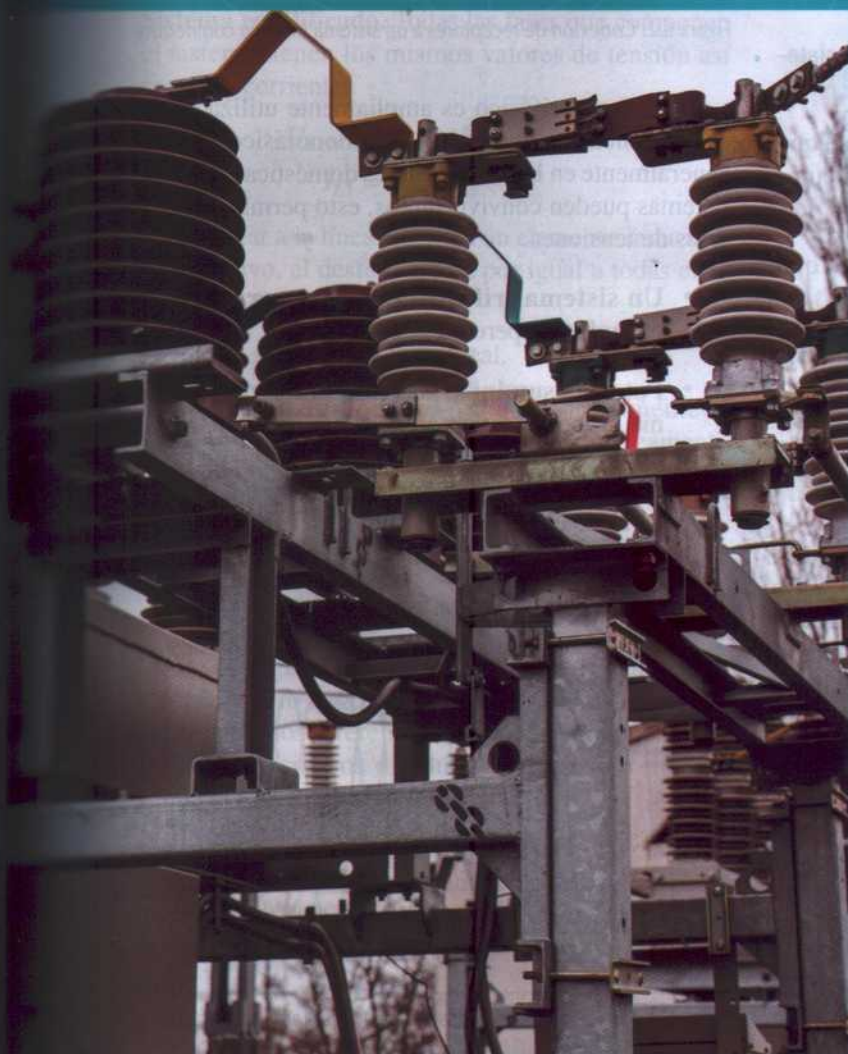


# La corriente alterna trifásica



A nivel de la industria, en los procesos productivos se emplea mayoritariamente la corriente alterna trifásica, ya que aporta una serie de ventajas frente a la corriente monofásica, principalmente por el empleo de motores. Este tipo de corriente permite conectar los receptores de diferentes formas.

Para verificar que los sistemas eléctricos funcionan correctamente es necesario realizar una serie de mediciones, por ello el técnico debe tener conocimiento de las diferentes magnitudes y de cómo realizar su correcta medición.

# 6

## Contenidos

- 6.1. Corriente alterna trifásica
- 6.2. Ventajas de los sistemas trifásicos
- 6.3. Equilibrio en los sistemas trifásicos
- 6.4. Tensiones en un sistema trifásico
- 6.5. Conexiones en un sistema trifásico
- 6.6. Potencia en sistemas trifásicos
- 6.7. Mejora del factor de potencia
- 6.8. Generador de corriente alterna trifásica
- 6.9. Medición en corriente alterna trifásica

## Objetivos

- Determinar las características de la corriente alterna trifásica.
- Distinguir los sistemas eléctricos trifásicos equilibrado y desequilibrado.
- Conectar los sistemas trifásicos en estrella y triángulo.
- Calcular el factor de potencia de una instalación trifásica.
- Aplicar las diferentes magnitudes y realizar su medición con seguridad.



## 6.1. Corriente alterna trifásica

Un sistema de corriente alterna polifásica es aquel que está formado por más de una fase. El sistema polifásico que más se emplea es aquel que está formado por tres fases, denominado **sistema trifásico**, aunque también se pueden encontrar sistemas compuestos por dos fases, denominados **sistemas bifásicos**.

A lo largo de esta unidad nos centraremos en los sistemas trifásicos.

Como se ha comentado, el sistema trifásico es aquel que está compuesto por tres fases, pero estas fases deben cumplir con una serie de requisitos:

- **Frecuencia.** Han de tener la misma frecuencia, que será la frecuencia del sistema.
- **Desfase.** El desfase entre ellas será determinado por la expresión siguiente y que para un sistema trifásico será de  $120^\circ$ .

$$\text{Desfase} = \frac{360^\circ}{\text{Número de fases}} = \frac{360^\circ}{3 \text{ (trifásica)}} = 120^\circ$$

- **Tensión.** El valor del voltaje de cada una de las fases será el mismo.

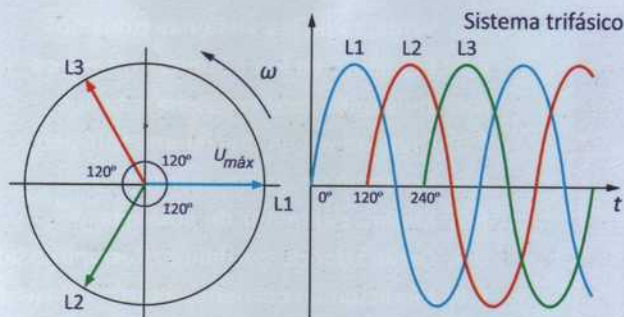


Figura 6.1. Onda alterna trifásica.

## 6.2. Ventajas de los sistemas trifásicos

Los sistemas trifásicos aportan una gran cantidad de ventajas frente a los sistemas monofásicos:

- **Sistema de doble tensión.** Los receptores pueden conectarse entre fases o entre fase y neutro, disponiendo de una doble tensión, por ejemplo 230 V/400 V.

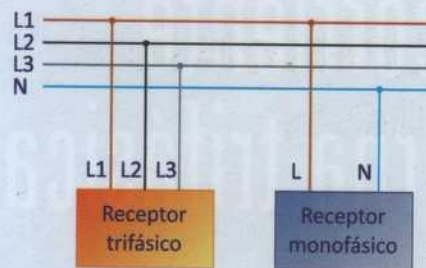


Figura 6.2. Conexión de receptores a un sistema trifásico con neutro.

El sistema trifásico es ampliamente utilizado en la industria mientras que el sistema monofásico es empleado generalmente en las instalaciones domésticas. Como ambos sistemas pueden convivir juntos, esto permite tener dos niveles de tensiones.

- **Un sistema trifásico puede generar un sistema monofásico** pero no al contrario.
- **Potencia suministrada más uniforme.** En un sistema monofásico la potencia suministrada es pulsatoria en función del tiempo, sin embargo en un sistema trifásico es más estable. Esto hace que los motores trifásicos sean más suaves en su funcionamiento que los monofásicos, que tienen mayores vibraciones.

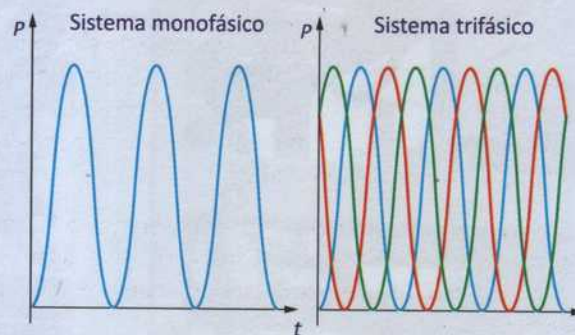


Figura 6.3. Curvas de potencia instantánea en sistema monofásico y trifásico.

- **Reducción del cableado.** Un sistema trifásico necesita un 75 % de la sección del cableado frente al 100 % de uno monofásico a igualdad de potencia, por tanto reduce costes.
- **Volumen.** Para una misma potencia, los equipos monofásicos son más voluminosos que los trifásicos.
- **El arranque de motores eléctricos trifásicos** es menos problemático que los monofásicos por la generación de campos magnéticos giratorios, como se verá más adelante.



## 6.3. Equilibrio en los sistemas eléctricos

En función de los diferentes valores entre las tensiones y las corrientes que componen un sistema, este puede ser equilibrado o desequilibrado.

- **Sistema equilibrado.** Todas las fases que componen el sistema tienen los mismos valores de tensión así como de corriente:

$$U_{L1N} = U_{L2N} = U_{L3N}$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$$

Al conectar a la línea eléctrica un elemento inductivo o capacitivo, el desfase afecta por igual a todas ellas (Figura 6.4).

Este es el sistema eléctrico ideal.

- **Sistema desequilibrado.** Aunque normalmente el valor de las tensiones de cada fase es prácticamente el mismo, los valores de intensidad no son iguales en cada fase de la línea:

$$I_{L1} \neq I_{L2} \neq I_{L3}$$

$$\cos \phi_1 \neq \cos \phi_2 \neq \cos \phi_3$$

Desde el origen de conexión al sistema de generación eléctrica y a lo largo de la línea de suministro, se van conectando los diferentes receptores (monofásicos o trifásicos, resistivos o inductivos), que van modificando el estado de equilibrio.

Por ejemplo, en la Figura 6.5 se observa que las cargas monofásicas van conectadas a la misma fase (L1), por tanto por esta fase circulará más corriente que por la demás.

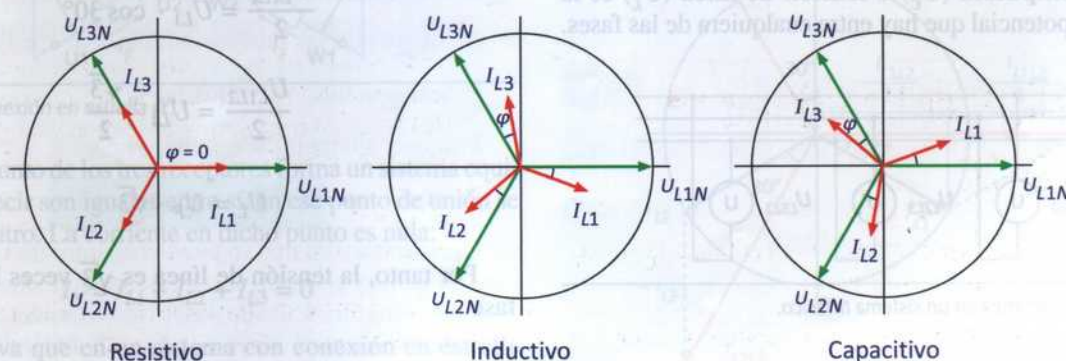


Figura 6.4. Diagrama de fasores en un sistema trifásico equilibrado.

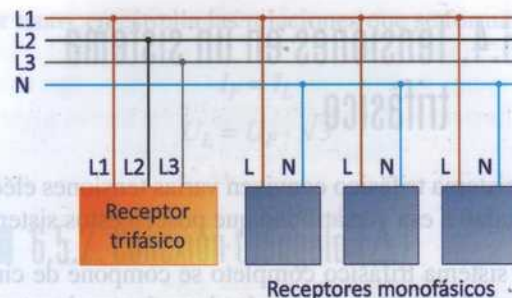


Figura 6.5. Esquema de sistema desequilibrado con sobrecarga en una fase.

Por ello, es importante a la hora de realizar el diseño, repartir las cargas de tal manera que se compensen entre sí y evitar en lo posible el desequilibrio.

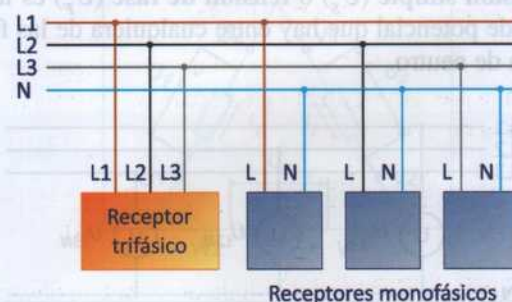


Figura 6.6. Esquema para equilibrar un sistema con reparto de cargas.

### ► Recuerda:

En un sistema trifásico, cada una de las fases adopta un color (marrón, negro y gris) para poder distinguirlas entre ellas. Si además consta de neutro, este será de color azul.



## 6.4. Tensiones en un sistema trifásico

En un sistema trifásico conviven varias tensiones eléctricas que ayudan a esa versatilidad que poseen estos sistemas.

Un sistema trifásico completo se compone de cinco líneas (tres fases más neutro más el conductor de protección o toma de tierra). Dejando a un lado el conductor de protección, se pueden dar diversas combinaciones entre las fases y neutro.

### 6.4.1. Tensión simple o de fase

La **tensión simple** ( $U_s$ ) o **tensión de fase** ( $U_f$ ) es la diferencia de potencial que hay entre cualquiera de las fases y la línea de neutro.

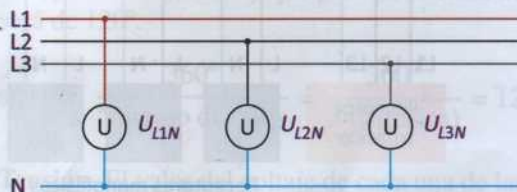


Figura 6.7. Tensión de fase en un sistema trifásico.

En un sistema trifásico habrá por tanto tres valores de tensión de fase, ambas del mismo valor pero desfasadas 120°:

$$U_{L1} = U_{L1N} = U_{L1} - U_N$$

$$U_{L2} = U_{L2N} = U_{L2} - U_N$$

$$U_{L3} = U_{L3N} = U_{L3} - U_N$$

### 6.4.2. Tensión compuesta o de línea

La **tensión compuesta** ( $U_c$ ) o **tensión de línea** ( $U_L$ ) es la diferencia de potencial que hay entre cualquiera de las fases.

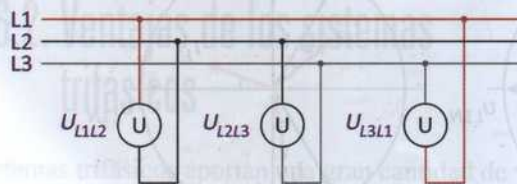


Figura 6.8. Tensión de línea en un sistema trifásico.

En un sistema trifásico habrá por tanto tres valores de tensión de línea, ambas del mismo valor pero desfasadas 120°:

$$U_{L1L2} = U_{L1} - U_{L2}$$

$$U_{L2L3} = U_{L2} - U_{L3}$$

$$U_{L3L1} = U_{L3} - U_{L1}$$

### 6.4.3. Relación entre la tensión de fase y la tensión de línea

En un sistema eléctrico trifásico, se ha visto que existen dos tipos de tensiones: la tensión de fase y la tensión de línea. Si se observa el diagrama fasorial de la Figura 6.9, correspondiente a un sistema equilibrado, se puede ver esa relación.

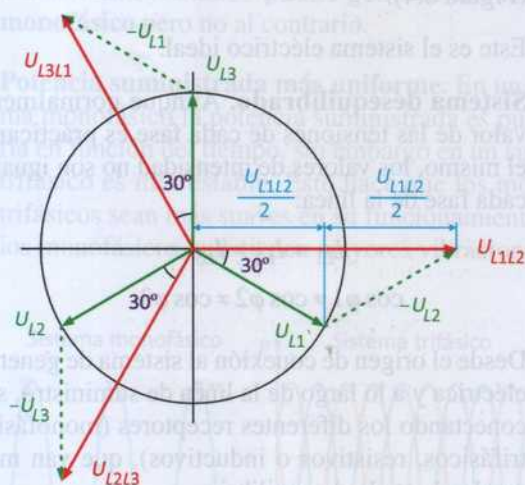


Figura 6.9. Relación entre las tensiones de línea y las de fase.

Se observa que si se realiza la suma vectorial de las tensiones de fase, se obtiene la tensión de línea. Además, el ángulo que aparece entre ambas es de 30°. Del triángulo que se forma, se establece la siguiente relación trigonométrica:

$$\frac{U_{L1L2}}{2} = U_{L1} \cdot \cos 30^\circ$$

$$\frac{U_{L1L2}}{2} = U_{L1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

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

Por tanto, la tensión de línea es  $\sqrt{3}$  veces la tensión de fase.



### Actividad resuelta 6.1

Si la tensión de fase en un sistema trifásico es de 230 V, ¿cuál es su tensión de línea? Y si la tensión de línea fuese 230 V, ¿cuál es la tensión de fase?

**Solución:**

Como la relación es:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_F = \sqrt{3} \cdot 230 \approx 400 \text{ V}$$

Y por otro lado:

$$U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} \approx 133 \text{ V}$$

## 6.5. Conexiones en un sistema trifásico

Un sistema trifásico se compone de tres ramas, cuyos receptores se pueden conectar de diferentes maneras, dando lugar a la conexión **estrella** y la conexión **triángulo**.

### 6.5.1. Conexión estrella (Y)

En un conjunto formado por tres receptores, la conexión **estrella** consiste en unir entre sí uno de los extremos y los otros tres extremos se conectan a la red eléctrica (Figura 6.10).

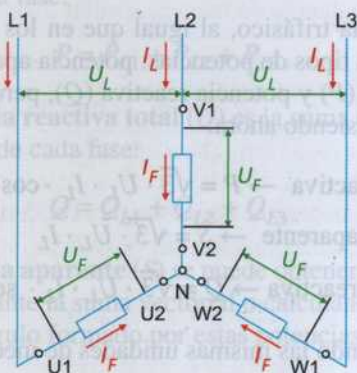


Figura 6.10. Conexión en estrella (Y).

Si el conjunto de los tres receptores forma un sistema equilibrado, es decir son iguales entre sí, en ese punto de unión se forma un neutro. La corriente en dicho punto es nula:

$$I_N = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 0$$

Se observa que en un sistema con conexión en estrella las corrientes de fase ( $I_F$ ) son las mismas que las corrientes de línea ( $I_L$ ).

Por tanto, en estrella las relaciones que se forman son:

$$I_F = I_L$$

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

### 6.5.2. Conexión triángulo ( $\Delta$ )

En un sistema con conexión **triángulo**, los receptores se conectan entre dos fases, siguiendo una disposición como la mostrada en la Figura 6.11.

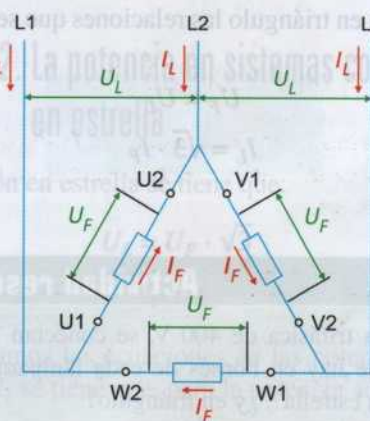


Figura 6.11. Conexión en triángulo ( $\Delta$ ).

En esta disposición, la unión de dos receptores va conectada a una de las fases de la red eléctrica. Se observa que coincide la tensión de fase con la tensión de línea:

$$U_F = U_L$$

En cuanto a la intensidad, se observa (Figura 6.12) que la corriente de línea es  $\sqrt{3}$  veces la corriente de fase:

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

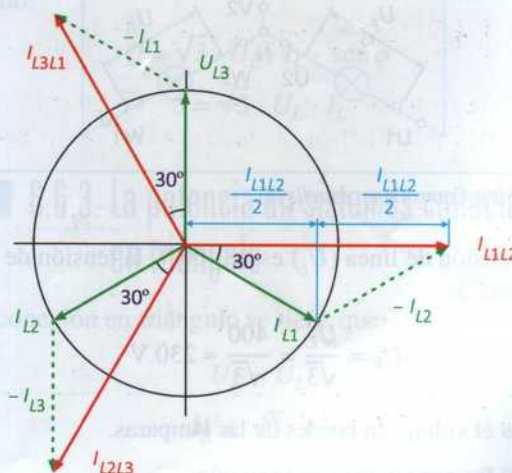


Figura 6.12. Las corrientes en conexión en triángulo.



Se observa que si se realiza la suma vectorial de las corrientes de fase, se obtiene la corriente de línea. Además, el ángulo que aparece entre ambas es de  $30^\circ$ . Del triángulo que se forma, se establece la siguiente relación trigonométrica:

$$\frac{I_{L1L2}}{2} = I_{L1} \cdot \cos 30^\circ$$

$$\frac{I_{L1L2}}{2} = I_{L1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

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

Por tanto, en triángulo las relaciones que se forman son:

$$U_F = U_L$$

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

### Actividad resuelta 6.2

A una línea trifásica de 400 V, se conectan 3 lámparas. ¿Qué voltaje hay en bornes de cada lámpara si estas se conectan en estrella?, ¿y en triángulo?

#### Solución:

En la conexión en estrella:

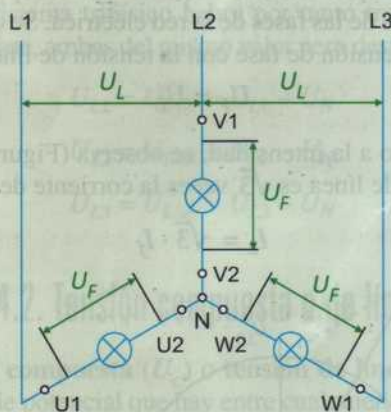


Figura 6.13. Conexión en estrella (Y).

Si la tensión de línea ( $U_L$ ) es de 400 V, la tensión de fase ( $U_F$ ) será de:

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

Que es el voltaje en bornes de las lámparas.

Pero si las conectamos en triángulo:

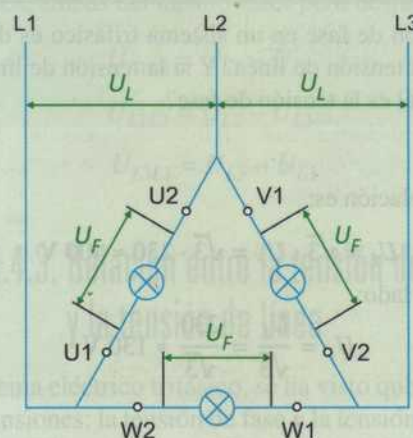


Figura 6.14. Conexión en triángulo (Δ).

En esta configuración, la tensión de fase ( $U_F$ ) corresponde con la tensión de línea ( $U_L$ ), estando las lámparas sometidas a un voltaje de 400 V:

$$U_F = U_L = 400 \text{ V}$$

## 6.6. Potencia en sistemas trifásicos

En un sistema trifásico, al igual que en los monofásicos, se tienen tres tipos de potencias: potencia aparente ( $S$ ), potencia activa ( $P$ ) y potencia reactiva ( $Q$ ), pero cambian sus expresiones, siendo ahora:

$$\text{Potencia activa} \rightarrow P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

$$\text{Potencia aparente} \rightarrow S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

$$\text{Potencia reactiva} \rightarrow Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$

Manteniendo las mismas unidades de medida:

Potencia activa: W, vatios.

Potencia aparente: VA, voltioamperios.

Potencia reactiva: VAR, voltioamperios reactivos.

Un sistema trifásico se puede considerar como una asociación de tres sistemas monofásicos conectados en estrella o en triángulo. Cuando estos tres sistemas monofásicos son iguales, se dice entonces que el sistema está **equilibrado**, en caso contrario el sistema se dice que está **desequilibrado**.



### 6.6.1. Sistemas equilibrados y desequilibrados

Si el sistema está **desequilibrado**, la potencia total es la suma de las potencias de cada fase. Por tanto, se debe obtener en primer lugar la potencia activa, reactiva y aparente, y a continuación realizar la suma de cada tipo de potencia.

Para la fase  $L_1$  se tiene que:

$$P_{L1} = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \cos \varphi_{L1}$$

$$Q_{L1} = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \sin \varphi_{L1}$$

$$S_{L1} = U_{L1} \cdot I_{L1}$$

Para la fase  $L_2$ :

$$P_{L2} = U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \cos \varphi_{L2}$$

$$Q_{L2} = U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \sin \varphi_{L2}$$

$$S_{L2} = U_{L2} \cdot I_{L2}$$

Y para la fase  $L_3$ :

$$P_{L3} = U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \cos \varphi_{L3}$$

$$Q_{L3} = U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \sin \varphi_{L3}$$

$$S_{L3} = U_{L3} \cdot I_{L3}$$

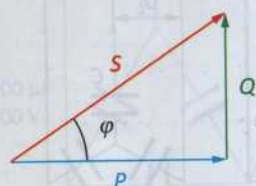
La **potencia activa total** ( $P$ ) es la suma de las potencias activas de cada fase:

$$P = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3}$$

La **potencia reactiva total** ( $Q$ ) es la suma de las potencias reactivas de cada fase:

$$Q = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3}$$

La **potencia aparente** ( $S$ ) se puede obtener de la misma manera, mediante la suma vectorial o calculando la hipotenusa del triángulo formado por estas potencias.



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Figura 6.15. Triángulo de potencias.

Si el sistema está **equilibrado**, es decir que las corrientes y los desfases son iguales, el sistema se simplifica:

$$I = I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$$

$$\varphi = \varphi_{L1} = \varphi_{L2} = \varphi_{L3}$$

Obteniendo que:

$$P = 3 \cdot U_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi$$

$$Q = 3 \cdot U_F \cdot I_F \cdot \sin \varphi$$

$$S = 3 \cdot U_F \cdot I_F$$

### 6.6.2. La potencia en sistemas conectados en estrella

En la conexión en estrella se tiene que:

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

$$I_F = I_L$$

Si expresamos las ecuaciones de las potencias en función de  $U_L$  e  $I_L$  se tiene que, para la potencia activa:

$$U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

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

Multiplicando y dividiendo por  $\sqrt{3}$ , se elimina esta del denominador, obteniendo la expresión:

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

De similar manera se opera con las otras potencias obteniendo:

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

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

### 6.6.3. La potencia en sistemas conectados en triángulo

En la conexión en triángulo se tiene que:

$$U_F = U_L$$

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

Si expresamos las ecuaciones de las potencias en función de  $I_L$  y  $U_L$  se tiene que, para la potencia activa:



$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

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

Multiplicando y dividiendo por  $\sqrt{3}$ , se elimina esta del denominador, obteniendo la expresión:

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

De similar manera se opera con las otras potencias obteniendo:

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

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

Se observa que las expresiones de las potencias son iguales tanto en estrella como en triángulo si se emplean magnitudes de línea.

### Actividad resuelta 6.3

Un sistema trifásico conectado a una red eléctrica de 400 V muestra los siguientes valores en cada una de sus fases:

$$I_{L1} = 10 \text{ A} \quad \cos \varphi_1 = 0,75$$

$$I_{L2} = 12 \text{ A} \quad \cos \varphi_2 = 0,68$$

$$I_{L3} = 8 \text{ A} \quad \cos \varphi_3 = 0,9$$

Calcula la potencia activa, reactiva y aparente así como el desfase.

#### Solución:

Con los datos iniciales:

$$I_{L1} = 10 \text{ A} \quad \cos \varphi_1 = 0,75$$

$$\varphi_1 = 41,409^\circ \quad \sin \varphi_1 = 0,661$$

$$I_{L2} = 12 \text{ A} \quad \cos \varphi_2 = 0,68$$

$$\varphi_2 = 47,156^\circ \quad \sin \varphi_2 = 0,733$$

$$I_{L3} = 8 \text{ A} \quad \cos \varphi_3 = 0,9$$

$$\varphi_3 = 25,841^\circ \quad \sin \varphi_3 = 0,435$$

Se calculan las potencias activas:

$$P_{L1} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_1 = 400 \cdot 10 \cdot 0,75 = 3000 \text{ W}$$

$$P_{L2} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_2 = 400 \cdot 12 \cdot 0,68 = 3264 \text{ W}$$

$$P_{L3} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_3 = 400 \cdot 8 \cdot 0,9 = 2880 \text{ W}$$

$$P = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} = 3000 + 3264 + 2880$$

$$P = 9144 \text{ W}$$

Las potencias reactivas:

$$Q_{L1} = U \cdot I \cdot \sin \varphi_1 = 400 \cdot 10 \cdot 0,661 = 2645,75 \text{ VAr}$$

$$Q_{L2} = U \cdot I \cdot \sin \varphi_2 = 400 \cdot 12 \cdot 0,733 = 3519,41 \text{ VAr}$$

$$Q_{L3} = U \cdot I \cdot \sin \varphi_3 = 400 \cdot 8 \cdot 0,435 = 1394,84 \text{ VAr}$$

$$Q = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} = 2645,75 + 3519,41 + 1394,84$$

$$Q = 7560 \text{ VAr}$$

La potencia aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{9144^2 + 7560^2} = 11\,864,5 \text{ VA}$$

Con estos datos ya es posible obtener el factor de potencia:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{9144}{11\,864,5} = 0,77$$

### Recuerda:

Cuando se habla de potencia en un sistema trifásico, se refiere a la potencia total que aportan o toman las tres fases a la vez.

## 6.7. Mejora del factor de potencia

En las redes eléctricas trifásicas también se puede mejorar el factor de potencia de manera similar a las monofásicas.

Las fórmulas de cálculo son las mismas:

$$C = \frac{P (\tan \varphi - \tan \varphi')}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_L^2}$$

Pero en este caso se necesitan tres condensadores que se pueden conectar de dos formas posibles.

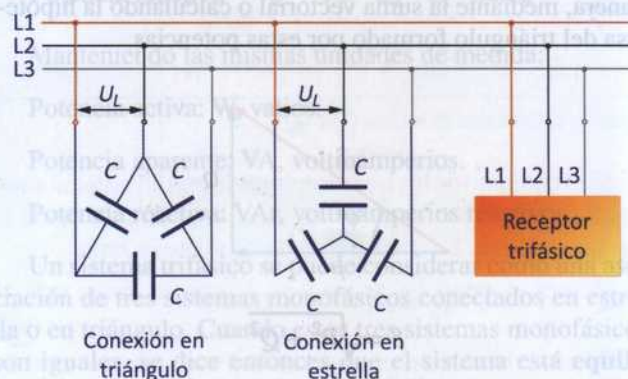


Figura 6.16. Conexión del condensador en trifásica.



En la **conexión en estrella**, la capacidad de cada condensador es igual a la capacidad obtenida:

$$C_{ESTRELLA} = C \quad \text{Tensión: } U_F$$

Es decir, que la batería de condensadores estará compuesta de tres condensadores de una capacidad que es la misma que la obtenida en el cálculo y que debe soportar una tensión igual a la de la red monofásica.

En la **conexión en triángulo**, la capacidad de cada condensador es de:

$$C_{TRIÁNGULO} = \frac{C}{3} \quad \text{Tensión: } U_L$$

Es decir, que la batería de condensadores estará compuesta de tres condensadores de una capacidad que es la tercera parte de la obtenida en el cálculo y que debe soportar una tensión igual a la de la red trifásica.

### Actividad resuelta 6.4

Se ha calculado el condensador para la mejora del factor de potencia en una red eléctrica de 230 V/400 V, obteniéndose una capacidad de 3000  $\mu\text{F}$ . Determina la batería de condensadores y sus características a instalar.

**Solución:**

El condensador calculado es de  $C = 3000 \mu\text{F}$ .

Según su conexión se tiene que la batería de condensadores estará formada por:

- Si se conecta en triángulo:

$$C_{TRIÁNGULO} = \frac{C}{3} = \frac{3000 \mu\text{F}}{3} = 1000 \mu\text{F} \rightarrow 3 \times 1000 \mu\text{F} / 400 \text{ V}$$

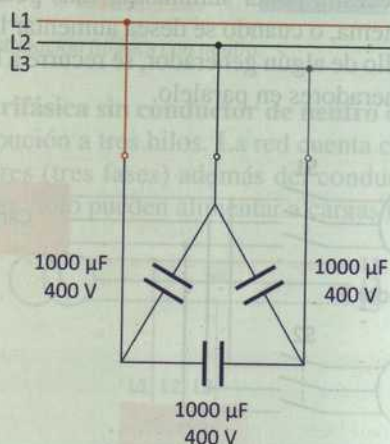


Figura 6.17. Conexión de la batería de condensadores en triángulo.

- Si se conecta en estrella:

$$C_{ESTRELLA} = C = 3000 \mu\text{F} \rightarrow 3 \times 3000 \mu\text{F} / 230 \text{ V}$$

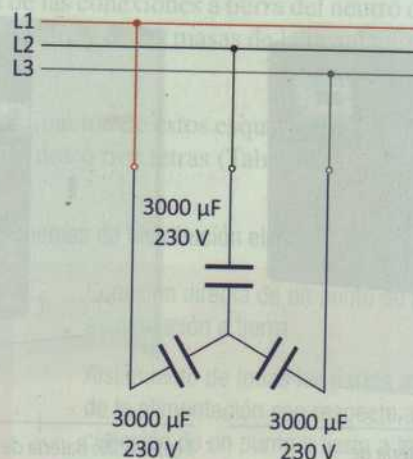


Figura 6.18. Conexión de la batería de condensadores en estrella.

### Sabías que...

Si al conectar un condensador o batería de condensadores, el desfase cambia de signo significa que el sistema pasa de ser de naturaleza inductiva a naturaleza capacitiva.

A nivel comercial, las baterías de condensadores se expresan en términos de potencia reactiva (kVAr) que aportan al sistema. En estas baterías, los condensadores van conectados internamente en triángulo, siendo solo accesibles los tres bornes de conexión eléctrica.

$$Q_{BATERIA \text{ CONDENSADORES}} = P (\tan \phi - \tan \phi')$$

**Tabla 6.1.** Baterías comerciales de condensadores para motores ( $\cos \phi \geq 0,95$ )

Compensación de motores					
kW	CV	$Q_c$ (kVAr)	$Q_c$ (kVAr)	$Q_c$ (kVAr)	$Q_c$ (kVAr)
		3000 r. p. m.	1500 r. p. m.	1000 r. p. m.	750 r. p. m.
5,5	7,5	2,5	2,5	5,0	5,0
7,5	10	2,5	5,0	5,0	7,5
11	15	2,5	5,0	7,5	10,0
15	20	5,5	5,0	7,5	10,0
18,5	25	5,0	7,5	10,0	12,5
22	30	7,5	7,5	10,0	15,0
30	40	10	10,0	12,5	15,0



Existen baterías de condensadores que cuentan con un sistema de control electrónico y de varios escalones de capacidad, que se activan en función del desfase detectado.



Figura 6.19. Batería de condensadores de montaje mural. (Cortesía de Circutor.)



Figura 6.20. Batería de condensadores de montaje superficial. (Cortesía de Circutor.)

## 6.8. Generador de corriente alterna trifásica

El generador de corriente alterna, también llamado alternador, basa su funcionamiento en el principio de inducción electromagnética en el cual al generar el movimiento en un conductor dentro de un campo magnético se induce una fuerza electromotriz. Al ser un movimiento circular, esta f. e. m. tiene carácter senoidal.

Para conseguir la tensión senoidal, se sitúan tres devanados independientes y separados  $120^\circ$  que formarán el campo magnético inducido y se sitúan en el estator. El campo inductor lo forma un electroimán situado en el rotor que gira. Este electroimán puede estar formado por uno o varios pares de polos y es alimentado por una corriente continua llamada **corriente de excitación**.

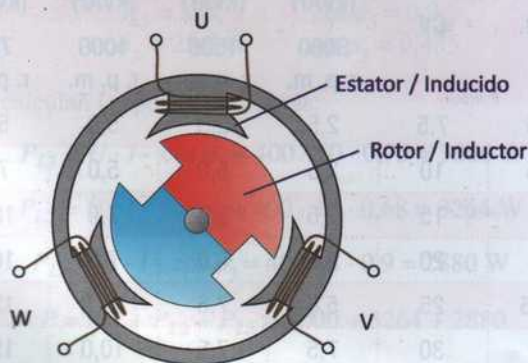


Figura 6.21. Alternador trifásico.

La frecuencia viene determinada por la velocidad de giro y por el número de pares de polos según la expresión:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

Donde:

$f$ : Frecuencia (Hz).

$p$ : Pares de polos.

$n$ : Velocidad (r. p. m.).

### Actividad resuelta 6.5

Determina cuál es la frecuencia que genera un alternador que gira a 3000 r. p. m. y tiene un par de polos. ¿Y si tiene dos pares de polos?

**Solución:**

Para un par de polos:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{1 \cdot 3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Para dos pares de polos:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3000}{60} = 100 \text{ Hz}$$

### 6.8.1. Acoplamiento de generadores en paralelo

Cuando se necesita poder suministrar más potencia a una carga o al sistema, o cuando se desea aumentar la fiabilidad en caso de fallo de algún generador, se recurre a la conexión de varios generadores en paralelo.

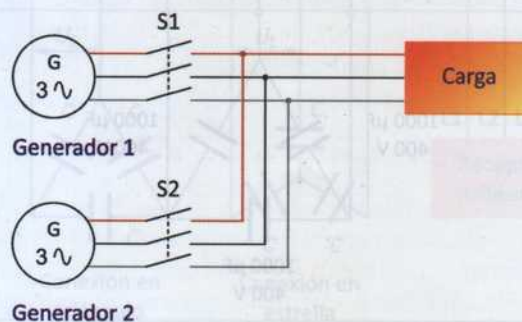


Figura 6.22. Acoplamiento de generadores en paralelo.



idad de  
resión:

El acoplamiento de alternadores tiene cierta complejidad puesto que se trata de corriente alterna donde interviene el parámetro de la frecuencia. Para poder llevar a cabo esta operación deben darse una serie de condiciones:

- La **tensión** de los alternadores debe ser igual. Cada una de las tres fases debe tener la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase que el conductor al que se conectará.
- La **frecuencia** debe ser la misma.
- La **secuencia de fases** debe ser la misma.

Para poder conseguir estas condiciones y realizar adecuadamente la conexión en paralelo, se actúa sobre la velocidad de giro del rotor y sobre la corriente de excitación. Actualmente esta maniobra se lleva a cabo mediante equipos automáticos de sincronización.

6.5

ador  
tiene

## 6.8.2. Los sistemas de distribución en trifásica

Existen dos configuraciones para la distribución de la red trifásica:

- **Red trifásica con conductor de neutro** distribuido o distribución a cuatro hilos. La red cuenta con cuatro conductores (tres fases más el neutro) además del conductor de protección. A partir de estas redes se obtienen sistemas monofásicos.



Figura 6.23. Distribución trifásica con neutro.

- **Red trifásica sin conductor de neutro** distribuido o distribución a tres hilos. La red cuenta con tres conductores (tres fases) además del conductor de protección. Solo pueden alimentar a cargas trifásicas.



Figura 6.24. Distribución trifásica sin neutro.

## 6.8.3. Esquemas en redes de distribución

Existen diferentes esquemas de distribución que se definen en función de las conexiones a tierra del neutro de alimentación, por un lado, y de las masas de la instalación receptora, por otro.

La denominación de estos esquemas se realiza mediante un código de dos o tres letras (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Esquemas de distribución eléctrica

Primera letra	T	Conexión directa de un punto de la alimentación a tierra.
	I	Aislamiento de todas las partes activas de la alimentación con respecto a tierra o conexión de un punto a tierra a través de una impedancia.
Segunda letra	T	Masas conectadas directamente a tierra, independientemente de la eventual puesta a tierra de la alimentación.
	N	Masas conectadas directamente al punto de la alimentación puesto a tierra (en corriente alterna, normalmente será el punto neutro).
Tercera letra	S	Las funciones de neutro y protección, aseguradas por conductores separados (conductor N + conductor PE).
	C	Las funciones de neutro y de protección, combinadas en un solo conductor (conductor CPN o PEN).

## Esquema TT (neutro conectado a tierra)

Es el esquema más utilizado en redes de distribución de baja tensión. Un punto de la fuente de alimentación se conecta directamente a tierra y todas las masas o partes conductoras accesibles de la instalación eléctrica receptora se conectan a una toma de tierra independiente.

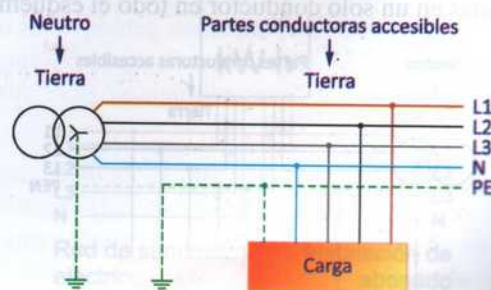


Figura 6.25. Esquema TT.



### Esquema IT (neutro aislado o impedante)

No se realiza ninguna conexión entre el punto neutro de la fuente de alimentación y tierra, o se establece una conexión a través de una impedancia. Las masas o partes conductoras accesibles de la instalación eléctrica receptora se conectan a una toma de tierra. En este tipo de distribución se recomienda no distribuir el conductor de neutro.

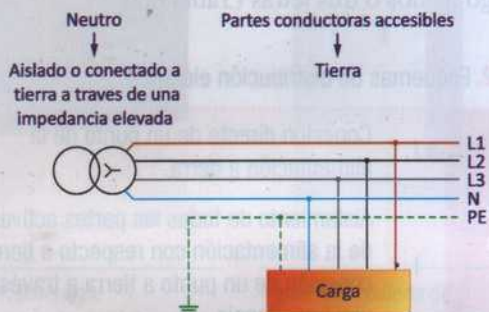


Figura 6.26. Esquema IT.

### Esquema TN-S

Tienen el punto de neutro de la fuente de alimentación conectado directamente a tierra y las masas de la instalación receptora conectadas al mismo punto mediante conductores de protección. El conductor de neutro y el conductor de protección son distintos en todo el esquema.

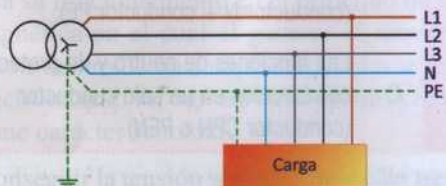


Figura 6.27. Esquema TN-S.

### Esquema TN-C

Tienen el punto neutro de la fuente de alimentación conectado directamente a tierra y las masas de la instalación receptora conectadas al mismo punto mediante conductores de protección. Las funciones de neutro y protección están combinadas en un solo conductor en todo el esquema.



Figura 6.28. Esquema TN-C.

### Esquema TN-C-S

Tienen el punto neutro de la fuente de alimentación conectado directamente a tierra y las masas de la instalación receptora conectadas al mismo punto mediante conductores de protección. Las funciones de neutro y protección están combinadas en un solo conductor, pero solo en un tramo del esquema.

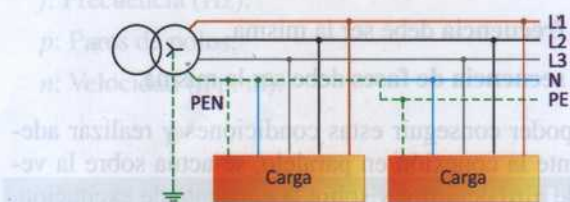


Figura 6.29. Esquema TN-C-S.

## 6.9. Medición en corriente alterna trifásica

Sobre los sistemas trifásicos se pueden realizar las mismas mediciones que se estudiaron en la unidad anterior, puesto que trifásica y monofásica están relacionadas.

### 6.9.1. Medición de la potencia

La medición de la potencia se realiza de idéntica manera que con los sistemas monofásicos, pero en el sistema trifásico, la corriente que circula por cada una de las fases no tiene por qué ser la misma.

Si el sistema es trifásico, la medición puede realizarse de diferentes formas:

- **Sistema equilibrado con neutro.** Solo es necesario un vatímetro. La potencia de la carga es tres veces la lectura.

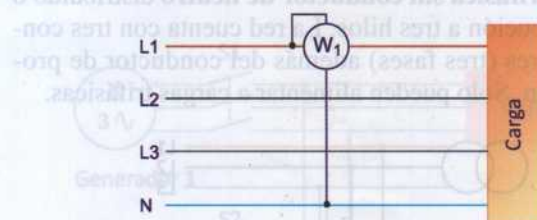


Figura 6.30. Medición de la potencia en sistema equilibrado con neutro.

- **Sistema desequilibrado con neutro.** Son necesarios tres vatímetros, uno para cada fase. La potencia de la carga es la suma de las lecturas de los vatímetros.



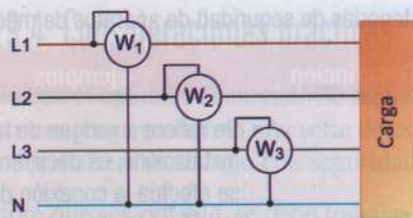


Figura 6.31. Medición de la potencia en sistema desequilibrado con neutro.

- **Sistema equilibrado y desequilibrado sin neutro.** Se unen los tres vatímetros por uno de sus bornes (bobinas voltimétricas, que deben ser todas iguales). La potencia de la carga es la suma de las lecturas de los vatímetros.

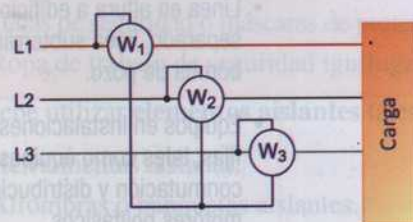


Figura 6.32. Medición de la potencia en sistema sin neutro.

Existe un método por el cual mediante dos vatímetros se puede conocer la potencia activa total de un sistema. Esta técnica se denomina **método de Arón** y se puede emplear tanto con sistemas equilibrados como desequilibrados.

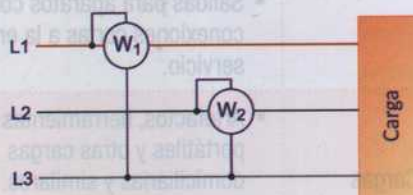


Figura 6.33. Medición de la potencia aplicando el método de Arón.

Para ello se conectan dos vatímetros en dos fases cualesquiera y la potencia activa total será la suma de ambas lecturas:

$$P_T = P_1 + P_2$$

Si el sistema es equilibrado, la potencia reactiva total viene determinada por la expresión:

$$Q_T = \sqrt{3} \cdot (P_1 - P_2)$$

## Actividad resuelta 6.6

Un sistema trifásico equilibrado al cual se le han conectado dos vatímetros según el método de Arón muestra las siguientes lecturas:  $W_1 = 8500 \text{ W}$  y  $W_2 = 6000 \text{ W}$ . Calcula las poten-

cias activa, reactiva y aparente, el factor de potencia y el consumo en la carga.

**Solución:**

La potencia activa la calculamos mediante Arón:

$$P = P_1 + P_2 = 8500 + 6000 = 14\,500 \text{ W}$$

La potencia reactiva es de:

$$Q_T = \sqrt{3} \cdot (P_1 - P_2) = \sqrt{3} (8500 - 6000) = 4330,12 \text{ VAR}$$

Y la potencia aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{14\,500^2 + 4330,12^2} = 15\,132,7 \text{ VA}$$

El desfase es de:

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{4330,12}{14\,500} = 0,298 \rightarrow \varphi = 16,627^\circ$$

Con un factor de potencia de:

$$\cos \varphi = 0,958$$

El consumo en la carga:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{14\,500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,958} = 21,84 \text{ A}$$

## 6.9.2. Medición de la energía

En los sistemas trifásicos cobra tanta importancia la medición de la energía activa como la reactiva, contando con aparatos para ambas.

- **Contador de energía activa.** Se encarga de registrar la energía en función de la potencia activa. Su lectura es en kilovatios hora ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ).

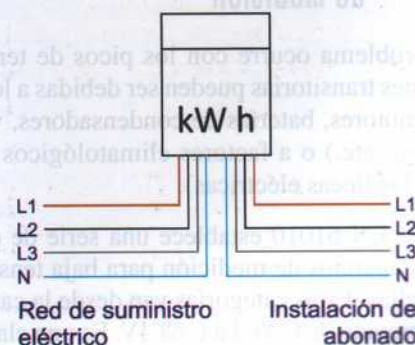


Figura 6.34. Medición con contador de energía activa trifásico.



- **Contador de energía reactiva.** Se encarga de registrar la energía en función de la potencia reactiva. Su lectura es en kilovoltiamperios reactivos (kVar · h).

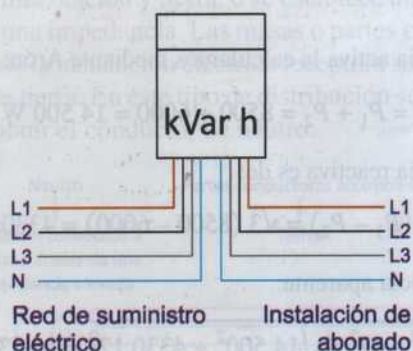


Figura 6.35. Medición con contador de energía reactiva trifásico.

Existen contadores que tienen la capacidad de realizar mediciones tanto de potencia activa como reactiva.



Figura 6.36. Contador trifásico.  
(Cortesía de Circutor.)



Figura 6.37. Contador para cuadro.  
(Cortesía de Circutor.)

### 6.9.3. Las categorías de los aparatos de medición

El mayor problema ocurre con los picos de tensión. Las sobretensiones transitorias pueden ser debidas a los equipos eléctricos (motores, baterías de condensadores, variadores de frecuencia, etc.) o a factores climatológicos (caída de rayos sobre las líneas eléctricas).

La norma EN 61010 establece una serie de categorías para que los aparatos de medición para baja tensión se encuadren en ellas. Estas categorías van desde la categoría I a la IV y se abrevian de CAT I a CAT IV. Es una clasificación en función de la energía, siendo la CAT IV la de mayor energía y la CAT I la de menor energía.

Tabla 6.3. Categorías de seguridad de aparatos de medición

Categoría	Descripción	Ejemplos
CAT IV	Tres fases en la conexión del servicio de energía eléctrica, cualquier conductor externo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se refiere a «origen de la instalación»; es decir, en dónde se efectúa la conexión de baja tensión a la alimentación del servicio de energía eléctrica.</li> <li>• Medidores de consumo de electricidad, equipos de protección contra sobrecorrientes.</li> <li>• Exterior y entrada del servicio, acometida del servicio desde el poste al edificio, recorrido entre el medidor y el panel.</li> <li>• Línea en altura a edificio separado, línea subterránea a bomba de pozo.</li> </ul>
CAT III	Distribución trifásica, incluyendo iluminación comercial monofásica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos en instalaciones fijas, tales como equipos de conmutación y distribución y motores polifásicos.</li> <li>• Bus y alimentador en plantas industriales.</li> <li>• Alimentadores y circuitos de derivación corta, dispositivos de paneles de distribución.</li> <li>• Sistemas de iluminación en edificios grandes.</li> <li>• Salidas para aparatos con conexiones cortas a la entrada del servicio.</li> </ul>
CAT II	Cargas conectadas a toma-corrientes monofásicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artefactos, herramientas portátiles y otras cargas domiciliarias y similares.</li> <li>• Tomacorrientes y circuitos de derivación larga.</li> <li>• SSalidas a más de 10 metros (30 pies) de fuente CAT III.</li> <li>• SSalidas a más de 20 metros (60 pies) de fuente CAT IV.</li> </ul>
CAT I	Electrónica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos electrónicos protegidos.</li> <li>• Equipos conectados a circuitos (fuente) en los cuales se toman mediciones para limitar las sobretensiones transitorias a un nivel adecuadamente bajo.</li> <li>• Cualquier fuente de voltaje alto y baja energía derivada de un transformador de gran resistencia de bobinado, tal como la sección de voltaje alto de una fotocopiadora.</li> </ul>



## 6.9.4. Consideraciones prácticas

Es necesario que el operario encargado de realizar las mediciones eléctricas tenga en cuenta una serie de consideraciones para poder realizar su trabajo con seguridad:

- Siempre que sea posible, se debe trabajar **sin tensión** y con los circuitos sin energía acumulada. Se debe evitar el rearme bloqueando los elementos de mando mediante candados, pasadores, llaves, etcétera.
- Se debe utilizar los **EPI** (equipos de protección individual) tales como:
  - Guantes aislados. Además, no se deben llevar objetos metálicos (relojes, anillos, pulseras, etc.).
  - Gafas de seguridad o máscaras de protección facial.
  - Ropa de trabajo de seguridad ignífuga.
- Se debe utilizar **elementos aislantes** tales como:
  - Herramientas aisladas.
  - Alfombras o banquetas aislantes.
- A la hora de realizar las mediciones:
  - Se debe realizar una medición de prueba previa y conocida, para verificar el correcto funcionamiento del aparato de medida.

— Con los terminales de medición, se debe hacer contacto primero con el conductor de tierra o neutro y luego con el conductor de fase. Y al retirar los terminales de medición se procede de manera inversa, retirando primero el terminal de fase.

— El aparato de medida, si es posible, no debe estar en contacto con el operario, para ello se debe apoyar o colgar. Esta es una medida de seguridad por si existe un choque eléctrico (debido a una fuerte sobretensión o fallo de aislamiento), de esta manera se evita que el circuito eléctrico se cierre a través del cuerpo del operario.

### • Se debe mantener el **aparato de medición en perfectas condiciones**:

- Se debe revisar que los terminales de medición y su cableado, así como la carcasa, no presenten desperfectos.
- Los aparatos de medición llevan fusibles como medida de protección, en caso de sustitución, se debe emplear los adecuados según el fabricante.
- Se debe verificar el estado de las baterías para así obtener lecturas fiables.



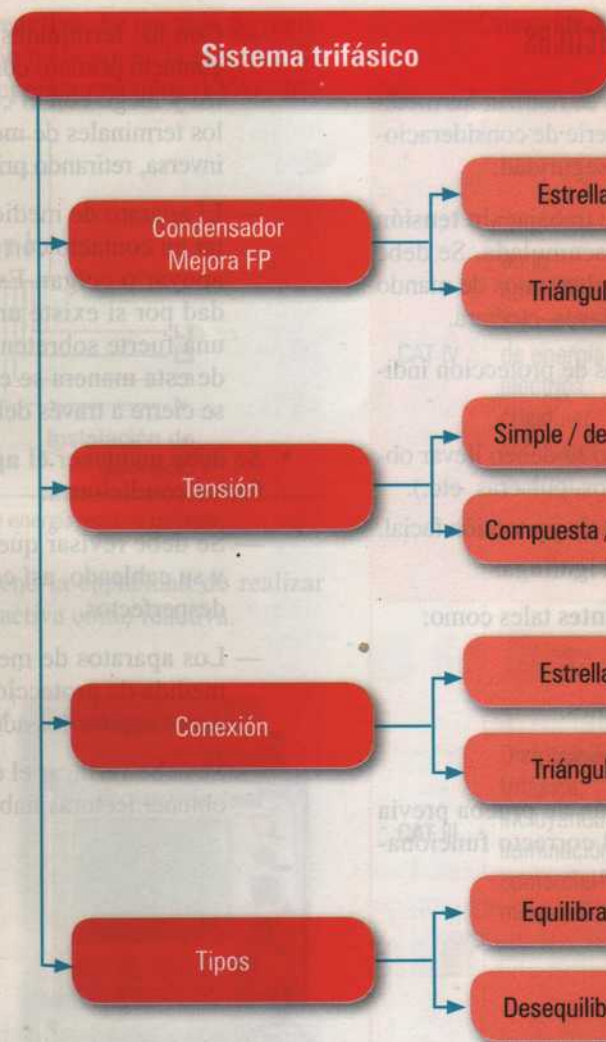


Figura 6.35. Condensador trifásico (Cortesía de Cicutor).

Figura 6.37. Condensador para cuadro (Cortesía de Cicutor).

### 6.3.3. Las categorías de los aparatos de medición

El mayor problema ocurre con los picos de tensión. Las sobretensiones transitorias pueden ser debidas a los equipos eléctricos (motores, baterías de condensadores, variadores de frecuencia, etc.) o a factores climatológicos (caída de rayos sobre las líneas eléctricas).

La norma IEC 61010 establece una serie de categorías para que los aparatos de medición para baja tensión se encuentren en ellas. Estas categorías van desde la categoría I a la IV y se abarcan de CAT I a CAT IV. Es una clasificación en función de la energía, siendo la CAT IV la de mayor energía y la CAT I la de menor energía.

<b>Cargas conectadas a los aparatos de medición</b> <b>CAT II</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrolados: bornas, montajes portátiles y otros corajes domiciliarios y similares.</li> <li>• Tomacorrientes y circuitos de derivación fijos.</li> <li>• SSalidas a más de 10 metros (30 pies) de fuente CAT III.</li> <li>• SSalidas a más de 20 metros (60 pies) de fuente CAT IV.</li> </ul>
<b>CAT I</b>	<b>Electrónica</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos electrónicos protegidos.</li> <li>• Equipos conectados a circuitos (cuanto) en los cuales se toman mediciones para limitar las sobretensiones transitorias a un nivel adecuadamente bajo.</li> <li>• Cualquier fuente de voltaje alto y bajo energía derivada de un transformador de gran resistencia de bobinado, tal como la sección de voltaje alto de una fotocopiadora.</li> </ul>



## Actividades de comprobación

- 6.1. Las ventajas de los sistemas trifásicos son:
- Son sistemas de doble tensión.
  - La potencia suministrada es más uniforme.
  - Hay una reducción del cableado frente a los sistemas monofásicos.
  - Todas las anteriores son ciertas.
- 6.2. La tensión de fase es:
- El voltaje que hay entre fase y neutro.
  - El voltaje que hay entre dos fases cualesquiera.
  - El voltaje que hay entre neutro y la toma de tierra.
  - El voltaje que hay entre las masas metálicas y la toma de tierra.
- 6.3. La tensión compuesta es:
- El voltaje que hay entre fase y neutro.
  - El voltaje que hay entre dos fases cualesquiera.
  - El voltaje que hay entre neutro y la toma de tierra.
  - El voltaje que hay entre las masas metálicas y la toma de tierra.
- 6.4. La relación entre la tensión de fase y la tensión de línea es:
- $\vec{U}_L = \vec{U}_F$ .
  - $\vec{U}_F = \vec{U}_L \cdot \sqrt{3}$ .
  - $\vec{U}_L = \vec{U}_F \cdot \sqrt{3}$ .
  - $\vec{U}_L = \frac{\vec{U}_F}{\sqrt{3}}$ .
- 6.5. En un receptor trifásico conectado en triángulo, se observa la siguiente relación:
- $U_F = U_L$ .
  - $U_L = U_F \cdot \sqrt{3}$ .
  - $\vec{U}_L = \frac{\vec{U}_F}{\sqrt{3}}$ .
  - $U_L = 0$ .
- 6.6. En un receptor trifásico conectado en estrella, se observa la siguiente relación:
- $U_F = U_L$ .
  - $U_L = U_F \cdot \sqrt{3}$ .
  - $\vec{U}_L = \frac{\vec{U}_F}{\sqrt{3}}$ .
  - $U_L = 0$ .
- 6.7. Los condensadores que forman una batería trifásica están sometidos a una tensión de:
- Si la conexión es en triángulo, entonces están sometidos a la mayor tensión de la red.
  - Si la conexión es en estrella, entonces están sometidos a la mayor tensión de la red.
  - La batería de condensadores solo se puede conectar en monofásica.
  - Internamente, al estar conectados a neutro, la tensión entre todos sus bornes es cero.
- 6.8. ¿En qué esquema de distribución, un punto de alimentación se conecta directamente a tierra y todas las masas o partes conductoras accesibles de la instalación eléctrica receptora se conectan a una toma de tierra independiente?
- TT.
  - IT.
  - TN-S.
  - TN-C.
- 6.9. El método de Arón consiste en:
- Emplear un vatímetro (conectado a una fase y a un neutro) y su potencia activa es el producto de su lectura por tres.
  - Emplear dos vatímetros (conectados cada uno a una fase y el otro terminal a la fase restante) y su potencia activa es la suma de sus dos lecturas.
  - Emplear tres vatímetros (cada uno a una fase y a un neutro) y su potencia activa es la suma de sus tres lecturas.
  - Emplear tres vatímetros (cada uno a una fase y el otro terminal unido entre sí formando un neutro ficticio) y su potencia activa es la suma de sus tres lecturas.
- 6.10. ¿Cuál debe ser la categoría del equipo de medición en sistemas de alumbrado en edificios comerciales?
- Categoría I.
  - Categoría II.
  - Categoría III.
  - Categoría IV.



### Actividades de aplicación

- 6.11.** Un horno eléctrico trifásico está formado por tres resistencias de  $80 \Omega$ . Calcula la potencia que consume si se conecta a una red trifásica de 400 V al conectarlo en estrella y en triángulo.
- 6.12.** Un motor trifásico tiene las siguientes características: tensión nominal 230 V/400 V,  $\cos \varphi = 0,87$ , rendimiento 0,80, potencia nominal 5 CV, y se conecta a una red trifásica de 400 V. Determina el tipo de conexión posible, las intensidades de fase y de línea y las potencias.
- 6.13.** Un motor trifásico tiene las siguientes características: tensión nominal 400 V/690 V,  $\cos \varphi = 0,88$ , rendimiento 0,85, potencia nominal 7,5 kW, y se conecta a una red trifásica de 400 V. Determina el tipo de conexión posible, las intensidades de fase y de línea y las potencias.
- 6.14.** Un sistema trifásico a 400 V presenta los siguientes valores en los conductores de fase:

$$I_{L1} = 25 \text{ A} \quad \cos \varphi_{L1} = 0,6$$

$$I_{L2} = 10 \text{ A} \quad \cos \varphi_{L2} = 0,74$$

Entre el conductor L3 y el neutro hay una carga de impedancia  $\bar{Z} = 80 + j10 \Omega$ .

Determina las potencias del sistema y el factor de potencia total, suponiendo que todas las cargas están conectadas entre fase y neutro.

- 6.15.** Un motor trifásico de 2,5 CV con un rendimiento de 0,86 y un factor de potencia de 0,75, está conectado a una red de 400 V. Determina la batería de condensadores a conectar en estrella para situar el factor de potencia a 0,98. Determina, además, la corriente antes y después de colocar la batería de condensadores.
- 6.16.** Un motor trifásico de 10 CV con un rendimiento de 0,89 y un factor de potencia de 0,7, está conectado a una red de 400 V. Determina la batería de condensadores a conectar en estrella para situar el factor de potencia a 0,94. Determina, además, la corriente antes y después de colocar la batería de condensadores.
- 6.17.** Los receptores de una instalación industrial se conectan a una red trifásica de 400 V, con las siguientes características:

Receptor	$P_n$ (kW)	Rendimiento	$\cos \varphi$	Conexión
Motor M1	15	0,86	0,85	$\Delta$
Motor M2	10	0,82	0,80	Y
Calefacción	8,2	1	1	$\Delta$
Lámparas	$0,15 \times 30$	1	0,6	Y

Calcula para cada receptor:

- Corrientes y tensión de fase y de línea.
- Potencias activas, reactivas y aparentes.

Calcula para el conjunto:

- Corriente.
- Factor de potencia.
- Batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,95 tanto en conexión en estrella como en triángulo.
- Corriente con el factor de potencia mejorado.



6.18. Los receptores de una instalación industrial se conectan a una red trifásica de 400 V, con las siguientes características:

Receptor	$P_n$ (kW)	Rendimiento	$\cos \varphi$	Conexión
Motor M1	5	0,91	0,82	$\Delta$
Motor M2	7,5	0,87	0,84	Y
Calefacción	4	1	1	$\Delta$
Lámparas	$0,25 \times 36$	1	0,62	Y

Calcula para cada receptor:

- Corrientes y tensión de fase y de línea.
- Potencias activas, reactivas y aparentes.

Calcula para el conjunto:

- Corriente.
- Factor de potencia.
- Batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,90 tanto en conexión en estrella como en triángulo.
- Corriente con el factor de potencia mejorado.

6.19. Los receptores de una instalación industrial se conectan a una red trifásica de 400 V, con las siguientes características:

Receptor	$P_n$	Rendimiento	$\cos \varphi$	Conexión
Motor M1	10 CV	0,95	0,70	$\Delta$
Motor M2	6 kW	0,98	0,78	Y
Horno	3000 W	1	1	$\Delta$

Calcula para el conjunto total de receptores:

- Corriente.
- Factor de potencia.
- Batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,98 tanto en conexión en estrella como en triángulo.
- Corriente con el factor de potencia mejorado.

## Actividades de ampliación

6.20. Consulta en internet páginas web de fabricantes de baterías de condensadores. Fijate en sus catálogos comerciales. Observa la gama y sus características. Por ejemplo, Circutor ([www.circutor.es](http://www.circutor.es)) o Cydesa ([www.cydesa.com](http://www.cydesa.com)).