

Comportamiento de los sistemas de alumbrado



José Cidrás Pidre
jcidras@uvigo.es
Camilo J. Carrillo González
carrillo@uvigo.es

*Grupo de investigación en e
Universidade de Vigo*

1

Equipos auxiliares

Son los equipos eléctricos asociados a la lámpara y necesarios para su correcto funcionamiento, desde el punto de vista eléctrico. Los equipos auxiliares más comunes son:

- los balastos
- los arrancadores
- los condensadores.

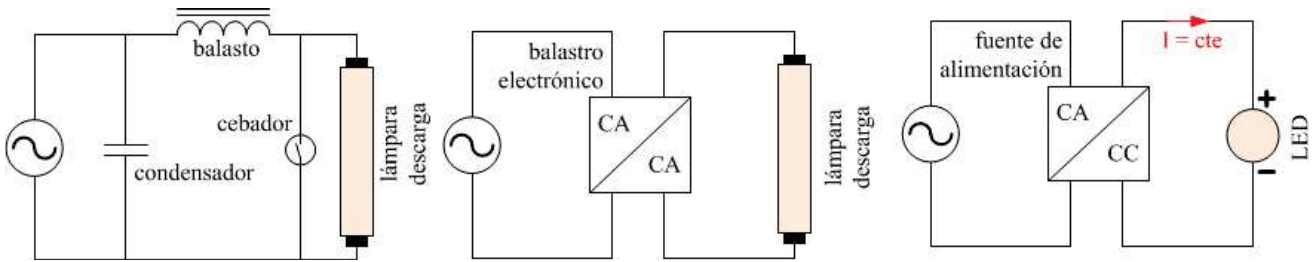
↔ Balastos electrónicos



2

Equipos auxiliares

Balastos y fuentes de alimentación



Las ventajas principales de la utilización de los balastos electrónicos:

- Mayor eficiencia de la lámpara por alimentarla a frecuencia elevadas
- Prevención del efecto estroboscópico
- Mayor eficiencia del balasto, al desaparecer las pérdidas en el cobre y en el hierro (rendimiento superior al 95%)
- Arranque instantáneo
- Factor de potencia del conjunto puede ser unitario
- Inmunidad a variaciones de la tensión de entrada
- Posibilidad de incorporar control de flujo luminoso

3

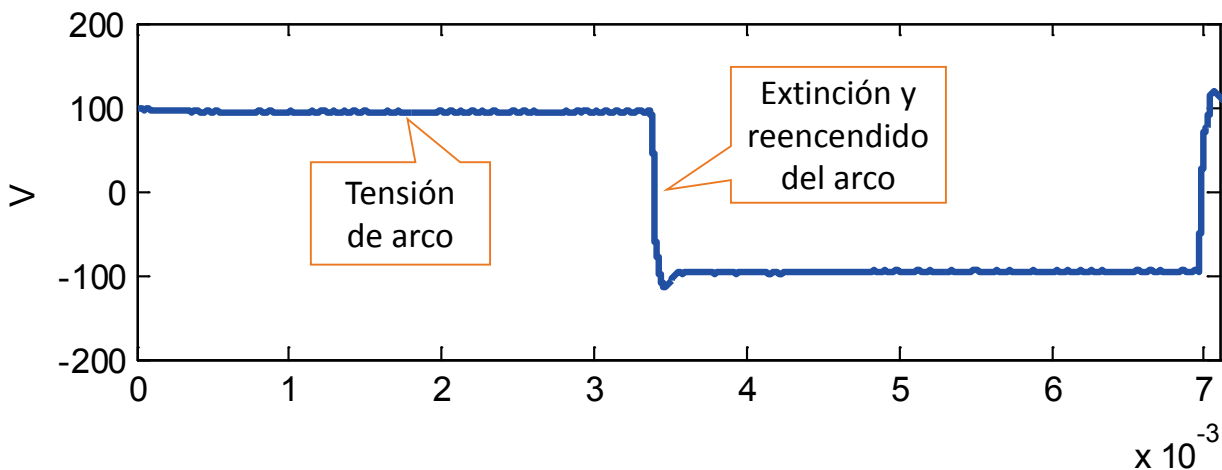
Equipos auxiliares

- **Funcionamiento: balastro electromagnético**

Tensión de cebado arco: 250V-5kV

Tensión de arco: 80V-180V

Tensión en lámpara de halogenuros metálicos



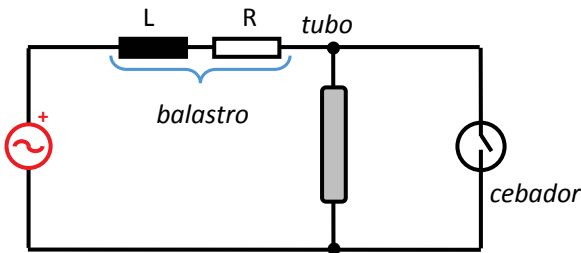
4

Equipos auxiliares

• Funcionamiento: balastro electromagnético

Tensión de cebado arco: 250V-5kV

Tensión de arco: 80V-180V



- Tubo fluorescente
- Balastro, bobina con núcleo de hierro con inductancia elevada
- Cebador, ampolla en cuyo interior hay un contacto bimetálico que se abre con el calor.

Arranque:

- Cebador en serie con balastro
- Apertura cebador provoca arco eléctrico

Régimen permanente:

- Balastro limita tensión en tubo ($\approx 80V$)
- Bobina muy saturada (pérdidas en hierro y en cobre)

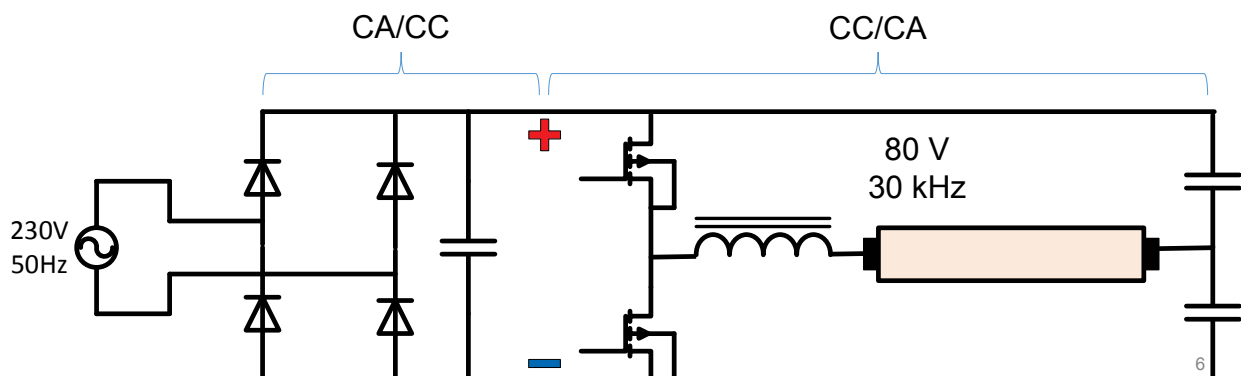
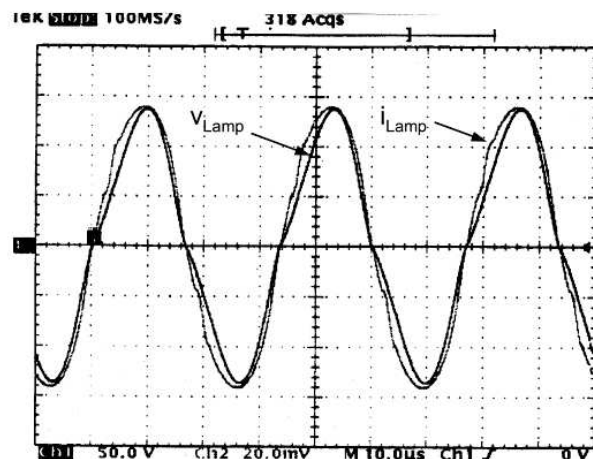
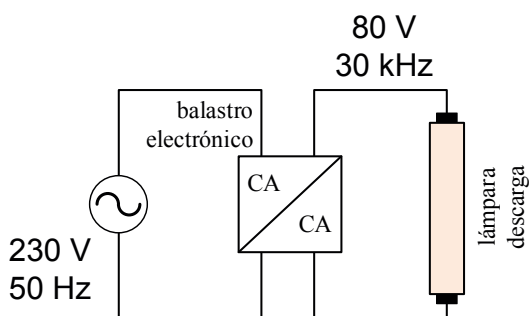
En función de la lámpara de descarga, el sistema de cebado del arco puede ser distinto.

5

Equipos auxiliares

• Funcionamiento: Lámpara fluorescente compacta

Tensión y corriente

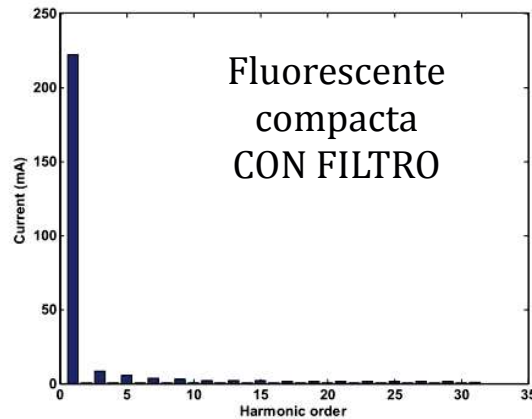
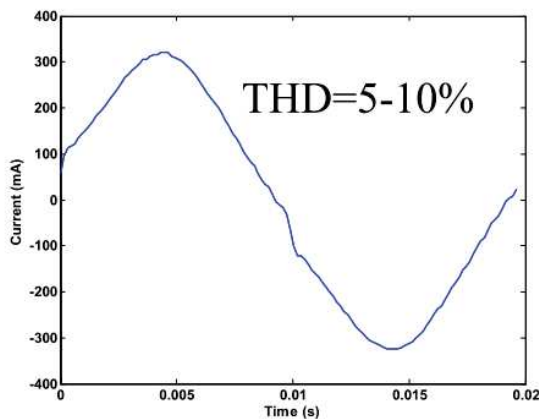
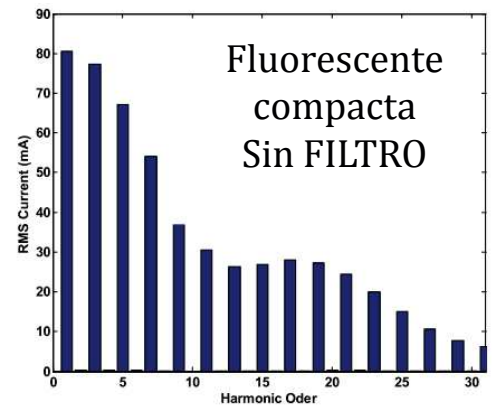
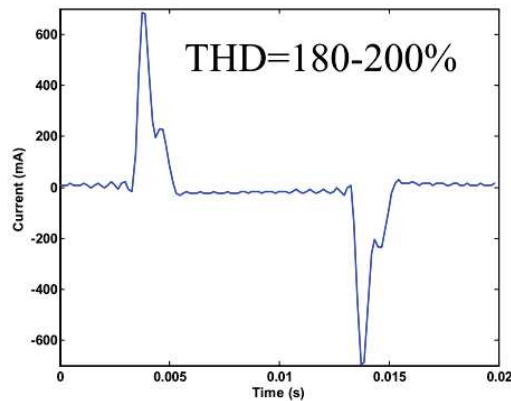


6

Equipos auxiliares

- **Funcionamiento: Lámpara fluorescente compacta**

Tensión y corriente



7

Equipos auxiliares

Elementos de un sistema de iluminación

❑ Equipos Auxiliares

- **Cebador / Arrancador**
 - o Genera los picos de tensión iniciales para el arranque de las lámparas.
 - o Precalentamiento de los cátodos.
 - o Lámparas de fluorescencia.
- **Balastos electromagnéticos o electrónicos.**
 - o Proporciona corriente de arranque.
 - o Proporciona tensión de vacío para generar arco entre electrodos.
 - o Limita el consumo de corriente de la lámpara.
 - o Estabiliza la corriente ante variaciones de tensión (alarga la vida útil).
- **Condensadores**
 - o Compensa el uso de energía reactiva cuando se utilizan reactancias electromagnéticas.
 - o Lámparas de fluorescencia, halógenos metálicos y vapor de sodio.
- **Transformador / Fuente de alimentación**
 - o Convierte la tensión de red a la adecuada a lámparas de muy baja tensión .
 - o Lámparas halógenas de baja tensión y LED's



8

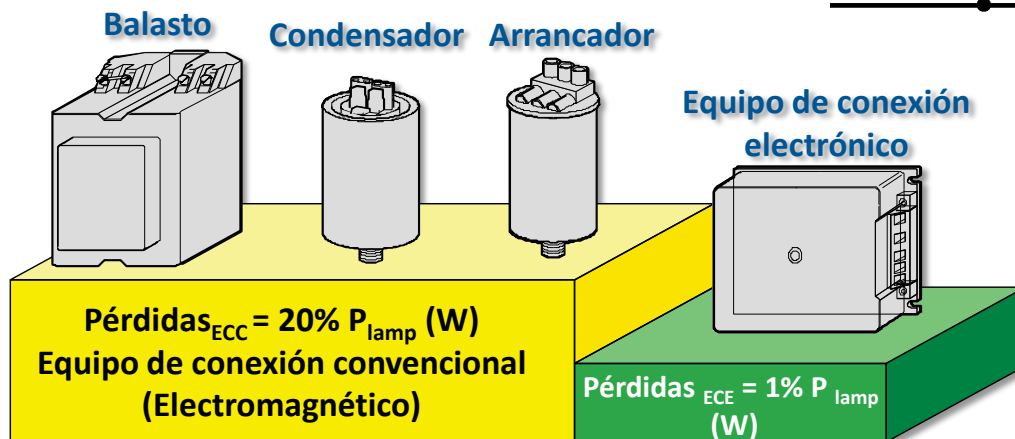
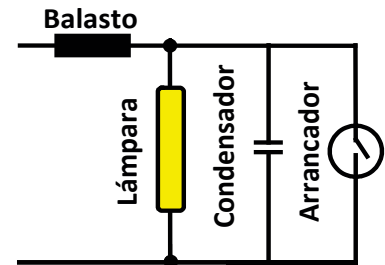
Equipos auxiliares

Los sistemas de alimentación: balasto

Las lámparas de descarga se alimentan a través de balastos mediante los que se limita la corriente de alimentación. Se utilizan en las lámparas de descarga.

Balastos electrónicos versus balastos electromagnéticos

- ✓ Menor consumo (mayor eficiencia)
- ✓ Mayor factor de potencia
- ✓ Reducción efecto estroboscópico (confort visual)
- ✓ Posibilidad de control
- ✗ Menor fiabilidad



Equipos auxiliares

Consumo lámparas

La potencia consumida por una lámpara se puede poner como:

$$I = (P_{aux} + P_{lámpera}) / (U \cdot \cos\phi)$$

Donde P_{aux} es la potencia consumida por los sistemas auxiliares (balasto o fuente de alimentación) y $P_{lámpera}$ es la potencia consumida por la lámpara. Los valores de referencia para el factor de potencia son:

- $\cos \phi = 1$; para lámparas incandescentes
- $\cos \phi = 0.6$; para tubos fluorescentes sin compensación de reactiva
- $\cos \phi = 0.86$; para tubos fluorescentes con compensación de reactiva
- $\cos \phi = 0.96$; para tubos fluorescentes con balasto electrónico

Nº Tubos	Potencia nominal en W	Corriente en A			Potencia consumida en W		
		Sin corr. FP	Con corr. FP	Balast. Electr.	Sin corr. FP	Con corr. FP	Balast. Electr.
1	18	0.2	0.14	0.1	28	28	23
1	36	0.33	0.23	0.18	46	45	40
1	58	0.5	0.36	0.28	69	71	62
2	18		0.28	0.18		55	40
2	36		0.46	0.35		91	78
2	58		0.72	0.52		142	115

Normativa límite consumo:

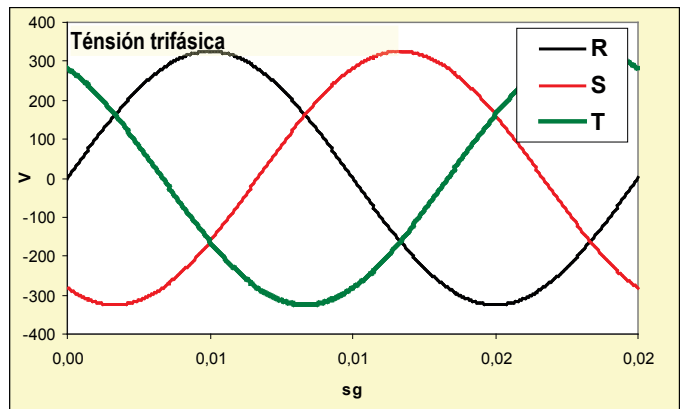
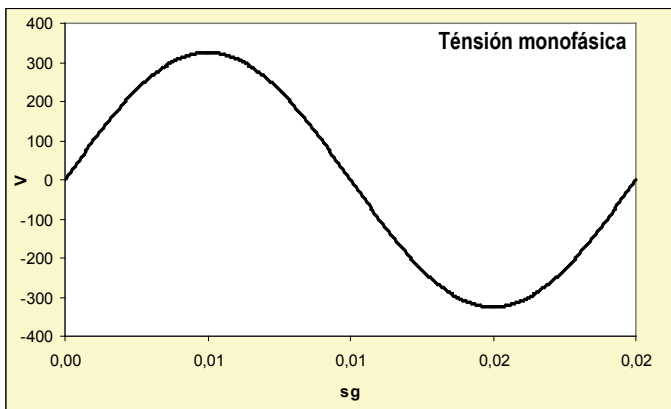
CTE HE3: consumo de lámparas de descarga y halógenas y sus balastos

RD 838/2002: consumo de lámparas fluorescentes

Potencia activa y reactiva

Formas de onda

Características de la tensión



Características ideales de la tensión:

- **Forma de onda:** sinusoidal
- **Frecuencia:** 50 Hz
- **Valor Eficaz:** 230 V (monofásica) / 400 V (trifásica)
- **Valor de pico:** 325 V (monofásica) / 565 V (trifásica)

11

Potencia activa y reactiva

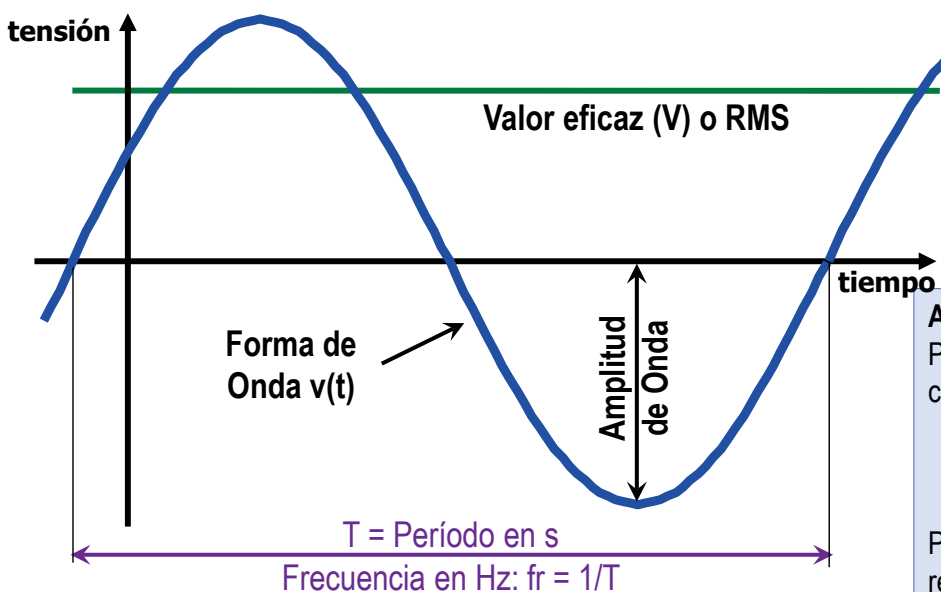
Valor eficaz

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T [v(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [v(k\Delta T)]^2} \approx \max(v(t)) = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$$

- T = Período en s
- Frecuencia en Hz: $f_r = 1/T$
- ΔT = Período de muestreo en s

ONDAS
SINUSOIDALES

Valor medio de la forma de onda al cuadrado.



UNE-EN 61400-4-30

La medida del valor eficaz ha de realizarse sobre 10 períodos consecutivos para redes de 50 Hz.

APROXIMACIÓN

Para formas de onda sinusoidales o cuasi sinusoidales:

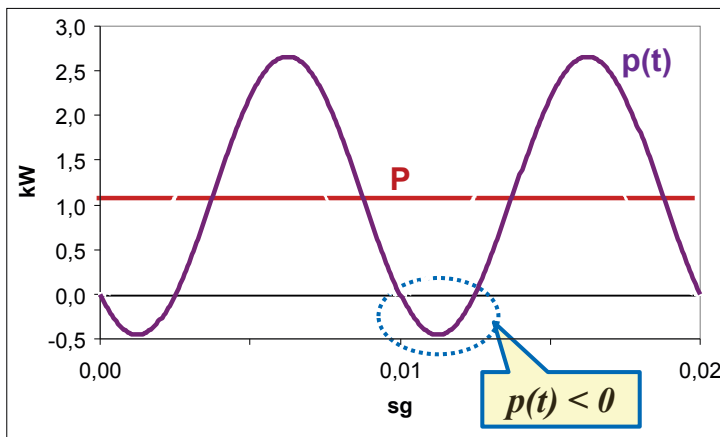
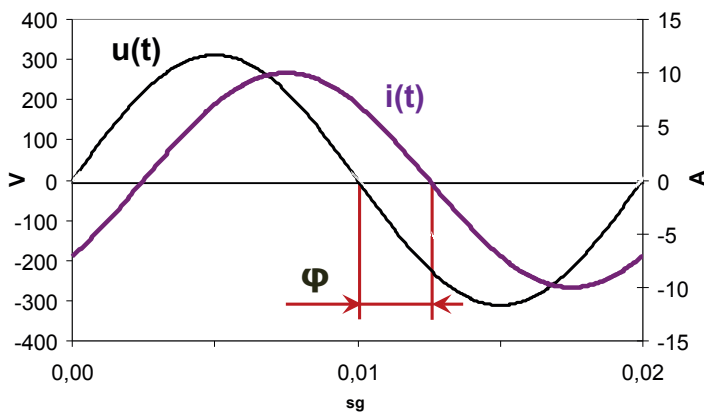
$$RMS \approx 1,1 \times \frac{1}{T} \int_T v(t) dt$$

Proporcional al valor medio de la onda rectificada.

Potencia activa y reactiva

Potencia activa y reactiva

Tensión e intensidad en una carga



Potencia instantánea:

$$p(t) = u(t)i(t)$$

Valor instantáneo del producto de tensión por intensidad.

Potencia media o activa:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(\tau) d\tau = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} p(k\Delta T)$$

Valor medio de la potencia instantánea

En el caso de formas de onda sinusoidales:

$$P = UI \cos \varphi \quad (W)$$

φ : Desfase entre tensión e intensidad

13

Potencia activa y reactiva

Potencia activa y reactiva

Potencia en una carga $P = UI \cos \varphi \quad [W]$

Potencia aparente: $S = UI \quad [VA]$

Potencia reactiva: $Q = \sqrt{S^2 - P^2} = UI \sin \varphi \quad [VAr]$

Cos φ :

El ángulo φ es el desfase entre la tensión e intensidad para ondas sinusoidales. En inglés DPF o Displacement Power Factor.

Potencia reactiva generada por un condensador:

$$Q = 2\pi \cdot fr \cdot C \cdot U^2$$

- C: capacidad del condensador (F)
- fr: frecuencia de red (Hz)
- U: valor eficaz tensión (V)

14

Potencia activa y reactiva

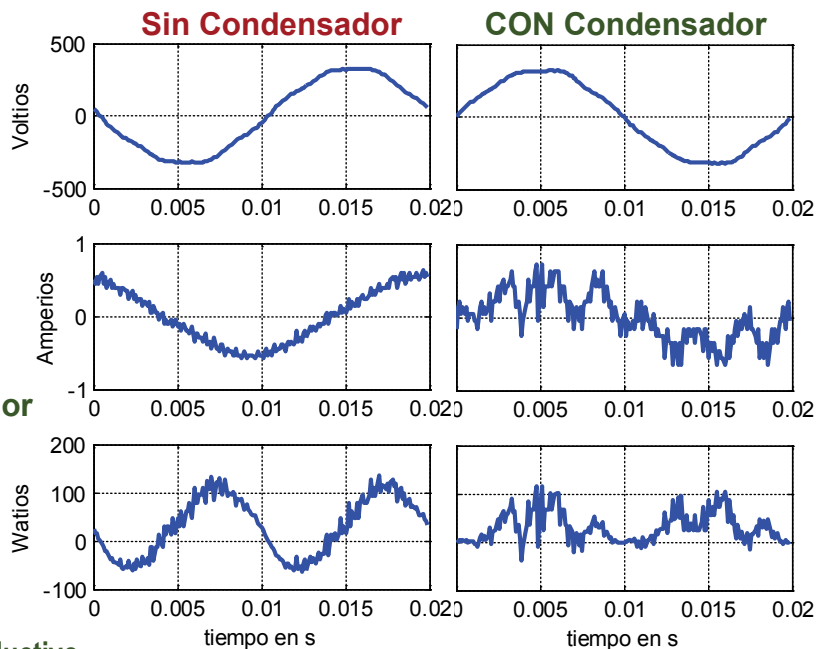
Potencia activa y reactiva

Ejemplo

Análisis de tubo fluorescente con balastro electromagnético, con y sin, condensador para compensación de reactiva.

Características del tubo:

- Tipo: T8
- Potencia nominal: 18W
- Código Color: 840 (CCT 400K; Ra 85)
- Compensación de reactiva: 5uF / 250V



Sin Condensador

- ❖ $U = 233 \text{ V}$
- ❖ $I = 0.37 \text{ A}$

- ❖ $P = 30.1 \text{ W}$
- ❖ $S = 86.6 \text{ VA}$
- ❖ $\cos \phi = 0.35$ inductivo
- ❖ $Q = 81.2 \text{ VAR}$

CON Condensador

- ❖ $U = 232 \text{ V}$
- ❖ $I = 0.16 \text{ A}$

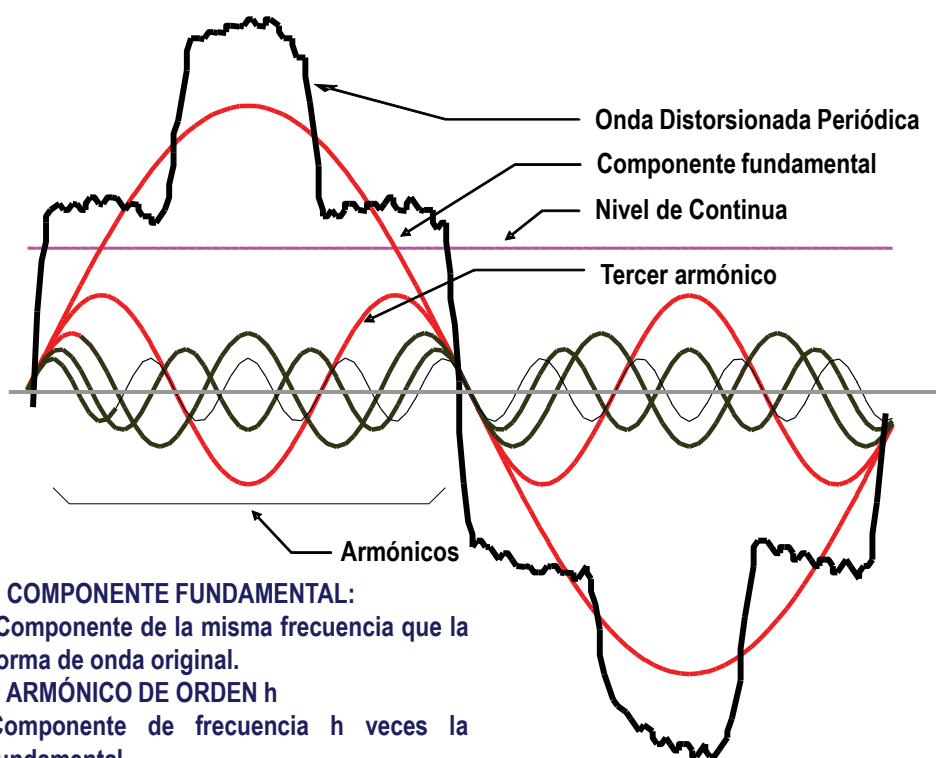
- ❖ $P = 30.3 \text{ W}$
- ❖ $S = 37.9 \text{ VA}$
- ❖ $\cos \phi = 0.997$ inductivo
- ❖ $Q = 22.7 \text{ VAR}$

15

Potencia en presencia de armónicos

Armónicos

Descomposición armónica



COMPONENTES ARMÓNICAS:

Cualquier forma de onda periódica no sinusoidal de una frecuencia dada (frecuencia fundamental) se puede descomponer en ondas sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental más una componente continua.

o COMPONENTE FUNDAMENTAL:

Componente de la misma frecuencia que la forma de onda original.

o ARMÓNICO DE ORDEN h

Componente de frecuencia h veces la fundamental.

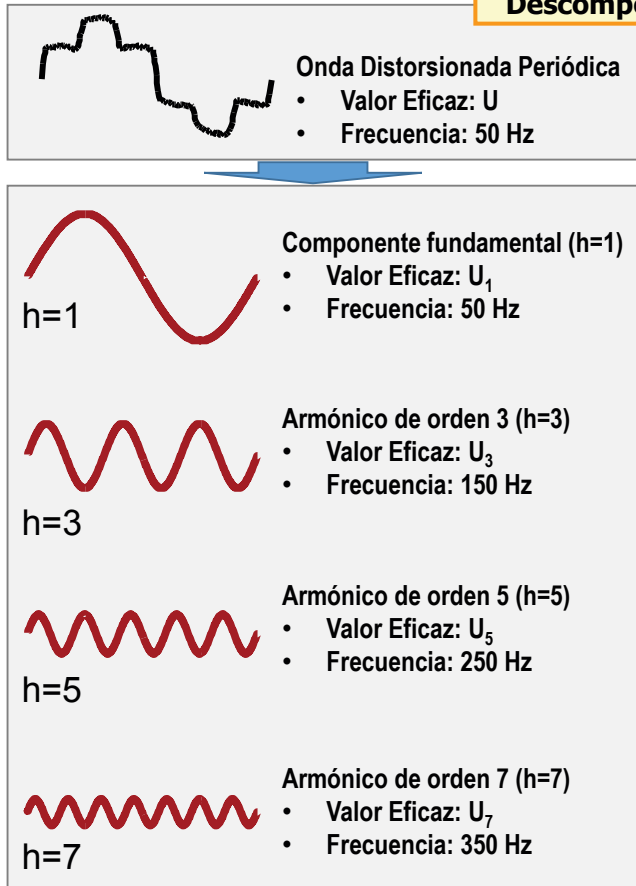
o COMPONENTE CONTINUA

o Valor medio de la forma de onda periódica.

Potencia en presencia de armónicos

Armónicos

Descomposición armónica



Una forma de onda periódica se puede descomponer en INFINITAS ondas sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia de la onda de partida.

En REDES industriales NO suelen existir armónicos de orden par (h=0,2,4,...) o bien su valor es muy bajo debido a la simetría de onda (ciclo positivo igual al ciclo negativo).

El valor eficaz de la onda periódica se puede poner como suma cuadrática de los valores eficaces de los armónicos.

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}$$

• En **REDES INDUSTRIALES** las tensiones e intensidades tienen una frecuencia de 50 Hz. Esto quiere decir que la componente fundamental es de 50 Hz y los armónicos tienen una frecuencia múltiplo de este valor.

• Los armónicos habituales en la redes industriales son los impares, especialmente los armónicos **3º (150 Hz)**, el **5º (250 Hz)** y el **7º (350 Hz)**.

Potencia en presencia de armónicos

Potencia activa y reactiva

Potencia en una carga: $P = \int p(t) \cdot dt \quad [W]$

Potencia aparente: $S = UI \quad [VA]$

Potencia reactiva: $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

Factor de potencia: $0 \leq FP = \frac{P}{S} \leq 1$

Habitualmente se designa como **f.d.p.**, λ o **TPF** (True Power Factor).

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi \quad [W]$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi \quad [VAr]$$

Para la componente fundamental

Cos φ :

El ángulo φ es el desfase entre componente fundamental de la tensión y la componente fundamental de la intensidad.

Sistemas lineales : $FP = \cos \varphi$

Sistemas no – lineales : $FP \neq \cos \varphi$

Potencia reactiva generada por un condensador:

$$Q_1 = 2\pi \cdot fr \cdot C \cdot U_1^2$$

- **C:** capacidad del condensador (F)
- **fr:** frecuencia de red (Hz)
- **U:** valor eficaz tensión (V)

Potencia en presencia de armónicos

Distorsión armónica

El nivel de distorsión de una forma de onda se valora con la denomina **Tasa Total de Distorsión Armónica** o **THD**, que se define como:

- Para la tensión:

$$THD_U = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_6^2 + \dots}}{U_1} \times 100$$

- Para la intensidad:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots}}{I_1} \times 100$$

Donde U_h e I_h representan los armónicos de tensión e intensidad de orden h , o lo que es lo mismo aquellos cuya frecuencia es $h \times 50\text{Hz}$.

El nivel de distorsión de una forma de onda se valora con la denomina **Tasa Total de Distorsión Armónica** o **THD**, que se define como:

Para la tensión:

$$HD_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100$$

Para la intensidad:

$$HD_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100$$

19

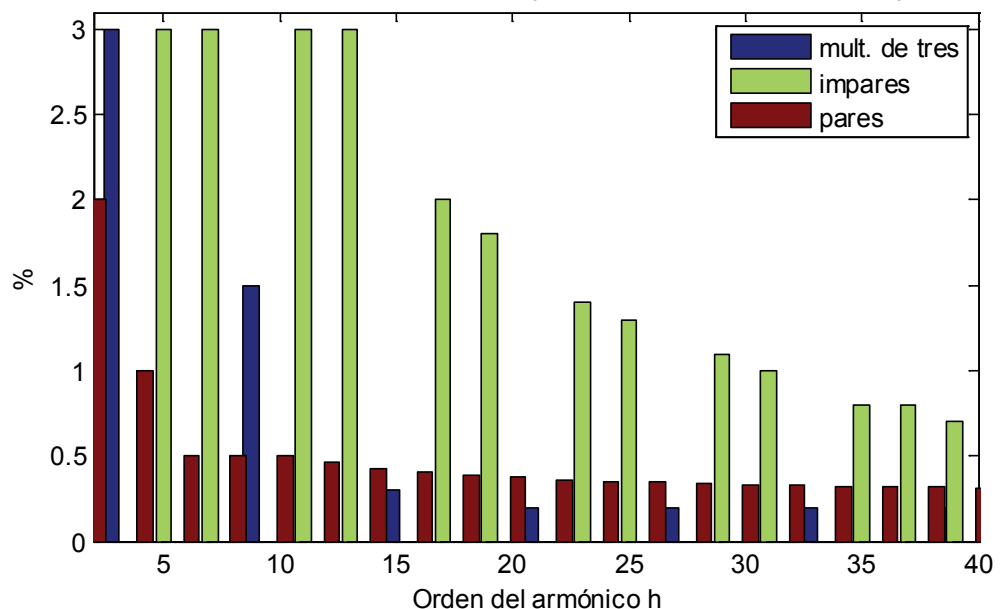
Potencia en presencia de armónicos

Límites - normativa

Según la normativa, la tasa de distorsión armónica de la tensión ha de ser inferior al 8%, considerando únicamente los armónicos hasta el orden 40 (UNE-EN 50160, Clase 2 en UNE-EN 61000-2-4):

$$THD_U < 5\%$$

Límites de armónicos de tensión (Clase 2 en UNE-EN 61000-2-4)



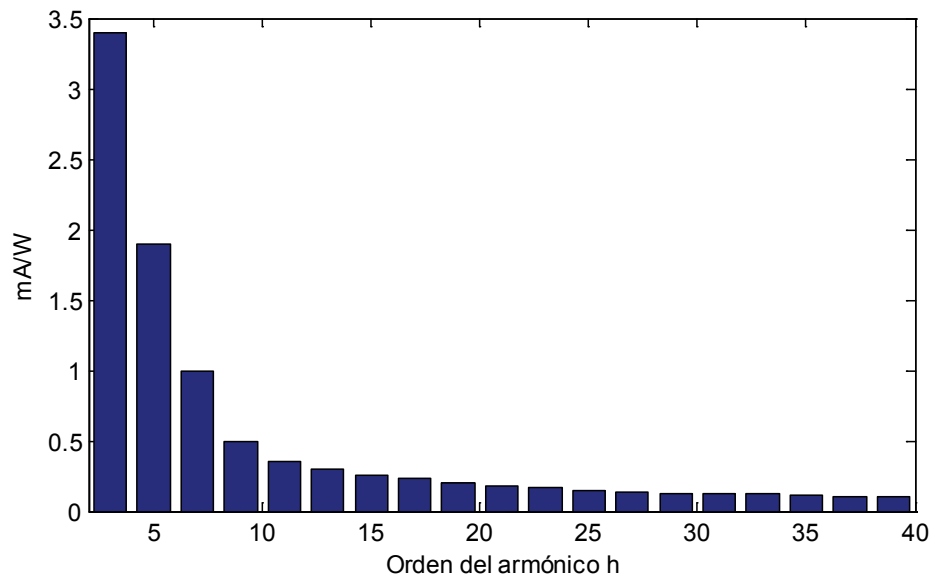
Introducción a la CA

Armónicos

En lo referente a cargas, las distintas normativas limitan la distorsión de la corriente demandada por éstas. Al contenido en componentes armónicas de la corriente se le denomina "emisión de corrientes armónicas".

Límites de emisión de armónicos de corriente para lámparas de menos de 25 W
(Clase C en UNE-EN 61000-3-2)

Una lámpara de 25W con un $\cos \varphi$ de 0.98 podría tener un THD_I superior al 90% y cumplir con la normativa.



Potencia en presencia de armónicos

Factor de potencia y $\cos \varphi$

En el caso de formas de onda de la corriente y tensión sinusoidales (sin distorsión o con $\text{THD}=0$) el denominado $\cos \varphi$ y el factor de potencia tienen un valor coincidente. En el caso de que las formas de onda estén distorsionadas ($\text{THD} \neq 0$), ambas variables tienen valores distintos ($FP \leq \cos \varphi$). La relación entre ambas se puede poner como:

$$FP = \frac{P/P_1 \cos \varphi}{\sqrt{1 + \text{THD}_I^2 + \text{THD}_U^2 + \text{THD}_U^2 \text{THD}_I^2}}$$

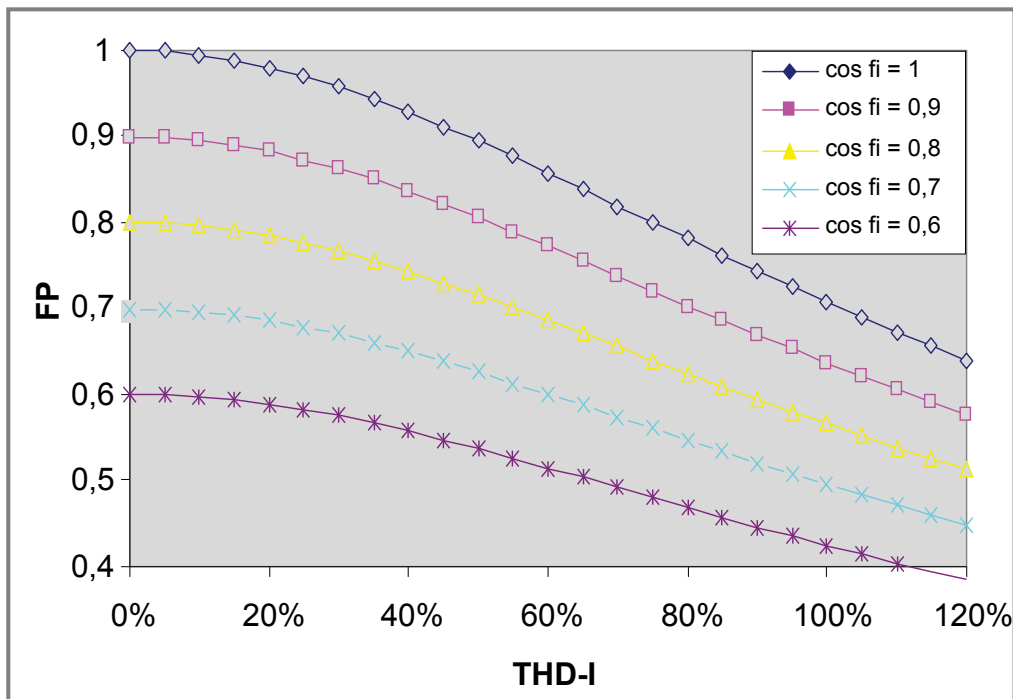
Generalmente $P \approx P_1$
Cuando $\text{THD}_U < 5\%$ y $\text{THD}_I > 40\%$ la expresión anterior se puede aproximar como:

$$FP = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \text{THD}_I^2}}$$

En la actualidad, los cálculos de potencia reactiva y $\cos \varphi$ a efectos de facturación no tienen en cuenta la distorsión armónica de la corriente.

Potencia en presencia de armónicos

Factor de potencia y cos ϕ



23

Potencia activa y reactiva

Potencia activa y reactiva

Ejemplo

Análisis de tubo fluorescente con balastro electromagnético con condensador para compensación de reactiva.

Características del tubo:

- Tipo: T8
- Potencia nominal: 18W
- Código Color: 840 (CCT 400K; Ra 85)
- Compensación de reactiva: 5 μ F / 250V

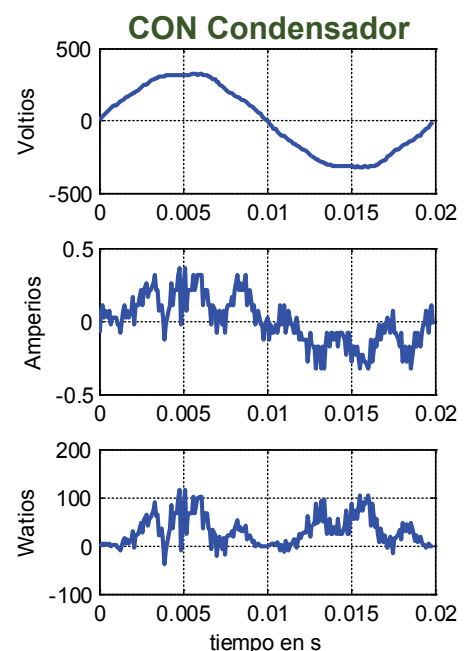
CON Condensador

- ❖ U = 232 V
- ❖ I = 0.16 A

- ❖ THD I = 59.84%

- ❖ P = 30.3 W
- ❖ S = 37.9 VA
- ❖ cos ϕ = 0.997 inductivo
- ❖ Q = 22.7 VAr

- ❖ P1 = 30.3 W
- ❖ Q1 = 2.52 VAr
- ❖ FP = 0.8



24

Potencia activa y reactiva

Potencia activa y reactiva

Ejemplo

Análisis de tubo LED para sustitución de tubo T8 de 18W.

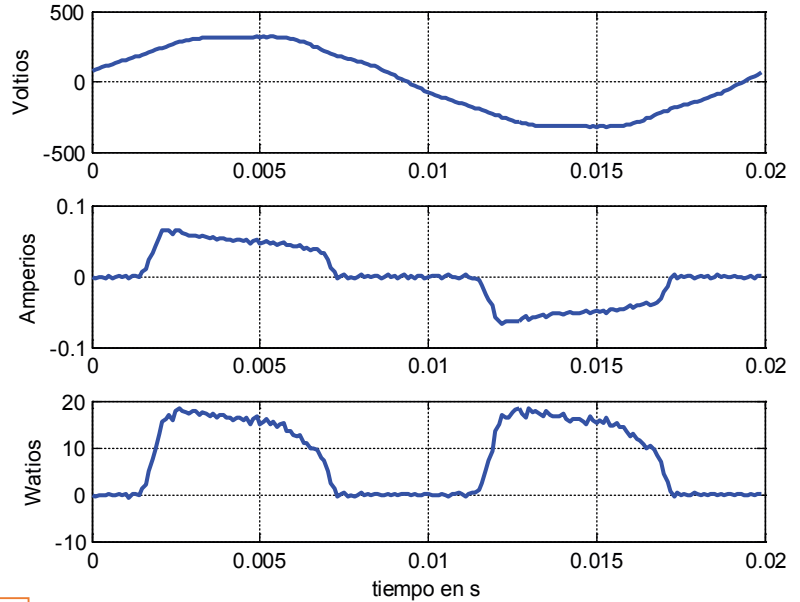
Características del tubo LED:

- Tipo: T8
- Potencia nominal: 8W
- CCT 6000K; Ra 80
- Compensación de reactiva: N/A

Medidas

- ❖ $U = 233 \text{ V}$
- ❖ $I = 0.37 \text{ A}$
- ❖ THD I = 42%
- ❖ $P = 7.9 \text{ W}$
- ❖ $S = 8.6 \text{ VA}$
- ❖ $\cos \phi = 0.997$ inductivo
- ❖ $Q = 3.5 \text{ VAR}$
- ❖ $P1 = 7.9 \text{ W}$
- ❖ $Q1 = -0.6 \text{ VAR}$
- ❖ $FP = 0.918$

Comportamiento capacitivo



25

Potencia activa y reactiva

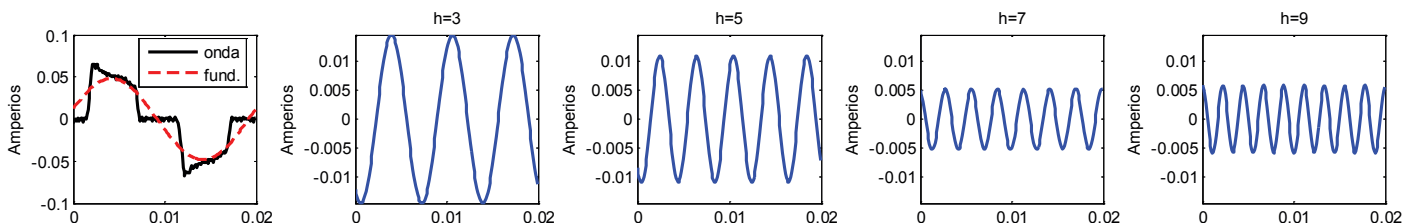
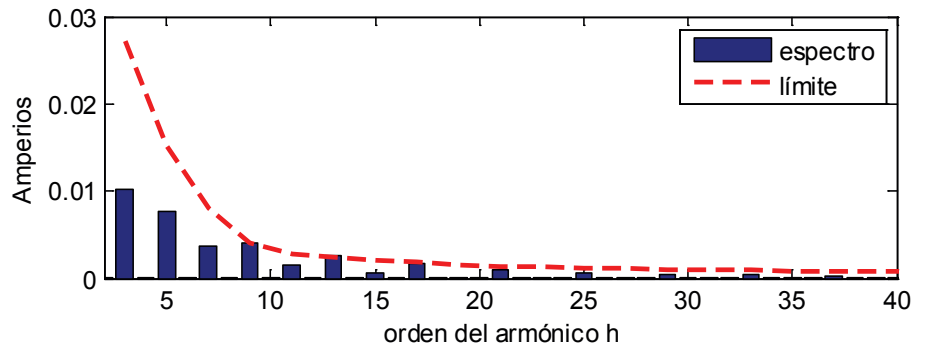
Potencia activa y reactiva

Ejemplo

Análisis de tubo LED para sustitución de tubo T8 de 18W.

Características del tubo LED:

- Tipo: T8
- Potencia nominal: 8W
- CCT 6000K; Ra 80

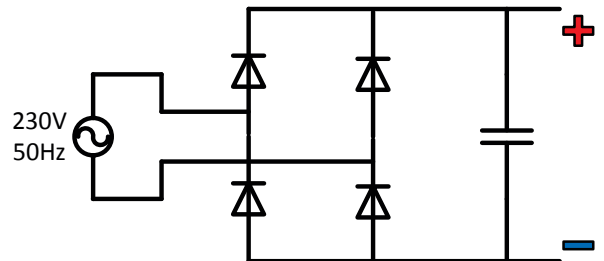
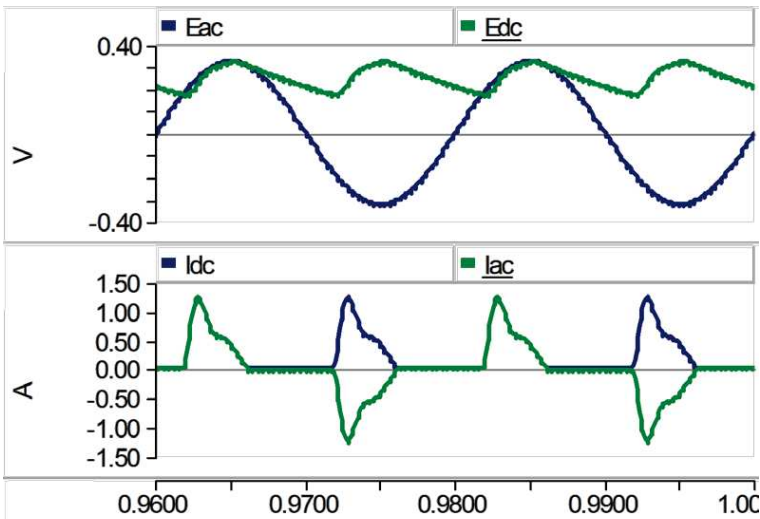


26

Potencia activa y reactiva

Comportamiento capacitivo de balastos electrónicos y fuentes de alimentación

- Balastos electrónicos y fuentes de alimentación están normalmente constituidos por un convertidor AC/DC/AC.
 - Entrada AC: 220 V / 50Hz
 - Salida AC: ej. descarga 90V / 5 kHz, LED CC.
- Primera etapa (AC/DC): Puentes de diodos



La carga del condensador comienza un poco antes de que la tensión llegue a su máximo, lo que provoca que la componente fundamental de la corriente vaya adelantada con respecto a la tensión.

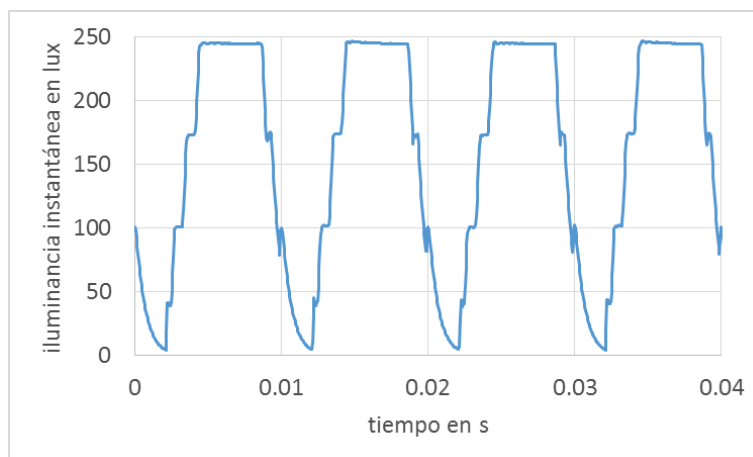
27

Flicker lumínico

Definición

También se denomina **parpadeo** o **efecto estroboscópico** y se refiere a la oscilación del nivel lumínico de una lámpara debido a la oscilación de la tensión instantánea de la tensión.

Las frecuencias de parpadeo superiores a 165 Hz - 200 Hz son filtradas por la retina del ojo, por lo que sus efectos pueden considerarse despreciables.



No se debe confundir con el flicker de la tensión, cuyo origen viene determinado por el efecto de las variaciones del valor eficaz de la tensión y su efecto sobre la percepción visual de las personas

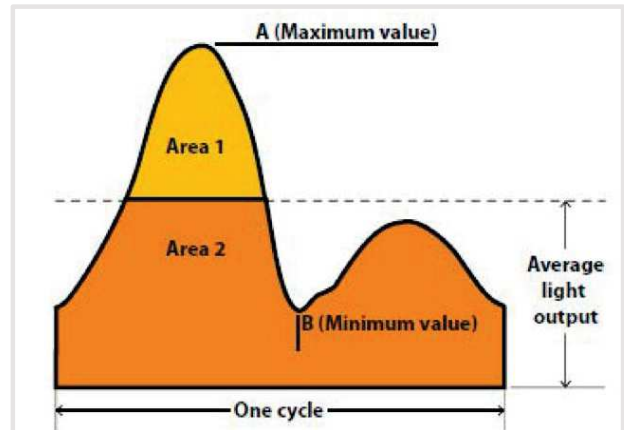
28

Flicker lumínico

Es la modulación del flujo luminoso que presentan algunas fuentes de luz en funcionamiento normal (típ: 100Hz). Puede verse incrementado por los equipos de control de flujo luminoso (dimming).

Efectos:

- Problemas neurológicos
- Cansancio, dolores de cabeza
- Distracción
- Eficacia visual reducida
- Efecto estroboscópico

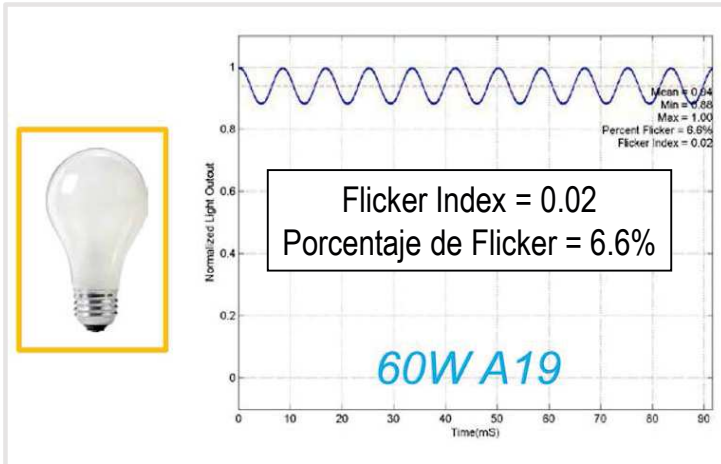


$$\text{Porcentaje de flicker} = 100\% \frac{A - B}{A + B}$$

$$\text{Flicker index} = \frac{\text{Area 1}}{\text{Area 1} + \text{Area 2}}$$



Fotodiodo de alta frecuencia.



Flicker lumínico

Potencia activa y reactiva

Ejemplo

Análisis de Flicker lumínico tubo LED

- ❖ Lux (medio) = 18 klx
- ❖ Lux (maximo) = 42 klx
- ❖ Lux (mínimo) = 0.01 klx
- ❖ Porcentaje Flicker = 99%
- ❖ Flicker Index = 0.92

