



# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

REDES DE DISTRIBUCIÓN E  
INSTALACIONES ELÉCTRICAS

PROFESOR: ING. ELVIO DANIEL ANTON

AUX: ING. DIEGO SALINAS

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## NATURALEZA DE LA ENERGÍA REACTIVA

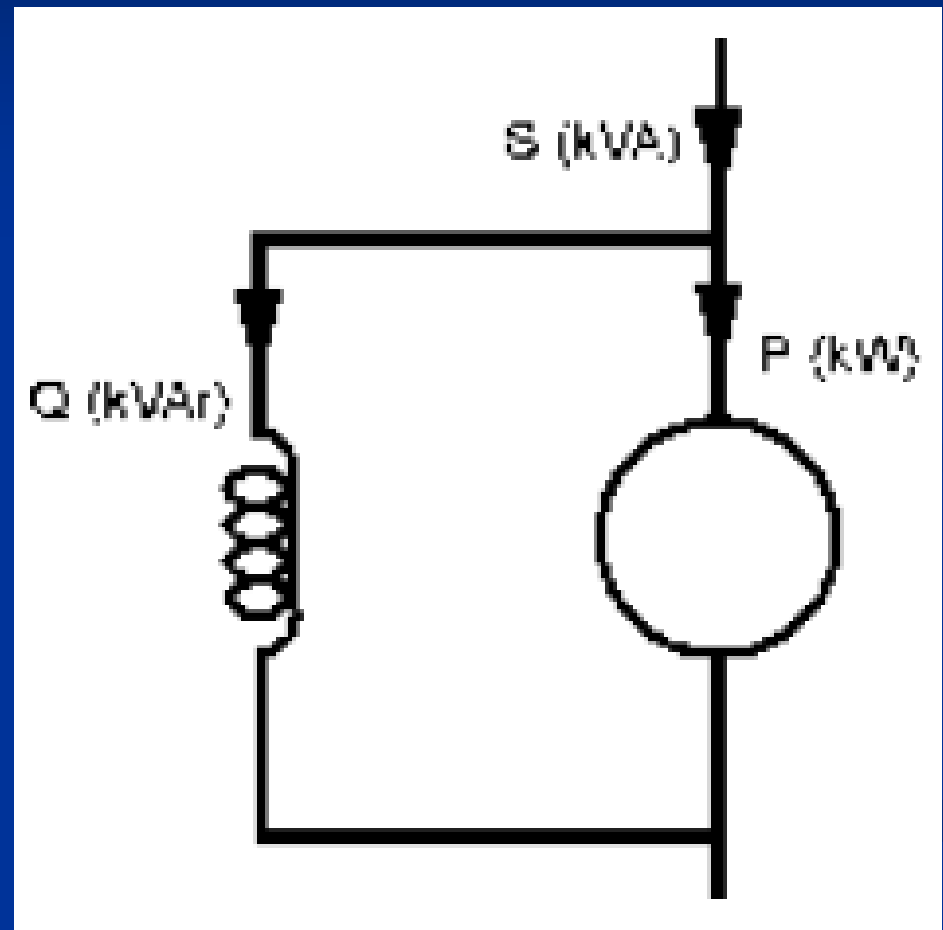
Cualquier máquina eléctrica alimentado en corriente alterna, consume dos tipos de energía:

- La energía activa: corresponde a la potencia activa  $P$  medida en kW se transforma en energía mecánica (trabajo) y calor (pérdidas).
- La energía reactiva: corresponde a la potencia reactiva  $Q$  medida en kVAr; sirve para alimentar circuitos magnéticos en máquinas eléctricas y es necesaria para su funcionamiento. Es suministrada por la red o, por condensadores previstos para ello.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## NATURALEZA DE LA ENERGÍA REACTIVA

La red de distribución suministra la energía aparente que corresponde a la potencia aparente  $S$ , medida en kVA. La energía aparente se compone de los 2 tipos de energía:



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

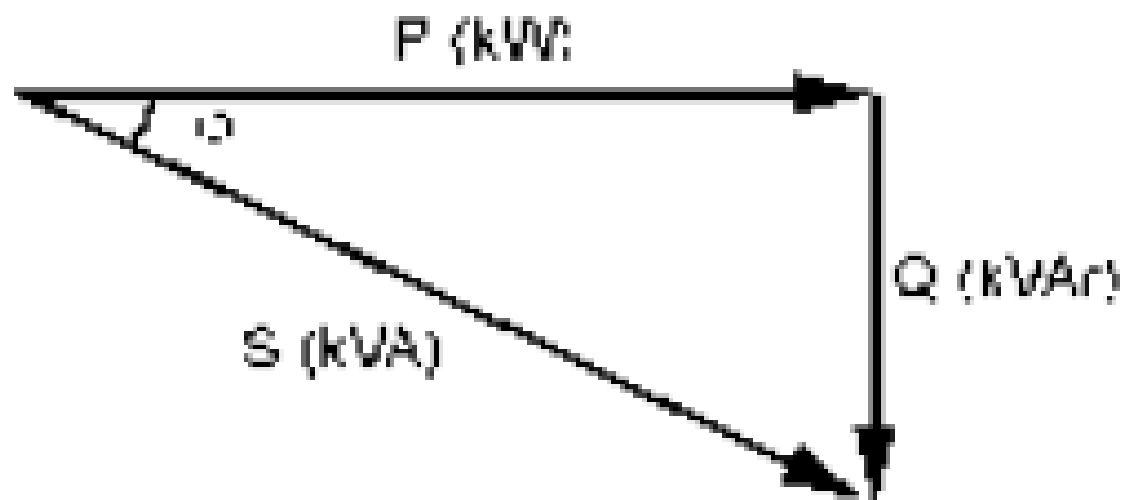
## DEFINICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia de la instalación es el cociente de la potencia activa (kW) consumida por la instalación y la potencia aparente (kVA) suministrada a la instalación.

Por lo tanto, el  $\cos \varphi$  no toma en cuenta la potencia transportada por los armónicos. En la práctica, se tiende a hablar del  $\cos \varphi$ .

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## DEFINICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA



$$F = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} = \cos \varphi$$

siendo:

$P$  = potencia activa,

$S$  = potencia aparente.

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

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

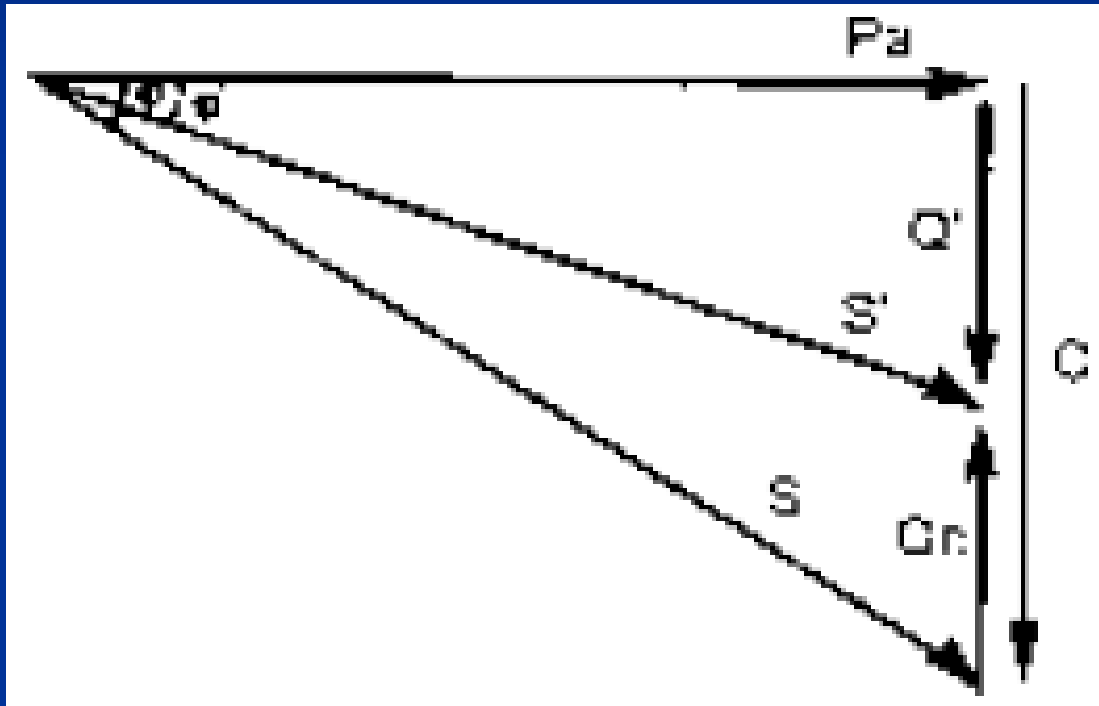
## COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

El hecho de instalar un condensador generador de energía reactiva es la manera más simple, flexible y rápidamente amortizada de asegurar un buen factor de potencia. Esto se llama compensar una instalación.

La figura que sigue ilustra el principio de compensación de la potencia reactiva  $Q$  de una instalación a un valor más bajo  $Q'$  mediante la instalación de una batería de condensadores de potencia  $Q_c$ .

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA



Vemos como la potencia aparente  $S$ , disminuye a un valor  $S'$  mediante la instalación de la batería de condensadores.

$$Q_c = P_a (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi').$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Ejemplo:

Sea un motor que, en régimen normal, absorbe una potencia de 100 kW con un  $\cos \varphi = 0,75$ , o sea  $\operatorname{tg} \varphi = 0,88$ . Para pasar a un  $\cos \varphi = 0,93$ , o sea  $\operatorname{tg} \varphi = 0,40$ , la potencia de la batería a instalar es:

$$Q_c = 100 (0,88 - 0,40) = 48 \text{ kVAr.}$$



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN EN BAJA TENSIÓN

En baja tensión la compensación se realiza con dos tipos de equipos:

- Condensadores Fijos:
- Equipos de Regulación Automática: que permiten ajustar permanentemente la compensación a las necesidades de la instalación.

Observación:

Cuando la potencia a instalar es superior a 800 kVAr con una carga estable y continua, puede resultar más económico elegir instalar baterías de condensadores de alta tensión en la red.

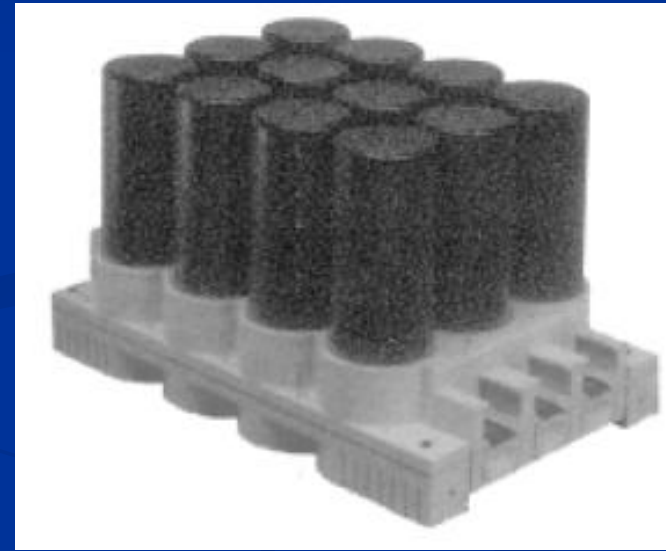
# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN EN BAJA TENSION

### ■ Condensadores Fijos:

Estos condensadores tienen una potencia unitaria constante y su conexión puede ser:

- manual: mando por disyuntor o interruptor
- semi-automática: mando por contactor
- directa: conectada a las bornes de un receptor.



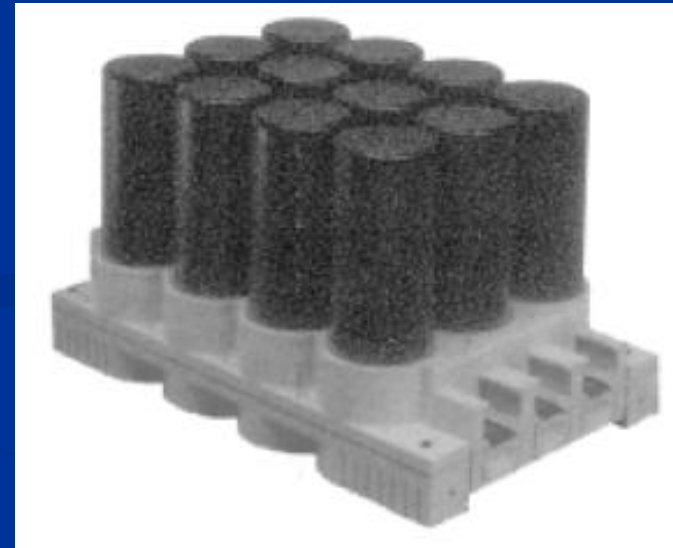
# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN EN BAJA TENSIÓN

### ■ Condensadores Fijos:

Se utilizan:

- en los bornes de los receptores de tipo inductivo (motores y transformadores).
- en un embarrado donde estén muchos pequeños motores cuya compensación individual sería demasiado costosa.
- cuando la fluctuación de carga es poco importante.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN EN BAJA TENSIÓN

### ■ Equipos de Regulación Automática:

Este tipo de equipo permite la adaptación automática de la potencia reactiva suministrada por las baterías de condensadores en función de un  $\cos \varphi$  deseado e impuesto permanentemente.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN EN BAJA TENSIONIÓN

### ■ Equipos de Regulación Automática:

Se utiliza en los casos donde la potencia reactiva consumida o la potencia activa varían en proporciones importantes, es decir esencialmente:

- en los embarrados de los cuadros generales BT.
- para las salidas importantes.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN EN BAJA TENSIÓN

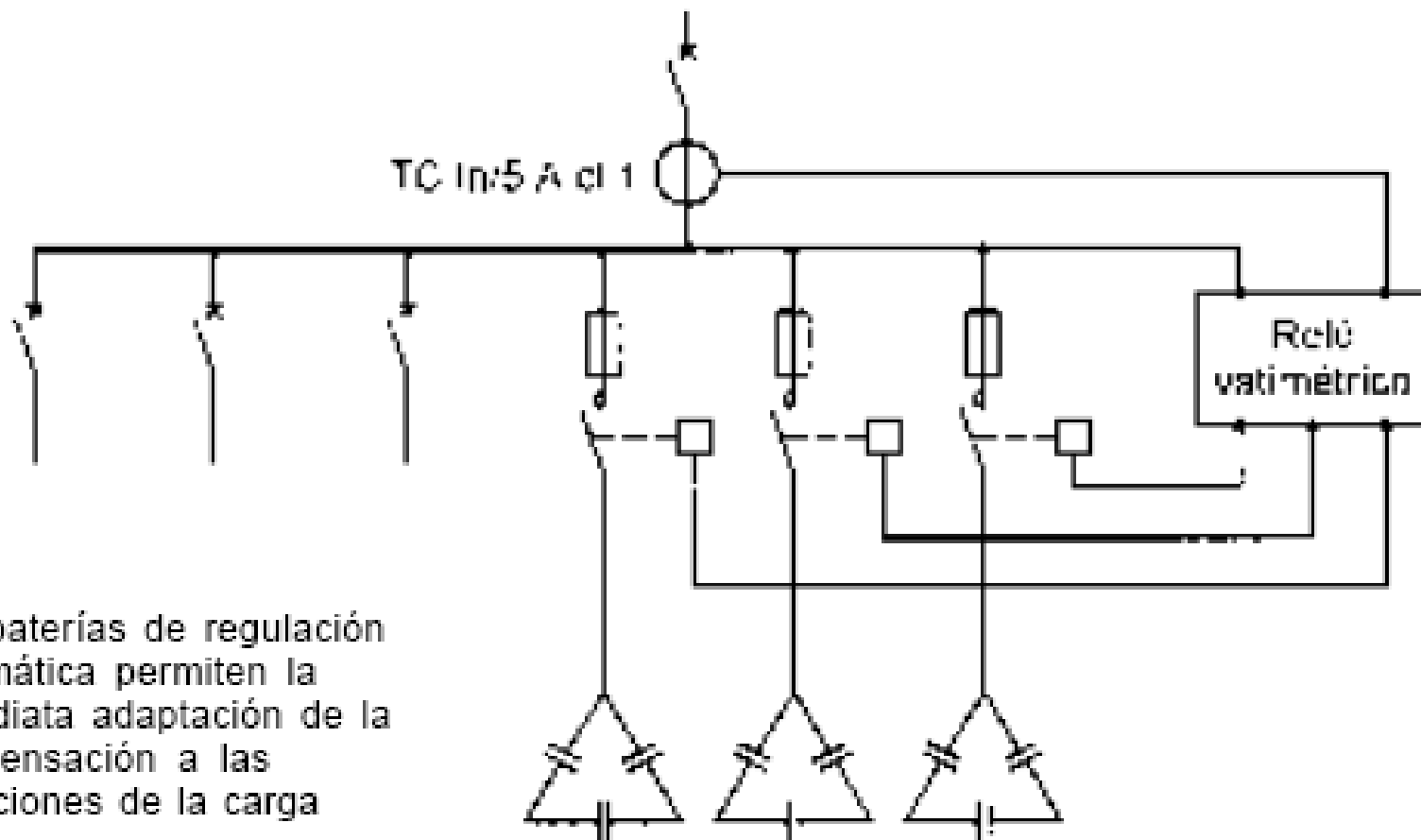
- Principio e interés de la compensación automática:

Instaladas en cabecera del cuadro de distribución BT o de un sector importante, las baterías de condensadores están formadas por distintos escalones de potencia reactiva. El valor del  $\cos \varphi$  es detectada por un relé varimétrico que manda automáticamente la conexión y desconexión de los escalones, a través de contactores, en función de la carga y del  $\cos \varphi$  deseado.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACION EN BAJA TENSION

- Principio e interés de la compensación automática:



Las baterías de regulación automática permiten la inmediata adaptación de la compensación a las variaciones de la carga

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## ELECCIÓN DE COMPENSACIÓN FIJA O AUTOMÁTICA

Regla práctica:

Si la potencia de los condensadores (kVAr) es inferior al 15% de la potencia del transformador, elegir condensadores fijos. Si la potencia de los condensadores (kVAr) es superior al 15% de la potencia del transformador, elegir una batería de condensadores de regulación automática.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

La localización de los condensadores BT en una red eléctrica constituye lo que se denomina el modo de compensación. La compensación de una instalación puede realizarse de distintas maneras:

- Compensación Centralizada.
- Compensación Por Grupo.
- Compensación Individual.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

---

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

---

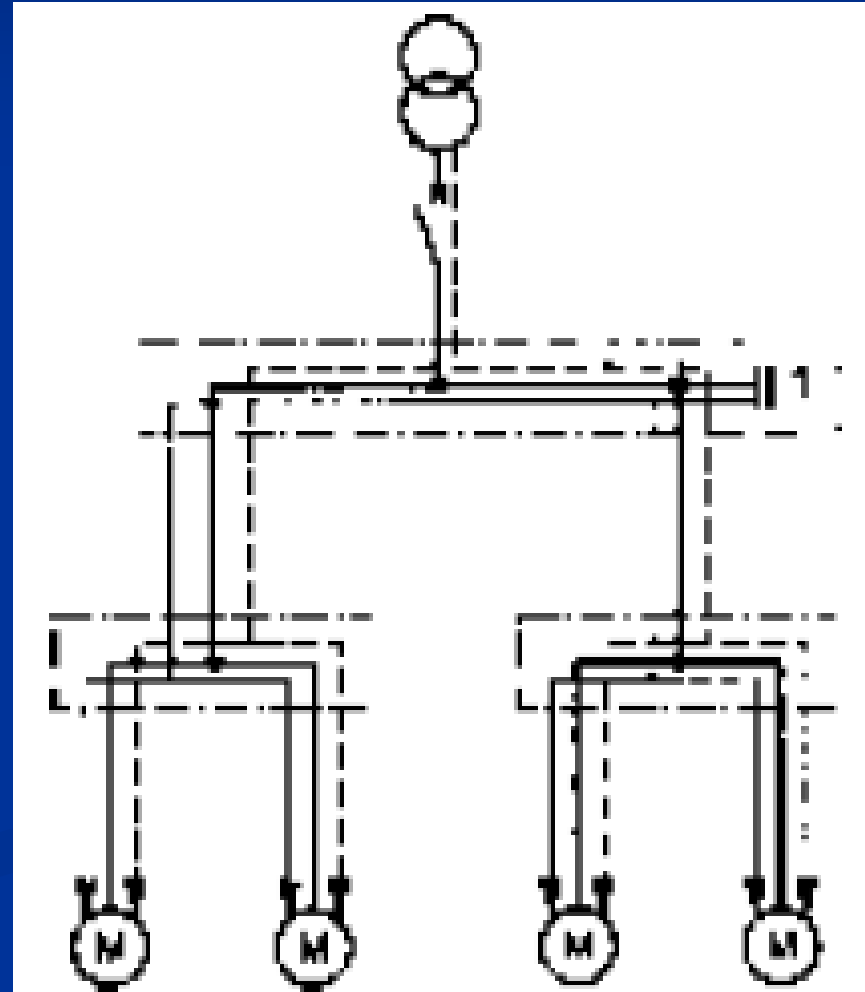
- Compensación Centralizada.

La batería está conectada en cabecera de la instalación y asegura la compensación del conjunto de la instalación. Está permanentemente en servicio durante la marcha normal de la fábrica

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

- Compensación Centralizada.
  - elimina las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
  - disminuye la potencia aparente ajustándola a la necesidad de kW de la instalación.
  - descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).



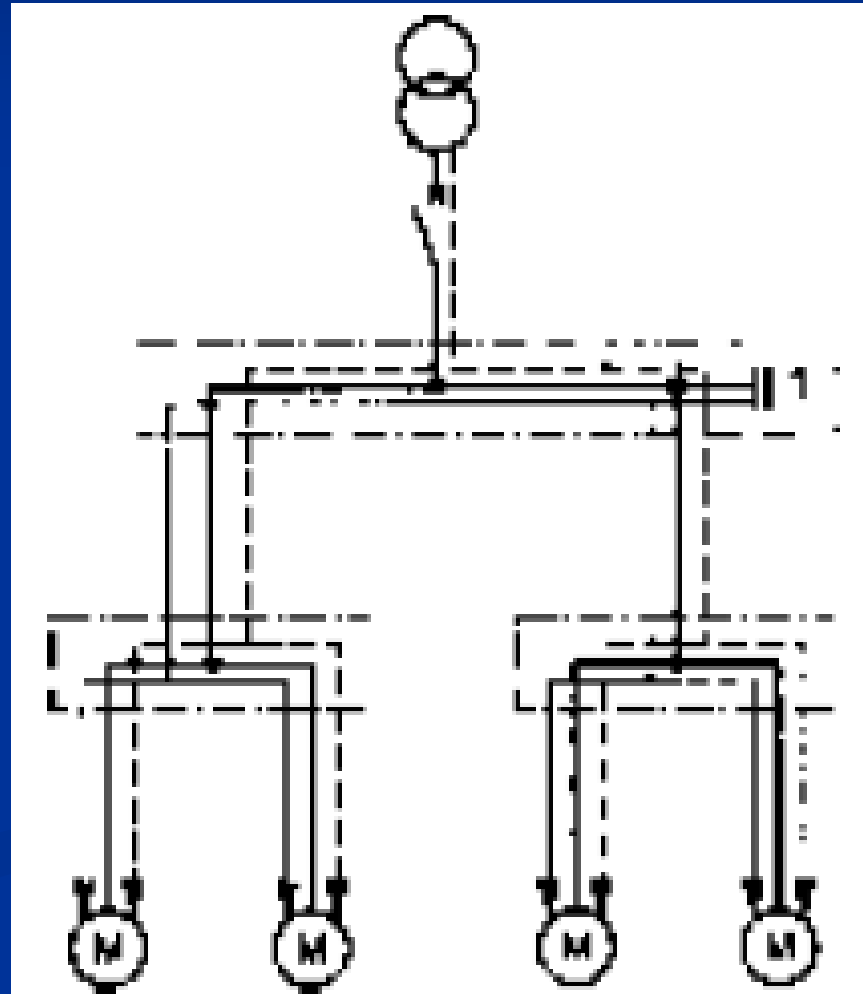
# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

### ■ Compensación Centralizada.

Observaciones:

- la corriente reactiva está presente en la instalación desde el nivel 1 hasta los receptores.
- las pérdidas por efecto Joule en los cables situados aguas abajo y su dimensionamiento no son, por tanto, disminuidos.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

---

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

---

- Compensación Por Grupo.

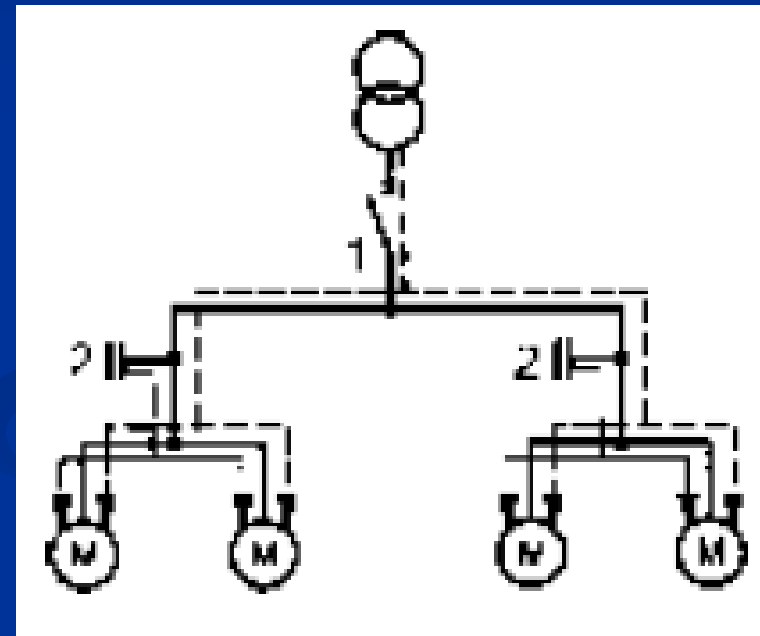
La batería está conectada al cuadro de distribución y suministra energía reactiva a cada taller o a un grupo de receptores. Se descarga así gran parte de la instalación, en particular los cables de alimentación de cada taller.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

### ■ Compensación Por Grupo.

- elimina las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
- descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).
- optimiza parte de la red ya que la corriente reactiva no circula entre los niveles 1 y 2.



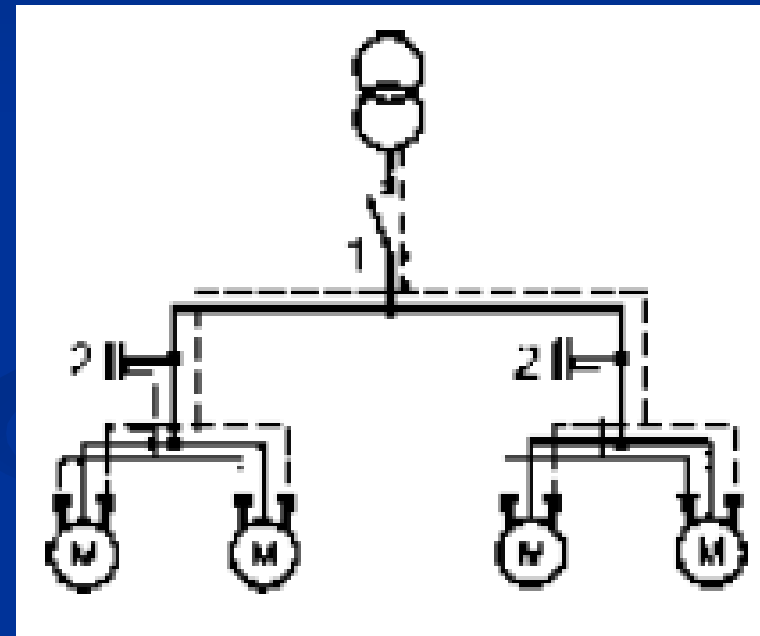
# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

### ■ Compensación Por Grupo.

#### Observaciones

- la corriente reactiva está presente desde el nivel 2 hasta los receptores.
- las pérdidas por efecto Joule en los cables quedan reducidas.
- existe riesgo de sobrecompensación debido a variaciones de carga importantes.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

### ■ Compensación Individual.

La batería está conectada directamente a los bornes de cada receptor de tipo inductivo.

Esta compensación debe contemplarse cuando la potencia del motor es importante con relación a la potencia total. Cuando es aplicable, esta compensación produce energía reactiva en el lugar mismo donde es consumida y en una cantidad que se ajusta a las necesidades. Puede preverse un complemento en cabecera de la instalación (transformador).

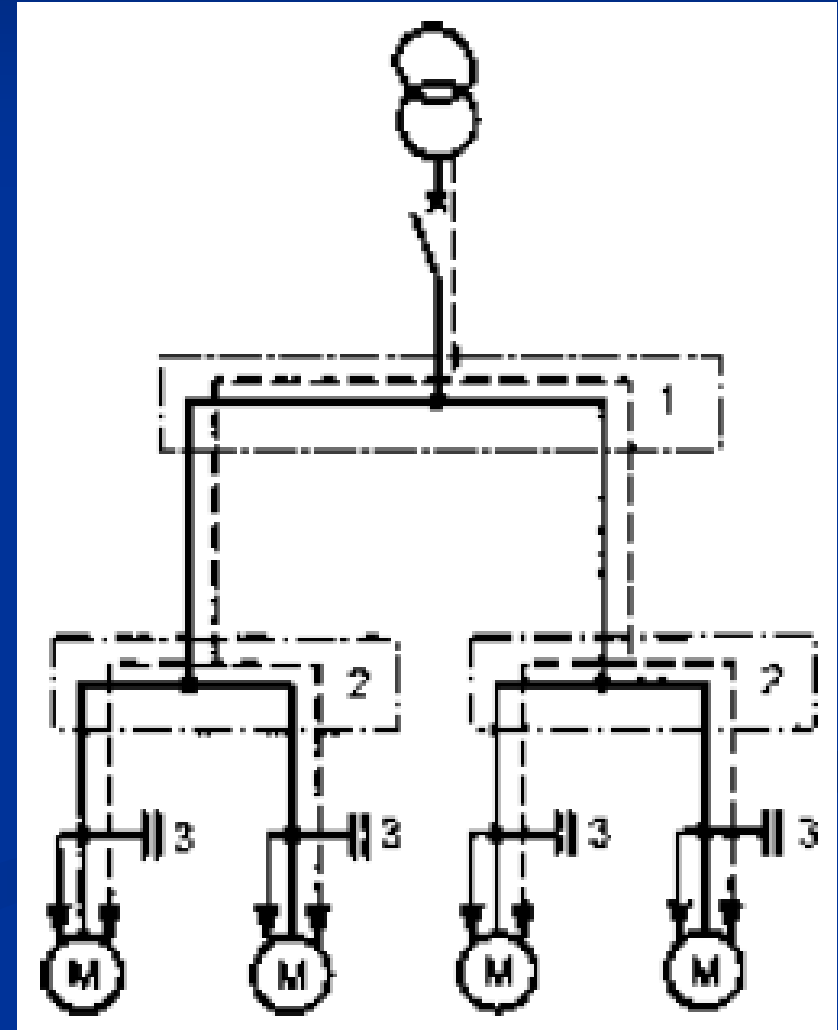


# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

### ■ Compensación Individual.

- elimina las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
- descarga el centro de transformación.
- reduce el dimensionamiento de los cables y las pérdidas por efecto Joule.



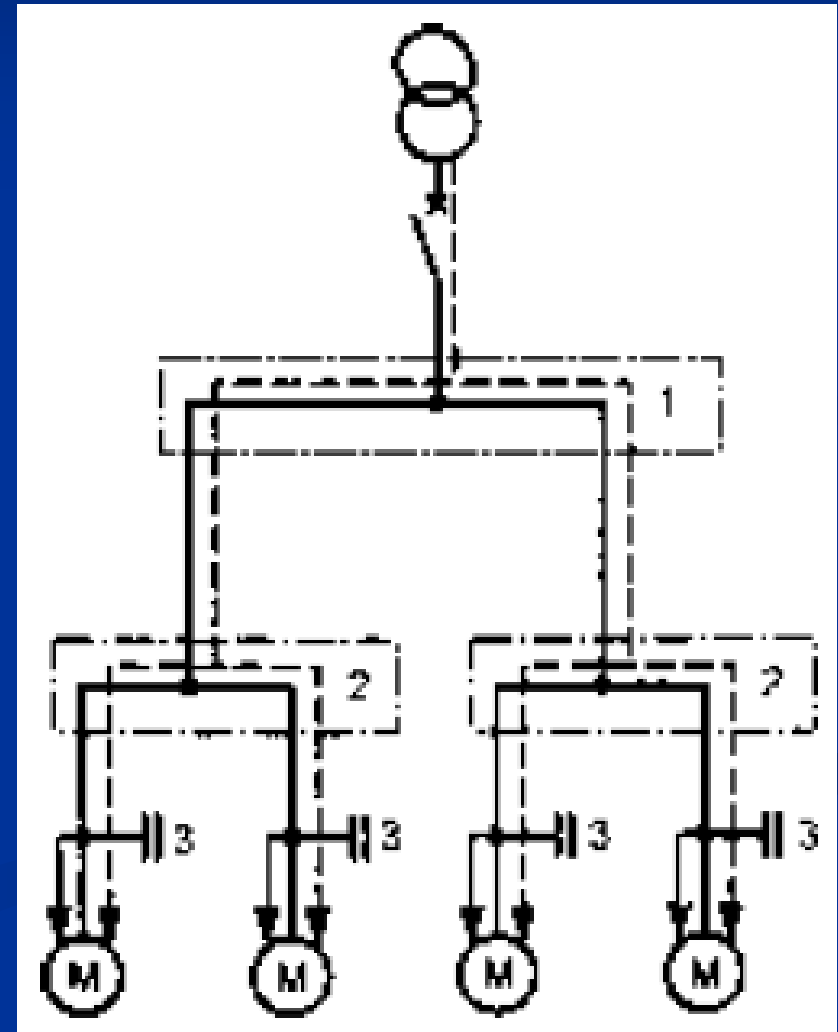
# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

- Compensación Individual.

### Observaciones

- la corriente reactiva ya no está presente en los cables de la instalación.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## TIPOS DE COMPENSACIÓN

### Conclusiones:

- Cuando la carga es estable y continua, conviene una compensación centralizada.
- Se recomienda una compensación por grupos cuando la instalación es amplia y comprende talleres cuyos regímenes de carga son distintos.
- Se puede contemplar una compensación individual cuando la potencia de algunos receptores es importante con relación a la potencia total. Es el tipo de compensación que más ventajas ofrece.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN A BORNES DE UN MOTOR ASÍNCRONO

### ■ Precaución General:

El  $\cos \varphi$  de los motores es muy bajo en vacío, con poca carga conviene por lo tanto evitar este tipo de funcionamiento sin prever una compensación.

### ■ Conexión:

La batería está conectada directamente a los bornes del motor.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN A BORNES DE UN MOTOR ASÍNCRONO

### ■ Arranque:

Si el motor arranca con la ayuda de un dispositivo especial (resistencia, inductancia, dispositivo estrella-triángulo, autotransformador), la batería de condensadores debe ponerse en marcha sólo después del arranque.

### ■ Motores especiales:

Se recomienda no compensar los motores especiales (paso a paso, a dos sentidos de marcha).

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN A BORNES DE UN MOTOR ASÍNCRONO

- Regulación de las protecciones:

La intensidad aguas arriba del conjunto motor-condensador se vuelve inferior a la intensidad antes de la compensación, para un funcionamiento idéntico del motor ya que los condensadores suministran una parte de la energía reactiva consumida por el motor.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## COMPENSACIÓN A BORNES DE UN MOTOR ASÍNCRONO

- Regulación de las protecciones:

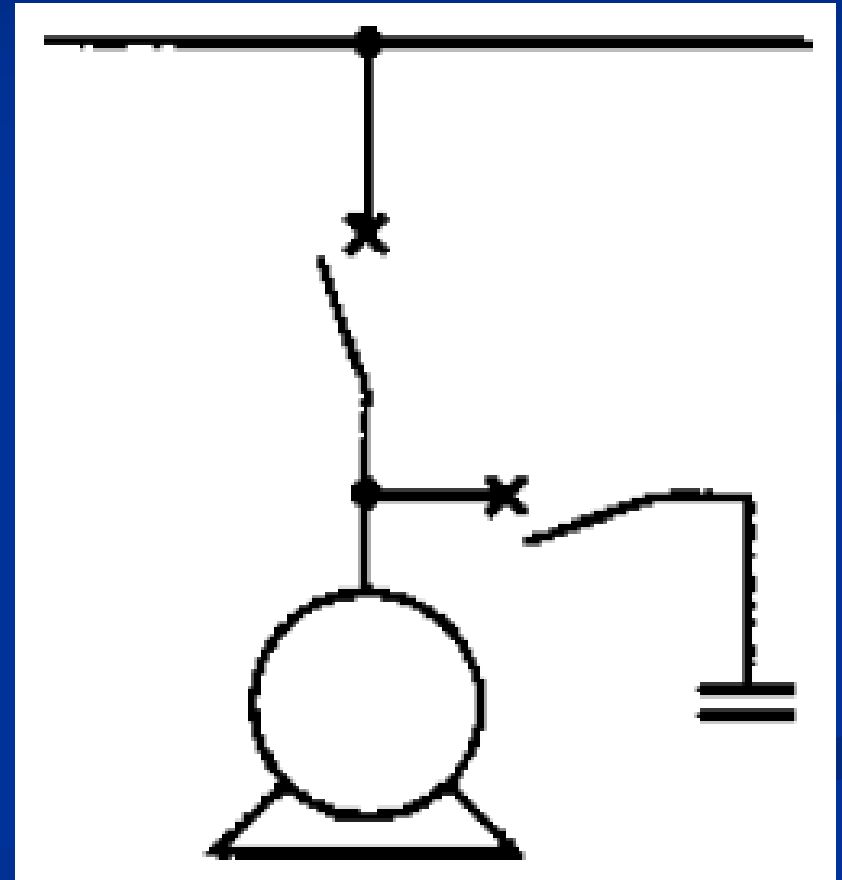
Cuando la protección del motor contra las sobrecargas está situada aguas arriba del conjunto motor-condensador, la regulación de esta protección debe reducirse en la relación:

$$\frac{\cos \varphi \text{ antes de la compensación}}{\cos \varphi \text{ después de la compensación}}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## AUTOEXITACIÓN DE MOTORES ASÍNCRONOS

Cuando un motor arrastra una carga que tiene una gran inercia puede, después del corte de la tensión de alimentación, seguir funcionando utilizando su energía cinética y ser autoexcitado por una batería de condensadores conectada a sus bornes.

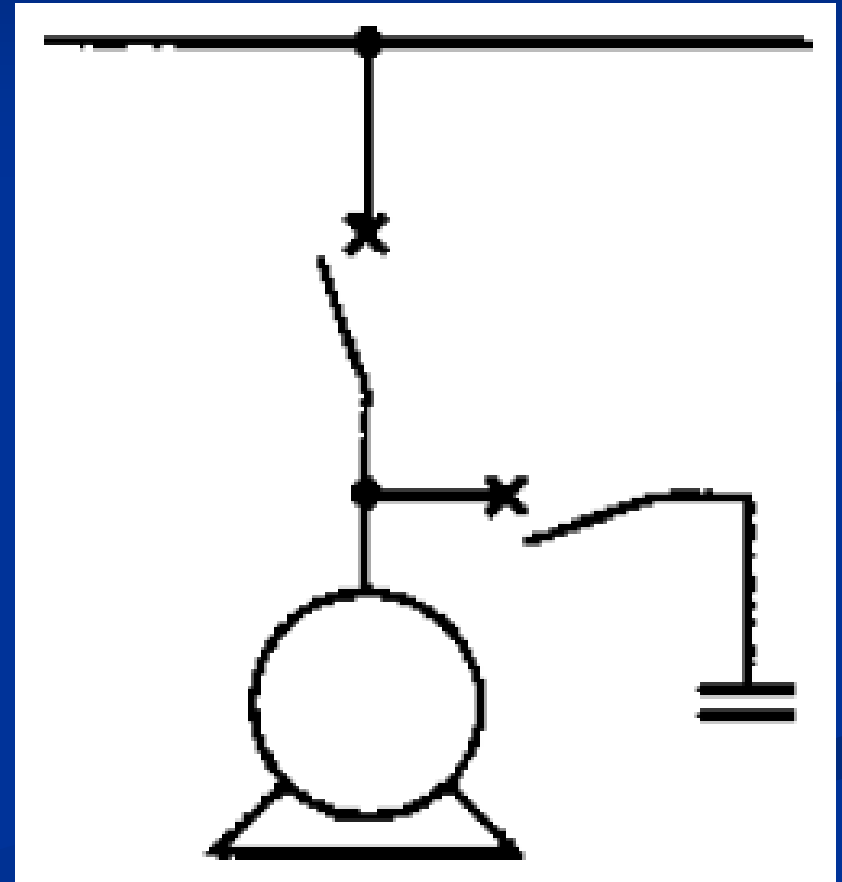




# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## AUTOEXITACIÓN DE MOTORES ASÍNCRONOS

Estos le suministran la energía reactiva necesaria para su funcionamiento en generador asíncrono. Dicha autoexcitación provoca un mantenimiento de la tensión y a veces sobretensiones elevadas.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## AUTOEXITACIÓN DE MOTORES ASÍNCRONOS

Para evitar este fenómeno, es necesario asegurar que la potencia de la batería es inferior a la potencia necesaria para la autoexcitación del motor, comprobando:

$$Q_e \leq 0,9 I_a U_n \sqrt{3}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## AUTOEXITACIÓN DE MOTORES ASÍNCRONOS

El valor de la corriente de vacío, es un dato que no figura en la placa de características de los motores y tampoco (casi nunca) en los catálogos. En este caso, puede utilizarse como alternativa, la fórmula siguiente:

$$Q_c \leq 0,9 \sqrt{3} U_n I_n \frac{1 - \cos \varphi_n}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}} 10^{-3} \text{ (kVAr)}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

Armónicas son corrientes o voltages con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia base de la fuente de 50 o 60 Hz. Por ejemplo, si la frecuencia base de la corriente es 60 Hz, entonces la 2<sup>o</sup> armónica será 120 Hz, la 3<sup>o</sup> 180 Hz, etc. Con equipos modernos de medición, hoy las armónicas pueden ser medidas hasta el grado 63<sup>o</sup>.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

Cuando existe la prevalencia de armónicas, los tableros eléctricos y los transformadores se hacen mecánicamente resonantes a los campos magnéticos generados por armónicas de alta frecuencia. Cuando esto pasa, el tablero de poder eléctrico y/o el transformador vibra o emite distintos sonidos dependiendo de la frecuencia armónica. Las armónicas más frecuentes medidas en sistemas de distribución eléctrica son las que están entre el grado 3° y el 25°.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Fuentes de Armónicos:

- Saturación de transformadores.
- Corrientes de energización de transformadores.
- Conexiones al neutro de transformadores.
- Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias.  
corriente alterna.
- Hornos de arco eléctrico.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Fuentes de Armónicos:

- Lámparas fluorescentes.
- Fuentes reguladas por conmutación.
- Cargadores de baterías.
- Compensadores estáticos de VAr's.
- Variadores de frecuencia para motores (“drives”).
- Convertidores de estado sólido.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Efectos de las Armónicas en Conductores.

Aumento en las pérdidas  $I^2R$  por efecto piel, por el aumento de la corriente en la periferia del conductor.



### • Ejemplo de la variación del efecto piel en conductores

Tamaño del conductor	Resistencia AC / Resistencia DC	
	60 Hz	300 Hz
300 MCM	1.01	1.21
450 MCM	1.02	1.35
600 MCM	1.03	1.50
750 MCM	1.04	1.60



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Efectos de las Armónicas en Transformadores.

Aumento en sus pérdidas:

1. Pérdidas  $I^2R$  (efecto Joule).
2. Pérdidas por corrientes de eddy.

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2$$

$I_h$  = corriente de la armónica  $h$ , en amperes

$I_R$  = corriente nominal, en amperes

$P_{e,R}$  = pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Efectos de las Armónicas en Transformadores.

Aumento en sus pérdidas:

3. Pérdidas adicionales.

$$P_{ex} = P_{ex,R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h$$

$P_{e,R}$  = pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- **Efectos de las Armónicas en Transformadores.**
  - En conexiones delta-estrella que alimenten cargas no lineales monofásicas se puede tener:
    - a. Sobrecalentamiento del neutro por la circulación de la 3<sup>o</sup> armónica.
    - b. Sobrecalentamiento del devanado conectado en delta.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- **Efectos de las Armónicas en Transformadores.**
  - En caso de que alimenten cargas no lineales que presenten componente de corriente directa es posible:
    - a. Aumento ligero en las pérdidas de núcleo o sin carga.
    - b. Aumento en el nivel de sonido audible.
    - c. Incremento en la corriente de magnetización.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- **Efectos de las Armónicas en los Motores.**
  - a. **Pérdidas  $I^2R$  en el estator:** por el aumento de la corriente de magnetización y por el efecto piel.
  - b. **Pérdidas  $I^2R$  en el rotor:** por el aumento en la resistencia efectiva del rotor por el efecto piel.
  - c. **Pérdidas de núcleo:** aumentan relativamente poco debido al aumento en las densidades de flujo pico alcanzadas.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Efectos de las Armónicas en los Motores.

d. **Pérdidas adicionales:** aumentan, pero son complejas de cuantificar y varían con cada máquina:

- Dependiendo del voltaje aplicado puede haber una reducción en el par promedio de la máquina.
- Se producen torques pulsantes por la interacción de las corrientes del rotor con los campos magnéticos en el entrehierro.
- Menor eficiencia y reducción de la vida de la máquina.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- **Efectos de las Armónicas en Otros Equipos.**
  - **Barras de neutros:** Calentamiento por la circulación de corrientes de secuencia cero.
  - **Interruptores:** Los fusibles e interruptores termomagnéticos protegen en forma efectiva contra sobrecargas por corrientes armónicas. Su capacidad interruptiva no se ve afectada por armónicas.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- **Efectos de las Armónicas en Otros Equipos.**
  - **Bancos de capacitores:** Se pueden tener problemas de resonancia serie o paralelo al instalar bancos de capacitores en presencia de armónicas, lo que ocasiona la operación de dispositivos de protección y el daño o envejecimiento prematuro de los bancos.
  - **Equipos electrónicos sensibles:** Las armónicas pueden afectar la operación en estos equipos.
  - **Valores erróneos en los equipos de medición.**



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Teorema de Fourier.

Una función que se repite cada  $T$  segundos ( esto es, una función con período  $T$  ) puede expresarse como una suma infinita de senos y cosenos:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos ( 1 \times \omega_1 t ) + b_1 \sin ( 1 \times \omega_1 t ) + a_2 \cos ( 2 \times \omega_1 t ) + b_2 \sin ( 2 \times \omega_1 t ) \\ + a_3 \cos ( 3 \times \omega_1 t ) + b_3 \sin ( 3 \times \omega_1 t ) + a_4 \cos ( 4 \times \omega_1 t ) + b_4 \sin ( 4 \times \omega_1 t ) + \dots$$

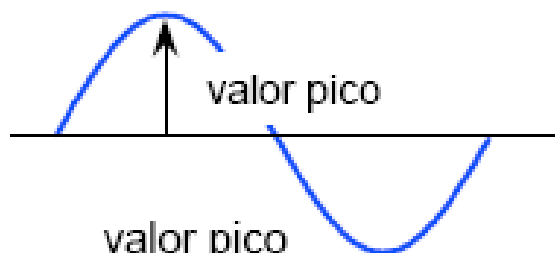
donde  $\omega_1 = 2 \pi / T$  es la frecuencia angular en rad / s.

La suma  $a_1 \cos ( \omega_1 t ) + b_1 \sin ( \omega_1 t )$  es la componente fundamental y tiene la misma frecuencia y el mismo periodo  $T$  que la función que deseamos descomponer en senos y cosenos.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Factor de Cresta y Valor Promedio.



$$\text{valor rms} = \frac{\text{valor pico}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{valor promedio} = 0$$

factor de cresta

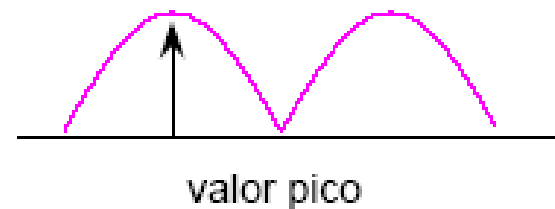
$$f.c. = \frac{\text{valor pico}}{\text{valor rms}}$$

el factor de cresta de una senoidal es  $\sqrt{2}$

$$\text{valor promedio: } F_{\text{prom}} = \frac{\text{área bajo la curva}}{\text{período en segundos}} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

el valor promedio de una senoidal es 0

el valor promedio de una senoidal rectificadora es  $\frac{2}{\pi} V_p$



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Valor Efectivo.

$$F_{\text{rms}} = \sqrt{\text{promedio de } f^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t) + \sqrt{2} I_2 \sin(\omega_2 t) + \sqrt{2} I_3 \sin(\omega_3 t)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$$

$\omega_1, \omega_2$  y  $\omega_3$  son distintas

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Valor rms y en base a Promedio.

**Valor rms verdadero:** algunos instrumentos indican el valor rms sin importar la forma de la onda, por lo general aparece la leyenda “true rms” en dichos instrumentos.

- **Valor rms en base al promedio de la senoidal rectificadora:** algunos instrumentos rectifican una señal proporcional a la cantidad a medir y miden directamente el valor promedio de dicha señal. La escala no indica el valor promedio sino el valor rms que corresponde a una senoidal.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Valor rms y en base a Promedio.

– para una senoidal:  $I_{rms} = I_{pico} / \sqrt{2}$

– valor rms en función del valor promedio está dado por:

$$I_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{prom}$$

– valor promedio de una senoidal con rectificación de onda completa está dado por:

$$I_{prom} = 2 \cdot I_{pico} / \pi$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Distorsión Armónica Total.

$$THD = \frac{\text{valor rms de la distorsión}}{\text{valor rms de la fundamental}} = \frac{I_{\text{dist}}}{I_1}$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_{h\text{max}}^2}}{I_1}$$

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_5}{I_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{h\text{max}}}{I_1}\right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h\text{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Factor de Potencia Total o Verdadero.

$$fp = \frac{\text{Potencia Promedio}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{P, (W)}{VI, (VA)}$$

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 \cdot dt} \times \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 \cdot dt}}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Factor de Potencia de Desplazamiento.

- » es la componente de desplazamiento del factor de potencia
- » es la relación de la potencia activa de la onda fundamental, (W), a la potencia aparente de la onda fundamental, (VA)

$$fp_{disp} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{V_1 \cdot I_1}$$

$$fp_{disp} = \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})$$



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Factor de Potencia de Distorsión.

$$fp = \frac{\text{Potencia Promedio}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{P, (W)}{VI, (VA)}$$

$$fp = fp_{\text{disp}} \times fp_{\text{dist}}$$

$$fp_{\text{dist}} = \frac{fp}{fp_{\text{disp}}} = \frac{P}{VI \cdot \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Factor de Potencia de Distorsión.

$$fp_{\text{dist}} = \frac{P}{VI \cdot \cos(\theta_v - \theta_{i1})} = \frac{VI_1 \cdot \cos(\theta_v - \theta_{i1})}{VI \cdot \cos(\theta_v - \theta_{i1})} = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{I_1 \cdot \sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

fp de distorsión

$$fp_{\text{dist}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

potencia reactiva  
de desplazamiento

$$Q_{\text{disp}} = VI_1 \cdot \sin(\theta_v - \theta_{i1})$$

potencia de distorsión

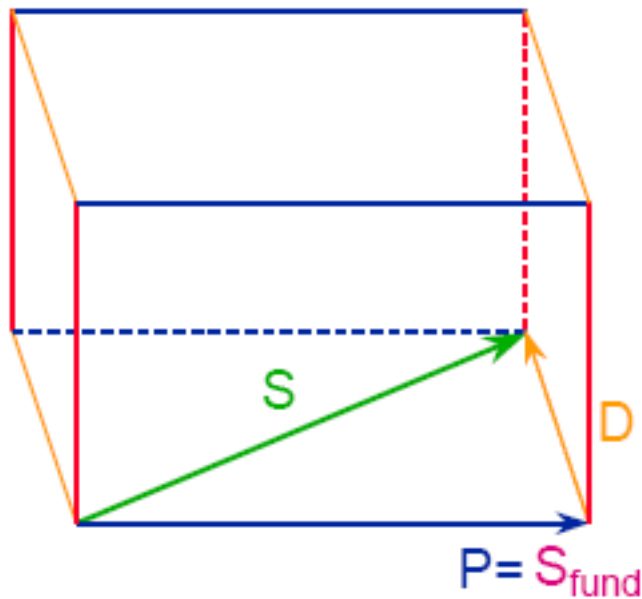
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_{\text{disp}}^2}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

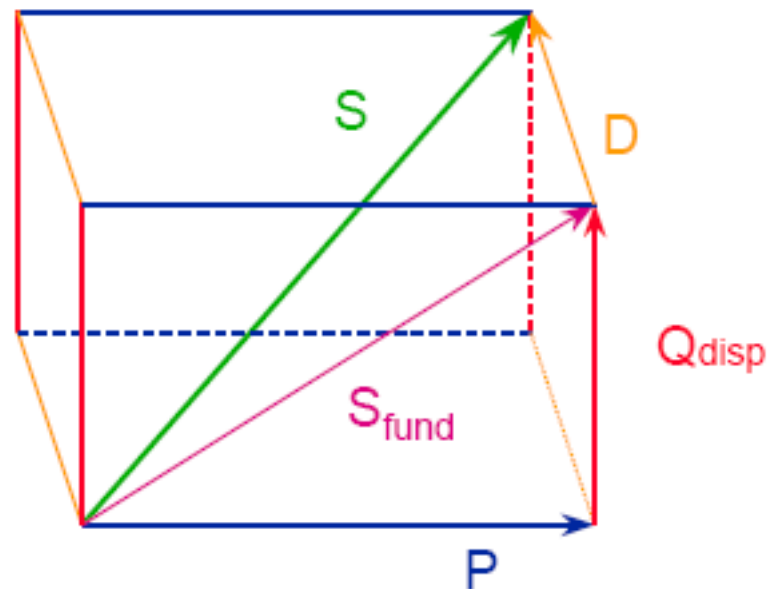
### ■ Carga con Distorsión.

Sin desplazamiento



$Q_{disp} = 0$

Con desplazamiento



$$S^2 = P^2 + Q_{disp}^2 + D^2$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Problemas planteados por los armónicos.

En particular, los condensadores son extremadamente sensibles a los armónicos debido a que su impedancia decrece proporcionalmente al rango de los armónicos presentes. Si la frecuencia propia del conjunto condensador-red está próxima al rango de un armónico, se producirá entonces una **resonancia** que amplificará el armónico correspondiente.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Problemas planteados por los armónicos.

La corriente resultante provocará el calentamiento y luego la perforación del condensador. Para limitar estos riesgos y permitir el buen funcionamiento del condensador, existen algunas soluciones posibles:

- Contra los efectos de los armónicos.
- Contra los fenómenos de resonancia.

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Problemas planteados por los armónicos.
- Contra los efectos de los armónicos.

La presencia de armónicos implica un aumento de la intensidad en el condensador a pesar de que está diseñado para una intensidad eficaz igual a 1,3 veces su intensidad nominal. Todos los elementos en serie se calibrarán entre 1,3 y 1,5 veces la intensidad asignada.

Tener en cuenta los fenómenos armónicos consiste principalmente en **sobredimensionar los condensadores y asociarlos a inductancias anti-armónicos.**

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Problemas planteados por los armónicos.
- Contra los fenómenos de resonancia.

Los condensadores no son en sí mismos generadores de armónicos. En cambio, cuando en una red circulan armónicos, la presencia de un condensador amplifica más o menos algunos de dichos armónicos. Esto produce una resonancia cuya frecuencia es función de la impedancia de la red (o de la potencia de cortocircuito). El valor de la frecuencia propia es:

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Problemas planteados por los armónicos.
- Contra los fenómenos de resonancia.

$$f_p = f_0 \sqrt{S_{cc} / Q}$$

siendo

$f_0$  = frecuencia de la red (50 Hz o 60 Hz),

$S_{cc}$  = potencia de cortocircuito de la red en kVA,

$Q$  = potencia de la batería de condensadores en kVAr.



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Problemas planteados por los armónicos.
- Contra los fenómenos de resonancia.

Para paliar estas fenómenos, se utilizarán:

- condensadores sobredimensionados en tensión, por ejemplo 440 V para una red 400 V.
- inductancias anti-armónicos asociadas a los condensadores.

La elección se hace teniendo en cuenta los elementos siguientes:

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Problemas planteados por los armónicos.
- Contra los fenómenos de resonancia.
- $G_h$  = potencia en kVA de todos los generadores de armónicos alimentados por el mismo embarrado que los condensadores. Si la potencia de los generadores es conocida en kW, se divide por 0,7 (valor medio de factor de potencia) para obtener  $G_h$ .
- $S_{cc}$  = potencia de cortocircuito real (kVA) de la red.
- $S_n$  = potencia del transformador aguas arriba (kVA).

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Problemas planteados por los armónicos.
- Contra los fenómenos de resonancia.

Condensadores alimentados en BT por un transformador de potencia  $S_n > 2$  MVA  
(regla general)

$G_h < \frac{S_{cc}}{120}$	$\frac{S_{cc}}{120} \leq G_h \leq \frac{S_{cc}}{70}$	$\frac{S_{cc}}{70} \leq G_h \leq \frac{S_{cc}}{30}$
condensador estándar	tensión condensador aumentada un 10% (salvo 230V)	tensión condensador aumentada un 10% + inductancia anti-armónicos

Condensadores alimentados en BT por un transformador de potencia  $S_n < 2$  MVA  
(regla simplificada)

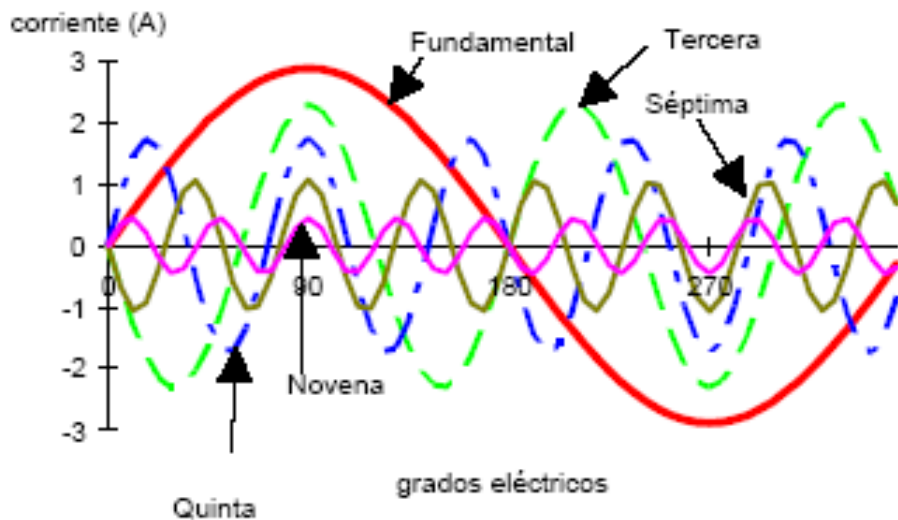
$G_h \leq 0,15 S_n$	$0,15 S_n < G_h \leq 0,25 S_n$	$0,25 S_n < G_h < 0,60 S_n$
condensadores estándar	tensión condensador aumentada un 10% (salvo 230 V)	tensión condensador aumentada un 10% + inductancia anti-armónicos

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

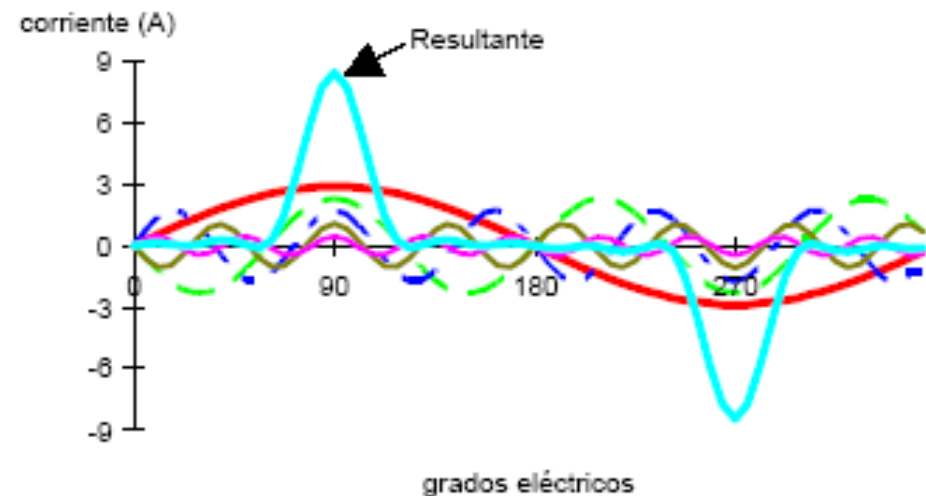
## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Ej. Corriente en un grupo de computadoras.

$$i(\omega_1 \times t) = +2.88 \times \sin(1 \times \omega_1 \times t) - 2.31 \times \sin(3 \times \omega_1 \times t) \\ + 1.75 \times \sin(5 \times \omega_1 \times t) - 1.07 \times \sin(7 \times \omega_1 \times t) \\ + 0.45 \times \sin(9 \times \omega_1 \times t)$$



(a) Componentes armónicas



(b) Componentes armónicas y resultante

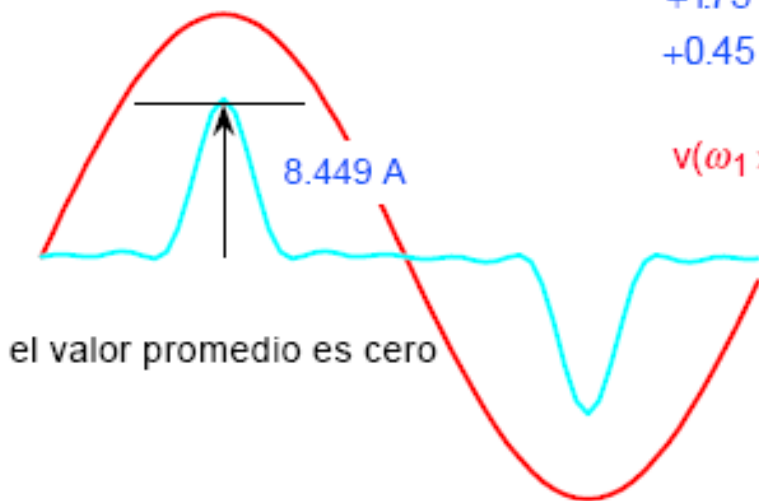
# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### Ej. Corriente en un grupo de computadoras.

$$i(\omega_1 \times t) = +2.88 \times \sin(1 \times \omega_1 \times t) - 2.31 \times \sin(3 \times \omega_1 \times t) \\ + 1.75 \times \sin(5 \times \omega_1 \times t) - 1.07 \times \sin(7 \times \omega_1 \times t) \\ + 0.45 \times \sin(9 \times \omega_1 \times t)$$

$$v(\omega_1 \times t) = \sqrt{2} \times 120 \times \sin(1 \times \omega_1 \times t)$$



$$f.c. = \frac{\text{valor pico}}{\text{valor rms}} = \frac{8.449}{3} = 2.816$$

h	1	3	5	7	9
I pico, h	2.88	2.31	1.75	1.07	0.45
I rms, h	2.036	1.633	1.237	0.757	0.318
(I rms, h) <sup>2</sup>	4.1472	2.66805	1.53125	0.57245	0.10125

$$I_{rms} = \sqrt{4.1472 + 2.66805 + 1.53125 + 0.57245 + 0.10125} = 3.00 \text{ A rms}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Ej. Corriente en un grupo de computadoras.



Rectificación de onda completa  
Valor promedio = 1.501 A.

En base a valor promedio

$$I_{\text{rms}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{\text{prom}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times 1.501 = 1.667$$

$I_{\text{true rms}} = 3 \text{ A}$

En base a valor pico

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{pico}}}{\sqrt{2}} = \frac{8.449}{\sqrt{2}} = 6$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Ej. Corriente en un grupo de computadoras.

h	1	3	5	7	9
I pico, h	2.88	2.31	1.75	1.07	0.45
I rms, h	2.036	1.633	1.237	0.757	0.318
(I rms,h) <sup>2</sup>	4.1472	2.66805	1.53125	0.57245	0.10125
(I rms,h) / I1	1	0.802	0.608	0.372	0.156
{(I rms,h) / I1} <sup>2</sup>	1	0.643	0.369	0.138	0.024

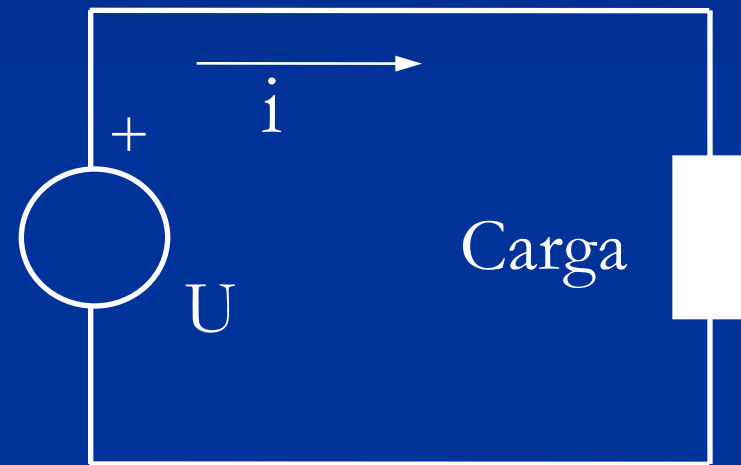
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{2.6681 + 1.5313 + 0.5725 + 0.10125}}{2.036} = \frac{2.207}{2.036} = 1.084 = 108.4\%$$

$$\text{THD} = \sqrt{0.643 + 0.369 + 0.138 + 0.024} = 1.084 = 108.4\%$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.



$$U = 311,3\text{sen}(\omega t)$$

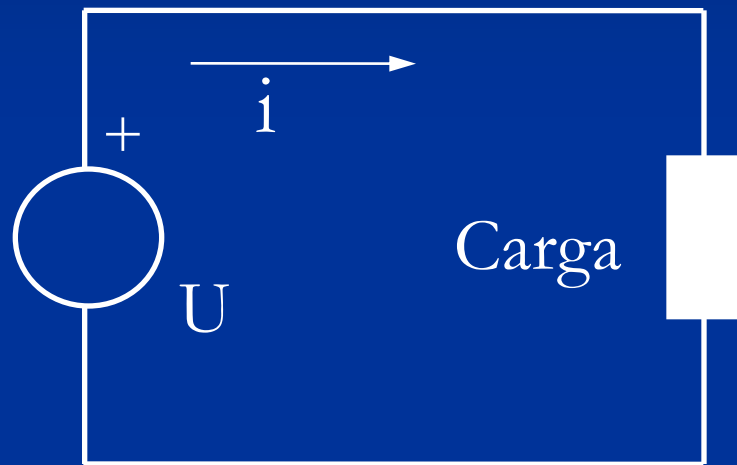
$$i = 10\text{sen}(\omega t - 30^\circ) + 6\text{sen}(3\omega t - 50^\circ) + 3\text{sen}(5\omega t - 70^\circ)$$



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.



El valor eficaz de la tensión será :

$$U_{ef} = \frac{311,3}{\sqrt{2}} = 220 \text{ V}$$

El valor eficaz de la corrientes será :

$$I_1 = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 \quad I_3 = \frac{6}{\sqrt{2}} = 4,24 \quad I_5 = \frac{3}{\sqrt{2}} = 2,12$$

$$I_{ef} = \sqrt{7,07^2 + 4,24^2 + 2,12^2} = 8,51 \text{ A}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.

La potencia Aparente surge del producto de los valores eficaces de tensión y corriente:

$$S = U_{ef} I_{ef} = 220 \times 8,51 = 1872 \text{ VA}$$

La potencia Activa y Reactiva derivan de la fundamental de la onda de corriente.

$$P = U_{ef} \times I_1 \times \cos \varphi = 220 \times 7,07 \times \cos 30^\circ = 1347 \text{ W}$$

$$Q = U_{ef} \times I_1 \times \text{sen} \varphi = 220 \times 7,07 \times \text{sen} 30^\circ = 777,7 \text{ VAR}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.

Los valores obtenidos nos permiten obtener el factor de potencia de la carga:

Este valor corresponde al “verdadero factor de potencia” y es el que miden los instrumentos electrónicos de verdadero valor.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{1347}{1872} = 0,72$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.

Los valores obtenidos nos permiten obtener el factor de potencia de la carga:

Para ondas poliarmónicas este difiere del que se obtendría en comportamiento senoidal y que resulta del siguiente cálculo:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

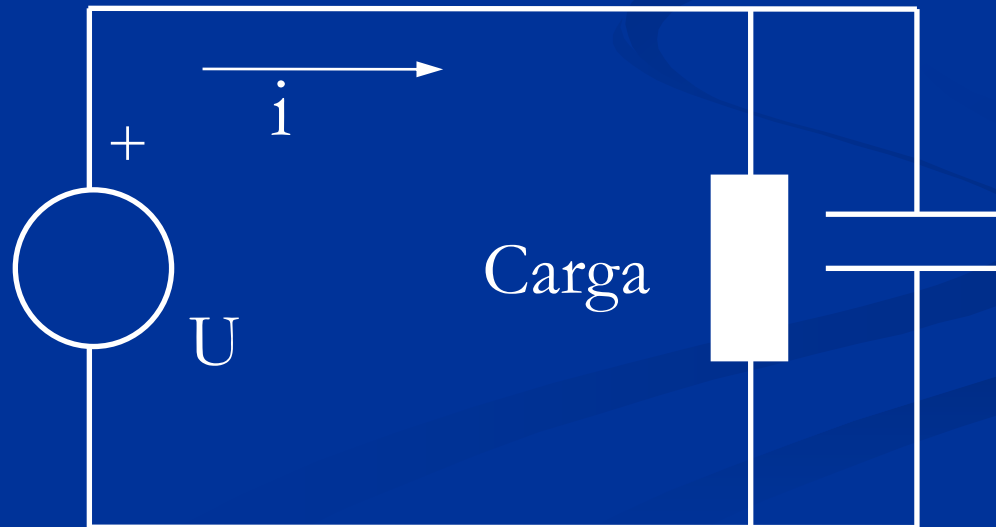
$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{1347^2 + 777,7^2}} = 0,866$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.

Si para corregir el factor de potencia colocamos un capacitor en paralelo como se indica en el circuito, circulará por el solo corriente de frecuencia fundamental:

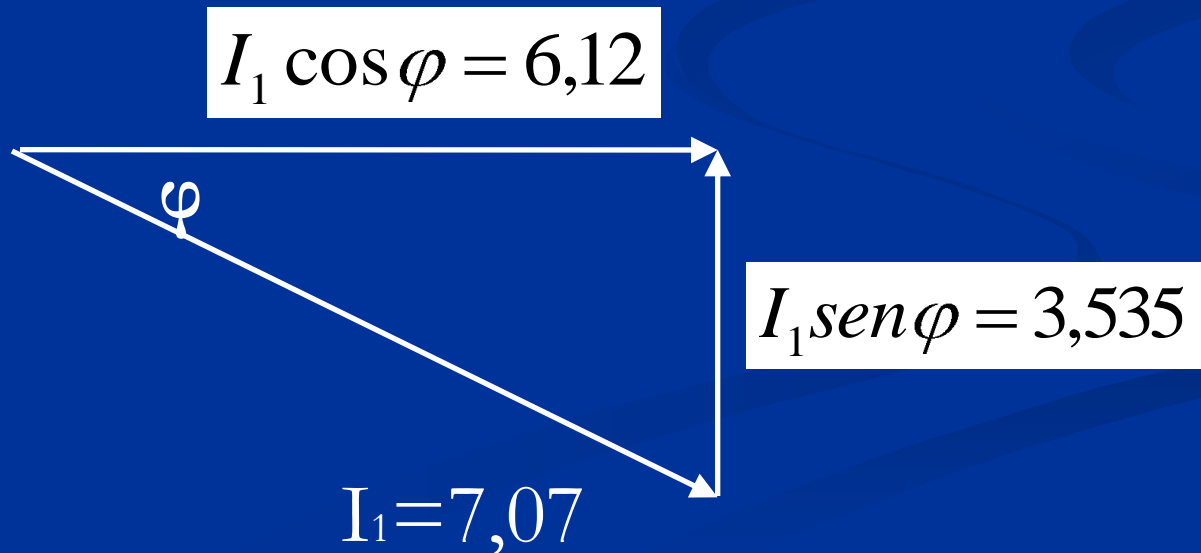


# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.

El mínimo valor de la fundamental que es posible obtener con el agregado de capacitores será de 6,12 A para un ángulo  $\varphi = 0$  y corresponde a una  $I_c = 3,535$  A; como se observa en el diagrama fasorial:



# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

### ■ Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.

Como el resto de las componentes no sufren modificación alguna, el nuevo valor eficaz de la corriente será:

$$I_{ef} = \sqrt{6,12^2 + 4,24^2 + 2,12^2} = 7,74 \text{ A}$$

Al que corresponde una potencia aparente y activa de :

$$S = 220 \times 7,74 = 1702,8 \text{ VA}$$

$$P = 1347 \text{ W}$$

# CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

## FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

- Ej. Factor de Potencia de una carga residencial.  
El nuevo factor de potencia será:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{1347}{1702,8} = 0,79$$

Este es el valor más próximo a 1 al que podemos aspirar con el agregado de capacitores.