



UNIVERSIDADE
DE VIGO

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Potencia

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Potencia instantánea trifásica

- En trifásica, la potencia instantánea es la suma de las potencias instantáneas de cada fase:

$$p(t) = p_R(t) + p_S(t) + p_T(t) = u_R(t)i_R(t) + u_S(t)i_S(t) + u_T(t)i_T(t)$$

- Y si es **equilibrada**, en las tres fases pasa lo mismo:

$$\begin{aligned} p(t) = & \sqrt{2}U_f \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2}I_f \sin(\omega t - \varphi) + \\ & + \sqrt{2}U_f \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sqrt{2}I_f \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & + \sqrt{2}U_f \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sqrt{2}I_f \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Potencia instantánea trifásica

□ Operando, resulta:

$$\begin{aligned} p(t) = & U_f I_f (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) + \\ & + U_f I_f \left(\cos \varphi - \cos \left(2 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \varphi \right) \right) + \\ & + U_f I_f \left(\cos \varphi - \cos \left(2 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \varphi \right) \right) \end{aligned}$$

□ ¡La potencia instantánea **NO** depende del tiempo!

$$p(t) = 3 U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi = \text{cte.}$$

CIRCUITOS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

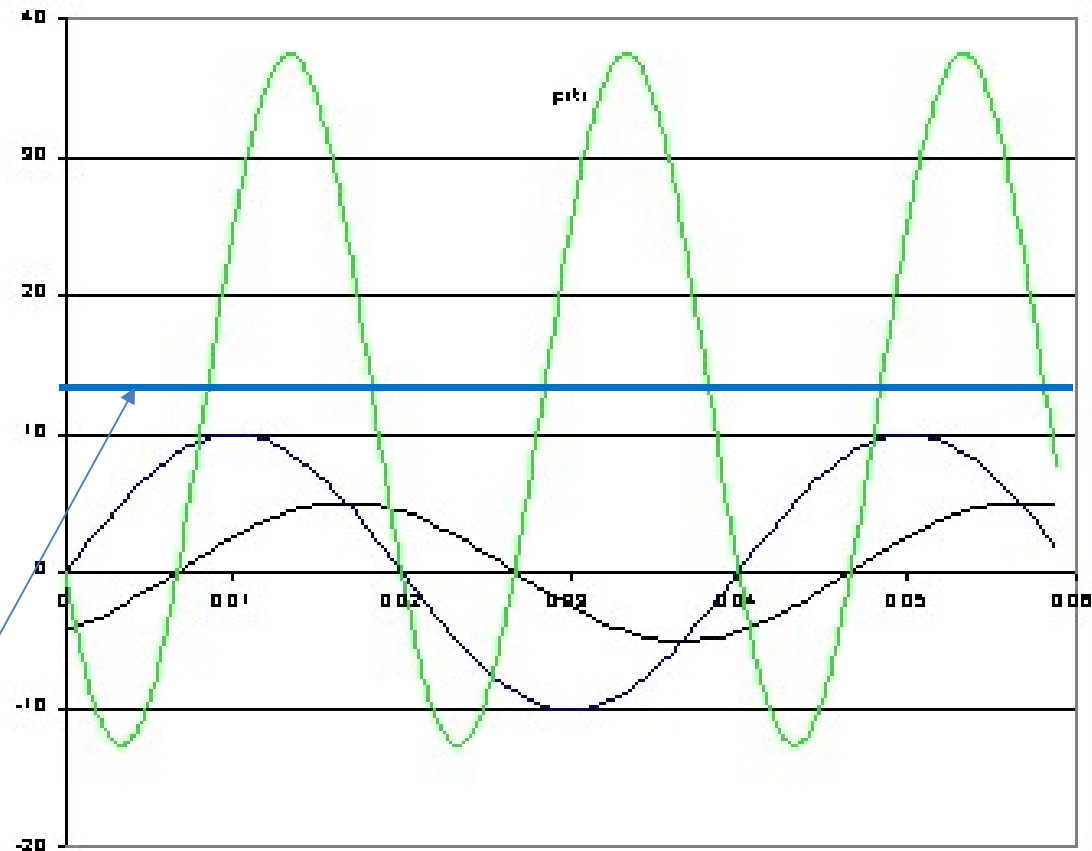
Potencia instantánea monofásica

La ecuación (*) indica que la potencia instantánea de un sistema monofásico depende del tiempo y oscila alrededor de un valor medio de potencia, $U_F I_F \cos \varphi$, con una frecuencia igual al doble de la frecuencia f de tensiones y corrientes.

Aunque la potencia transmitida tiene un valor eficaz positivo, sus valores instantáneos son pulsantes. La energía no se entrega como flujo constante, sino que llega en oleadas. Esto puede tener efectos indeseables en los motores y los generadores monofásicos.

A nivel comparativo recordemos que la potencia instantánea monofásica **SI** que depende del **TIEMPO**

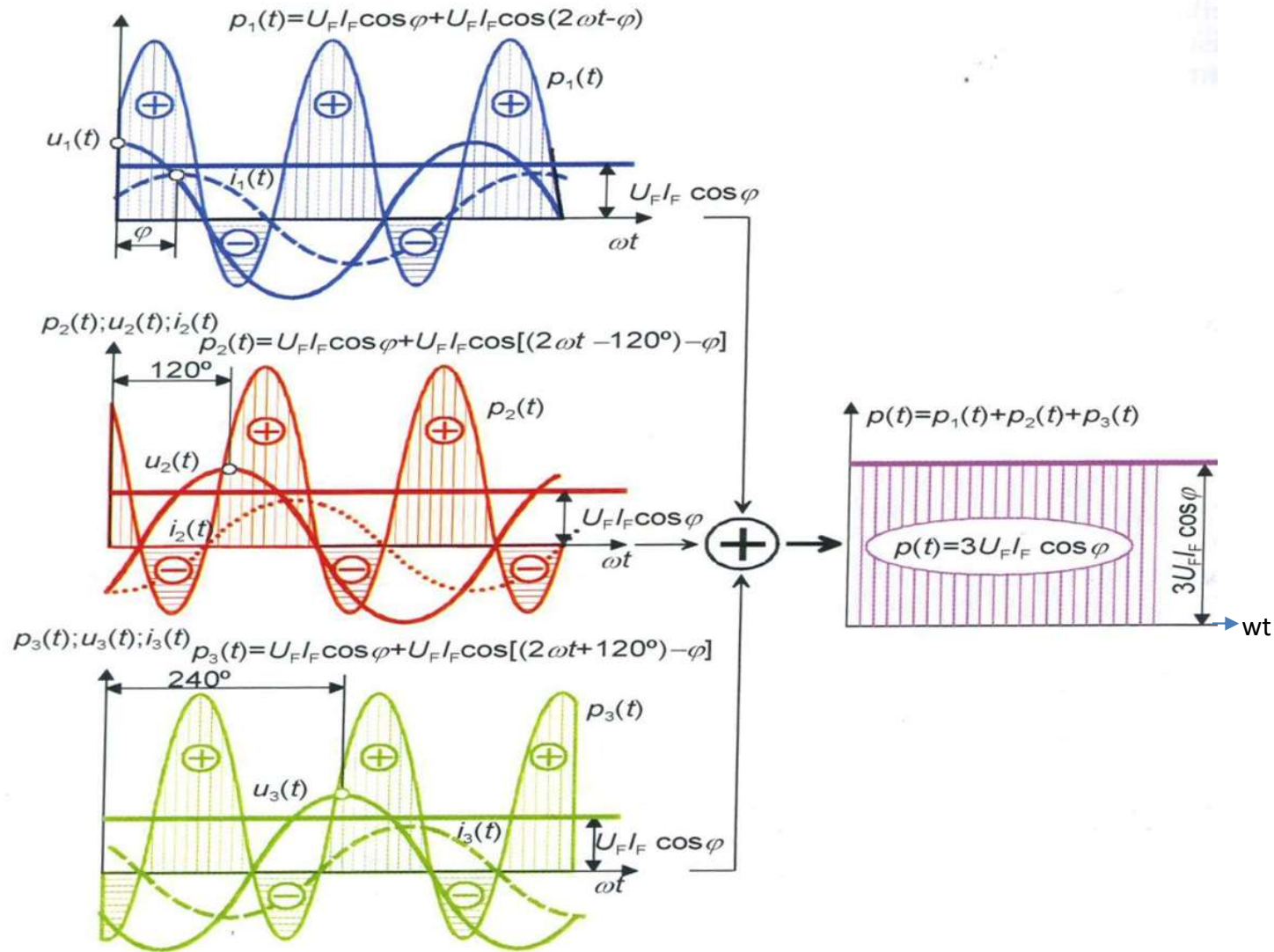
Potencia instantánea $p(t)$. Circuito monofásico de carga inductiva.



(*)
$$p_1(t) = U_F I_F \cos \varphi + U_F I_F \cos[(2\omega t - 120^\circ) - \varphi]$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Potencia instantánea trifásica



Potencias instantáneas de fase y total de un sistema trifásico equilibrado

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

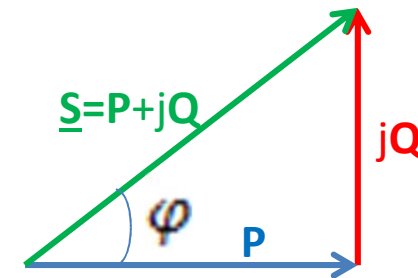
Potencia activa, reactiva y aparente

- ❑ **Activa:** valor medio de la instantánea:

$$P = \frac{1}{T} \int p(t) dt = p(t) = 3 U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

- o suma de las activas de cada fase:

$$P = P_R + P_S + P_T$$



- ❑ **Reactiva:** Σ de las reactivas de cada fase:

$$Q = Q_R + Q_S + Q_T = 3 U_f I_f \sin \varphi = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

- ❑ **Aparente:** Σ de las aparentes de cada fase:

$$\bar{S} = \bar{S}_R + \bar{S}_S + \bar{S}_T = \bar{U}_R \bar{I}_R^* + \bar{U}_S \bar{I}_S^* + \bar{U}_T \bar{I}_T^* = \sqrt{3} UI e^{j\varphi} = P + jQ$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Potencia trifásica

Se presentará el caso de carga equilibrada y fuente equilibrada de secuencia directa

Carga conectada en estrella:

$$\left. \begin{array}{l} P_f = U_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi \\ P_T = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi \end{array} \right\} \text{ Como: } U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} \text{ e } I_f = I_l \Rightarrow P_T = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi$$

Para una carga conectada en triángulo, se llega al mismo resultado. Se tiene pues:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_T = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi \text{ [W]} \\ Q_T = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \sin\varphi \text{ [VAr]} \\ S_T = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \text{ [VA]} \\ FP = \cos\varphi \end{array} \right.$$

$$S_T^2 = P_T^2 + Q_T^2 \Rightarrow S_T = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \sin\varphi)^2 + (\sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi)^2}$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS

Potencias en sistemas desequilibrado

❑ La potencia **instantánea** ya **NO** es **constante**

❑ La potencia **activa**, ya no es igual a $\sqrt{3} U I \cos \varphi$:

$$P = P_R + P_S + P_T = U_R I_R \cos \varphi_R + U_S I_S \cos \varphi_S + U_T I_T \cos \varphi_T$$

❑ La potencia **reactiva** tampoco es $\sqrt{3} U I \sin \varphi$:

$$Q = Q_R + Q_S + Q_T = U_R I_R \sin \varphi_R + U_S I_S \sin \varphi_S + U_T I_T \sin \varphi_T$$

❑ Ni la potencia **aparente** es $\sqrt{3} U I$:

$$\bar{S} = \bar{S}_R + \bar{S}_S + \bar{S}_T = \bar{U}_R \bar{I}_R^* + \bar{U}_S \bar{I}_S^* + \bar{U}_T \bar{I}_T^* = P + jQ$$

❑ Y el **factor de potencia** (equivalente) es:

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{P_R + P_S + P_T}{\sqrt{(P_R + P_S + P_T)^2 + (Q_R + Q_S + Q_T)^2}}$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS

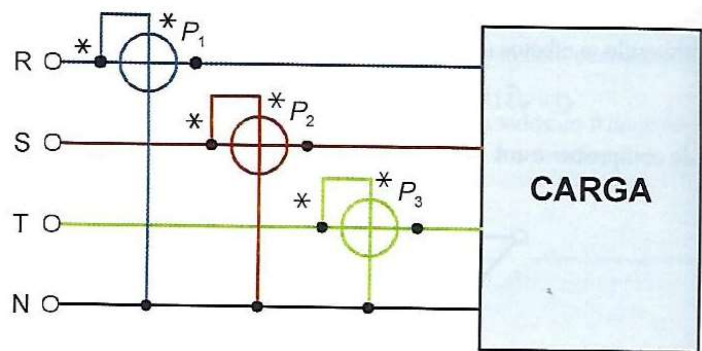
Medida de la potencia

Medida de la potencia en un circuito de c.a. monofásica:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u_x(t) i_y(t) dt = U_x I_y \cos \alpha$$

Lectura de un vatímetro que tiene conectada su bobina voltimétrica a la tensión U_x y por cuya bobina amperimétrica circula una corriente I_x , siendo α el desfase entre los fasores de ambas señales.

Si se desea medir la potencia activa de un **sistema trifásico a cuatro hilos** (equilibrado o no), se necesitarán tres vatímetros unos por cada fase, como se muestra en la figura:



La potencia total del conjunto será igual a la suma de las potencias parciales de cada fase

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

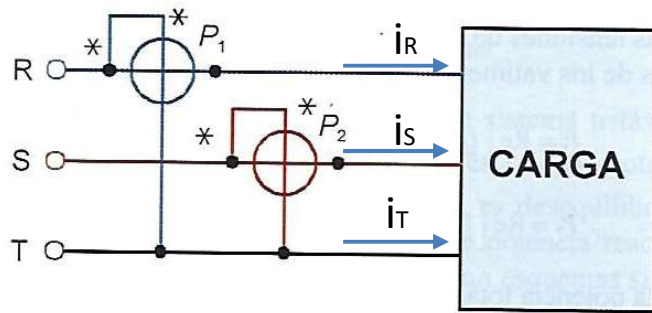
Esquema de un sistema trifásico a cuatro hilos

Caso especial ➡

Si la **carga está equilibrada**, será suficiente utilizar un único vatímetro conectado a una fase y la potencia total será tres veces la que marque el vatímetro.

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la potencia de un sistema a tres hilos. (Equilibrado o no)



Medida con dos vatímetros. Conexión Aron

Como:

$$u_{RN}(t) - u_{TN}(t) = u_{RT}(t) \quad ; \quad u_{SN}(t) - u_{TN}(t) = u_{ST}(t)$$

Teorema de Blondel. El número mínimo de vatímetros que se requiere para medir la potencia en un sistema polifásico es uno menos que el número de hilos o conductores del sistema

Voltímetro 1. Bobina voltimétrica conectada entre las fases R y T. Bobina amperimétrica en serie con la fase R.

Voltímetro 2. Bobina voltimétrica conectada entre las fases S y T. Bobina amperimétrica en serie con la fase S.

$$p(t) = u_{RN}(t)i_R(t) + u_{SN}(t)i_S(t) + u_{TN}(t)i_T(t)$$

Si el sistema tiene tres hilos

$$i_R(t) + i_S(t) + i_T(t) = 0$$

$$i_T(t) = -i_R(t) - i_S(t)$$

$$p(t) = u_{RN}(t)i_R(t) + u_{SN}(t)i_S(t) + u_{TN}(t)[-i_R(t) - i_S(t)]$$

$$p(t) = [u_{RN}(t) - u_{TN}(t)]i_R(t) + [u_{SN}(t) - u_{TN}(t)]i_S(t)$$

$$p(t) = u_{RT}(t)i_R(t) + u_{ST}(t)i_S(t) = p_1(t) + p_2(t)$$

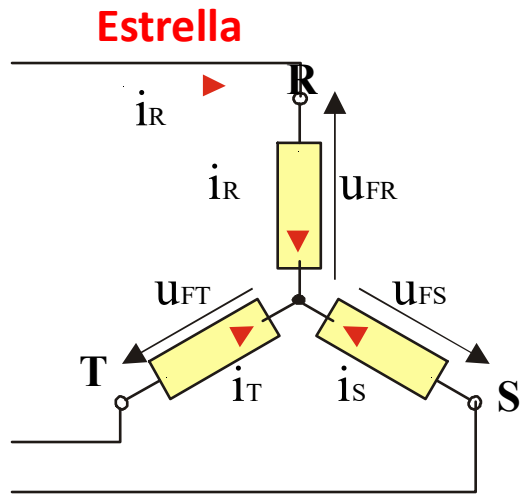
$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{RT}(t) i_R(t) dt = U_{RT} I_R \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad P_1 = \operatorname{Re} [\underline{U}_{RT} \underline{I}_R^*]$$

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{ST}(t) i_S(t) dt = U_{ST} I_S \cos \beta \quad \Rightarrow \quad P_2 = \operatorname{Re} [\underline{U}_{ST} \underline{I}_S^*]$$

$$P = P_1 + P_2$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la Potencia activa trifásica. Sistema trifásico de tres hilos



A continuación se demostrará la validez del Método Aron para una conexión estrella.

La demostración se hará para potencia instantánea extendiendo su validez para potencia activa.

La potencia instantánea total será la suma de las potencias instantáneas de cada fase.

$$p = p_R + p_S + p_T$$

$$p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T$$

Aplicando Kirchoff en el nudo central: $i_T = -i_R - i_S$ reemplazando:

$$p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot (-i_R - i_S)$$

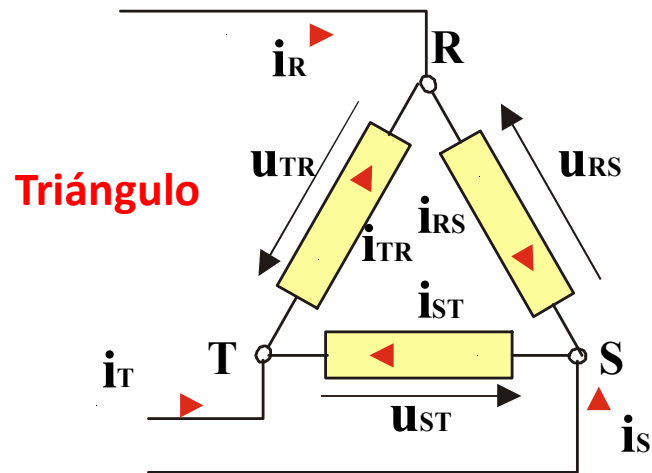
$$p = i_R \cdot (u_R - u_T) + i_S \cdot (u_S - u_T)$$

$$p = i_R \cdot (u_{RT}) + i_S \cdot (u_{ST})$$

$$p = p_{W1} + p_{W2}$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la Potencia activa trifásica. Sistema trifásico de tres hilos



A continuación se demostrará la validez del Método Aron para una conexión triángulo.

La potencia instantánea total será la suma de las potencias instantáneas de cada fase.

$$p = p_{RS} + p_{ST} + p_{TR}$$

$$p = u_{RS} \cdot i_{RS} + u_{ST} \cdot i_{ST} + u_{TR} \cdot i_{TR}$$

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff al triángulo: $u_{RS} = -u_{TR} - u_{ST}$ reemplazando:

$$p = (-u_{TR} - u_{ST}) \cdot i_{RS} + u_{ST} \cdot i_{ST} + u_{TR} \cdot i_{TR}$$

$$p = u_{TR} \cdot (-i_{RS} + i_{TR}) + u_{ST} \cdot (-i_{RS} + i_{ST})$$

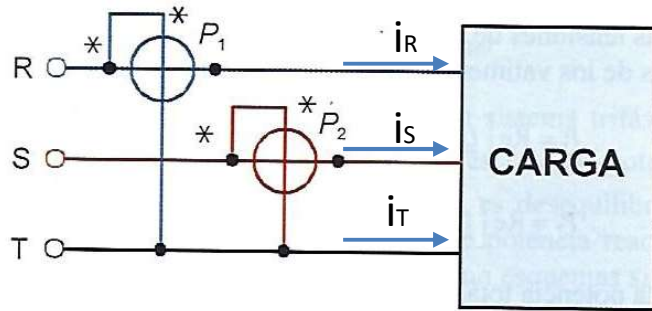
Aplicando la primera ley de Kirchhoff a los nudos R y S: $p = -u_{TR} \cdot i_R + u_{ST} \cdot i_S$

Pero $-u_{TR} = u_{RT}$ entonces: $p = u_{RT} \cdot i_R + u_{ST} \cdot i_S$

$$p = p_{W1} + p_{W2}$$

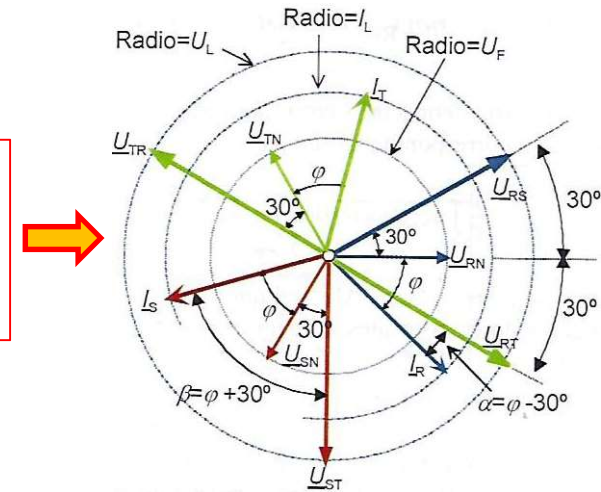
SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la potencia en sistemas equilibrados



Medida con dos vatímetros. Conexión Aron

Fasores de tensiones y corrientes en un sistema trifásico equilibrado



$$P_1 \Rightarrow P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{RT}(t) i_R(t) dt = U_{RT} I_R \cos \alpha$$

$$\Rightarrow P_1 = \operatorname{Re} \left[\underline{U}_{RT} \underline{I}_R^* \right] = U_L I_L \cos(\varphi - 30^\circ)$$

$$P_2 \Rightarrow P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{ST}(t) i_S(t) dt = U_{ST} I_S \cos \beta$$

$$\Rightarrow P_2 = \operatorname{Re} \left[\underline{U}_{ST} \underline{I}_S^* \right] = U_L I_L \cos(\varphi + 30^\circ)$$

$$P = P_1 + P_2 = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

Restando: $P_1 - P_2 = U_L I_L \sin \varphi$

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \tan \varphi$$

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}$$

$$\Rightarrow f.d.p. = \cos \varphi$$

Para un sistema trifásico con carga inductiva y de secuencia directa

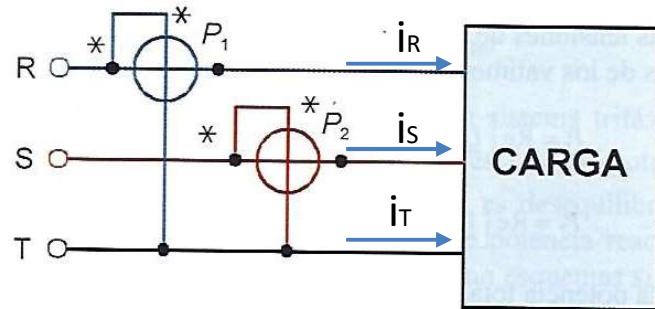
$$\Rightarrow Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{Q}{\sqrt{3}}$$

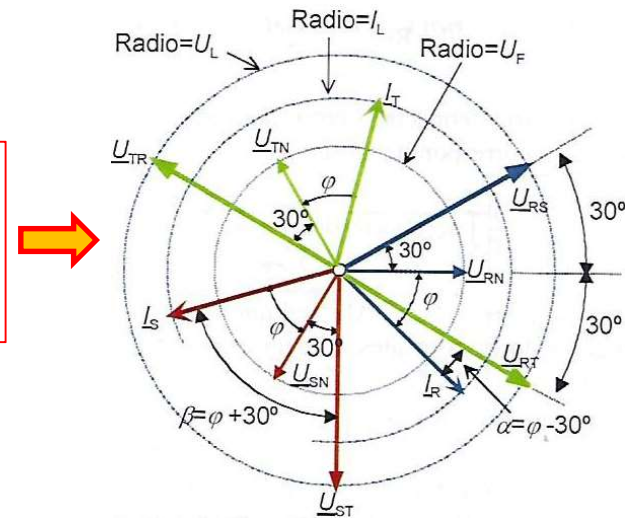
Se puede comprobar que para carga inductiva y secuencia inversa, se cumple: $P_1 - P_2 = -\frac{Q}{\sqrt{3}}$

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la potencia en sistemas equilibrados



Fasores de tensiones y corrientes en un sistema trifásico equilibrado



Medida con dos vatímetros. Conexión Aron

$$P_1 = \text{Re} \left[\underline{U}_{RT} \underline{I}_R^* \right] = U_L I_L \cos(\varphi - 30^\circ)$$

$$P_2 = \text{Re} \left[\underline{U}_{ST} \underline{I}_S^* \right] = U_L I_L \cos(\varphi + 30^\circ)$$

$$P = P_1 + P_2 = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

Casos particulares:

1. Si la carga es resistiva pura, $\varphi = 0^\circ$, ambas lecturas serán iguales: $P_1 = P_2$.
 2. Si $\varphi < 60^\circ$, es decir, si el f.d.p. es superior a 0,5, entonces se tendrá: $P_1 > 0$ y $P_2 > 0$.
 3. Si $\varphi = 60^\circ$ (f.d.p = 0,5), entonces el segundo vatímetro dará una lectura nula ($P_2 = 0$).
 4. Si $\varphi > 60^\circ$, entonces $\cos(30^\circ + \varphi)$ es negativo y el vatímetro P_2 dará una lectura negativa. Para poder efectuar la medida deberá invertirse una de las bobinas del vatímetro.
2. La potencia sigue siendo la suma de P_1 (positivo) y P_2 (negativo).

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la potencia activa trifásica.

Métodos de medida

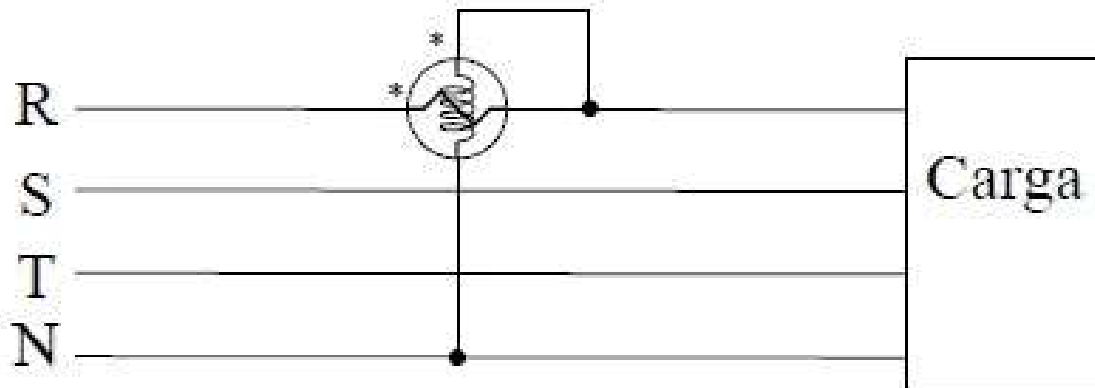
- ❑ Los distintos métodos se basan en alguna de las ecuaciones:

$$P = P_R + P_S + P_T = 3U_f I_f \cos\varphi = \sqrt{3}UI \cos\varphi \quad (\text{S. EQUILIBRADO})$$

- ❑ Hay que tener en cuenta distintos condicionantes:
 - Si son válidos con **tensiones desequilibradas**;
 - Si son válidos con **corrientes desequilibradas**;
 - Si se dispone de **tres o cuatro hilos**;
 - **Cuántos** vatímetros se necesitan
- ❑ Aparecerán **constantes de multiplicación**:
 - Debidas al propio método
 - Debidas a los aparatos: trafos de intensidad, etc...

CIRCUITOS TRIFÁSICOS

Un vatímetro con tensión simple



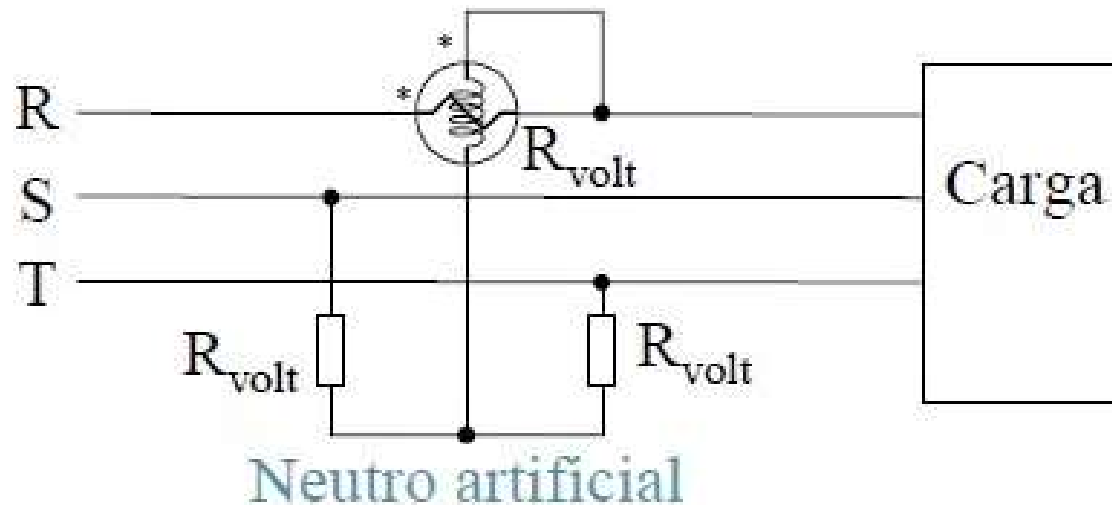
Esquema eléctrico de conexión de un vatímetro con tensión simple

$$P_{\text{med}} = U_R I_R \cos \varphi_R \quad P = K_m P_{\text{med}} = 3 U_R I_R \cos \varphi_R$$

- ❑ Válido si hay **equilibrio** en tensiones y en intensidades
- ❑ Necesita **cuatro hilos**

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Un vatímetro con tensión simple (trifilar)



$$P_{\text{med}} = U_R I_R \cos \varphi_R$$

$$P = K_m P_{\text{med}} = 3 U_R I_R \cos \varphi_R$$

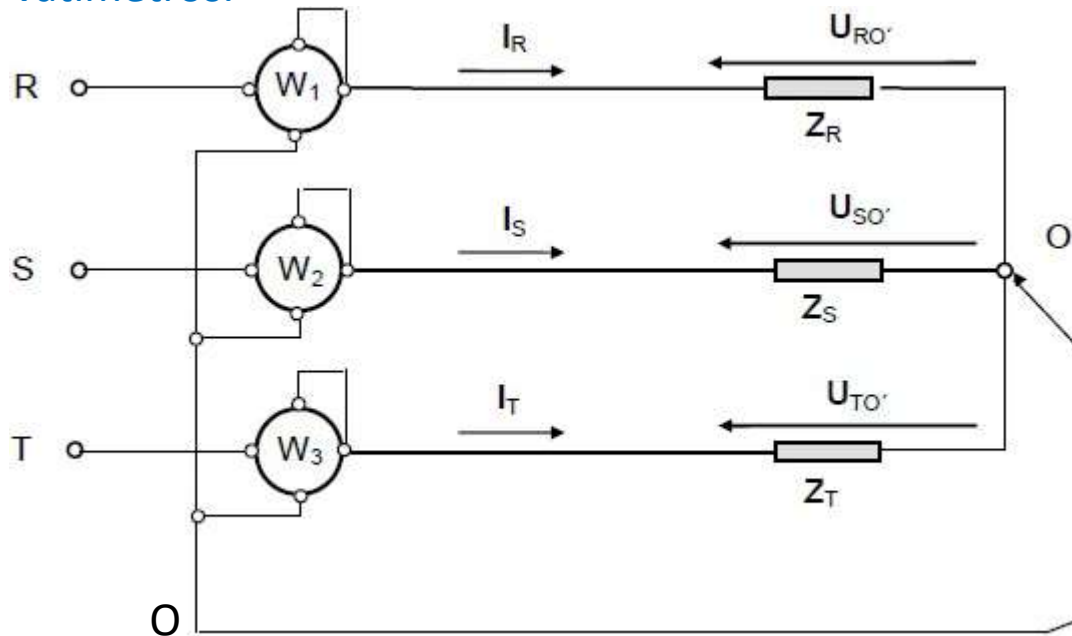
- ❑ Válido si hay **equilibrio** en tensiones y en intensidades

En **trifilar**, se crea un **neutro artificial** con una estrella equilibrada de resistencias con el valor de la bobina voltimétrica

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la Potencia trifásica. Sistema trifásico a cuatro hilos

La medición de potencia en un sistema trifásico de 4 hilos es bastante simple de entender ya que simplemente se lee la potencia en cada fase con un vatímetro empleando en total 3 vatímetros.



Las tres bobinas voltimétricas de los vatímetros, se unen a un punto común, que es el centro de estrella del receptor "O'".

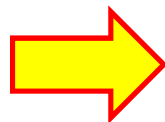
$$P_{\text{trifásica}} = W_1 + W_2 + W_3$$

$$W_1 = U_{RO} \cdot I_R \cdot \cos \varphi_R = \bar{U}_{RO} \cdot \bar{I}_R$$

$$W_2 = U_{SO} \cdot I_S \cdot \cos \varphi_S = \bar{U}_{SO} \cdot \bar{I}_S$$

$$W_3 = U_{TO} \cdot I_T \cdot \cos \varphi_T = \bar{U}_{TO} \cdot \bar{I}_T$$

Esquema eléctrico de la conexión de 3 vatímetros en un sistema de 4 hilos



$$P_{\text{trifásica}} = \bar{U}_{RO} \cdot \bar{I}_R + \bar{U}_{SO} \cdot \bar{I}_S + \bar{U}_{TO} \cdot \bar{I}_T$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la Potencia trifásica. Sistema trifásico a cuatro hilos

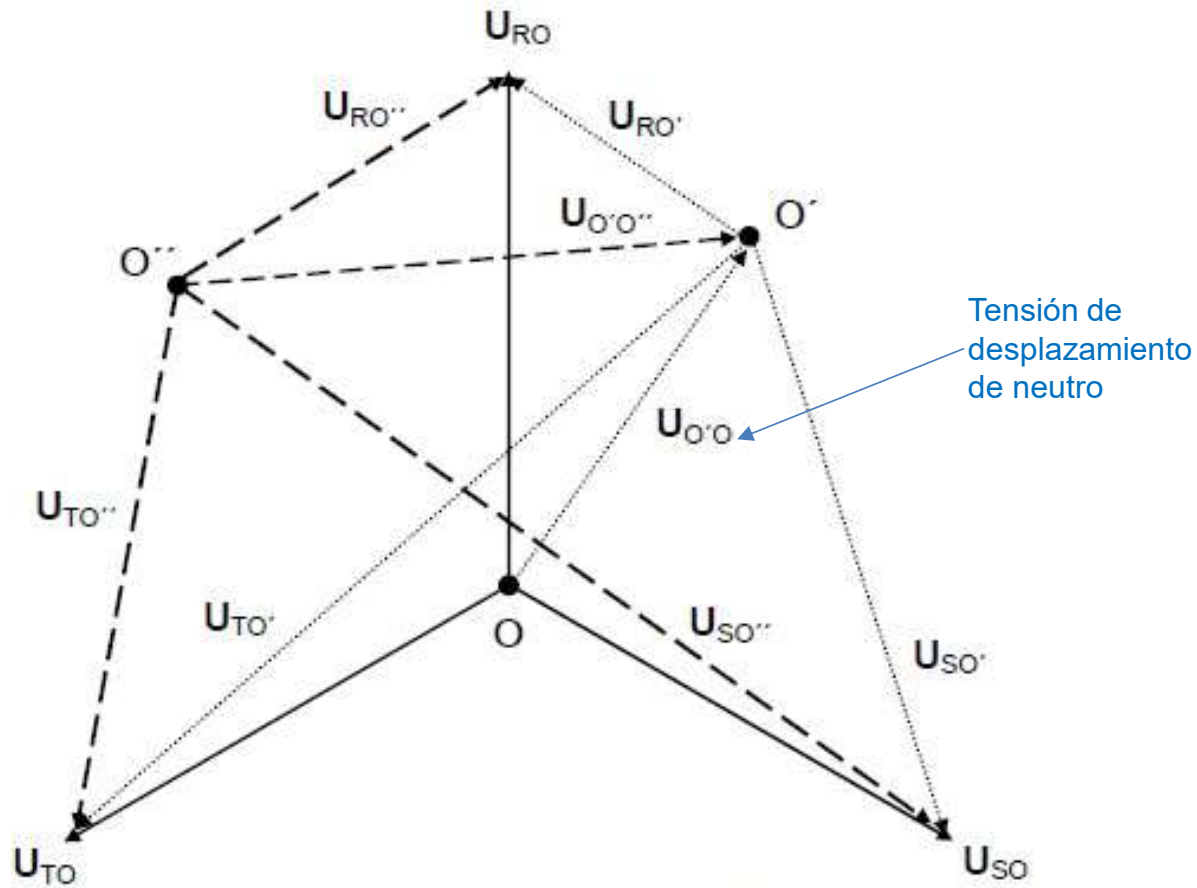
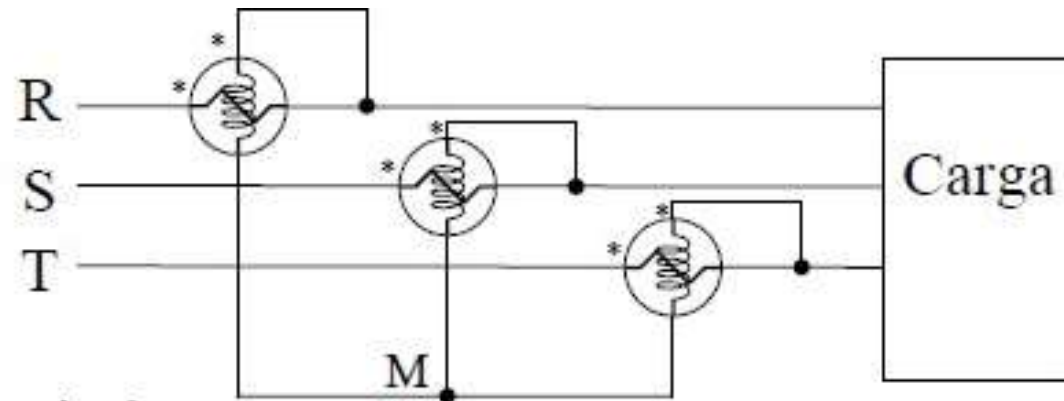


Diagrama fasorial de tensiones de un sistema trifásico desequilibrado

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la Potencia trifásica. Sistema trifásico a tres hilos

La medición de potencia en un sistema trifásico de 3 hilos, como en el caso anterior, se lee la potencia en cada fase con un vatímetro empleando en total 3 vatímetros.



$$P_{med_1} = \frac{1}{T} \int u_{RM} i_R dt$$

$$P_{med_2} = \frac{1}{T} \int u_{SM} i_S dt$$

$$P_{med_3} = \frac{1}{T} \int u_{TM} i_T dt$$

Esquema eléctrico de la conexión de 3 vatímetros en un sistema de 3 hilos

$$P_{med_1} + P_{med_2} + P_{med_3} =$$

$$= \frac{1}{T} \int (p_R + p_S + p_T - u_M (i_R + i_S + i_T)) dt$$

$$P = P_{med_1} + P_{med_2} + P_{med_3}$$

Válido con **carga desequilibrada**, pero el Método de Aron lo supera

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Medida de la potencia activa trifásica. Resumen

Método	3 Hilos	4 Hilos	Desequilibrada
1 vatímetro	Sí (ntro. art.)	Sí	No válido
2 vatímetros (Aron)	Sí	No	Válido
3 vatímetros	(Sí)	Sí	Válido

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Vatímetros trifásicos

- ❑ En los casos anteriores, hay que **sumar** las lecturas o multiplicarlas por constantes
- ❑ Puede ocurrir que algún aparato indique al revés y haya que **cambiar su polaridad**
- ❑ Estos inconvenientes se evitan con vatímetros trifásicos de **dos o tres equipos** vatimétricos, pero un solo indicador
- ❑ Suelen estar conectados internamente siguiendo los métodos descritos:
 - 2 equipos: método de Aron
 - 3 equipos: método de los tres vatímetros

SISTEMAS TRIFÁSICOS

Métodos de medida de la potencia reactiva

- La potencia reactiva puede medirse:
 - Con los **mismos montajes** que para potencia activa, sustituyendo los **vatímetros** por **varímetros**
 - (Salvo los que utilizan neutro artificial: $\bar{Z}_{\text{volt.}} \neq R_{\text{volt.}}$)
 - Midiendo la activa con vatímetros, la aparente con voltímetros y amperímetros y **deduciendo** Q:
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$
 - Utilizando vatímetros con **conexiones particulares**
 - Típicamente retrasando las tensiones 90°

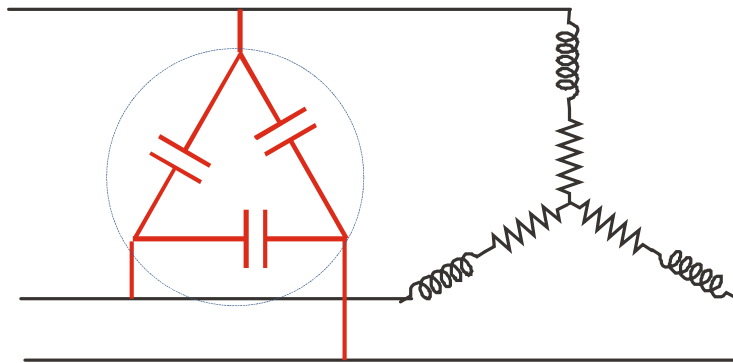
SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Factor de potencia en sistemas trifásicos

Al igual que en sistemas monofásicos, el **factor de potencia** se define como la relación entre potencia activa y la potencia aparente

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{\text{Potencia Activa (P)}}{\text{Potencia Aparente (S)}} \Rightarrow f.d.p. = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$$

La corrección de factor de potencia se efectúa con condensadores. Si bien existe la posibilidad de conectarlos tanto en estrella como en triángulo, por lo general se adopta la configuración triángulo porque requiere condensadores de menor capacidad.



Esquema eléctrico de la conexión de condensadores en triángulo para compensar el factor de potencia.

Existen comercialmente condensadores trifásicos para corrección de factor de potencia cuya conexión interior es triángulo.

La ubicación de los mismos se deberá analizar en cada caso en particular, en función de la operación y potencia de las distintas máquinas eléctricas que conforman la instalación.

Los condensadores para la corrección de factor de potencia se especifican, además de por su capacidad y su tensión, por su potencia reactiva a 50 Hz.

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Corrección del factor de potencia (Compensación de energía reactiva)

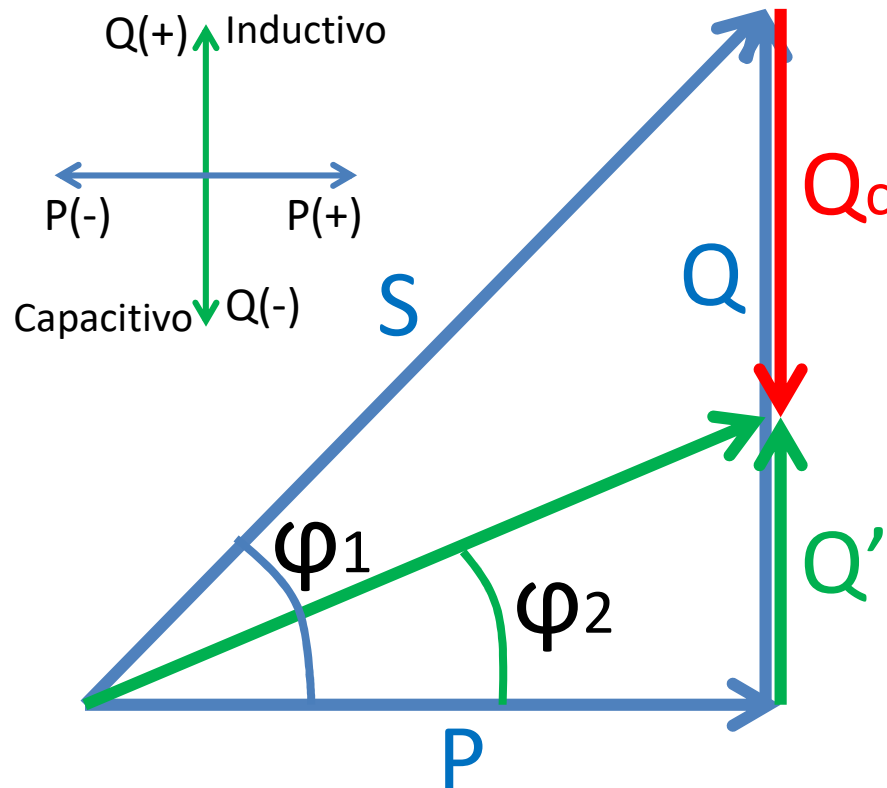


Diagrama vectorial de potencias

$$Q_c = Q - Q' = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

U_F = Tensión eficaz de fase

I_F = Intensidad eficaz de fase

$$Z_c = X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

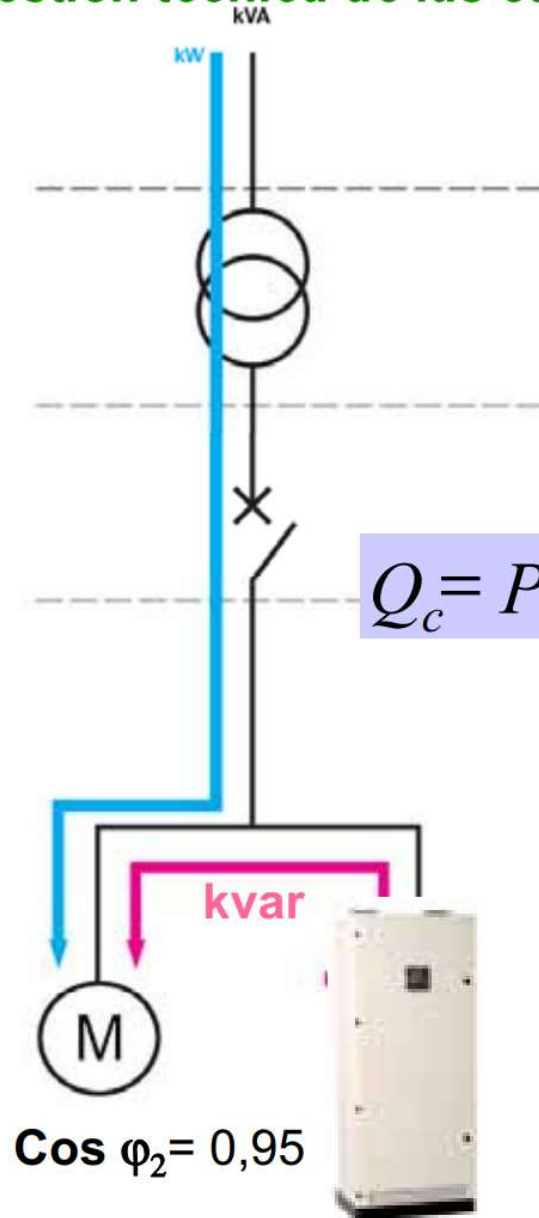
$$I_F = \frac{U_F}{Z_c} = \frac{U_F}{X_c}$$

$$Q_c = 3 \cdot X_c \cdot I_F^2 = 3X_c \left(\frac{U_F}{X_c} \right)^2 = \frac{3U_F^2}{X_c} = \frac{3U_F^2}{\frac{1}{\omega C}} = 3\omega C U_F^2$$

$$C = \frac{Q_c}{3\omega U_F^2} = \frac{Q_c}{3(2\pi f)U_F^2} = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)}{3\omega U_F^2}$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Gestión técnica de las cargas



Datos de la instalación :

$S_n = 630 \text{ kVA}$

$P = 500 \text{ KW}$

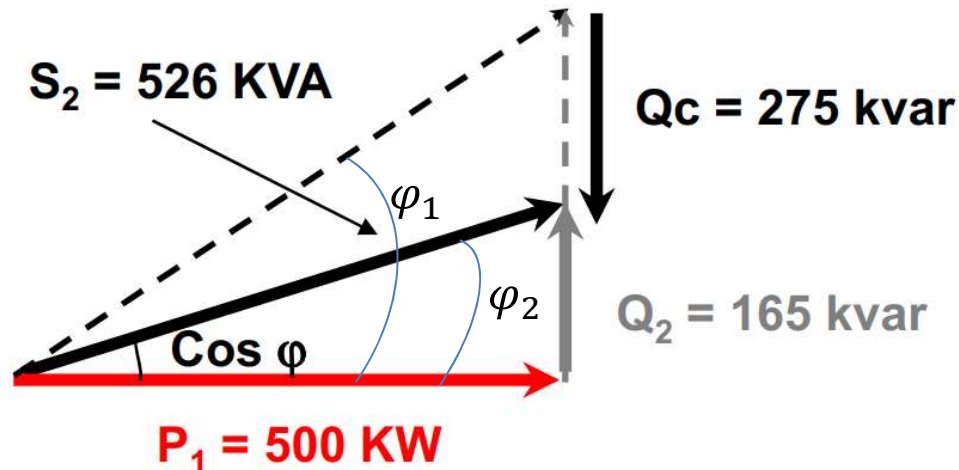
$\cos \varphi_1 = 0,75$

Con condensadores

$$\cos \varphi_1 = 0,75 \leftrightarrow \varphi_1 = 41,41^\circ \leftrightarrow \operatorname{tg} \varphi_1 = 0,88$$

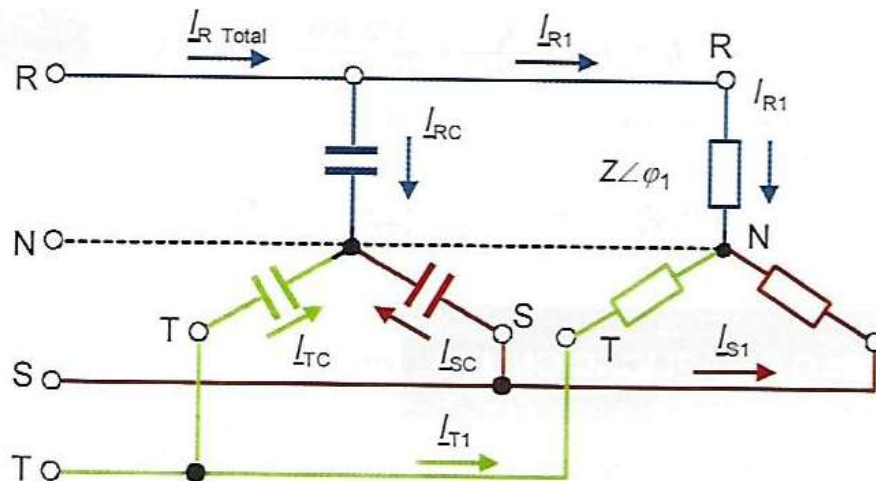
$$Q_c = P \times (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad Q_c = 500 \times (0,88 - 0,33) = 275 \text{ kvar}$$

$$\cos \varphi_2 = 0,95 \leftrightarrow \varphi_2 = 18,19^\circ \leftrightarrow \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,33$$



SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Corrección del factor de potencia



Carga trifásica en estrella y condensadores para corregir el f.d.p.

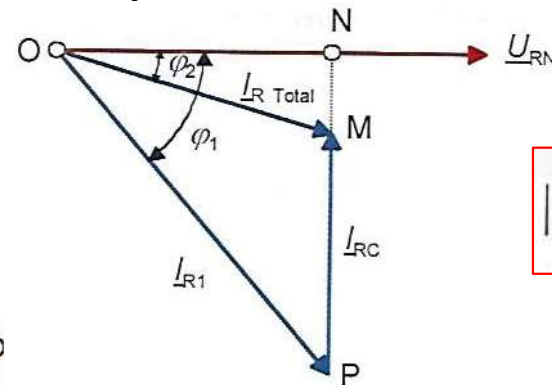


Diagrama fasorial de corrientes

$$|I_{R1}| = I_{R1} = \frac{P}{\sqrt{3} U_L \cos \varphi_1}$$

$$|ON| = |OP| \cos \varphi_1 = I_{R1} \cos \varphi_1 \quad ; \quad |PN| = |OP| \sin \varphi_1 = I_{R1} \sin \varphi_1$$

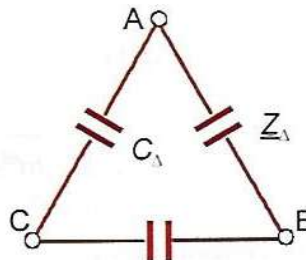
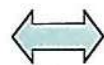
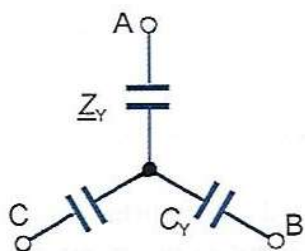
$$|MN| = |ON| \tan \varphi_2 = I_{R1} \cos \varphi_1 \tan \varphi_2$$

$$|PM| = I_{RC} = |PN| - |MN| = I_{R1} \sin \varphi_1 - I_{R1} \cos \varphi_1 \tan \varphi_2$$

$$I_{RC} = I_{R1} \cos \varphi_1 (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Potencia reactiva de los condensadores:

$$\Rightarrow Q_C = \sqrt{3} U_L I_{RC} \sin 90^\circ$$



$$C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3}$$

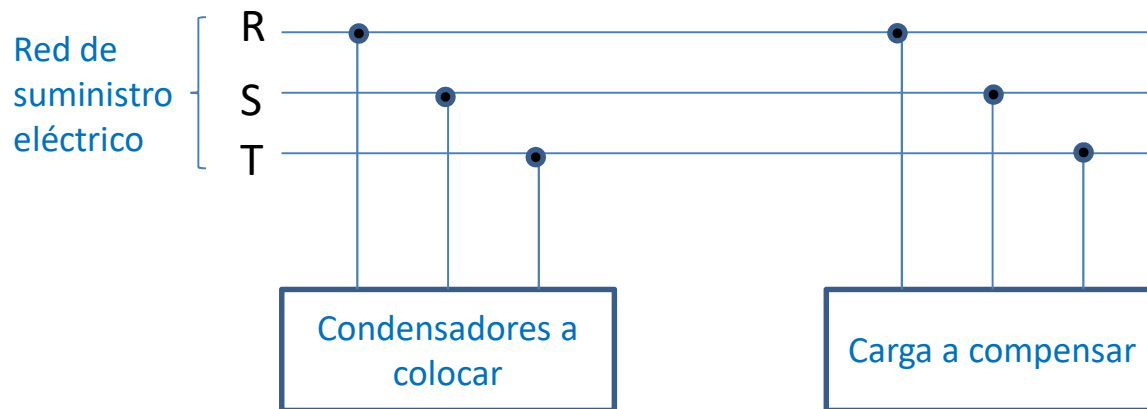
$$Q_C = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Esquema de condensadores en estrella y en triángulo

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Corrección del factor de potencia

Dado que la conexión de los condensadores puede realizarse agrupándolos en estrella o triángulo, el valor de la capacidad de los mismos será diferente.



Esquema de conexión para efectuar compensación de potencia reactiva

Si la potencia reactiva a compensar es QL (trifásica), en cada fase habrá que colocar un condensador que compense la tercera parte de dicha potencia.

Valor de la capacidad total a colocar:

Condensadores conectados en estrella

En este caso la tensión que reciben los condensadores, es la tensión de fase del sistema.

Dado que el sistema es equilibrado, la relación de tensiones esta dada por: $U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$

$$C = \frac{P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{\omega U_L^2}$$

Y

Condensadores conectados en triángulo

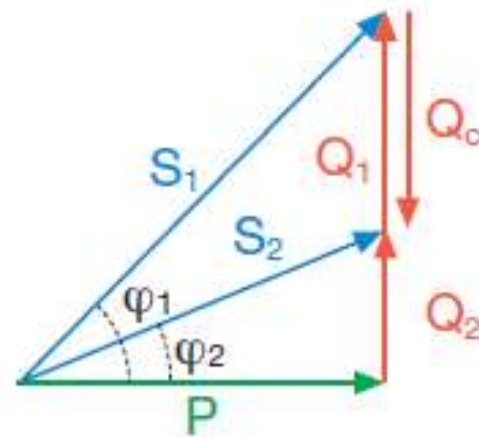
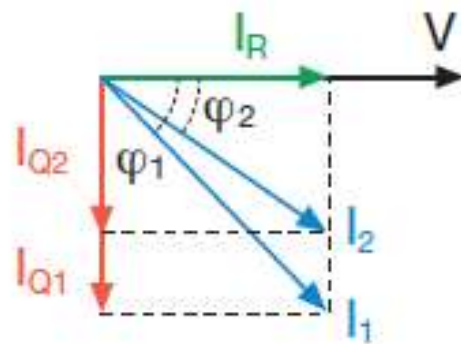
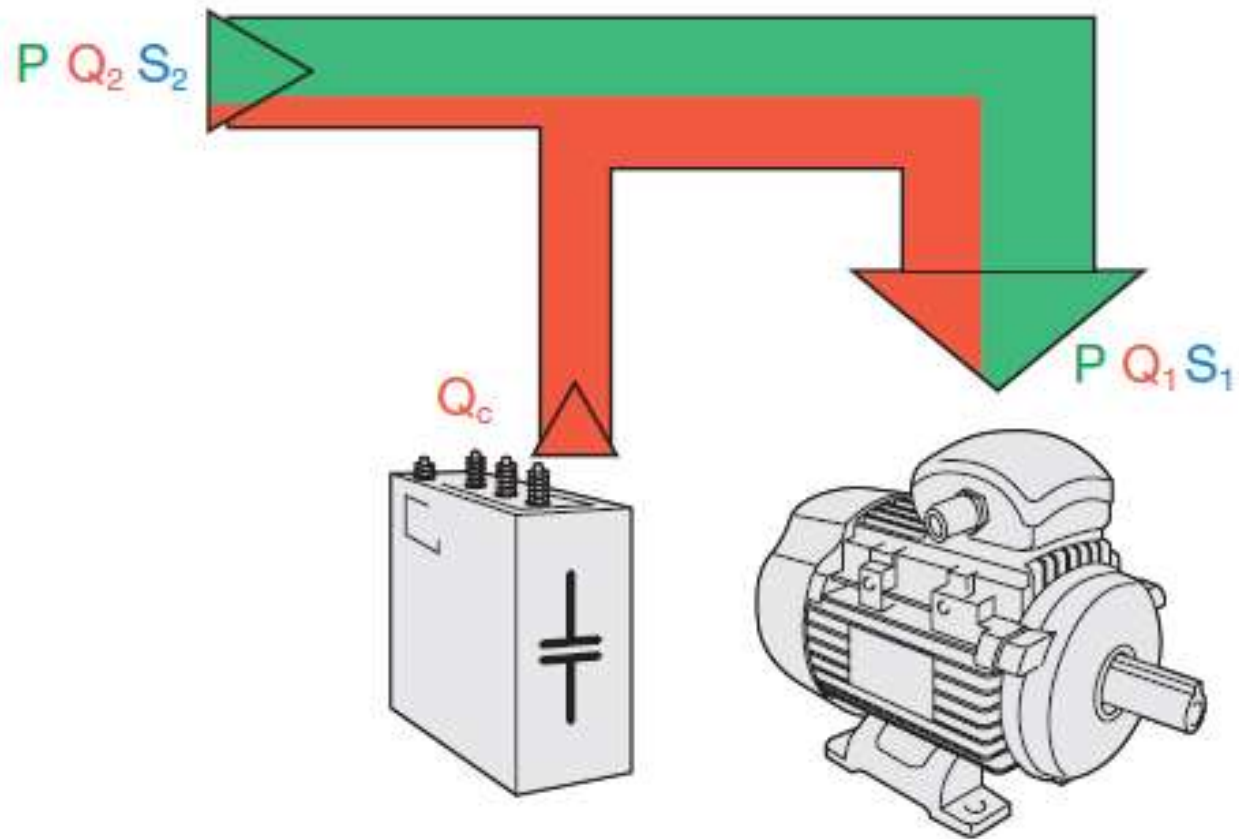
En este caso: $U_F = U_L$ por lo que queda:

$$C = \frac{P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{3\omega U_L^2}$$

D

La relación de capacidades de adoptar una forma de conexión u otra esta dada por:

$$\frac{C_{triángulo}}{C_{estrella}} = \frac{1}{3}$$



Supongamos que queremos incrementar el factor de potencia de una instalación trifásica ($U_n = 400 \text{ V}$) que consume de media 300 kW, de 0.8 a 0.93.

La corriente absorbida será:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi_1} = \frac{300}{\sqrt{3} * 400 * 0,8} = 540 \text{ A}$$

Aplicando la potencia reactiva que debe producirse localmente :

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 300 \cdot (0.75 - 0.39) = 108 \text{ kVAr}$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi_2} = \frac{300}{\sqrt{3} * 400 * 0,93} = 465 \text{ A}$$

Por efecto de la corrección, la corriente absorbida pasa de 540 A a: 465 A
(reducción del 15% aprox.)

Con todo ello, las ventajas principales de la corrección pueden resumirse de la siguiente manera:

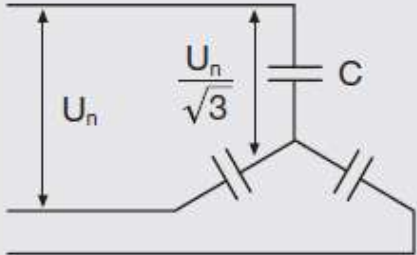
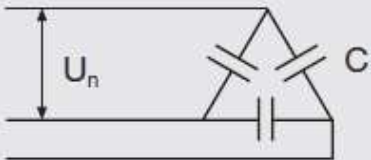
- uso optimizado de las máquinas eléctricas;
- uso optimizado de las líneas eléctricas;
- reducción de las pérdidas;

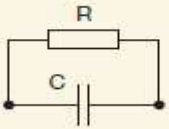
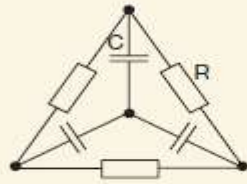
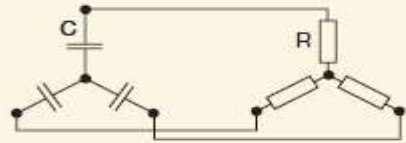
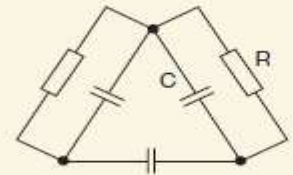
$$\begin{aligned} \cos\varphi_2 &= 0.93 \leftrightarrow \varphi_2 = 21.57^\circ \text{C} \\ &\leftrightarrow \operatorname{tg}\varphi_2 = 0.39 \end{aligned}$$

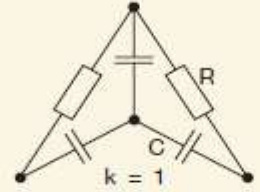
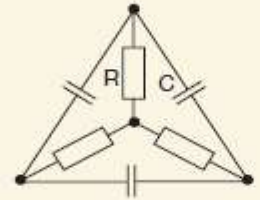
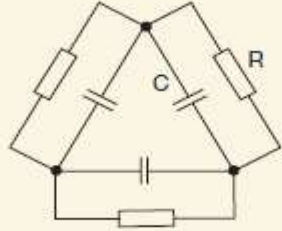
$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= 0.8 \leftrightarrow \varphi_1 = 41.41^\circ \text{C} \\ &\leftrightarrow \operatorname{tg}\varphi_1 = 0.75 \end{aligned}$$

Carga	$\cos\varphi$ factor de potencia
Transformadores en vacío	0.1÷0.15
Motores	0.7÷0.85
Dispositivos para el tratamiento del metal:	
- soldadoras de arco	0.35÷0.6
- soldadoras de arco compensadas	0.7÷0.8
- soldadoras de resistencia	0.4÷0.6
- hornos de arco	0.75÷0.9
Lámparas fluorescentes:	
- compensadas	0.9
- no compensadas	0.4÷0.6
Convertidores de CA - CC	0.6÷0.95
Accionamientos de CC	0.4÷0.75
Accionamientos de CA	0.95÷0.97
Cargas resistivas	1

Tabla 9.2

	Intensidad nominal (de línea)	Corriente en los condensadores	Potencia
	$I_{cn} = \omega \cdot C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$	$I_c = I_{cn}$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = \omega \cdot C \cdot U_n^2$
	$I_{cn} = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U_n$	$I_c = \omega \cdot C \cdot U_n$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_n^2$

Conexión	k
	1
	$\frac{1}{3}$
	1
	3

	1
	3
	1

donde:

- R es la resistencia de descarga en $[\Omega]$;
- t es el tiempo de descarga de $\sqrt{2} U_n$ a U_r en [s];
- U_n es la tensión nominal en [V];
- U_r es la tensión residual admitida⁴ en [V];
- k es un coeficiente que depende del método de conexión de las resistencias con las unidades capacitivas (véase tabla 9.3);
- C es el valor de la capacidad de la batería de condensadores [F].

$$R \leq \frac{t}{k \cdot C \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{U_r}\right)}$$

Para satisfacer las condiciones dictadas por la norma IEC EN 60831-1, en la fórmula anterior habrá que poner $t = 180$ s y $U_r = 75$ V.

Corrección automática del factor de potencia

- sensores que detectan las señales de corriente y tensión;
- una unidad inteligente que compara el factor de potencia medido con el deseado y ejecuta la inserción o la desconexión de las baterías de condensadores en función de la potencia reactiva necesaria (regulador del factor de potencia);
- un cuadro eléctrico de potencia, que incluye los dispositivos de protección y maniobra;
- baterías de condensadores.

SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

Corrección del factor de potencia. Tipos de compensación

