niveles máximos permitidos de tasa de armónicos

$N$	$U_n$ %	$N$	$U_n$ %	$N$	$U_n$ %
2	2,0	8	0,5	15	0,3
3	5,0	9	1,5	17	2,0
4	1,0	10	0,5	19	1,5
5	6,0	11	3,5	21	0,2
6	0,5	12	0,2	23	1,5
7	5,0	13	3,0	25	1,5

### Factor de distorsión armónica total (THD %)

Es un factor que tiene en cuenta la tasa porcentual de todos los armónicos que pueda contener una onda de tensión distorsionada en relación con la componente fundamental. Así, por ejemplo, la tasa de distorsión total (THD %) admitida en el suministro de energía de baja tensión es del 3 %.

### 15.8.2. Efectos que producen los armónicos

La aparición de los armónicos en la red provoca una gran cantidad de problemas, que en muchas ocasiones complica la labor de los instaladores eléctricos, como por ejemplo:



- Aunque las corrientes de fases de un sistema trifásico estén equilibradas aparece una intensidad de corriente por el neutro más elevada que por las fases.
- Los interruptores automáticos y fusibles cortan el circuito a intensidades de corriente diferentes a los valores nominales. Esto se debe a que las corrientes con muchos armónicos poseen un valor eficaz pequeño en relación con su valor pico máximo.
- Los interruptores diferenciales saltan sin que existan corrientes reales de defecto. Para minimizar este efecto se fabrican unos diferenciales especiales que tienen el nombre de «superinmunizados» a los que se les incorpora un filtro con el fin de rechazar las altas frecuencias y evitar disparos innecesarios.
- Los transformadores de potencia y los motores se sobrecalientan aun trabajando por debajo de la potencia nominal.
- Las baterías de condensadores de compensación de energía reactiva se calientan excesivamente y se destruyen.
- Los equipos de electrónica de potencia funcionan de forma incorrecta.
- Los motores pueden producir vibraciones extrañas en su funcionamiento.
- Los conductores de la línea se sobrecalientan debido al aumento del efecto piel. Los armónicos de frecuencia alta hacen que aumente la reactancia inductiva en el interior del conductor, por lo que la corriente eléctrica tiende a fluir por la parte externa de aquel. De esta forma se reduce la sección efectiva del conductor, trayendo consigo un aumento de la resistencia de este, lo que provoca el aumento de calor generado.

### 15.8.3. Medida de los armónicos

Un aspecto a tener en cuenta para averiguar los problemas que causan los armónicos es utilizar equipos de medida que midan el verdadero valor eficaz o RMS (valor cuadrático medio). Un aparato de medida no preparado podría arrojar resultados en la medida de ondas distorsionadas de hasta un 40 % del verdadero valor eficaz.

El verdadero valor eficaz RMS equivale al valor de una corriente continua que produzca el mismo calentamiento que la corriente alterna a medir.

A este efecto existen en el mercado diferentes aparatos de medida, conocidos con el nombre de analizadores de red, que son capaces de presentar en la pantalla todas las características de los armónicos, como por ejemplo:

- Medida del verdadero valor eficaz RMS.
- Medida del factor de distorsión armónica total (THD %).
- Medida de porcentaje de tasa de armónico en función del número de su orden.
- Otras medidas relacionadas con la distorsión de onda fundamental.

En la Figura 15.32 se muestra un analizador de red midiendo los armónicos de una línea trifásica con neutro.

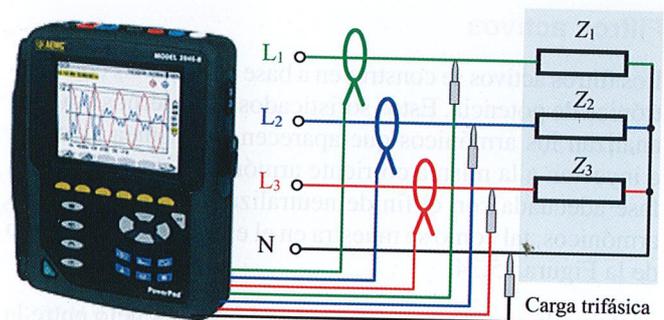


Figura 15.32. Analizador de red midiendo los armónicos con puntas de prueba y pinzas amperimétricas de medida.

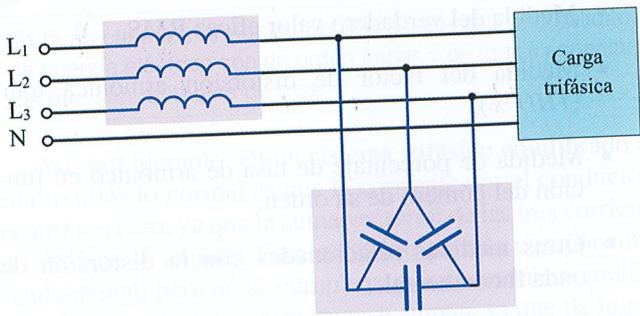
### 15.8.4. Sistemas para la compensación de armónicos

Para evitar la aparición de armónicos lo primero que habría que hacer es prevenir su aparición. Los fabricantes deberían esforzarse en diseñar equipos que generen un menor nivel de armónicos.

En cuanto a los usuarios, una vez detectados altos niveles de armónicos en una instalación eléctrica, es posible minimizar sus efectos utilizando interruptores diferenciales superinmunizados, aumentar la sección de conductores de fase y en especial la del neutro, utilizar interruptores automáticos multipolares que corten también por la acción de las corrientes del neutro, y la utilización de filtros pasivos y activos que consiguen reducir el nivel de los armónicos.

#### Filtros pasivos

Los filtros pasivos se pueden construir con la combinación de elementos  $R$ ,  $L$  y  $C$ . Así, por ejemplo, las reactancias inductivas conectadas en serie con la carga aumentan su impedancia para las altas frecuencias y producen un bloqueo de estas. Por otro lado, si se conectan condensadores en paralelo con la carga, su reactancia disminuye con la frecuencia y consiguen cortocircuitar las altas frecuencias (Figura 15.33).

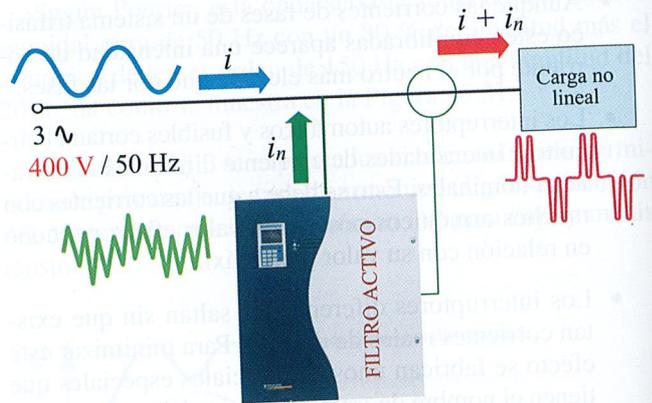


**Figura 15.33.** Filtros pasivos para la eliminación de armónicos a base de bobinas y condensadores.

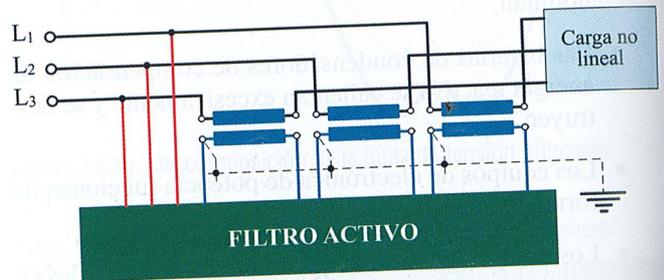
### Filtros activos

Los filtros activos se construyen a base de sistemas con electrónica de potencia. Estos sofisticados y modernos equipos analizan los armónicos que aparecen en la línea eléctrica e inyectan a la misma corriente armónica detectada con la fase adecuada con el fin de neutralizar totalmente dichos armónicos, tal como se muestra en el esquema simplificado de la Figura 15.34.

Los filtros activos van intercalados en paralelo entre la red y la carga y pueden programarse para corregir un armónico determinado. Para la medida de nivel de armónicos en la red se valen de transformadores de corriente o pinzas de medida, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 15.35.



**Figura 15.34.** Filtro activo para la eliminación de armónicos en una carga no lineal.



**Figura 15.35.** Esquema de conexiones de filtro activo.



## Comprobación práctica en el laboratorio

**15.1. Relación entre las tensiones y corrientes de fase y de línea.** 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 de línea [Figura 15.36(a)].

Con los datos obtenidos, comprueba si:

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

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

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

Ahora conecta las tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en estrella a una red trifásica de 400 V entre fases. Conecta un voltímetro entre las fases ( $U_L$ ) y otro entre los bornes de una de las lámparas ( $U_f$ ) con el objeto de medir la tensión de línea y de fase, respectivamente. Conecta también un amperímetro (A) en una de las líneas para comprobar el valor de la corriente de línea y de fase [Figura 15.36(b)].

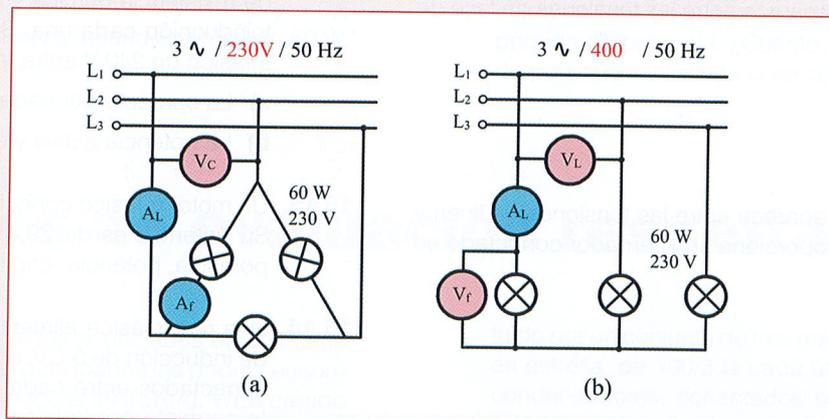


Figura 15.36.

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$\frac{U_L}{U_f} = \dots = \sqrt{3}$$

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

Desconecta una de las lámparas. ¿Qué ocurre? ¿Y si desconectamos dos?  
¿Ocurriría lo mismo si conectásemos el neutro al punto común de la estrella?

**15.2. Analizador para redes trifásicas.** Consigue un analizador de red trifásico y, siguiendo las instrucciones del equipo de medida, analiza los niveles de armónicos de alguna carga no lineal.

## Actividades de comprobación

- 15.1.** ¿Qué ventajas presenta el alternador conectado en estrella frente al conectado en triángulo?
- Presenta un mejor rendimiento.
  - Disponibilidad del conductor neutro y posibilidad de puesta a tierra del mismo.
  - Reduce considerablemente la distorsión en las tensiones de fase.
- 15.2.** En una carga trifásica conectada en triángulo:
- La tensión de fase es igual que la de línea.
  - La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.
  - La corriente de línea es igual que la de fase.
- 15.3.** En una carga conectada en estrella:
- La tensión de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.
  - La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.
  - La corriente de fase es igual que la de línea.
- 15.4.** ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de fase de un alternador?
- $30^\circ$ .
  - $90^\circ$ .
  - $120^\circ$ .
- 15.5.** ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de línea y de fase que proporciona un alternador conectado en estrella?
- $30^\circ$ .
  - $90^\circ$ .
  - $120^\circ$ .
- 15.6.** 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, averigua las potencias de la carga.
- 15.7.** 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. Averigua:
- La potencia nominal del transformador en kVA, así como la corriente por el primario y el secundario.
  - 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.
- 15.8.** 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. Averigua el factor de potencia de la carga.
- 15.9.** Un aparato de calefacción trifásico consta de tres resistencias de  $10\ \Omega$  conectadas en estrella. Determina la potencia que desarrollarán cuando se les aplique 230 V entre fases, así como la corriente de fase y de línea.
- 15.10.** ¿Y si conectamos en triángulo las mismas resistencias que en la actividad anterior?
- 15.11.** Un motor trifásico de 3.990 W,  $\cos \varphi = 0,65$  se conecta a una red de 400 V, 50 Hz. Averigua 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 la puede considerar como una inductancia en serie con una resistencia óhmica, determina los valores de las fases.
- 15.12.** 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, determina:
- La corriente por cada fase y por la línea.
  - La potencia activa y el FP de la carga trifásica.
- 15.13.** Un motor trifásico conectado a 400 V consume 56 A. Su potencia es de 29,4 kW. Determina el factor de potencia, potencia reactiva y aparente.
- 15.14.** Una red trifásica alimenta tres motores monofásicos de inducción de 5 CV,  $\cos \varphi = 0,78$ , 230 V cada uno, conectados entre cada fase y el neutro. Determina 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.
- 15.15.** 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. Calcula:
- El FP medio en dicho periodo de facturación.
  - Intensidad por la línea.
  - Característica de batería de condensadores conectados en estrella para mejorar el FP hasta 0,93.
  - Porcentaje de reducción de la corriente de línea al conectar la batería de condensadores.



**15.16.** 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, 240 V,  $\cos \varphi = 0,9$ . Determina las potencias, el *FP* y la intensidad de línea del conjunto de la instalación.

**15.17.** En la Figura 15.37 se muestra el esquema general de distribución de una instalación industrial.

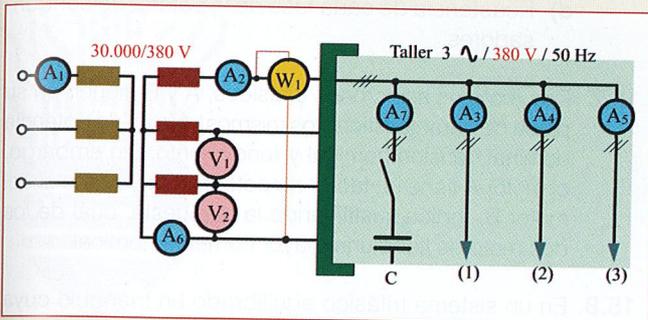


Figura 15.37.

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, 400 V,  $\cos \varphi = 0,6$  cada una; (3) 90 lámparas incandescentes de 60 W, 220 V cada una. Con estos datos averigua:

- Lectura de los aparatos de medida con el interruptor *Q* de la batería de condensadores abierto.
- Características de la batería de condensadores conectados en triángulo para mejorar el *FP* a 0,95.
- Lectura de los aparatos de medida con el interruptor cerrado (condensadores conectados).

**15.18.** 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, calcula 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 empotrado en obra.

**15.19.** Para la acometida de una pequeña factoría se ha instalado una línea trifásica de 200 m de longitud y con una sección de 35 mm<sup>2</sup>. La tensión entre fases es de 500 V y la potencia instalada es de 50 kW con un  $\cos \varphi = 0,7$ . Determina 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?

## Actividades de evaluación resueltas



A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

- 15.1.** Se dispone de tres resistencias de 30 W cada una, asociadas en estrella, y acopladas a una red trifásica de 380 V de tensión de línea. Calcula:
- Tensión en cada una de las resistencias.
  - Corriente de fase y de línea de la asociación.
  - Potencia consumida por el conjunto de las tres resistencias.
- 15.2.** Una red trifásica de 400 V (tensión de línea), 50 Hz, alimenta una instalación eléctrica que dispone de los siguientes receptores: (1) 4 motores trifásicos de 20 CV con un factor de potencia de 0,8 y un rendimiento de 0,92, cada uno; (2) un sistema de calefacción consti-

tuido por un conjunto de tres resistencias, conectadas en estrella, de 100/3  $\Omega$  cada una; (3) una batería de condensadores, conectados en estrella, de 955  $\mu\text{F}$  cada uno.

Halla:

- Potencia activa, reactiva y aparente que consumen los diferentes elementos de la instalación.
  - Factor de potencia de la instalación.
  - Intensidad de línea absorbida por la red.
- 15.3.** Tres impedancias de  $Z = 3 + j4 \Omega$  se conectan a una línea trifásica de 220 V y frecuencia 50 Hz según se muestra en la Figura 15.38. Calcula:
- Tensiones de fase y de línea complejas.
  - La intensidad de fase y de línea compleja de cada receptor.
  - La potencia compleja y el factor de potencia.

## 15. SISTEMAS TRIFÁSICOS

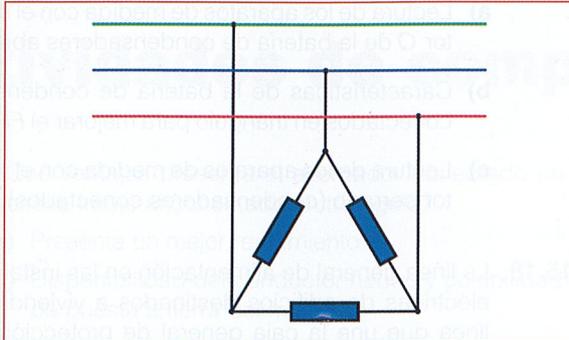


Figura 15.38.

**15.4.** En la Figura 15.39 se representan dos cargas equilibradas conectadas a una línea trifásica de 380 V (tensión de línea) y 50 Hz. La carga formada por las impedancias  $Z_1$  absorbe una potencia activa de 3 kW y una potencia reactiva de 5 kVAR. Halla:

- Valor de las impedancias complejas  $Z_1$ .
- Valor de la potencia activa y reactiva absorbida por la carga constituida por las impedancias  $Z_2 = 10 + j10 \Omega$ .
- Valor eficaz de la intensidad que circula por los conductores de la línea que alimenta a las dos cargas.

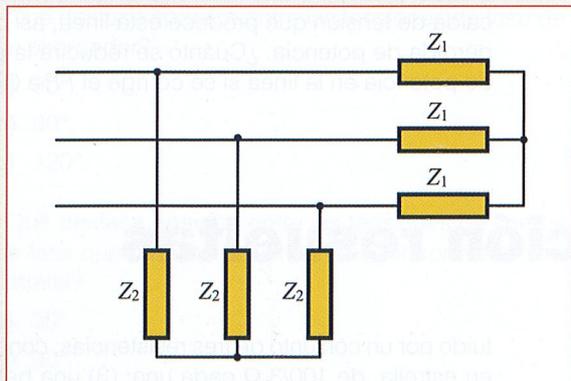


Figura 15.39.

**15.5.** Una instalación de corriente alterna trifásica está conectada a una red de 380 V (tensión de línea) y 50 Hz. La potencia activa absorbida por la instalación es de 8 kW y esta tiene un factor de potencia 0,8 (inductivo).

- Calcula la intensidad que circula por los conductores que conectan la instalación a la red.
- Corrige el factor de potencia de la instalación a 0,9 (inductivo). Indica qué elementos es necesario introducir en el circuito, cómo conectarlos y qué valor deben tener.
- Calcula el valor de la potencia reactiva absorbida por la instalación antes y después de la corrección del factor de potencia.

**15.6.** Una línea trifásica equilibrada, cuya tensión de línea es de 400 V, alimenta a las siguientes cargas trifásicas equilibradas: (1) Motor con conexión estrella de potencia útil  $P = 10 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$  inductivo y rendimiento  $\eta = 0,89$ , (2) Horno eléctrico con conexión triángulo de  $S = 15 \text{ kVA}$  y  $\cos \varphi = 0,9$  inductivo y (3) Batería de condensadores con conexión triángulo de  $Q = 5 \text{ kVAR}$ . Determina:

- Intensidad que circula por la línea.
- Factor de potencia del conjunto de las cargas indicando si es inductivo o capacitivo.
- Intensidad de fase de la carga (3).
- Reactancia de cada fase de la batería de condensadores.

**15.7.** Dos motores asíncronos trifásicos, A y B, tienen en su placa de características los mismos valores de potencia nominal, tensión nominal y rendimiento. Sin embargo, el motor A tiene un factor de potencia mayor que el del motor B. Indica, justificando la respuesta, cuál de los dos motores tiene una mayor corriente nominal.

**15.8.** En un sistema trifásico equilibrado en triángulo cuya tensión de línea es de 240 V se conoce que la potencia aparente ( $S_T$ ) tiene un valor de 7,2 kVA y que la relación entre potencia activa y reactiva ( $P_T/Q_T$ ) vale 0,5. A partir de estos datos, calcula:

- La corriente de fase y de línea.
- El factor de potencia.
- La potencia activa y reactiva del sistema.

**15.9.** Una red trifásica de 380 V eficaces de tensión de línea alimenta un motor asíncrono trifásico de  $P = 3 \text{ kW}$  con un  $\cos \varphi = 0,9$  (inductivo) y un grupo condensador de compensación del factor de potencia con un  $Q_c = 1 \text{ kVAR}$ . Determina:

- El factor de potencia de la instalación.
- La corriente de línea, si el motor está conectado en triángulo.

**15.10.** Una red trifásica alimenta dos cargas. La primera consume una potencia  $P_1 = 3.000 \text{ W}$  con un  $\cos \varphi = 0,8$  (en retraso) y la segunda una potencia aparente  $S_2 = 4.535 \text{ VA}$  con un  $\cos \varphi = 0,93$  (en adelanto). Determina:

- El triángulo de potencias indicando los valores de  $P$ ,  $Q$  y  $S$  de la red.
- El factor de potencia de la red.

**15.11.** A una línea trifásica de tensión de línea 380 V y  $f = 50 \text{ Hz}$ , se conecta un receptor que consume una potencia de 4 kW con un  $\cos \varphi = 0,83$  inductivo:

- Realiza el esquema y calcula el triángulo de potencias.
- Capacidad de cada condensador de la batería de condensadores, a conectar en triángulo, necesaria para elevar el  $\cos \varphi$  a 0,97.