

### **Daños causados al rodamiento.**

La erosión eléctrica provoca daños graves al rodamiento y el fallo prematuro del mismo, reduciendo notablemente su vida.

La aparición de microcráteres en las pistas de rodadura es la primera fase de la erosión, aunque todavía no es visible al ojo humano.

Estos continuos *chispazos* que crean los cráteres terminan por eliminar cierta cantidad de material de los elementos rodantes y sus pistas de rodadura.

Estos restos de material se desintegran debido a la elevada temperatura que se produce durante el arco eléctrico.

En esta fase los cráteres pueden llegar a ser de mayor tamaño, pudiéndose detectar con un simple vistazo.

Estos grandes cráteres se denominan *picaduras eléctricas* y aparecen principalmente en los motores de corriente continua.

La segunda de las fases que aparecen en el proceso de la erosión eléctrica es la denominada formación de estrías, durante la cual, aparecen pequeños segmentos paralelos de un color grisáceo sobre las propias pistas de rodadura.

Estas marcas son resultado del estrés mecánico que los elementos rodantes ejercen al rodar sobre los microcráteres.

Esta es ya una fase crítica para el motor eléctrico y puede ser detectada gracias a un análisis de las vibraciones que comienzan a aparecer y que indicarán que será necesario cambiar el rodamiento en un plazo muy breve.

En la última de sus fases, la erosión eléctrica provoca la descomposición y degradación del lubricante.

El ennegrecimiento de la grasa es una clara señal de este efecto, ya que los picos de temperatura provocados por los arcos de corriente alteran la estructura molecular del aceite base, el espesante y los aditivos que conforman la grasa.

### **La solución.**

En condiciones normales, el lubricante se encarga de separar los elementos rodantes de las pistas de rodadura, reduciendo el coeficiente de fricción.

Tal y como hemos explicado, la lámina de lubricante actúa en este caso como un condensador.

Cada vez que este condensador se descarga, genera un paso de corriente de alta frecuencia en el rodamiento.

Estas rápidas descargas generan modificaciones del campo magnético que se genera alrededor del rodamiento.

Un fabricante de rodamientos detectó estas variaciones y desarrolló un equipo capaz de aislar esta banda de frecuencias y contabilizar el número de picos que ocurren en un periodo de tiempo determinado por el usuario.

El detector es capaz de advertir estas modificaciones del campo magnético y contabilizar las descargas eléctricas que pasan por el rodamiento, haciendo posible detectar la erosión eléctrica desde la primera de sus fases.



Bobina de Tesla.

## ENERGÍA REACTIVA Y ARMÓNICOS

Parte del texto que aparece a continuación se basa en el blog titulado "Quinto armónico.es".

### ANECDOTARIO:



*Antes de continuar vamos a comentar, a título de anécdota, un episodio de la historia de la electricidad que tiene un nombre propio: "La guerra de las corrientes".*

*Está íntimamente ligado a este tema y servirá, sobre todo, para justificar la existencia de la corriente alterna y por ende de la energía reactiva.*

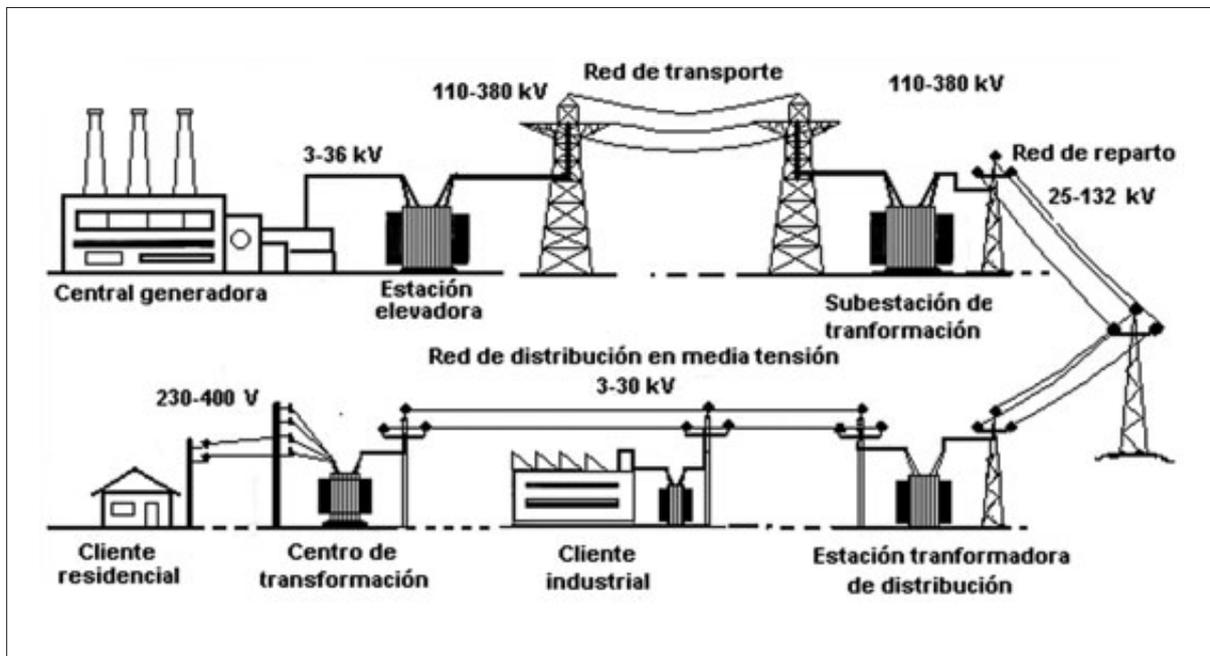


Fig. 310. El recorrido de la corriente alterna.

### La Lucha entre Edison y Tesla por imponer su estándar de electricidad. La guerra de las corrientes.



Fig. 311. The current war

*“La electricidad era la palabra mágica a fines del siglo XIX. Desde las tentativas iniciales de Benjamin Franklin o de Michael Faraday hasta la tecnología del telégrafo, las aplicaciones de la electricidad han crecido rápida y continuamente.*



Fig. 312. Exposición mundial de París 1881

*Después de la Exposición Mundial de París en 1881 y de la presentación de la lámpara de Edison, los nuevos sistemas de iluminación eléctrica se convirtieron en el logro tecnológico más importante del mundo.*

*La electricidad podía sustituir el vapor para hacer funcionar los motores.*

*Era una segunda revolución industrial y, en ciudades europeas y americanas, las centrales eléctricas se multiplicaban basadas en el diseño de Pearl Street, la central que Edison fundó en 1882 en Nueva York.*



Fig. 313. Central de Peral Street

*Fue la primera instalación eléctrica comercial del mundo y aunque era una planta enorme para su época, podía producir y distribuir electricidad a sólo 330 habitantes de Manhattan.*

*Edison logró que su lámpara de filamento de carbono permaneciera encendida en Nueva York durante dos días.*

*Es el inicio de la era de la iluminación eléctrica.*

*La demanda de electricidad pronto condujo al deseo de construir centrales eléctricas más grandes y de llevar la energía a mayores distancias.*

*Además, la rápida distribución de motores eléctricos industriales provocó una fuerte demanda por un voltaje diferente a los 110 V usados para la iluminación.*

*En 1884, el joven Nikola Tesla emigró a Norte América procedente de Europa, con unos pocos centavos en los bolsillos, y un puñado de buenas ideas para mejorar el estándar de electricidad que se utilizaba en aquel entonces en los Estados Unidos y que había ideado Thomas Alva Edison.*

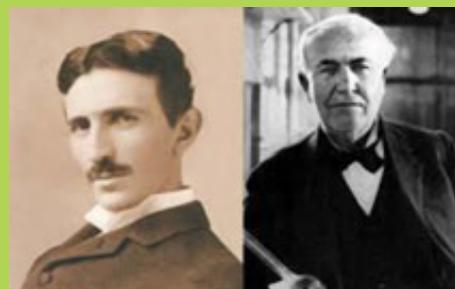


Fig. 314. Tesla y Edison.

En Nueva York comenzó casi de inmediato a trabajar en los laboratorios de Edison en donde terminó de desarrollar muchos de los trabajos sobre los que el máximo inventor norteamericano trabajaba hacia muchos años.

La capacidad inventiva de Tesla y los celos profesionales de Edison hicieron que la relación entre ambos terminara con el despido de Tesla.

Pero Tesla no se rindió y comenzó a juntar fondos para montar su propio laboratorio.

Allí desarrolló el primer sistema de corriente alterna (CA), una forma mucho más sencilla y segura de utilizar la electricidad que el sistema utilizado por Edison.

Sin embargo, sus buenas intenciones y sus conocimientos sobre campos mecánicos, sobre física y matemáticas, pronto chocaron contra los deseos y ambiciones de Edison, que emprendió

una lucha para demostrar la peligrosidad de la corriente alterna y seguir así manteniendo la corriente continua como único flujo que corriera por las líneas eléctricas de las urbes.

Aquel duelo de corrientes se resolvería ante los millones de personas que se congregaron para ver con sus propios ojos la nueva electricidad de Tesla durante la inauguración de la Exposición Universal de Chicago de 1893.

Por eso, cuando el presidente de los Estados Unidos, Grover Cleveland, pulsó un botón y 100.000 bombillas incandescentes iluminaron aquel espacio, el público prorrumpió en un aplauso entusiasta.

Ya no quedaba duda alguna, la corriente alterna se había impuesto sobre la continua y se convertiría en la energía de consumo masivo del siglo XX.

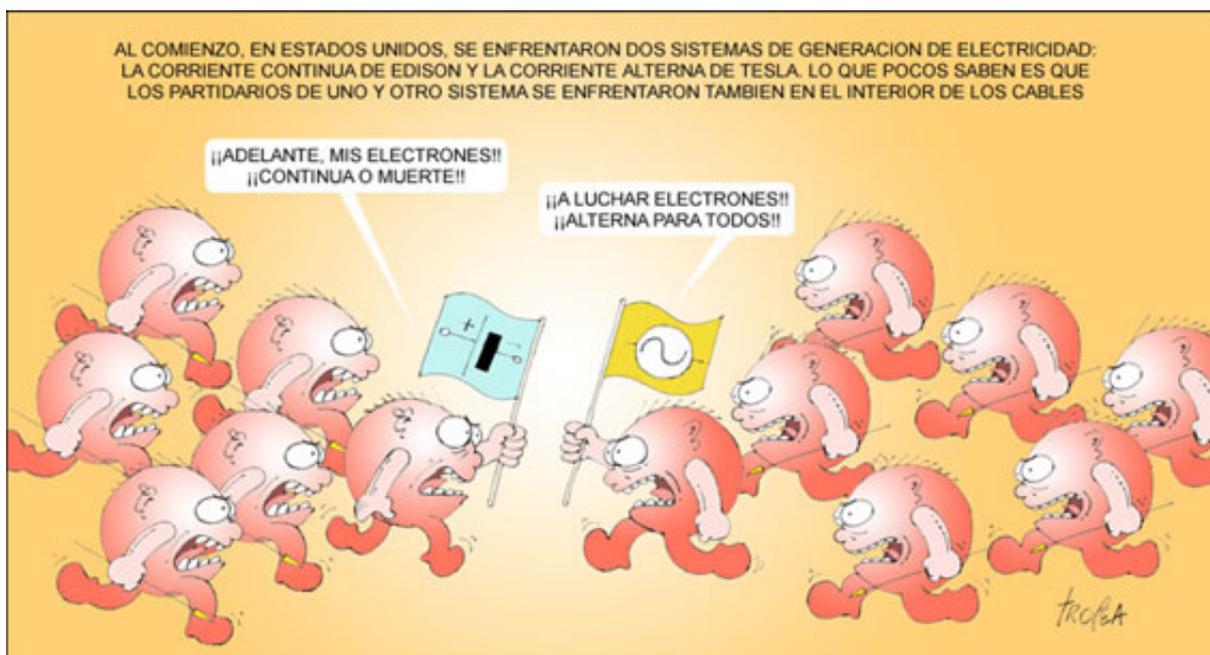


Fig. 315. La guerra de las corrientes.

### **Antes de la guerra.**

*Aquella lucha de dos corrientes había comenzado mucho antes, en 1879, cuando Thomas Alva Edison había presentado públicamente su último invento, la bombilla incandescente.*

### **La bombilla incandescente, inventada por Edison en 1878.**

*Como quería que aquel ingenio se instaurara en todos los hogares del país, comenzó a trabajar en un nuevo sistema que permitiera suministrar energía para iluminar América.*

*Tras ocho años de pruebas y experimentos, dio con una solución: la corriente continua, que substituyó al vapor como fuente de energía.*

*Los norteamericanos acogieron rápidamente y con los brazos abiertos, la idea de Edison, que ya gozaba de cierta popularidad por sus anteriores inventos, aunque pronto comenzaron a percatarse de los numerosos problemas e inconvenientes que presentaba.*

*La energía sólo fluía en una sola dirección y los cables se derretían al paso de la corriente.*

*El sistema no permitía realizar transmisiones de energía a distancias superiores a uno o dos kilómetros, por lo que se tenían que instalar numerosos generadores por la ciudad.*

*Y como tampoco se podía transformar el voltaje, se necesitaban líneas eléctricas separadas para poder proporcionar energía a las industrias y también a los hogares de forma eficiente, segura y económica.*

*El resultado fue que el cielo de Nueva York quedó sembrado de gruesos cables de cobre que le conferían una imagen de urbe atrapada en una gran tela de araña eléctrica.*

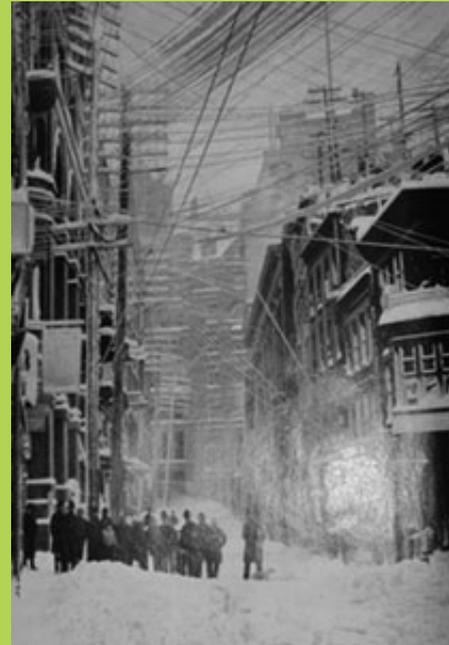


Fig. 316. Los cables de Nueva York en 1888.

*Pero eso no era lo peor, sino la poca seguridad que ofrecía el sistema de Edison.*

*Que Nueva York estuviera cableada por completo resultaba peligroso, como quedó de relieve durante el episodio del Gran Huracán Blanco que sepultó la ciudad en 1888.*

*Los vientos brutales que azotaron la ciudad rompieron muchos de los cables que cayeron sobre los ciudadanos que corrían de un sitio a otro buscando refugio.*

*En aquella tragedia, murieron más de 400 personas, buena parte de ellas, electrocutadas.*

### **Corriente continua y corriente alterna.**

*El sistema de Edison, que utilizaba la corriente continua (CC), era poco adecuado para responder a estas nuevas demandas.*

*El problema del transporte era aún más difícil, puesto que la transmisión interurbana de grandes cantidades de CC en 110 voltios era muy costosa y sufría enormes pérdidas por disipación en forma de calor.*

*En 1886, George Westinghouse, un rico empresario recién llegado al negocio eléctrico, fundó Westinghouse Electric para competir con General Electric de Edison.*

*El esfuerzo de la primera se basó en desarrollar los descubrimientos y las patentes de Nikola Tesla, apasionadamente convencido de la superioridad de la corriente alterna (CA).*

*Su argumento se basaba en que las pérdidas en la transmisión de electricidad dependen del voltaje: a mayor voltaje, menores pérdidas.*

*Y a diferencia de la CC, el voltaje de la CA se puede elevar con un transformador para ser transportado largas distancias con pocas pérdidas en forma de calor.*

*Y antes de proveer energía a los clientes, el voltaje se puede reducir a niveles seguros y económicos.*

*Su pelea con Edison y sus intentos por pasar por encima de las reglas del capitalismo mercantilista le valieron el oprobio de los empresarios y la ignorancia activa de los funcionarios del país que adoptó como suyo en 1891.*

### **Tesla frente a Edison.**

*Con 28 años, Nikola Tesla llegó a Nueva York en 1884 con una carta de recomendación en el bolsillo para Thomas Alva Edison que había escrito uno de los socios de éste en Europa.*

*"Querido Mr. Edison: conozco a dos grandes hombres y usted es uno de ellos. El otro es éste joven".*

*A pesar de que a Edison no le causó buena impresión, decidió contratarlo.*

*La primera tarea que le encargó fue que hallara una forma para mejorar su sistema de corriente continua.*

*Si lo conseguía, le dijo, le recompensaría con 50.000 dólares. Sin embargo, al poco de trabajar juntos, las diferencias entre ambos hombres comenzaron a provocar conflictos.*

*Edison carecía de una educación formal y todos sus inventos se basaban en un método empírico de ensayo, de prueba y error; mientras que Tesla poseía una sólida formación en matemáticas, mecánica, física e ingeniería y era capaz de resolver mentalmente los problemas técnicos que surgían sin necesidad de recurrir a realizar experimentos, lo que sacaba de quicio a Edison.*

*Quizás por eso, cuando Tesla se presentó ante él un año después y le anunció que había dado con una solución a su problema, Edison no daba crédito a sus oídos y desdeñó la propuesta.*

*El joven había diseñado un sistema de generación y transmisión de corriente alterna que permitía que el voltaje se elevara con un transformador antes de transportarse a largas distancias y, una vez en destino,*

*reducirse para proporcionar energía de forma eficiente, segura y económica.*

*Aquella solución presentaba muchas ventajas frente a la corriente continua de Edison, pero éste, lejos de reconocerlas, menospreció a Tesla y se negó a pagarle la recompensa prometida alegando que había sido tan sólo una broma americana.*

*"Tesla, no entiendes el sentido del humor americano", le espetó.*

*Furioso y decepcionado, el joven inventor dimitió.*

*Pero Tesla comenzaba a ser conocido y muchos inversores se interesaron en financiar sus trabajos, como AK Brown, que le proporcionó fondos para que diseñara un motor de corriente alterna.*

*O la Western Union Company, que apoyó económicamente su investigación sobre generación y transporte de corriente alterna a largas distancias.*

*Fue entonces cuando George Westinghouse, inventor de los frenos de aire para trenes y propietario de la compañía The Westinghouse Corporation, se percató del enorme potencial de aquel muchacho y le propuso un trato: comprarle su sistema de corriente alterna.*

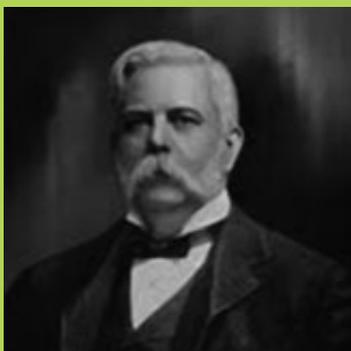


Fig. 317. George Westinghouse

*La comercialización de aquel nuevo sistema de energía supuso el inicio de la guerra de corrientes que enfrentó durante casi una década a Thomas Alva Edison y la General Electric con Nikola Tesla y la Westinghouse Corporation.*

*En un intento de mantener su monopolio, Edison emprendió una campaña de difamación y desprestigio de la corriente alterna. Llenó la ciudad de carteles que advertían a los ciudadanos de los peligros que suponía y se dedicó a electrocutar en público -con corriente alterna- a perros y caballos para demostrar así su poca seguridad.*

*Extendió una serie de historias falsas sobre accidentes mortales provocados por la invención de Tesla e incluso llegó a impulsar, aunque involuntariamente, la silla eléctrica, que se obsesionó en querer asociar con la corriente de Tesla.*

*Edison estaba conmovido por la aparición de la tecnología de Tesla, que amenazaba sus intereses en un campo que él mismo había creado.*

*Edison y Westinghouse se enfrentaron en una batalla de relaciones públicas a los que los periódicos denominaron "la guerra de las corrientes", para determinar qué sistema se convertiría en la tecnología dominante.*

*Edison inventó una silla eléctrica de CA y electrocutó a perros y gatos para demostrar que la corriente alterna era peligrosa.*

*Para neutralizar esta iniciativa, Tesla se expuso a una CA que atravesó su cuerpo sin causarle ningún daño.*

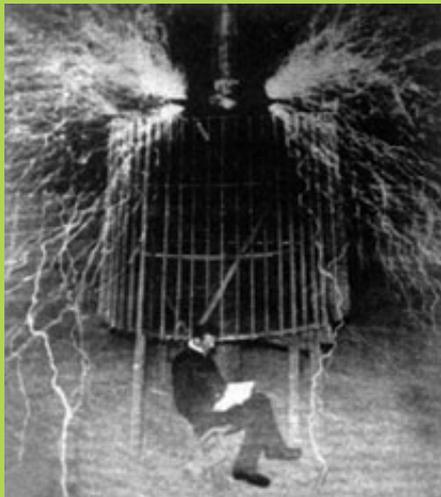


Fig. 318. Tesla expuesto a los rayos.

*Ante esta prueba, Edison nada pudo hacer y su prestigio quedó momentáneamente erosionado.*

### **Tesla vence a Edison.**

*Tras meses de batalla, aquel enfrentamiento llegó a su fin con la Exposición Universal de Chicago de 1893, que se celebró de mayo a octubre y que tuvo una gran repercusión internacional, puesto que participaron 19 países y por ella pasaron más de 27 millones de personas.*

*Los organizadores buscaban una fórmula para iluminar el recinto y recurrieron a Edison y a Tesla.*

*El primero les propuso su sistema de corriente continua y les pidió un millón de dólares para implementarlo.*

*En cambio, Tesla, con su corriente alterna, les presentó un presupuesto que ascendía a la mitad de esa cantidad y que, además, libraba a la Feria del enjambre de cables que suponía la opción de Edison.*

*La victoria estaba, pues, clara, y la superioridad de la corriente alterna había quedado demostrada.*

*Además, ambos sistemas se exhibieron durante la exposición. Tesla, un hombretón de casi dos metros de altura, ataviado con abrigo negro y bombín, demostró una y otra vez la belleza y el poder de su corriente alterna mediante un espectáculo en el que conseguía que le saltaran chispas de los dedos.*

### **Tesla y su corriente alterna.**

*Edison, claro está, también realizó una demostración de su corriente, aunque con peor fortuna.*



Fig. 319. La feria de Chicago 1892-1893

*La feria de Chicago de noche. 1892-1893. He aquí el primer espacio abierto que se iluminó con luz eléctrica.*

*Todo un mérito de Tesla.*

*Tres años más tarde, Buffalo se convirtió en la primera ciudad de los Estados Unidos que quedó iluminada por la corriente de Tesla, después de que la Westinghouse Corporation instalara una central hidroeléctrica en las cataratas del Niágara capaz de enviar energía hasta 32 km de distancia.*

*A partir de ese momento, se comenzó a reemplazar la corriente continua como estándar, aunque algunas ciudades siguieron utilizando el sistema de Edison hasta bien entrado el siglo XX, como Helsinki, donde estuvo operativo hasta los años 40, o Estocolmo, hasta los 60.*



Fig. 320. Tesla.

*En Nueva York, la compañía de Edison continuó proporcionando energía a muchos clientes que habían adoptado el sistema de corriente continua a comienzos de siglo, sobre todo hoteles que la empleaban para hacer funcionar sus ascensores.*

*Fue el final de la "guerra de las corrientes" porque la CA acabaría imponiéndose en todo el mundo.*



Fig. 321. Un cartel que se instalaba en los hoteles de aquella época.



Fig. 322. La traducción del cartel que se instalaba en los hoteles de aquella época.

*En enero de 1998, la central de Nueva York que había fundado Edison a comienzos de siglo aún suministraba energía a 4600 personas, una cifra que se redujo, en 2006, a 60 clientes, hasta que, en 2007, la central hizo su última transmisión de corriente continua.*

*A Tesla le gustaba decir: "el presente es suyo, el futuro es mío". Y así fue.*

*"Su corriente alterna ilumina el mundo."*

Hemos podido comprobar en "la guerra de las corrientes" que, pese a todo el empeño de Edison, la corriente continua no tuvo futuro como suministro a distancia.

No se podía, aprovechando el efecto transformador, elevar o hacer descender la tensión.

En estas circunstancias cedió su protagonismo a la corriente alterna.

No queremos decir que la corriente continua no lo tenga (protagonismo), lo que ocurre es que ésta última está más vinculada a otros ámbitos, como son la electrónica, la informática, la radio, la televisión, etc.

La corriente continua es más fácil de comprender y sus circuitos son más fáciles de calcular.

La corriente alterna tiene su aquel, como, por ejemplo, el fenómeno de la energía reactiva.

### La potencia eléctrica (P).

La potencia eléctrica es la capacidad que tiene la electricidad de producir un trabajo o de transformar la energía en un tiempo dado.

Se define por la siguiente expresión:

$$P = V \cdot I$$

En el sistema internacional, la unidad de potencia es el vatio (W) y se cumple la siguiente relación:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ A} \times 1 \text{ V}$$

1 (kW) kilovatio = 1.000 vatios (Ejemplo: Fuerza motriz en general, planchas, etc.).

1 (MW) megavatio = 1.000 vatios (Ejemplo: Plantas industriales, ciudades).

Los niveles de potencia con los cuales se trabaja normalmente son del orden de 150 kW para pequeñas plantas industriales y por encima de 1 MW las grandes instalaciones.

### La Energía Eléctrica (E).

La energía eléctrica (E) es la forma más versátil de las energías manejadas por el hombre.

Se define como el trabajo que puede realizar una potencia eléctrica dada, en un tiempo dado.

La energía eléctrica se mide en julios (J), sin embargo en el campo de la electricidad se suele utilizar el kWh (kilovatio hora). Y esta unidad es la que aparece en las facturas de la empresa eléctrica.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ Megajulios}$$

### Diferencias físicas entre la corriente continua y la corriente alterna.

La corriente continua es aquella cuyo valor y sentido son constantes (no cambian en el tiempo).

En el siguiente gráfico, se puede ver la representación gráfica de la corriente continua, por ejemplo de una corriente de 10 A.

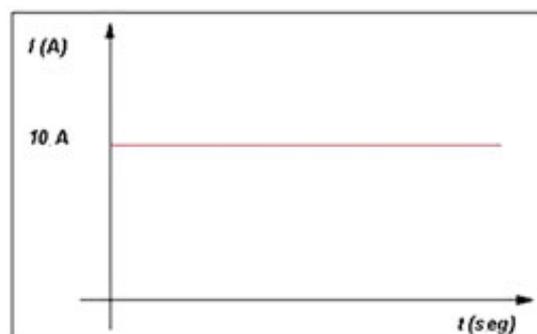


Fig. 323. Corriente continua.

Por lo tanto, una corriente continua se produce en un circuito cuando se aplica una fuente de tensión continua a este circuito, por ejemplo una batería de auto o un panel fotovoltaico que alimenta unas lámparas incandescentes.

En corriente continua la potencia de un circuito se obtiene simplemente multiplicando la tensión aplicada al circuito por la intensidad que circula.

$$P = W$$

$$W = V \cdot I$$

La corriente alterna es aquella cuyo valor y sentido cambian en el tiempo de forma periódica.

En el caso de la corriente usada industrialmente, la gráfica obtenida tiene la forma de una onda sinusoidal.

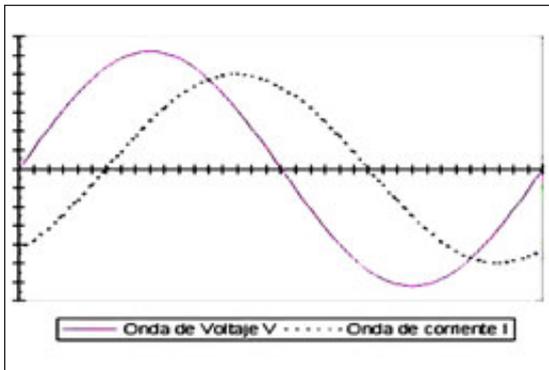


Fig. 324. Corriente alterna.

Cuando en alterna manejamos un circuito como una plancha, un radiador, un secador de pelo, o sea, resistencias puras, ocurre lo siguiente:

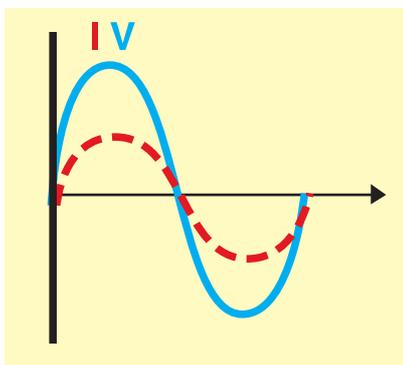


Fig. 325. Ondas en fase.

Vemos que la tensión e intensidad están en fase (aunque no necesariamente deben tener la misma amplitud).

Pero... si en el circuito aparecen bobinas, ocurre...

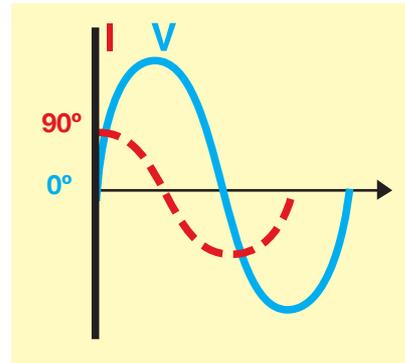


Fig. 326. Onda de intensidad retrasada.

Que traducido a un idioma coloquial significa que la intensidad se retrasa de la tensión, o dicho de otra forma, que se opone a su avance.

Y si tiene algún condensador...

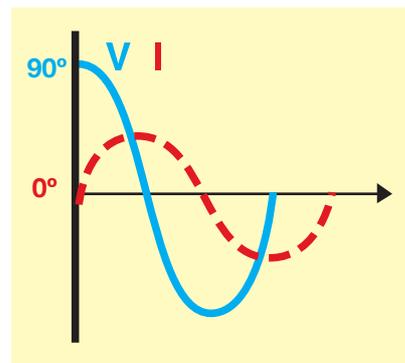


Fig. 327. Onda de tensión retrasada.

Ocurre lo contrario, que es la tensión la que se retrasa.

Por lo tanto ya podemos imaginar que si en un circuito donde predomina una inductancia, colocásemos un condensador apropiado, podemos volver a:

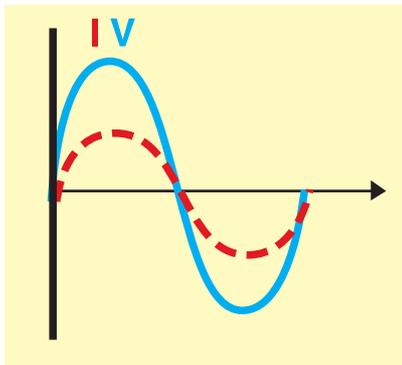


Fig. 328. Ondas en fase.

Cuando en un circuito de corriente alterna conviven bobinas y condensadores, la potencia ya no es  $V \times I$ , porque interviene el desfase entre el voltaje y la intensidad.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi$$

Ahora estamos hablando de vectores, vector tensión, vector intensidad.

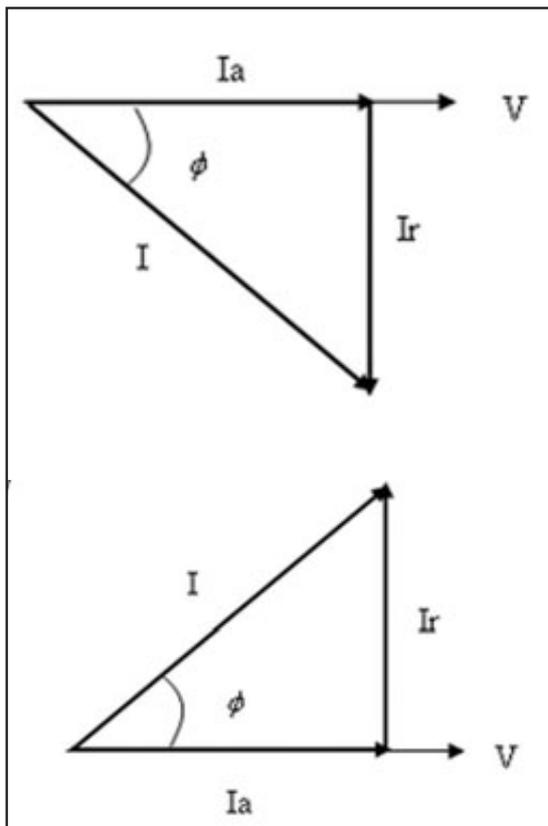


Fig. 329 Componentes activa y reactiva de la intensidad. Arriba es inductivo y abajo es capacitivo.

Pero ¿qué es lo habitual de un circuito?  
¿Sólo resistencias o bobinas o condensadores?  
Lo habitual es una mezcla de todos.

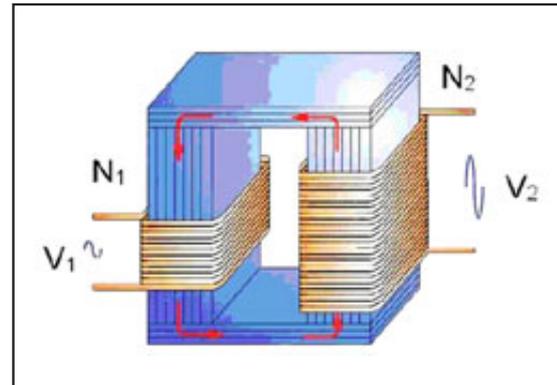


Fig. 330. Transformador.



Fig. 331. Motor.

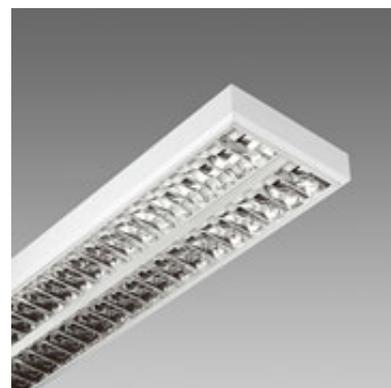


Fig. 332. Luminaria fluorescente con reactancias.

La energía reactiva es la demanda extra de energía que algunos equipos de carácter inductivo como motores, transformadores, luminarias y líneas eléctricas (carácter capacitivo), producen en su funcionamiento.

Esta energía "extra" puede descompensar un sistema eléctrico ya que afecta directamente al factor de potencia del mismo, porque a mayor energía reactiva en el sistema menor será el factor de potencia.



Pongamos un ejemplo:

\* Una instalación para el suministro de una pequeña industria de 1000 kVA, en la que existen varias cargas reactivas debidas al transformador de

potencia, a los motores de consumo, a la línea eléctrica de reparto en baja tensión.

Las cargas reactivas inductivas (transformador y motores) siempre serán mucho mayores que las cargas capacitivas (línea eléctrica de reparto en Baja Tensión), siendo el valor de la energía reactiva inductiva 100 kVAR.

Por este motivo la potencia aparente será de 994,98 kVA.

\* El factor de potencia (que es igual al  $\cos \varphi$  si no tenemos en cuenta los posibles armónicos existentes en la instalación) tendrá un valor de 0,99.

Dicho valor es muy próximo a la unidad, que es el valor que nos indica que las pérdidas de la instalación debidas a la energía reactiva son nulas.

\* Si la potencia reactiva, inductiva en este caso, fuese de 250 kVAR tendríamos una potencia aparente de 964,24 kVA y un  $\cos \varphi$  de 0,96, que ya sería un valor a tener en cuenta de cara a la facturación de la compañía eléctrica.

La mayor parte de las cargas industriales producen este tipo de energía, conjuntamente con la energía activa.

Los efectos negativos de la energía reactiva o que se derivan de su consumo son:

1. Costes económicos reflejados en las facturas eléctricas.
2. Pérdida de potencia de las instalaciones.
3. Caídas de tensión que perjudican el normal funcionamiento de las instalaciones.
4. Transformadores más recargados.

Podemos visualizar la situación mediante una analogía mecánica en la siguiente figura, imaginemos un carrito de tren que es tirado por una cuerda que no esta alineada con la dirección del tren, sino que forma un ángulo  $\varphi$  con ella, debido a esto ocurre lo siguiente:

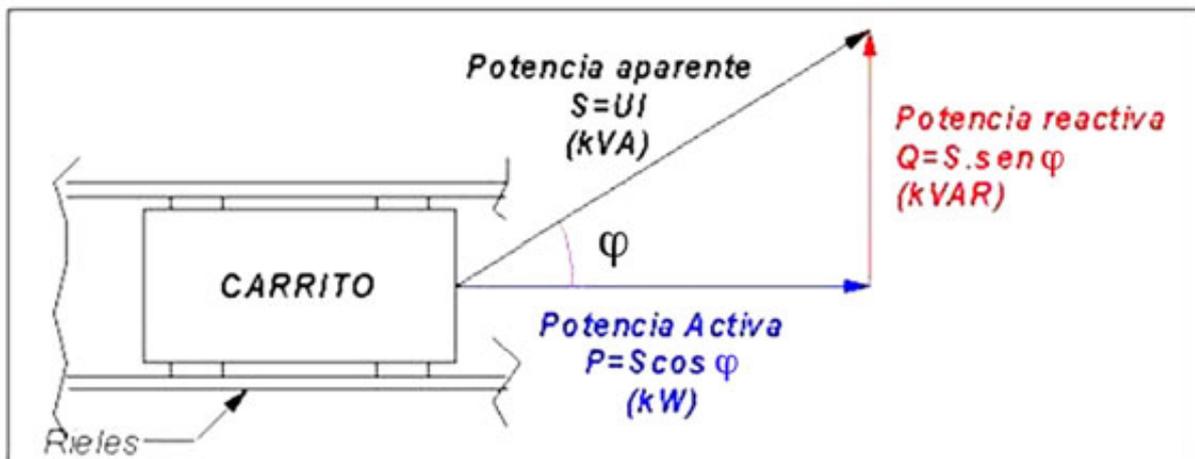


Fig. 333. Símil de las tres potencias.

La potencia activa (P) contribuye efectivamente al movimiento del carro.

La potencia reactiva (Q) solamente tiende a pegarlo contra el riel y utiliza parte de la capacidad del que esta tirando de la cuerda, en forma inútil.

La potencia aparente (S) representa la capacidad total que se usa tirando de la cuerda.

El ángulo  $\varphi$  es el ángulo de desfase que existe entre la tensión que se aplica a un consumidor y la corriente que este consume. Observemos que cuanto mayor es el ángulo  $\varphi$  menos eficientemente se utiliza la capacidad de la fuente.

Las potencias se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$S = U \cdot I ; P = S \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Donde:

S = Potencia aparente, en voltio amperios (VA)

P = Potencia útil o potencia activa, en vatios (W)

Q = Potencia reactiva, en voltio amperios reactivos (VAR)

U = Tensión o voltaje aplicado a la carga, en voltios (V)

I = Corriente consumida por la carga, en amperios (A)

$\varphi$  = Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente con signo cambiado.

Las potencias se expresan en kVA, kW o kVAR, solamente lo hacen en vatios aquellas que tienen un valor muy pequeño.

En estas expresiones se puede observar, que la tensión o voltaje es una constante, por ejemplo 230 V ó 400 V, en cambio la magnitud de la corriente representa la energía que se transporta de la fuente al consumidor y que de acuerdo a la magnitud del ángulo  $\varphi$  se reparte en forma de potencia activa y potencia reactiva.

La energía reactiva provoca sobrecarga en las líneas de distribución y transporte sin producir un trabajo útil, y por lo tanto es necesario compensarla para optimizar las instalaciones eléctricas.

Las ventajas de la compensación de energía reactiva, ayudando a obtener ventajas económicas y técnicas son:

1. Aumentar la capacidad de las líneas y transformadores instalados.
2. Mejorar la tensión de la red.
3. Disminuir las pérdidas de energía.
4. Conseguir una reducción en el coste global de la energía.

En diferentes sectores, se utilizan soluciones que minimizan el impacto derivado del consumo de este tipo de energía. Básicamente consisten en la utilización de equipos diseñados para neutralizar la energía reactiva que presentan los sistemas eléctricos.

Un ejemplo claro es la instalación de baterías de condensadores. Además se pueden utilizar otros mecanismos para realizar seguimientos exhaustivos del consumo de la energía reactiva y poder así realizar acciones correctoras.

Un ejemplo es la visualización de las curvas de carga de energía reactiva que se pueden obtener directamente del contador de la instalación y/o analizando la factura eléctrica (según los tipos de contratos).

También es interesante conocer cómo funciona el sistema eléctrico de distribución y transporte de energía eléctrica, ya que ello nos puede ayudar a comprender los requerimientos legales que se les exige a los consumidores en media tensión y/o alta tensión, así como a las empresas que generan energía eléctrica.

Para ello vamos a diferenciar los tres tramos de consumo generales del sistema eléctrico español:

Horas punta, horas llano y horas valle.

- **Horas punta:** Son las horas en las que el consumo del sistema eléctrico se encuentra en su mayor estado de carga, por lo que son las horas en las que los transformadores y las líneas eléctricas se encuentran prácticamente al 100 % de su estado de carga contratado, no al 100 % de su carga nominal que de diseño puede rondar un 40% más de la carga contratada.

Cuando los *transformadores* están "muy cargados" generan energía reactiva inductiva, siendo esta directamente proporcional al estado de carga del transformador.

Por otro lado, las *líneas eléctricas* (aéreas o subterráneas) están también "muy cargadas" y en este estado generan energía reactiva inductiva y energía reactiva capacitiva, ya que estas disponen de una componente resistiva e inductiva directamente proporcional al estado de carga de la línea y una componente capacitiva fija para cualquier estado de la misma.

"Podemos llegar a la conclusión de que en este tramo el sistema dispondrá de la energía reactiva capacitiva (fija) de las líneas y de la energía reactiva inductiva (directamente proporcional al estado de carga) de las líneas y de los transformadores, siendo esta última mucho mayor y resultando por tanto un sistema inductivo.

La legislación actual prima por ello a los generadores eléctricos que inyecten energía reactiva capacitiva en horas punta para compensar al sistema eléctrico **inductivo**".

- **Horas llano:** Son las horas en las que el consumo del sistema eléctrico se encuentra a mitad de carga, por lo que son las horas en las que los transformadores y las líneas eléctricas se encuentran prácticamente al 50-60 % de su estado de carga contratado.

Cuando los *transformadores* están "a mitad de carga" generan energía reactiva inductiva, siendo esta directamente proporcional al estado de carga del transformador.

Por otro lado, las *líneas eléctricas* (aéreas o subterráneas) están también "a mitad de carga" que en este estado generan energía reactiva inductiva y energía reactiva capacitiva, ya que estas disponen una componente resistiva e inductiva directamente proporcional al estado de carga de la línea y una componente capacitiva fija para cualquier estado de la misma una vez está en tensión.

"Llegamos a la conclusión de que en este tramo el sistema dispondrá de la energía reactiva capacitiva (fija) de las líneas y de la energía reactiva inductiva (directamente proporcional al estado de carga) de las líneas y de los transformadores, siendo esta última algo menor y resultando por tanto un sistema casi equilibrado pero capacitivo, aunque con una diferencia realmente pequeña.

La legislación actual prima por ello a los generadores eléctricos que inyecten energía reactiva inductiva con un  $\cos \varphi$  muy próximo a la unidad (1) en horas llano para compensar al sistema eléctrico **casi equilibrado pero capacitivo**".

- **Horas valle:** Son las horas en las que el consumo del sistema eléctrico se encuentra en su menor estado de carga, por lo que son las horas en las que los transformadores y las líneas eléctricas se encuentran prácticamente al 0-10 % de su estado de carga contratado.

Cuando los *transformadores* están "muy poco cargados" casi no generan energía reactiva inductiva, siendo esta directamente proporcional al estado de carga del transformador.

Por otro lado, las *líneas eléctricas* (aéreas o subterráneas) están también "muy poco cargadas" porque en este estado generan muy poca energía reactiva inductiva y la misma energía reactiva capacitiva que en los otros dos casos, ya que estas disponen de una componente resistiva e inductiva directamente proporcional al estado de carga de la línea y una componente capacitiva fija para cualquier estado de la misma una vez está en tensión.

"La conclusión es que en este tramo el sistema dispondrá de la energía reactiva capacitiva (fija) de las líneas y de la energía reactiva inductiva casi nula (directamente proporcional al estado de carga) de las líneas y de los transformadores, resultando por tanto un sistema capacitivo. La legislación actual prima por ello a los generadores eléctricos que inyecten energía reactiva inductiva en horas valle para compensar al sistema eléctrico **capacitivo**".



Con esto se pretende dar una idea general sobre la importancia de tener controlado el consumo de energía reactiva en cualquier sistema eléctrico, ya que este punto es el "camino crítico" para conseguir

**una mayor eficiencia energética** (en lo que a energía eléctrica se refiere) en cualquier sistema.

Los avances técnicos y tecnológicos de nuestra sociedad están haciendo que las cargas de las instalaciones eléctricas cambien. Ahora tiene más presencia la electrónica de potencia con variadores, fuentes de alimentación, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.

Consecuencia:

Se disparan los armónicos.

Pero, realmente, ¿Qué son los armónicos?



En el mundo industrializado en el que trabajamos, sin duda hemos oído alguna vez decir que una instalación tiene armónicos, con ese tono peyorativo que parece que los armónicos sean virus, fantasmas o cualquier otro "ente" que

no se ve, pero que es dañino por naturaleza.

No es cierto.

Los armónicos no son buenos para las instalaciones, pero tampoco tienen por qué ser los causantes de todos los problemas que las aquejen.

La generación de armónicos por las cargas es algo inherente a los avances tecnológicos que incorporan, cada vez más, sistemas de electrónica de potencia

compuestos fundamentalmente de tiristores, diodos, microprocesadores, varistores y condensadores...

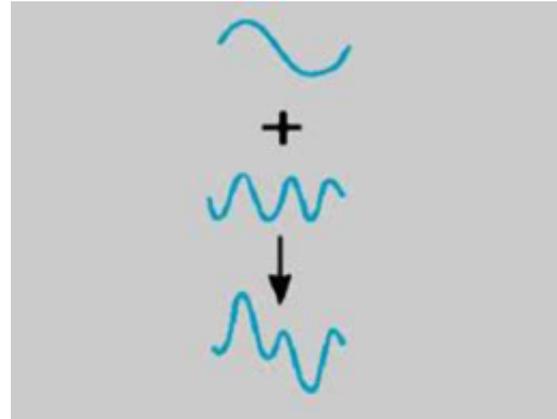


Fig. 334. Una onda fundamental de 50 Hz más armónicos no deseados producidos por la electrónica de potencia, es igual a una onda deformada que ya no es senoidal, pero sí peligrosa.

Más adelante sabremos más detalles de éstos.

Los motores y transformadores también proliferan y esto hace que el **factor de potencia** tenga valores cada vez peores y que los niveles de **armónicos** crezcan exponencialmente.

Cada vez más las distribuidoras de electricidad, las empresas y todos los implicados en la calidad de la red se preocupan más por controlar y mitigar los efectos de estas distorsiones.

Se requiere a los diseñadores de máquinas, de otros equipos y de los sistemas eléctricos que mejoren las prestaciones de sus diseños en materia de ahorro energético y disponibilidad eléctrica. Es en este contexto en el que la corrección de estas distorsiones toma una real importancia.

El diseño de medidas correctoras para evitar niveles altos de armónicos y para mejorar el factor de potencia es una materia de la que se podrá encontrar múltiples opiniones y en la que hay un cierto oscurantismo, por ser algo sorprendente.

Cualquier solución para una instalación pasa por la corrección conjunta de estos dos fenómenos de la física.

## Diferencias entre el $\cos \varphi$ y el factor de potencia.

En cierta ocasión escuchamos, sorprendidos, el siguiente comentario:

"Algunos países están comenzando a penalizar, en el recibo eléctrico, por el **factor de potencia** y no por el  **$\cos \varphi$** ".

Lo curioso fue saber que estos países no eran ni Suecia, ni Japón, ni Dinamarca, sino los países en vías de desarrollo (Brasil, Chile, India,...), para así conseguir mayor eficiencia en su, masificado, sistema de distribución.

Conviene aclarar la diferencia entre ambos conceptos y por qué si las compañías penalizasen o bonificasen midiendo el FP se conseguiría un sistema de distribución mejor.

Primero hay que repetir que la potencia eléctrica (potencia aparente (S)) es una magnitud, matemáticamente hablando, compleja, resultante de la suma de otras dos componentes vectoriales: la potencia activa (P) y la reactiva (Q)

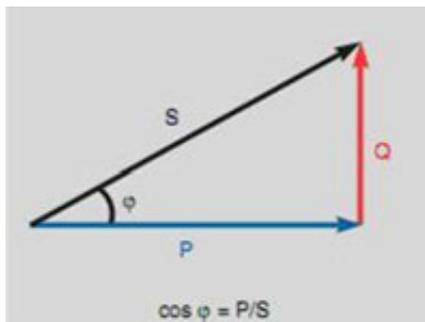


Fig.335. Triángulo de las potencias.

Cabe destacar, que la penalización, en España, de valores bajos del  $\cos \varphi$  atiende a la necesidad de reducir la potencia reactiva.

Ahora hablaremos del por qué de esa necesidad de compensar y reducir la potencia reactiva.

De hecho, como se verá, ni el FP ni el  $\cos \varphi$  son nada, no tienen unidades (metros, kW, kVA,...) ya que simplemente son la comparación entre dos magnitudes (cuánto se parecen dos potencias expresado en tanto por uno) o el coseno de un ángulo.



En España, en base al  $\cos \varphi$  se pueden obtener bonificaciones de 4% sobre la facturación básica para valores igual a 1 y un recargo del 47% para valores iguales o inferiores a 0,8.

Este recargo, según el Ministerio, es en concepto de energía reactiva.

El  $\cos \varphi$  (coseno de  $\varphi$ ) no es más que el coseno del ángulo  $\varphi$  que forman la potencia activa (P) y la aparente (S) en el triángulo de potencias tradicional.

Como ya se explicó, en un sistema eléctrico de corriente alterna con ondas senoidales perfectas la descomposición de la potencia aparente en la suma de dos vectores da como resultados un triángulo rectángulo, en el que las componentes se encuentran en los ejes de los números reales y los imaginarios:

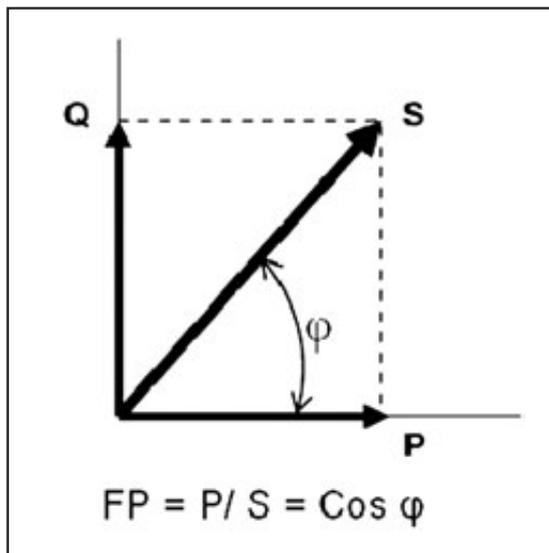
El factor de potencia (FP) es la relación entre las potencias activa (P) y aparente (S).

Si la onda de corriente alterna es perfectamente senoidal, FP y  $\cos \varphi$  coinciden.

El factor de potencia (FP), es la figura genérica que representa el grado de aprovechamiento de la energía entregada a una carga. Así por ejemplo un FP = 1 señala que toda la energía demandada por la carga genera trabajo útil, y está determinado según la relación:

$$FP = \frac{\text{Potencia activa}}{\text{Potencia aparente}}$$

En el caso particular de cargas eléctricas que no generan deformación en la corriente, entendiéndose por deformación al contenido armónico, el factor de potencia (FP) se puede determinar, como ya hemos visto, calculando el coseno del ángulo entre el vector de potencia activa y potencia aparente tal como muestra la figura 336.


 Fig. 336.  $\cos \varphi$ 


Conviene observar que en este caso, al no haber deformación por presencia de armónicos, el esquema vectorial está contenido en el plano "P-Q".

Si la onda no fuese perfecta S no estaría únicamente compuesta

por P y Q, sino que aparecería una tercera componente suma de todas las potencias que genera la **distorsión**.

**A esta componente de distorsión le llamaremos D.**

En la figura 337 se observa este tipo de representación.

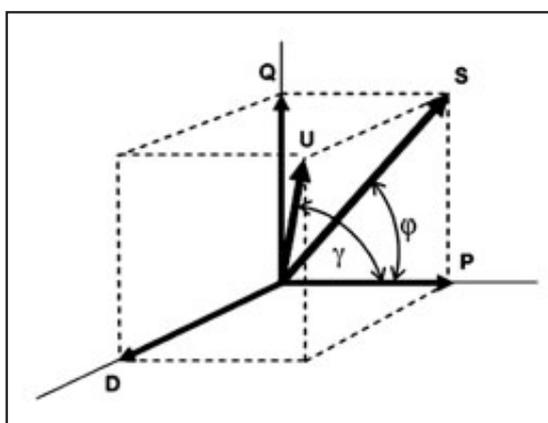


Fig. 337. Aparece la distorsión.

Nótese que con la aparición de la potencia de deformación el vector de potencia aparente S, que sin contenido armónico estaba contenido en el plano "P-Q", ahora se encuentra desplazado por la potencia de deformación con tres proyecciones en los ejes P, Q y D.

Éste nuevo vector de potencia aparente se denomina potencia aparente total (U).

Queda claro por qué U es igual a la potencia aparente (S), solo en el caso en que la potencia de distorsión (D) sea nula.

Es decir, cuando el FP se puede obtener calculando sólo el  $\cos \varphi$ .

El vector D es la potencia de distorsión y representa a la potencia de pérdidas asociada a las componentes armónicas de corrientes que no encuentran su par en la señal de tensión.

Esto ocurre cuando la carga es del tipo no lineal como por ejemplo una carga resistiva controlada por un tiristor.

El uso indiscriminado en la jerga eléctrica del término "factor de potencia" o " $\cos \varphi$ ", seguramente obedece a la tradición, cuando las cargas eran preponderantemente lineales y las corrientes de carga no contenían deformación.

En esas condiciones, hablar de un valor de factor de potencia o de  $\cos \varphi$ , representaba lo mismo.

Contrariamente, cuando las corrientes de carga están deformadas, debe tenerse especial cuidado en la interpretación del valor de factor de potencia medido, para evitar el riesgo de caer en males mayores.

Las cargas de tipo "no lineal" generan corrientes de deformación, en particular, los controladores activos como los componentes de estado sólido (Tiristores, Triacs, etc.).

Debe advertirse que en presencia de este tipo de carga, no basta con medir el valor del factor de potencia, sino que es necesario medir el  $\cos \varphi$  para conocer la característica de la carga.

Un mal factor de potencia puede ser consecuencia del desfase entre tensión y corriente, pero también puede deberse a la presencia de armónicos en la corriente.

Por lo tanto, si no se conoce con precisión como contribuyen en el factor de potencia estas dos componentes, se hace difícil poder acertar en el adecuado tratamiento para optimizar el rendimiento de la energía sobre la carga.

En ocasiones se comete el error de querer corregir un bajo valor de FP instalando condensadores de compensación sobre la carga. **Y lo único que se logra gastar dinero para empeorar las cosas por cuanto el bajo valor de FP se debe a deformación y no al desfase.**

La figura 338 muestra un ejemplo de una carga preponderantemente inductiva que determina un factor de potencia bajo, supongamos  $FP = 0,7$ , pero que puede ser compensado agregando una componente capacitiva (figura 339) a la carga hasta reducir el ángulo de desfase a cero, con lo cual el factor de potencia será el óptimo.

Veamos ahora este otro ejemplo (figura 340), donde se aplica un control de carga con un triac sobre la resistencia de un horno.

Si el resultado de la medición del factor de potencia se asume sin conocer el tipo o característica de la carga (caja gris), se puede incurrir (figura 341) en una compensación desfavorable.

La representación vectorial en 3 ejes de la figura 342 ayuda a interpretar por qué la potencia aparente  $U$  se aparta del "plano P-Q", a medida que aumenta la potencia de deformación  $D$ .

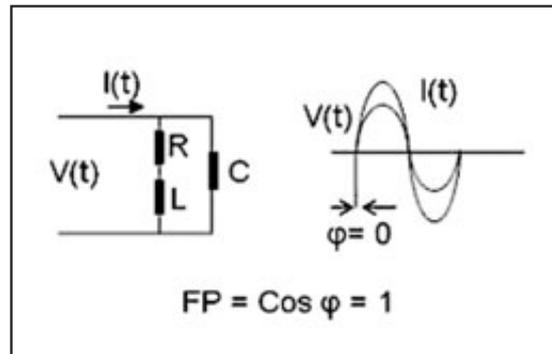


Fig. 339. Inductiva compensada.

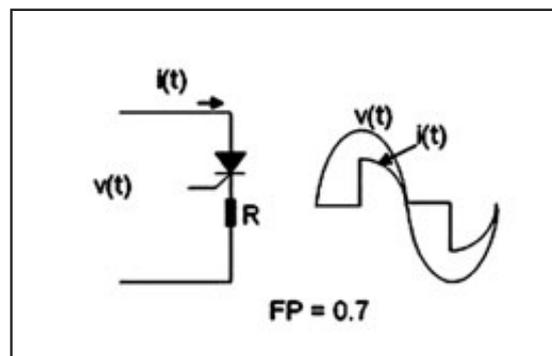


Fig. 340. Circuito con triac.

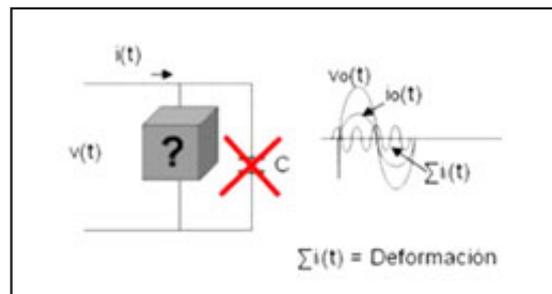


Fig. 341. Surgen los armónicos.

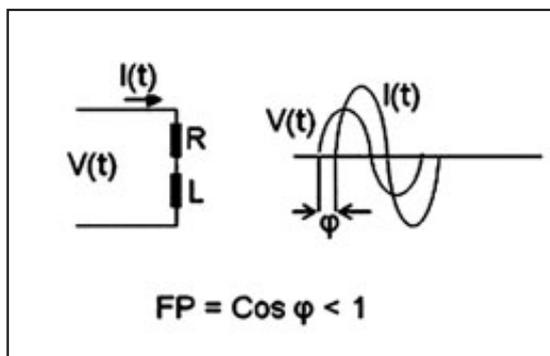


Fig. 338. Carga inductiva.

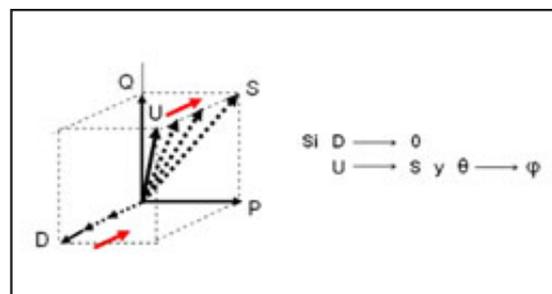


Fig. 342. Analizando la deformación.

Supongamos que en la instalación hay una tasa de distorsión armónica (THD) alta debido a que hay corrientes armónicas.

THD es la relación en tanto por ciento entre la corriente o tensión fundamental y la distorsionada.

Estas corrientes armónicas, junto con la tensión a la que está sometido el conductor por el que fluyen da como resultado una potencia, que si fuese ésta la única distorsión en la instalación, su valor se correspondería con el total de las distorsiones D. Gráficamente se vería como ya lo hemos visto en la figura 337, que repetimos:

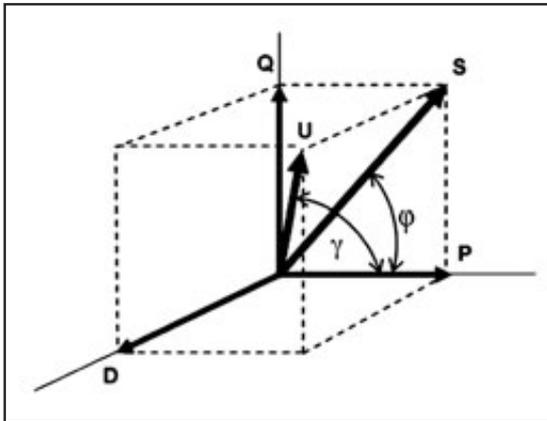


Fig. 337. Observando el FP.

Si atendemos a la cara anterior del prisma vemos el triángulo rectángulo anterior, pero la hipotenusa no es ahora S, sino U, ya que S ha de tener en cuenta a D en su composición y en este caso la estamos obviando.

Si prestamos atención al prisma completo veremos dos ángulos  $\varphi$ ,  $\gamma$ .

Ahora el ángulo importante no es  $\varphi$  ya que no tiene en cuenta a D, sino  $\gamma$ .

Atendiendo a la definición de factor de potencia, como la relación entre P y S obtenemos la siguiente expresión:

$$\cos \varphi = P / S$$

$$\text{FP} (\gamma) = P / U$$

Como se ha visto FP y  $\cos \varphi$  son dos términos distintos y dependen de distintas cosas:

$\cos \varphi$ : Sólo depende de las potencias activa (P) y reactiva (Q).

FP( $\gamma$ ): Depende de las potencias activa (P), reactiva (Q) y de las distorsiones (D).

En el caso de que el flujo eléctrico sea perfecto y no haya distorsiones ( $D = 0$ ) ambos coincidirán.

En países en vías de desarrollo en vez de penalizar por los niveles de reactiva y usar para medirlo el  $\cos \varphi$  penalizan por los niveles de distorsión y de reactiva y para ello usan el FP ( $\gamma$ ).

En España con una batería de condensadores se compensa la reactiva y se puede conseguir hasta una bonificación del 4% en la factura eléctrica y darse la paradoja de que esa instalación esté exportando distorsiones (por ejemplo corrientes armónicas) a la red de distribución.

En estos países la red de distribución no está tan sobredimensionada y han de sacarla el máximo partido y para ello quieren que el que la esté ocupando pague por ello.

Se ha explicado qué es el coseno de  $\varphi$  ( $\cos \varphi$ ) y sus diferencias con el factor de potencia FP, pero para explicar cómo compensar la energía reactiva hay que tener claro este concepto.

El  $\cos \varphi$  es el coseno del ángulo  $\varphi$  que forman la potencia activa (P) y la aparente (S) en el triángulo de potencias tradicional.

En un sistema eléctrico de corriente alterna con ondas senoidales perfectas, la descomposición de la potencia aparente en la suma de dos vectores, da como resultados un triángulo rectángulo, en el que las componentes se encuentran en los ejes de los números reales y los imaginarios:

Aplicando el Teorema de Pitágoras y las relaciones trigonométricas se obtiene que el  $\cos \varphi$  sólo depende de las potencias activa (P) y reactiva (Q).

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

### ¿Por qué compensar la reactiva?

Porque una variación de la potencia reactiva hace que los equipos generadores y/o transformadores que abastecen a la instalación trabajen a un régimen mayor del necesario.

Además, la administración está penalizando, cada vez más duramente los valores del  $\cos \phi$  bajos.

Con lo que compensar la energía reactiva supone un ahorro directo en la factura eléctrica.

### ¿Quién es el culpable de la reactiva?

La energía reactiva la utilizan los equipos con bobinados para mantener los campos magnéticos que necesitan para realizar su trabajo.

Así motores y transformadores son los grandes consumidores de reactiva.

### ¿Cómo se compensa la reactiva?

La energía reactiva se compensa instalando condensadores en paralelo a las cargas "problemáticas".

Así en grandes motores y transformadores se instalarán condensadores en paralelo conectados solidariamente, de modo que cuando éstos entren en funcionamiento lo hagan con su condensador apoyándolos.

En ocasiones no es una carga concreta la causante del problema, si no que es la suma de todas.



*Se descarta compensar carga a carga por el elevado coste de la instalación, salvo receptores como luminarias que últimamente se compensan todas.*

A continuación se explicará cómo se calcula una batería de condensadores para una instalación en marcha o en proyecto, de dos formas distintas: **Teórica y empírica**.

Más adelante se explicará cuales son las características más importantes de una batería de condensadores, o sea, qué es lo que hay que tener en cuenta a la hora de elegirla.

### Cálculo de una instalación proyectada.

Si la instalación no ha funcionado nunca, sólo podremos dimensionar la batería realizando una estimación, de modo teórico.

Contabilizando la potencia instalada de cada receptor y aplicando un coeficiente de simultaneidad.

(En la ITC-BT 10 de la Guía Técnica del Reglamento de Baja Tensión encontraremos estos coeficientes y, algunos consejos).

Ahora estimaremos un  $\cos \phi$ .

Como norma general se aplicará un  $\cos \phi$  de 0,8 ( $\tan \phi = 0,75$ ) a todas las cargas con grandes motores y transformadores, como la maquinaria.

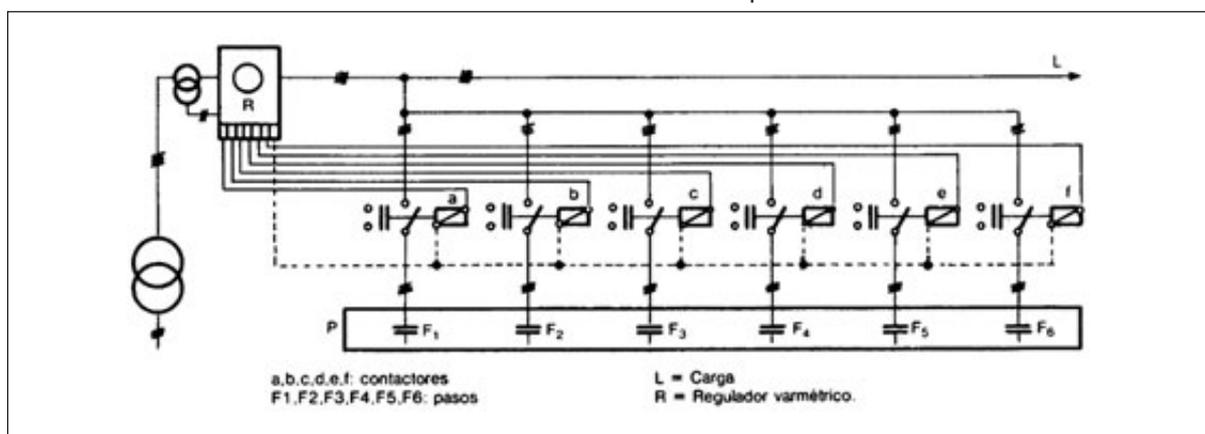


Fig. 343. Esquema de una batería regulable de condensadores.

Y un  $\cos \varphi$  de 0,9 ( $\tan \varphi = 0,48$ ) para alumbrado y otro tipo de receptores.

Así, se sumará la componente reactiva de todas las cargas:

$$Q_t = \sum P.F_s.Tan(\varphi)$$

Se elegirá la batería de condensadores de una potencia reactiva inmediatamente superior a la calculada, teniendo en cuenta los modelos de fabricación.

### Cálculo instalación en marcha.

Una instalación en marcha permite hacer el cálculo de dos maneras.

Una teórica y otra práctica o empírica.

Lo aconsejable es hacerlo de las dos y contrastar.

Además que cada una tiene unas ventajas, que las acercan más al valor más idóneo.

### Cálculo práctico.

Se conectan todos los equipos de la instalación. Todos.

Se ponen a funcionar, a consumir electricidad.

Si la instalación cuenta con máquinas hay que ponerlas a trabajar a los niveles altos de energía.

Por ejemplo si se tienen sierras eléctricas hay que hacer que corten, no es suficiente con que gire el disco.

Previo a esto deberá haberse conectado en la cabecera de la instalación un analizador de redes u otro equipo registrador que mida la potencia activa y reactiva de la instalación.

Cuando se recoja el equipo se revisara cuál ha sido la máxima potencia reactiva demandada.

Pensando en la posibilidad de que haya futuras ampliaciones que necesiten compensar una reactiva mayor que la medida se elegirá una batería suficiente para compensarla.

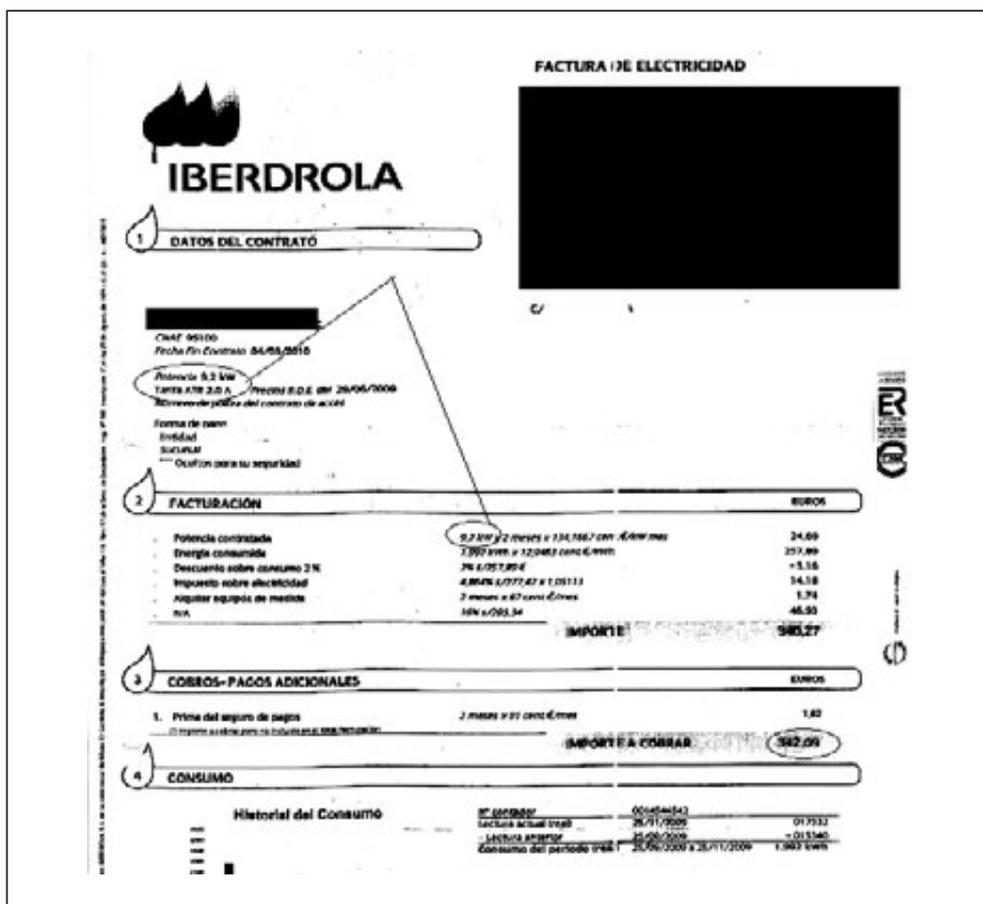


Fig. 344. Factura de energía.

## Cálculo teórico.

Se necesitarán las facturas eléctricas del último año.

Es necesario un año entero ya que no se utilizan las instalaciones del mismo modo en invierno y verano.

La calefacción y/o aire acondicionado, trabajos estacionales (pensemos en una bodega), cambios de horarios (en verano hay muchas empresas que reducen su jornada), etc.... hacen que las necesidades energéticas no sean constantes a lo largo del año.

Observemos que en las facturas hay tres parámetros que ha registrado el contador en cada uno de los periodos: potencia activa (kW), energía activa (kWh) y energía reactiva (kVArh).

Se usarán los tres para el cálculo de la batería.

Como en todos los aspectos de la vida, el tiempo (h: en horas) afecta a todo por igual, y, a las potencias también, por lo que el triángulo de potencias mantiene sus proporciones cuando se hace con energías.

Así,  $\phi$  mantiene su valor aunque los catetos del triángulo sean las energías activa y reactiva en vez de las potencias.

Para calcular la potencia reactiva máxima en la instalación usaremos las relaciones trigonométricas entre dos triángulos rectángulos proporcionales:

Así, se calculará la máxima potencia reactiva en kVAr en cada periodo de cada factura y, se tomará como la potencia a compensar la máxima de todas.

Igual que en los casos anteriores, se tendrán en cuenta las potencias estándar de los fabricantes de baterías y, la posibilidad de futuras ampliaciones en la instalación.

## ¿Qué son los Armónicos?

No pretendemos explicar todas las formas armónicas existentes, si no sólo las que afectan al servicio eléctrico en baja tensión.

Los armónicos están presentes en todos los aspectos de la vida en los que hay una onda, como por ejemplo en la música (el sonido es una onda), en los círculos que hace una piedra al caer al agua y en otros muchos sitios.



*Decir que en una instalación hay presencia de armónicos de potencia, significa que la corriente y la tensión se distorsionan y desvían de las formas senoidales de la onda perfecta de 50Hz.*

## Explicación.

Las corrientes armónicas son causadas por cargas no lineales conectadas a la instalación, es decir, que la responsabilidad de su presencia, al igual que con la reactiva, la tienen los consumidores finales.

Una carga se dice que es no lineal cuando la corriente que pasa por ella no tiene la misma forma de onda que la tensión que la alimenta.

El flujo de corrientes armónicas a través de las impedancias del sistema, a su vez crea armónicos de tensión, que distorsionan la tensión de alimentación.

Cada carga no lineal distorsiona la onda eléctrica de un modo, dependiendo de la naturaleza de dicha carga.

Así, aparecerán en la instalación ondas distorsionadas de la fundamental que convivirán con ésta y fluirán por la instalación. Como cuando gritamos en un acantilado y aparecen ecos y, aunque sigamos gritando nuevas palabras todavía se oye la primera rebotando por las paredes, modificándose y atenuándose.

Realmente el eco es un ejemplo físico de armónicos pero con ondas de sonido.

En la siguiente figura se presentan unas formas de onda con típicas distorsiones.

En la parte de arriba de una única fase y la de abajo trifásica:

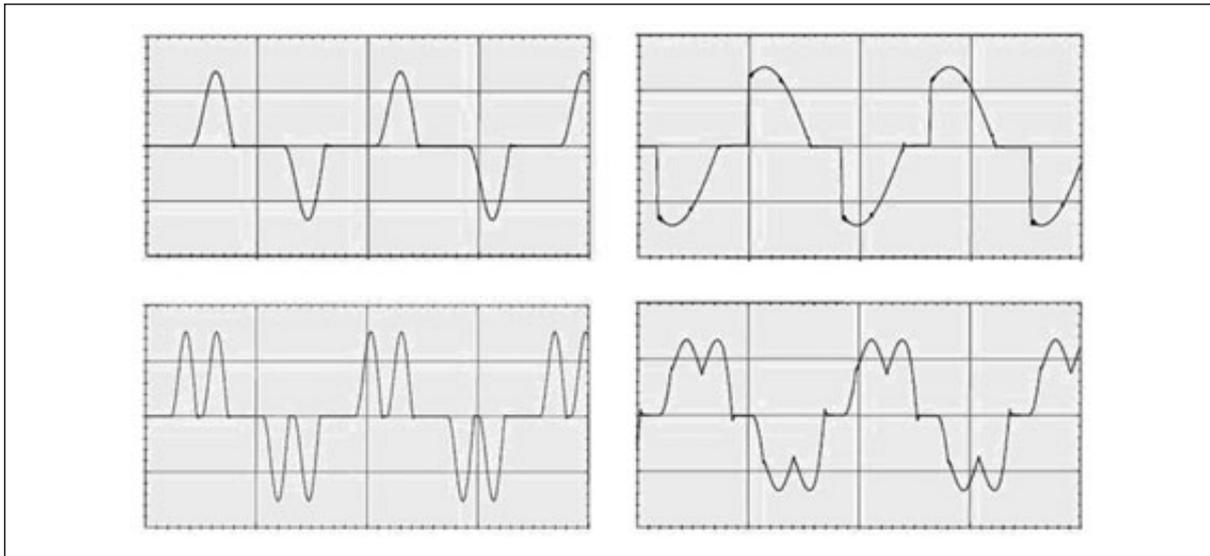


Fig. 345. Distorsión Armónica: Ejemplos típicos de distorsión

### Equipos distorsionadores.

Como antes se ha explicado, la irrupción de la electrónica de potencia ha hecho que la mayoría de cargas sean causantes de alguna distorsión armónica.

Esto, sumado con el aumento del consumo de energía hace que las distorsiones sean algo muy común en las redes de distribución.

Como se ha dicho los equipos distorsionadores son muy comunes y, se podrían incluir la mayoría de los aparatos industriales y domésticos.

#### Monofásicos:

- Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado, presentes en ordenadores, impresoras, monitores, lavadoras, televisores, frigoríficos y la mayoría de electrodomésticos.
- Balastos electrónicos de iluminación fluorescente. Si el equipo de iluminación fluorescente no tiene el condensador (cebador) y la reactancia, tendrá un balasto electrónico.

#### Trifásicos:

- Los SAI o UPS.

- Los variadores de velocidad y otros sistemas de control de motores eléctricos.
- Máquinas de soldadura.
- Hornos de arco o inducción.
- Cargadores de baterías.

### Tipos de armónicos.

Dependiendo de la frecuencia de la onda así se clasifican los armónicos.

Siendo el armónico fundamental el de 50Hz que es del que nacen los otros.

Sería nuestro grito en el acantilado.

Luego, dependiendo de la frecuencia del mismo se tendrá un segundo armónico a los 100Hz, un tercero a los 150Hz, un cuarto a los 200Hz,...



*Conviene saber que los armónicos pares no son causantes de problemas en las instalaciones, pero los impares sí. Especialmente el tercer y el quinto armónico. El tercer armónico es causado por cargas monofásicas y el quinto por las trifásicas.*

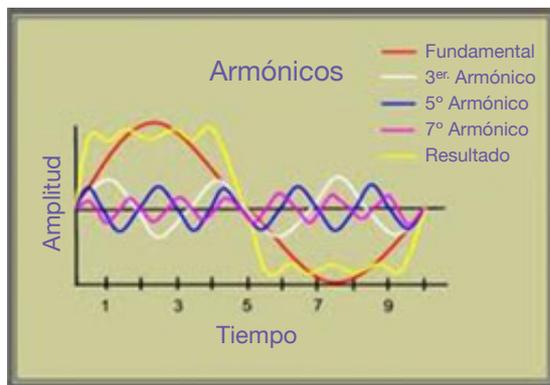


Fig. 346. Varios armónicos.

No queremos dejar pasar más tiempo sin aclarar...

### ¿Qué es la THD?

La THD es la tasa de distorsión armónica.

Es la relación en tanto por ciento entre la corriente o tensión fundamental y la distorsionada.

Por ejemplo, si en la instalación hay 100A, pero con frecuencia 50Hz son 60A, la THD en corriente (THDI) será del 40%.

En la siguiente gráfica se puede ver un ejemplo de THD.

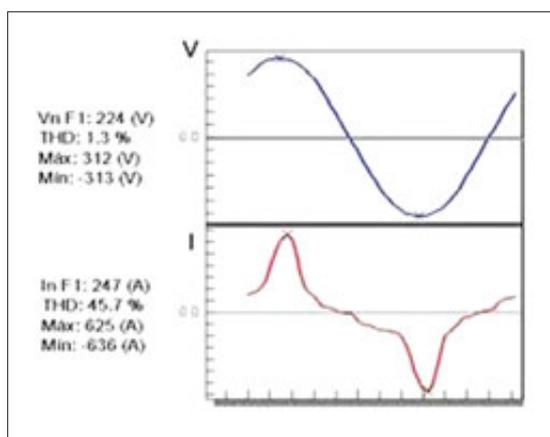


Fig. 347. Ejemplo de medición de Tasa de Distorsión Armónica en una instalación.

### Baterías de Condensadores: Características más importantes.

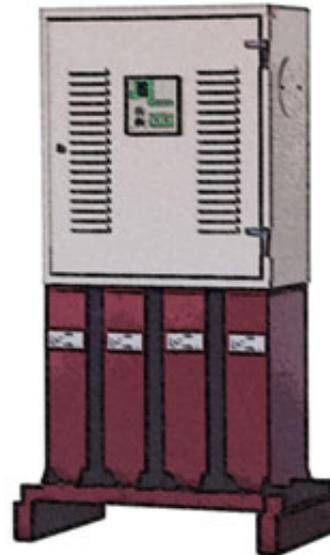


Fig. 348. Batería automática.

Con el fin de hacer una correcta elección de la batería, a continuación, se describen cada uno de los parámetros y características más importantes de una.

#### Capacidad.

Es la máxima potencia reactiva que en un momento puntual es capaz de compensar la batería.

Esta potencia deberá ser algo mayor que la máxima que se calculó en la instalación.



*Aunque la capacidad de un condensador y, por tanto de una batería, se mide en Faradios, tanto fabricantes como consumidores, para este tipo de usos, utilizan como unidad los VAR o kVAR.*

Es más cómodo comparar directamente la potencia máxima de la batería con la que se desea compensar en las mismas unidades.

## Número de escalones.

Si nos fijamos en la imagen anterior, veremos cuatro prismas en su parte inferior.

Son los condensadores.

Cada uno es un condensador trifásico y, tiene distinta potencia. Cuando la batería está funcionando, el regulador medirá la potencia reactiva instantánea a compensar y, en función de ésta conectará uno, u otro condensador, combinando la entrada de éstos para que siempre se compense la mayor cantidad de energía reactiva.

Por ejemplo; supongamos que la batería cuenta con cuatro "escalones" de  $5 + 5 + 10 + 20$  kVAR.

La batería será de 40 kVAR.

¿Cómo se comportará la batería con los aumentos de reactiva a compensar?:

- Cuando en la instalación haya menos de 5 kVAR a compensar ningún condensador estará conectado.
- Cuando la reactiva supere los 5 kVAR, pero sea menor de 10 kVAR, entrará el primer escalón de 5 kVAR.
- Cuando esté entre 10 y 15 kVAR, se conectará el de 10 kVAR.
- Cuando esté entre 15 y 20 kVAR, se conectarán uno de 5 y el de 10 kVAR. Y así sucesivamente.

Como habremos observado, la precisión de la batería la marca el escalón más pequeño.

En la batería del ejemplo la compensación se hace de 5 en 5 kVAR.

## Regulador.



Fig. 349. Regulador

El regulador es el cerebro de la batería.

Interpreta las señales que le envían los equipos auxiliares y determina la potencia reactiva a compensar a cada instante.

En función de esto ordenará conectar o desconectar unos u otros escalones.

Las decisiones que tomará el regulador estarán íntimamente ligadas a la información de que disponga, cuando más precisa mejor actuará.

Hay baterías, que conectan su circuito de medida con un sistema Aaron.

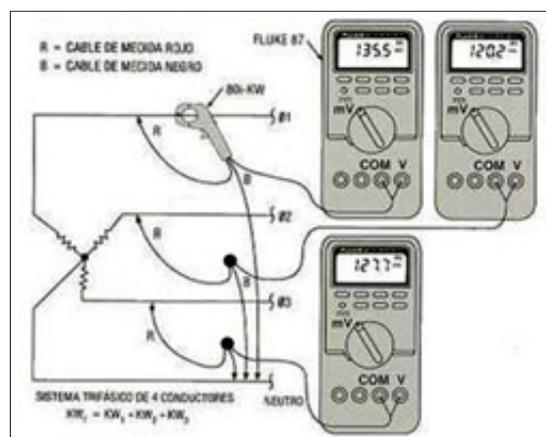


Fig. 350. Ejemplo de conexiones para medir.



*Consiste en medir las tensiones de cada una de las fases, pero sólo la intensidad de una y, con una simple regla de tres estimar la potencia trifásica total.*

Otras, en cambio, realizan una medida trifásica, tomando tres tensiones y tres corrientes.

En sistemas desequilibrados, puede que, con un sistema Aaron, la batería incurra en sobrecompensaciones o no compense lo suficiente la instalación.

Dependerá de si en la fase que se mide corriente hay mucha o poca carga reactiva comparada con las otras.

## Sistema de maniobra.

Generalmente hay dos: Por contactores electromecánicos o por tiristores.

### • Contactores:

Es el más común.

Es más económico.

El regulador hace las funciones de relé y manda la señal de apertura o cierre a los contactores que conectan o desconectan los condensadores.

El proceso lleva un par de segundos.

### • Tiristores:

Son más caros.

Funcionan con un sistema integrado de electrónica de potencia.

Son absolutamente silenciosos y, hacen la conexión instantáneamente.

Tienen un ilimitado número de maniobras, a priori, ya que no hay desgaste mecánico de los componentes.

También se alarga la vida de los componentes ya que eliminan el transitorio de la conexión.

Son ideales para:

- Centros educativos, comercios u otros lugares donde el ruido de los contactores puede ser molesto.
- Ascensores u otro tipo de cargas que entran muy rápidamente.

Interruptor.

Las baterías han de contar con un interruptor de corte en carga que las aisle del resto de la instalación y, que permita trabajar en ellas sin tensión.

Este interruptor puede estar en el cuadro al que se conecta o, en el armario de la propia batería.

Es indiferente.

Pero téngase en cuenta a la hora de comprarla ya que no en todos los cuadros hay espacio suficiente para instalar un interruptor.

La corriente nominal del interruptor se ha de calcular siguiendo la siguiente fórmula:

$$Q = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \text{Sen}(\varphi) \rightarrow I = \left( \frac{Q}{V \cdot \text{Sen}(\varphi)} \right)$$

Q, es la nominal de la batería. V la tensión de la instalación, 400 V para trifásico y 230 V para monofásico.

Sen ( $\varphi$ ) tendrá el valor que se considere, por ejemplo 0,6 que corresponde a un cos ( $\varphi$ ) de 0,8.

Es conveniente que previo a la desconexión de la batería se quiten las cargas más reactivas y se espere a que la batería desconecte la mayoría de los escalones, así la corriente que pasará por el interruptor en el momento del corte será menor.

Antes de manipular la batería hay que asegurarse de que los condensadores no se encuentran cargados.

Suelen colocarse unas resistencias de descarga rápida, puenteando éstos, que disipan su carga transformándola en calor, pero tardan varios minutos.

Son muy comunes los accidentes por manipular baterías con los condensadores aún cargados.

## Armario.

El armario, no es más que una estructura de chapa, pero en instalaciones que se prevé que aumente la reactiva a compensar, conviene elegirlos grandes, que permitan añadir nuevos condensadores para futuras ampliaciones.

En el ejemplo anterior de la batería de cuatro escalones, si el armario tuviera capacidad para dos escalones más se podría ampliar otros 80 kVAr más, según se necesitara.

El precio del armario no es significativo y, puede ahorrar tener que comprar un segundo equipo.

Si se decide elegir un armario que posibilite las ampliaciones, pensemos en que éste ha de contar con un regulador que pueda trabajar con el número máximo de escalones, también el interruptor ha de estar dimensionado para la potencia máxima que se podrá instalar (o se tendrá que cambiar cuando se amplíe), al igual que los conductores de conexión al cuadro.

Los transformadores de medida deben estar ajustados a la corriente que midan ya que en regímenes bajos de la carga no se comportan adecuadamente.

### Armónicos.

¿En la instalación hay presencia de armónicos? Entonces se debería pensar en adquirir una batería con algún tipo de filtro.

Las baterías amplifican y provocan resonancias de las corrientes armónicas y, puede que agraven el problema de distorsiones aumentando la THD.

### Cómo es un condensador.

Como se ha visto, las baterías están compuestas de "escalones", que no son más que condensadores trifásicos que se conectan y desconectan de la instalación según las necesidades de compensación de reactiva.

Cada condensador, está compuesto por láminas de material conductor enrolladas sobre si mismas formando una espiral y, entre medias un material dieléctrico.

En muchos casos derivados poliméricos.

Se montan tres rollos (ya que son trifásicos) que se encierran dentro de una carcasa metálica.

Los huecos se rellenan de Vermiculita que es un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas.

Por ser trifásico, se le instalan tres bornes de conexión, que están conectados a cada uno de los tres "rollos".

Entre sí, se conectan "todos con todos" de modo que internamente formen un triángulo.

Así al conectarlo en la instalación la diferencia de potencial entre cada una de las fases hará que la corriente fluya a través de él y, se produzca la compensación

Una batería de condensadores está compuesta por varios de éstos, que se llaman en el argot "escalones", que están conectados en paralelo, sometidos a la tensión de la instalación al entrar en servicio y, sumando las corrientes "correctoras" que aportan cada uno.

### Conexión de la batería en estrella.

Visto cómo se conecta un condensador internamente, se explicará cómo se conectará en la instalación que se desea compensar. Como todos los condensadores se conectan en paralelo, eléctricamente habrá uno, resultante de la suma de capacidades de todos, por cada una de las fases.

En el esquema adjunto se podrá ver cómo resultaría la conexión en estrella de estos condensadores.

Se conectaría el neutro de la estrella para que coincidiera con el de la instalación y evitar diferencias de potencia entre ambos. Fíjese en la tensión a la que está sometido cada condensador.

Cada "bote" está conectado entre neutro y fase, con lo que estará a una tensión de 230 V. Siempre entre el conductor azul y otro.

Ante las preguntas: ¿Este sistema es válido? ¿Funcionaría? Sólo hay una respuesta: Si, todo funcionaría.

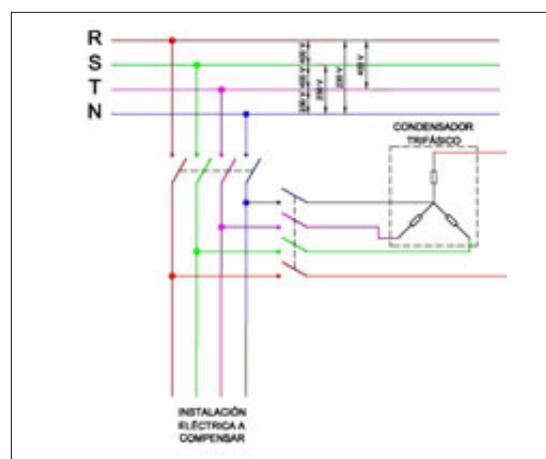


Fig. 351. Conexión en estrella.

### Conexión de la batería en triángulo.

Visto cómo se conectaría en estrella, ahora se verá el resultado en triángulo.

Según se explicó al describir un condensador internamente, éstos se conectan en triángulo, en las instalaciones trifásicas.

Con lo que este esquema es el correcto, el que utilizan todos los fabricantes.

Igual que en el caso de la estrella, debe fijarse en las tensiones a las que se somete cada condensador.

En este caso no existe neutro en la batería de condensadores, con lo que cada "rollo" dentro de cada "escalón" estará conectado entre dos fases, o lo que es lo mismo, estará a 400 V.

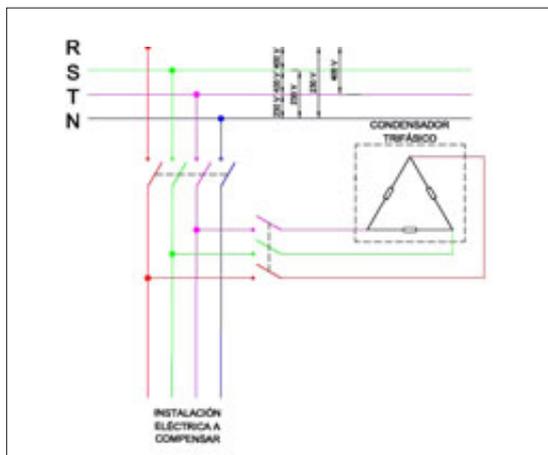


Fig. 352. Conexión en triángulo.

Esta solución, al igual que la otra, también funciona.

Entonces ¿Por qué se conectan en triángulo?

### ¿Por qué se conectan en triángulo?

Está claro que la decisión no atiende a criterios de operatividad y funcionalidad.

Como la mayoría de todas las decisiones, es económica.

Realizar un "escalón" que internamente esté conectado en triángulo es más laborioso ya que las conexiones son más complejas, pero se usa menos material y, es lo más caro de una batería, la materia prima.

El material conductor que se suele usar es Zinc, que igual que el Cobre o el Hierro, tienen un precio muy variable.

Recordemos que entre las características más destacadas de una batería de condensadores un parámetro importante es la tensión a la que la batería compensaba la potencia reactiva nominal indicada por el fabricante.

Recordemos que para dos baterías de igual potencia nominal, por ejemplo 10 kVAr y tensiones nominales de 400 V y 440 V, montadas en la misma instalación, la de 440 V tiene un 10% menos de capacidad de compensación.

Para desarrollar la misma potencia compensatoria, si la batería se somete a una tensión mayor tendrá que soportar menor corriente. Cuanto mayor es la corriente más Zinc ha de tener la batería para evitar las pérdidas por el "efecto Joule".

La energía convertida en calor y, por lo tanto perdida por este concepto, depende del cuadrado de la corriente y de la resistencia del material.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Con lo que para evitar esas pérdidas, hay que reducir la corriente, en primer lugar, ya que por cada 2 A que se reduce, las pérdidas se dividen por 4.

Y luego la resistencia.

Para reducir la resistencia sólo queda elegir otro material por otro más conductor o aumentar la superficie de éste, lo que implica un incremento en el coste.

Así que ante cablear la batería de un modo u otro o encarecer el material, la decisión es clara.

Se conectan con el sistema que permite estar a los condensadores sometidos a la tensión más alta, admisible, dentro de la instalación.

Esta configuración es la de Triángulo.

## ¿Es muy grande la diferencia?

Sí, es grande.

Si se usa la batería del ejemplo de 10 kVA y, los cálculos que ya se vieron en las características más destacadas de una batería de condensadores se verá:

$$Q = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \text{Sen}(\varphi)$$

$$10\text{kV Ar} = 400 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3} \cdot \text{Sen}(\varphi)$$

$$10\text{kV Ar} = 230 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \text{Sen}(\varphi)$$

Igualando las dos expresiones:

$$230 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \text{Sen}(\varphi) = 400 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3} \cdot \text{Sen}(\varphi)$$

$$1,739 \cdot I_1 = I_2$$

Esto quiere decir, que para compensar la misma reactiva, una batería conectada en estrella tendrá que soportar casi un 174% de la corriente que tendría que soportar una en triángulo.

Que la batería esté preparada para soportar esa corriente la hace más cara.

## Reducción de costes.

La compensación de energía reactiva se lleva aplicando años en las instalaciones consumidoras de energía, por que aporta beneficios económicos directos amortizables a muy corto plazo. Estos beneficios son de dos tipos:

- 1- Directos:** Producidos por la eliminación de la penalización por consumo de energía reactiva en la factura eléctrica.
- 2- Indirectos:** Producidos por un mejor funcionamiento y optimización de las instalaciones.

## Beneficios directos.

Son los más fáciles de calcular y estimar.

Las penalizaciones por kWhr consumido son, según el BOE de 31 de Diciembre de 2009, para España (ver gráfico en la parte inferior).

Como se puede apreciar en la tabla, la tendencia es, claramente al alza y, la penalización por la energía reactiva es cada vez mayor con crecimientos muy altos.

Es lógico.

Un sistema con menor reactiva es un sistema más optimizado, como se verá cuando se expliquen los beneficios indirectos.

Las penalizaciones tienen como objetivo dar un argumento claro para que los consumidores potencien este aspecto de la calidad de red y de la eficiencia energética ya que son ellos los causantes de que haya mucha diferencia entre la potencia activa y la aparente. Como se verá, tener un sistema compensado es bueno para una instalación y para la de la empresa distribuidora.

## Beneficios indirectos.

Si se disminuye la energía reactiva solicitada por una instalación a la red de distribución aparecen varios beneficios:

- Disminución de la Potencia Aparente (S). Si se reduce la reactiva (Q) y se mantiene la activa (P) debe reducirse la aparente.
- Disminución de la corriente solicitada por la instalación. Si la tensión en la instalación es constante (veremos que no del todo) y la potencia aparente disminuye, lo ha de hacer la corriente ya que  $S = V \cdot I$

Cos $\varphi$	€/kvar 31/12/09	€/kvar 01/01/2010	Incremento
Cos $\varphi$ < 0,95 hasta 0,9	0,000013	0,041554	319730%
Cos $\varphi$ < 0,9 hasta 0,85	0,017018	0,041554	144%
Cos $\varphi$ < 0,85 hasta 0,8	0,034037	0,041554	22%
Cos $\varphi$ < 0,8	0,051056	0,062332	22%

- Al disminuir la corriente disminuirá la carga a la que están sometidos los transformadores de cabecera de las instalaciones en caso de haber.
- Como disminuye la carga de los transformadores se podrán introducir nuevas cargas aumentando la potencia útil de la instalación.
- Si disminuye la corriente disminuirán las pérdidas en calor por el Efecto Joule. Teniendo en cuenta que las pérdidas dependen del cuadrado de la corriente por lo que una reducción de la misma tendrá un efecto muy beneficioso en cuanto a las pérdidas.
- Al haber menor corriente la caída de tensión será menor pues depende directamente de ésta.

### Ejemplo teórico.

La teoría y la práctica deberían ser iguales, pero esto no es así.

Sacado directamente de un antiguo catálogo de un fabricante se plantea el siguiente ejemplo teórico para una instalación compuesta por:

- Un transformador MT/BT de 800 kVA.
- Una carga en el cuadro general de Baja Tensión de 630 kW con un  $\cos \varphi$  de 0,6.
- Una línea de interconexión de 100 metros de cable de cobre de 4 x (3 x 240) mm<sup>2</sup> que tiene una resistencia de 0,075  $\Omega$ /km.

Se conecta en la instalación una batería de 360 kVAr a 400V que una vez conectada, garantiza un  $\cos \varphi$  de 0,98.

Antes de hacer ningún cálculo, conviene conocer las dos fórmulas matemáticas que se utilizarán:

- Caída de tensión de una línea trifásica:

$$\Delta U_c = \frac{Z_c \cdot P}{U \cdot \cos \varphi}$$

- Pérdidas por efecto Joule en una línea trifásica:

$$\Delta P = \frac{l}{\gamma \cdot S} \left( \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \right)^2$$

	Sin Batería $\cos \varphi$ 0,6	Con Batería $\cos \varphi$ 0,98	Disminución (%)
Caída de tensión	5 %	3 %	60 %
Pérdidas efecto Joule	17 kW	6,4 kW	62 %
Potencia suministrada por el transformador	1.050 kVA	642 kVA	38 %

## Conclusiones.

Independientemente de los ahorros directos por evitar las penalizaciones, se puede optimizar mucho la instalación y aprovecharla al máximo eliminando la energía reactiva.

Imaginemos que la instalación en una cesta en la que caben setas, que son los amperios.

Si eliminamos los terrones de tierra que traen las setas al sacarlas del suelo, cabrán más setas en la cesta.

Está claro, que en este símil la tierra es la reactiva.

Es por esto que a las distribuidoras les interesa eliminar la reactiva y, esto sólo se puede conseguir involucrando a los consumidores y, para ello el gobierno impone las penalizaciones.

## ¿Dónde instalar la batería?

La elección de dónde instalar una batería de condensadores dependerá del tipo de instalación en la que se desee montar.

Ya que realizar la compensación en un punto u otro de una instalación reporta distintas ventajas, que según sea la instalación pueden primar sobre el resto.

Sobre esto no hay reglas escritas y dependerá en gran medida de la experiencia que se tenga a la hora de elegir el punto, dentro del esquema de la instalación, dónde compensará.

Dos son los criterios que se tendrán en cuenta a la hora de estudiar la ubicación de las baterías:

## Tamaño de la instalación.

Cuando la instalación tenga en su cuadro general al punto más representativo de la instalación, y que sus cuadros secundarios sean pequeños y no estén muy alejados, el punto más idóneo, en el que hacer la compensación, es en la cabecera de éste, aguas abajo del interruptor general y del diferencial general, si es que lo hay.

Hay instalaciones muy grandes y, descentralizadas.

Compuestas por un cuadro general y varios subcuadros, todos de tamaños muy considerables y, muy alejados entre si.

En estos casos hay que pensar en una compensación descentralizada y que se haga en los subcuadros o, en las propias cargas, si existieran cargas grandes.

También se puede recurrir a sistemas de compensación mixtos, con una batería de condensadores en cabecera que compense las cargas reactivas que han quedado fuera del ámbito de aplicación de las baterías que compensan en los cuadros secundarios y en las cargas.

## Grandes cargas consumidoras.

Cuando existen cargas de este tipo es conveniente estudiar la compensación directa de la energía reactiva.

Esto se puede hacer para grandes motores o transformadores, no obstante habría que asociarlo a un estudio de armónicos ya que los variadores que utilizan los grandes motores suelen ser cargas muy perturbadoras y, junto con una batería de condensadores se pueden dar situaciones de resonancias magnéticas que dañen la instalación.

## Beneficios de cada sistema.

### **Compensación centralizada en cabecera:**

El primer beneficio es económico ya que sólo habrá que instalar un equipo, se consigue una compensación que abaratará la factura eléctrica, y se consigue bajar la carga del transformador de potencia de cabecera en caso de que existiera.

### **Compensación centralizada en cuadros secundarios:**

Aunque hay que adquirir mayor número de equipos, la compensación es más precisa, ya que los escalones de compensación se hacen para unidades de instalación menores.

No sólo se consigue mejorar la factura eléctrica, si no que también se bajan los

niveles de carga de las líneas y, con lo cual se reducen las caídas de tensión en las líneas que alimentan a los cuadros.

#### **Compensación descentralizada en cargas:**

Es posible que haya que adquirir más equipos que en cualquiera de las otras, pero éstos serán más económicos ya que serán más pequeños y, cuando se traten de los que directamente compensan las cargas no hará falta que tengan una compensación automática, si no que podrán ser condensadores fijos.

Otra ventaja es que, al igual que con la otra compensación descentralizada, se disminuye la corriente por la líneas, con lo que se reduce la caída de tensión.

También se reduce la factura eléctrica por desaparecer las penalizaciones y, haber un menor consumo.

Es el punto idóneo para hacer una compensación, carga a carga, pero es un sistema caro que sólo interesa hacer (desde el punto de vista económico) en instalaciones con grandes cargas.

**NOTA:** Según la legislación vigente en España, no se podrán conectar condensadores fijos en implantación general, sólo en paralelo con las cargas de modo que a la conexión de éstas entren y con su desconexión, también lo hagan los condensadores.

#### **Compensación fija y automática.**

Existen dos maneras de compensación: Fija y automática.

La elección entre una u otra dependerá principalmente de tipo de equipo a compensar.

La compensación fija, en la práctica, sólo se utiliza para transformadores y grandes motores.

Este sistema sólo se utilizará en cargas o instalaciones donde:

- Tendrán una demanda de energía bastante constante.

- La reactiva a compensar, también estará presente en los momentos en que la carga es baja.
- Se trata de cargas grandes que, interesa compensar individualmente.

En la práctica sólo se utiliza para compensar transformadores y grandes motores asíncronos.

Se conecta en paralelo con ellos de modo que al entrar en servicio también lo haga la batería de condensadores y, que al desconectarse lo haga ésta, también.

#### **Motores asíncronos:**

Estos motores consumen gran cantidad de energía reactiva para mantener los campos magnéticos internos necesarios para su funcionamiento.

Dependerá de la velocidad del giro del motor, pero la reactiva puede llegar a ser de 1/3 de la nominal del motor.

Esto es mucho.

Para calcular el condensador fijo que se deberá instalar, se puede consultar la tabla que acompaña a este texto.

Está sacada de un catálogo de un fabricante.

Pero la potencia del condensador a montar coincide con el 90% de la potencia de vacío de la máquina.

Aproximadamente el  $\cos \phi$  quedará alrededor del 0,91 ó 0,92.

Si se desea compensar mayores  $\cos \phi$ , a la entrada y salida del condensador de la red deberá estar mandada por un contactor de maniobra.

Si el motor cuenta con un arrancador progresivo, un variador de frecuencia u otro sistema de electrónica de potencia que lo regule, habrá que estudiar el montar algún tipo de rechazo para evitar problemas de resonancias magnéticas debidas a los armónicos que puedan ocasionar estos equipos.

Potencia motor		Revoluciones por minuto r.p.m.			
kW	CV	3000	1500	1000	750
5,5	7	2,0	2	2,5	3
7,5	10	2,5	3	4	5
10	14	4,0	5	6	7,5
15	20	5,0	6	7	9
18,5	25	6,3	7	9	10
22	30	8,0	9	10	12,5
30	40	10,0	12,5	15	15
37	50	12,5	15	20	20
45	60	15,0	20	25	25
55	75	20,0	20	25	25
75	100	25,0	25	30	30
90	120	30,0	30	35	35
110	150	30,0	35	40	40
132	180	35,0	40	45	45
160	220	45,0	55	55	60
200	272	50,0	60	60	65
250	340	60,0	65	65	70

Compensación al 90% de la potencia de vacío del motor

### Transformadores:

Al igual que los motores asíncronos, los transformadores, para mantener los campos magnéticos en su núcleo necesitan de grandes cantidades de energía reactiva.

Este tipo de máquinas, además, suelen estar permanentemente conectadas y, cuando la potencia activa demandada por la instalación baja, como ellos tienen una necesidad constante de reactiva, hacen que se alcancen valores del  $\cos \varphi$  muy malos.

Para el dimensionamiento del condensador a instalar se tendrán en cuenta las fórmulas indicadas en la tabla que acompaña a este texto y, que se ha escaneado del mismo catálogo que la anterior.

Aunque como consejo, se recomienda instalar un condensador fijo del orden del 4% ó 6% de la potencia aparente nominal del transformador. Conviene no instalar un condensador mayor del 10% de la potencia aparente del transformador porque pueden darse fenómenos de resonancias magnéticas.

	Fórmula de cálculo	Ej.: Transformador 630 kV.A, U <sub>cc</sub> = 6 %, I <sub>v</sub> vacío = 1 %
Q consumida en vacío	$Q_{\text{vacío}} = S_n \cdot I_o (\%)$	$Q_{\text{vacío}} = 630 \cdot 1 \% = 6,3 \text{ kvar}$
Q consumida en carga	$Q_{\text{carga}} = P S_n \cdot u_{\text{cc}} (\%)$	$Q_{\text{carga}} = 0,9^2 \cdot 630 \cdot 6 \% = 31 \text{ kvar}$
Q total	$Q_{\text{total}} = Q_{\text{vacío}} + Q_{\text{carga}}$	$Q_{\text{total}} = 6,3 + 31 = 37 \text{ kvar}$ Es decir 5,9 % de S <sub>n</sub>

Valores del  $\cos \varphi$  de los aparatos que se detallan.

Aparato		$\cos \varphi$	$\text{tg } \varphi$	
Motor asíncrono	carga a	0%	0,17	5,80
		25%	0,55	1,52
		50%	0,73	0,94
		75%	0,80	0,75
		100%	0,85	0,62
Lámparas incandescentes		1	0	
Tubos fluorescentes no compensados		0,5	1,73	
Tubos fluorescentes compensados		0,93	0,39	
Lámparas de descarga		0,4 a 0,6	2,29 a 1,33	
Hornos a resistencias		1	0	
Hornos a inducción con compensación incorporada		0,85	0,62	
Hornos a calentamiento dieléctrico		0,85	0,62	
Hornos de arco		0,8	0,75	
Máquinas de soldar a resistencia		0,8 a 0,9	0,75 a 0,48	
Electrodos monofásicos, estáticos de soldadura al arco		0,5	1,73	
Electrodos rotativos de soldadura al arco		0,7 a 0,9	1,02 a 0,48	
Transformadores-rectificadores de soldadura al arco		0,7 a 0,9	1,02 a 0,75	

## ILUMINACIÓN EFICIENTE EN LA INDUSTRIA

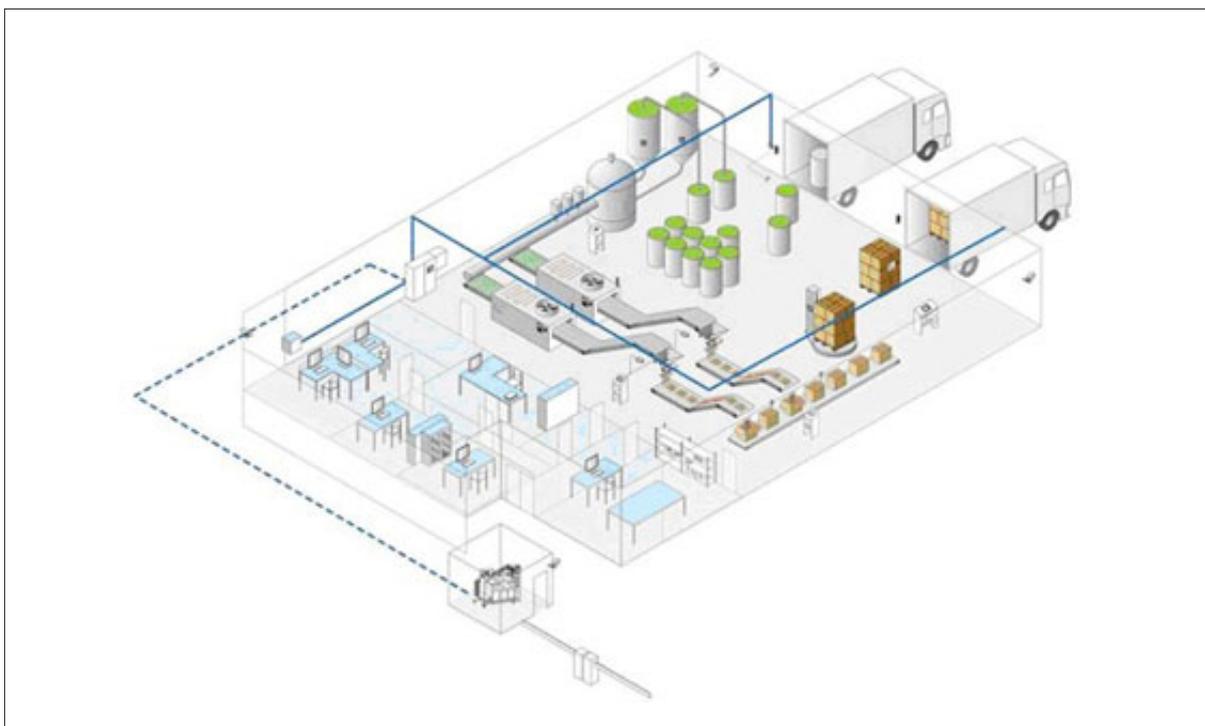


Fig. 353. Vista general de una industria.

El Alumbrado del sector industrial representa el 18% del total del consumo eléctrico en alumbrado.



*Más del 75% de la iluminación usada en la industria está basada en tecnologías antiguas e ineficientes.*

Una iluminación eficiente implica una mejora en la calidad.

El escenario energético y medio ambiental actual demanda cambios urgentes en los hábitos de consumo.

El alumbrado representa el 2% de la inversión total en industria y el 10% del consumo eléctrico.

Un alumbrado eficiente y de calidad proporciona beneficios económicos, productivos y medioambientales.

Hemos comentado que, sorprendentemente, a estas alturas de la evolución industrial, existen aún muchos ámbitos fabriles mal iluminados o de una forma poco eficiente.

Por ello hemos decidido dedicar un espacio a conocer cómo es la iluminación en la industria, para saber de qué depende y cómo podemos conseguir un ahorro importante adaptándola a la actividad que en ese momento se esté desarrollando.

### Luminotecnia para la industria.

Bien sabemos que la luz artificial es una cuestión reciente.

En 1857 empezó a tomarse en serio de la mano del Sr. Edison con el desarrollo de la primera bombilla.

A partir de ahí fue como un estallido de imaginación en todos los órdenes de la técnica, de la ciencia, de la investigación y en el deseo de vivir sin que la oscuridad nocturna fuese un impedimento para desarrollar las actividades habituales.



*Esa primera bombilla, muy poco eficiente, único exponente de modernidad en muchas viviendas de aquella época, dio paso a una gran familia que para describirla necesitamos espacio y tiempo, como con todo lo que es importante.*

*Y dio paso a una nueva disciplina, la **luminotecnia**.*

### Unidades luminotécnicas.



*Es obligado recordar las unidades básicas que se utilizan y conocer también cómo se puede calcular de forma muy rápida, casi empírica, el número de luminarias necesarias para cualquier espacio interior.*

Las unidades son siete, a saber:

- Flujo luminoso.
- Intensidad luminosa.
- Iluminancia.
- Luminancia.
- Eficiencia luminosa.
- Índice de rendimiento cromático.
- Temperatura de color.

### Flujo luminoso.

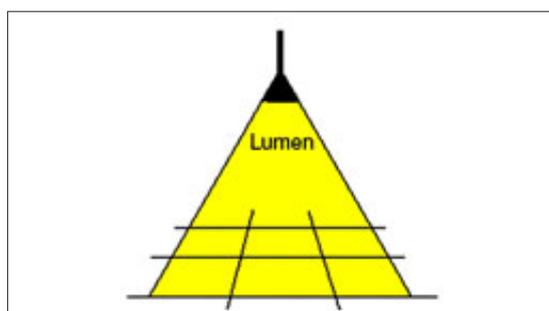


Fig. 354. Flujo luminoso.

Es la cantidad de luz que emite una fuente de luz en la unidad de tiempo.

Se representa como  $\Phi$  y la unidad es el lumen (lm).

En los catálogos de las fuentes de luz podemos apreciar este parámetro, fácilmente.

Símil hidráulico:

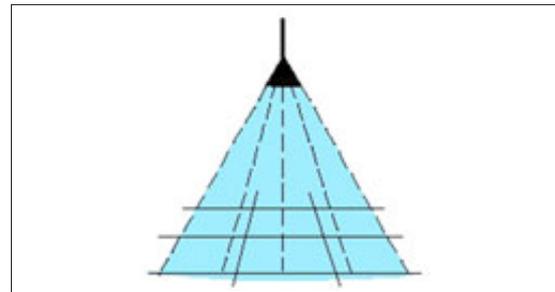


Fig. 355. Símil hidráulico del flujo luminoso.

Es la cantidad de agua que sale por un grifo en la unidad de tiempo.

### Intensidad luminosa.

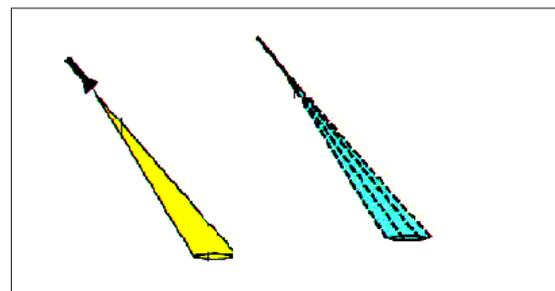


Fig.356. Intensidad luminosa y símil hidráulico.

Es la cantidad de luz que emite una fuente de luz en una determinada dirección y en la unidad de tiempo.

Se representa con la letra  $I$  y su unidad es la candela (cd).

Símil hidráulico:

El agua que sale de una manguera cuando se riega.

## Iluminancia.

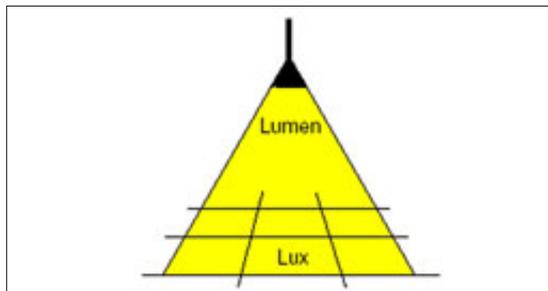


Fig. 357. Iluminancia.

También se conoce como nivel de iluminación.

Es el flujo luminoso por unidad de superficie.

Se representa con la letra E y la unidad es el lux:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

En donde  $\Phi$  son los lúmenes y S es la superficie en metros cuadrados.

Símil hidráulico:

El agua que llega al suelo de una ducha (por ejemplo).

## Luminancia.

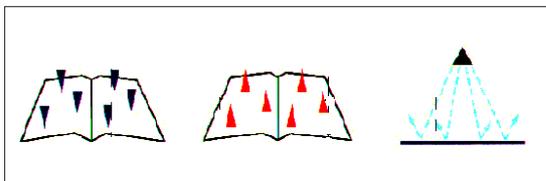


Fig. 358. Luminancia.

Se conoce como brillo y es la luz que procede de un objeto.

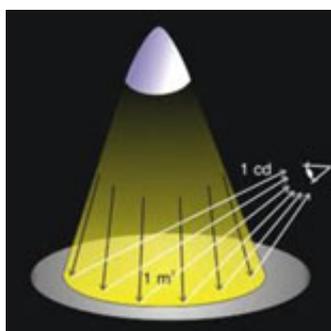


Fig. 359. Luminancia.

Símil hidráulico:

El agua que salpica en el suelo de una ducha (por ejemplo). Unidad:  $\text{cd}/\text{m}^2$

## Eficiencia luminosa.

Conocida también como rendimiento luminoso.

Son los lúmenes emitidos por una fuente de luz por unidad de potencia (incluyendo el equipo de encendido). Unidad:  $\text{lm}/\text{W}$

## Índice de rendimiento cromático.

Es la capacidad de una fuente de luz de reproducir fielmente los colores que ilumina.

Se mide en tantos por ciento y el valor máximo es 100%.

Se conoce como IRC y también como Ra.

Capacidad de reproducción de los colores:

Excelente o muy buena:  $\text{IRC} > 85$

Buena reproducción:  $70 < \text{IRC} < 85$

Reproducción aceptable;  $60 < \text{IRC} < 70$

Deficiente:  $< 20$

## Temperatura de color.

Considerado el cuerpo negro como radiante teóricamente perfecto, éste va cambiando de color a medida que vamos aumentando su temperatura, adquiriendo al principio el tono de un rojo sin brillo, para luego alcanzar el rojo claro, el naranja, el amarillo, el blanco, el blanco azulado, y finalmente el azul.

De esta idea nace la "Temperatura del Color", y se utiliza para indicar el color de una fuente de luz por comparación de esta con el color del cuerpo negro a una determinada temperatura.

Así, por ejemplo, el color de la llama de una vela es similar al de un cuerpo negro calentado a 1.800 K, por lo que se dice que la temperatura de color de la llama de una vela es de 1.800 K.

La temperatura de color solamente puede ser aplicada a aquellas fuentes de luz que tengan una semejanza con el color del cuerpo negro, como por ejemplo la luz del día, la luz de las lámparas incandescentes, la luz de las lámparas fluorescentes, etc.

El color de las lámparas de vapor de sodio, no coincide con el color del cuerpo negro a ninguna temperatura, por lo que ni pueden ser comparadas con él, ni se les puede asignar ninguna temperatura de color.

Seguidamente damos algunas temperaturas de color, con el fin de que nos familiaricemos con ellas:

Cielo azul: 20.000 K.

Cielo nublado: 7.000 K.

Luz solar directa: 5.000 K.

Luz de velas: 1.800 K.



Ahora que ya hemos hablado de unidades podemos detallar cómo se hace un cálculo muy, pero que muy, simplificado para saber el número necesario de luminarias a instalar en cualquier espacio:

Partimos de la fórmula de la iluminación:  $E = \Phi/S$

Hemos de considerar tres datos necesarios para seguir, que son, el nivel de iluminación que necesitamos, el tipo de luminaria que queremos ver instalada y por supuesto, la superficie del local.

Ejemplo: Si necesitamos 500 Lux y tenemos 30 m<sup>2</sup> de superficie en local y queremos colocar unas luminarias de empotrar de 4 x 18 W con equipo de alta frecuencia y tubos 18W/840 (1350 lm).

$$500 \times 30 = 15.000$$

$\Phi = 15.000$  lúmenes que tienen que proporcionar las luminarias elegidas.

Pero... ¡No tan rápido!

¿Por qué?

Porque hay que distinguir entre el flujo de lámparas (el que emiten) y el flujo útil (el que llega al plano de trabajo).

Necesitamos saber el flujo útil porque es el que determinará el número de luminarias... ¿Cómo?

Para ello multiplicaremos el paquete de lúmenes del producto (en este caso 15.000) por 1,5 ó 2 ó 2,5 según un análisis de:

\* Altura excesiva, superior a la normal.

\* Mala reflexión de las paredes, suelo y techo.

\* Otras circunstancias, como por ejemplo muebles oscuros.

Siguiendo con el ejemplo, imaginemos que la situación es mediana y por eso multiplicamos por 2.

$$\Phi \text{ Total necesario} = 15.000 \times 2 = 30.000 \text{ lúmenes}$$

¡Ya tenemos el flujo necesario!

Ahora lo dividimos por el que proporciona una luminaria (5.400) y tendremos el número total de luminarias:

$$5,5 \div 6$$

## Las fuentes de luz artificiales:

Se clasifican en tres grandes grupos:

**Incandescentes**, que se identifican por un filamento que al pasar la corriente se pone brillante.

**Halógenas**, que son incandescentes mejoradas con un gas halógeno, yodo normalmente, que captura y devuelve las partículas del filamento para que no se escapen hacia la ampolla y la ennegrezcan.



Atención: En 2009 la UE aprobó una regulación para mejorar la eficiencia de energía en los hogares (lámparas no direccionales). Regulación EC No 244/2009 (18/03/2009).

Básicamente consiste en la retirada progresiva de lámparas halógenas e incandescentes.

## Aplicación de la regulación.

Las lámparas en stock en la UE podrán ser vendidas (almacenes, tiendas) con posterioridad a la fecha de caducidad de cada tecnología (2009, 2010,....)... **sin límite.**

¿Por qué esta regulación en la UE?

La UE cree que se pueden obtener ahorros en el sector residencial importantes: globales 40TWh (la energía que necesitan al año 11 millones de hogares).

Individuales: 50€ por hogar.

Emissiones: 15 millones de toneladas/año

Inyección a la economía de la EU: 5-10.000 M€.

Las lámparas poco eficientes (incandescentes-halógenas) serán retiradas de 2009 a 2012.

Curioso: ¿Sólo en hogares?

¿Por qué no en otros sectores?

Sigamos con el resto de fuentes de luz.

**Descarga**, que son lámparas más evolucionadas, con más tecnología en su fabricación y funcionamiento y con una mayor eficiencia energética.

Las lámparas de descarga más conocidas son las fluorescentes.

De todas ellas vamos a hacer una pequeña reseña por orden, para tenerlas presentes.

## Los tubos fluorescentes.

De todas las fuentes de luz existentes son, sin duda, los más incomprensidos.

Dos matices justifican esta aseveración:

La necesidad de depender de un equipo de encendido (reactancia o balasto y cebador) y el **escaso rendimiento cromático proporcionado por los primeros tubos**, a raíz de su invención (1939).

Actualmente la fluorescencia ha dejado de ser sólo un recurso práctico, por aquello de que, sorprendentemente, da más luz que la incandescencia.

Tiene muchas aplicaciones, la paleta de tonos está más completa que nunca y los fabricantes

no reparan en empeño y en acciones para darla a conocer.

Ya no existe ninguna excusa para no utilizar, sin limitaciones, este sistema de iluminación.



*Actualmente no es necesario salir a la calle para observar el color de la tela que se compra.*

*Así cómo la televisión en color animó a los usuarios a prescindir de los receptores en blanco y negro,*

*hasta el punto de no aceptar uno ni regalado, lo mismo está ocurriendo con la gama 80 (trifósforo) de los tubos fluorescentes, pues quien prueba su luz, su brillo y la reproducción que permite de los colores, no desea otra cosa.*

*Recordemos el lema que los define: "más luz, de mejor calidad, durante más tiempo".*

*Si a esto añadimos las ventajas que proporciona la estabilidad del arco cuando en el equipo se incluyen balastos de alta frecuencia, para qué hablar.*

*Sin embargo aún queda mucho por hacer ya que, de vez en cuando, escuchamos alguna descalificación, fruto de un desconocimiento profundo.*

*Por eso, como en todos los órdenes de nuestra vida, la comprensión de las cosas, aún de forma somera, abre nuevos horizontes*

*Trataremos de justificar lo expuesto.*

## Evolución de los tubos fluorescentes.

Los primeros tubos tenían un diámetro de 75 mm.

Después éste se redujo a 38 mm, con unas potencias de 20 W (600 mm de largo, aprox.), 40 W (1200 mm de largo, aprox.) y 65 W (1.500 mm de largo, aprox.).

Se fabricaron otras potencias y formas (curvados, circulares, etc.) pero, como no podemos extendernos tanto, seguiremos ciñéndonos a esos tres modelos, que significan casi el 80% del consumo.

El rendimiento cromático era bajo, en torno de un 60%, obligando a lo ya comentado:

"Salir a la calle para observar el color real de la tela que se compraba..."

### Primera evolución, 1979-1980, dirigida al ahorro.

Se redujo el diámetro a 26 mm y las potencias, para la misma emisión de luz, bajaron a 18-36 y 58 W.

Con ello se produjo una mejora en el consumo del 10-12% aproximadamente.

El rendimiento cromático siguió más o menos en el mismo valor.

### Segunda gran evolución, 1980-1985.

Nace el tubo **trifósforo** gama 80 y 90, basado en la técnica tres fósforos.

El lema que le define es: más luz (un 15%), mejor calidad de luz, mayor duración, sin apenas degradarse al paso de las horas de estar encendido.

En su primera andadura los tubos **trifósforos** costaban el triple que los tubos ya existentes, a los que vamos a llamar **estándar** en adelante.

Y han llegado a tener tal protagonismo que la idea que persiste, en los foros luminotécnicos, es colocar tubos estándar sólo en espacios donde no sea necesario destacar ningún color, como por ejemplo en los garajes.

En el resto de aplicaciones se sugiere colocar sólo los nuevos tubos trifósforos.

Sin embargo...

Llevamos ya muchos años con los famosos tubos y a pesar de todo no son aún suficientemente conocidos.

Invitamos, a quien lo desee, a llevar a cabo el siguiente experimento.

Busquemos cualquier negocio, panadería, boutique, papelería, donde tengamos confianza y tengan instalados tubos lineales, que seguro serán estándar.

Animémosles a cambiarlos y el resultado será sorprendente:

15% de incremento del nivel de iluminación...

Colores más definidos...

En fin, ¡un cambio radical y sin mayor consumo!

### Recursos nemotécnicos para referenciar un tubo.



Fig. 360. Serigrafía de un tubo.

A los tubos se les cataloga por una serie de números y letras que aparecen en la serigrafía y que vamos a detallar.

En primer lugar el tubo de 36 mm de diámetro se le denomina T 12.

Es obligado decir que T viene de tubo, 12 se refiere al diámetro en octavos de pulgada:

$$12 \times 1/8 \text{ de pulgada} = 12 \times 1/8 \times 25,4 = \div 36 \text{ mm}$$

Al tubo de 26 mm de Ø se le denomina T8.

Al de 16 mm de Ø se le llama T5.

Al de 7 mm de Ø se le conoce como T2.

A continuación se indica la potencia.

Finalmente, se ponen tres cifras.

Veamos un ejemplo:

T8 58W/840

Tenemos un tubo de 26 mm de Ø, de 58 vatios.

El 8, gama 80, **trifósforo**, indica el rendimiento cromático ( $R_a$ ), >85%.

El 40 (añadiendo dos ceros) se refiere a la temperatura del color (tono).

**Temperatura de color** es la sensación de "calor" que nos produce una fuente de luz, como ya vimos.

Hemos oído hablar de "tono frío" o "tono cálido". Se mide en Kelvin, K, sistema SI.

Los tubos estándar se referencian así:

T8 18/54 Luz día.

T8 18/33 Blanco frío industrial.

Existen actualmente tubos trifósforos con los siguientes tonos:

2.700 K- La sensación que produce es muy cálida.

3.000 K- La sensación que produce es cálida.

4.000 K- La sensación que produce es intermedia (ni frío ni calor).

6.500 K- La sensación que produce es fría.

### Tubos trifósforos, gama 90.

Baste indicar que se utilizan en pruebas de imprenta, para contrastar colores, con lo que se entiende que su rendimiento cromático ( $R_a$ ), es mayor, superior al 90%.

Pero...su flujo luminoso es inferior, vaya lo uno por lo otro por lo que no se suelen utilizar en la iluminación de ambientes, salvo que tengan la misión de mejorar la calidad cromática de determinadas zonas.

### Tercera evolución, 1979-1980.

Nace el tubo compacto.

De entrada sólo se fabrica con la técnica trifósforo.

¡No existe la versión estándar!

Rápidamente se fabrican versiones de mayor potencia y mayor número de dobleces con el fin de conseguir un tamaño similar a las bombillas.

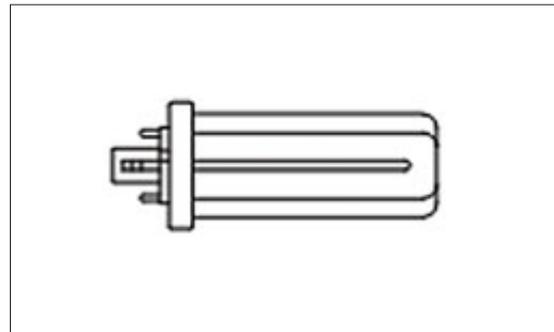


Fig. 362. Tubo compacto triple TCT.

### Cuarta evolución, 1990-2000.

Surge la denominación "bombilla ahorradora".

Consiste en un tubo compacto integrado, es decir que incorpora el equipo de encendido, electrónico para más señas y lleva un portalámparas convencional E 14 ó E 27.

Con lo cual, simplemente, se trata de sustituir la bombilla de 100 W, 1360 lúmenes, por una lámpara compacta electrónica de 20W, 1350 lúmenes.



Fig. 363. Bombilla ahorradora.

PEQUEÑAS LAMPARAS FLUORESCENTES							
Modelo	Potencia lámpara W	Intensidad de servicio A	Potencias		Flujo luminoso Lm	Dimensiones	
			Balasto W	Total W		$I_1$ mm	$I_2$ mm
5 W	5,5	0,180	4,5	10	250	82	105
7 W	6,9	0,175	4,3	11,2	400	112	135
9 W	8,7	0,170	4,1	12,8	600	144	167
11 W	11,4	0,155	3,4	14,8	900	212	235

Tensión de alimentación 220 V. Eficacia luminosa 45 a 79 Lm/W. Temperatura de color 2.700° K. Periodo de arranque 2 a 4 minutos.

Fig. 361. Tubos compactos TC.

Si añadimos los 10 años de supuesta vida, nos encontramos con un ahorro importante, la quinta parte de consumo, máxime si utilizamos varias a la vez.

Por tal motivo se auspició, por parte del MINER, en 1997, un programa conocido como DOMOLUZ, que animaba a los ciudadanos a sustituir unas por otras, primando la compra con una cantidad en metálico.

Tuvo la feliz consecuencia de la entrada masiva de esta compacta ahorradora en los hogares españoles que no habían sido muy hospitalarios con ella hasta la fecha, básicamente por tres motivos:

1. Por el precio, ya que al principio eran caras.
2. Porque la emisión luminosa, en el momento del encendido, no era la máxima, necesitándose un par de minutos para este fin.
3. Porque la escasa calidad de la luz de los tubos estándar incidía en el juicio de valor de los usuarios.

*Recordemos que... sólo se fabrican con la técnica trifósforo.*

*¡No existe la versión estándar!*

Hemos llegado al momento actual donde se conoce mucho más la técnica fluorescente pero ¡han pasado muchos años!

### El tubo compacto lineal TCL.

Por estas fechas aparece el tubo doblado compacto largo con las siguientes potencias:

18 W-24 W-36 W- 40 W -55 W y 80 W

Permiten que las luminarias con esos tubos entren en los huecos de 600 x 600, simplificando el montaje.

### El tubo T5.

Iluminó por vez primera no hace tantos años.

Tiene 16 mm de diámetro, como hemos visto.

Hay varios fabricantes que han apostado con fuerza por él, pero hay que tener en cuenta varios aspectos.

### ¿Qué tipos de tubos T5 existen?

Existen tubos T5 estándar HE y de "alto flujo". Estos últimos se denominados T5 HO, debido a sus siglas en inglés (High Output). Las potencias de los tubos estándar son 14W, 21W, 28W y 35W (dependiendo del largo del tubo). Los T5 HO tienen potencias de 24W, 39W, 54W y 80W.

Repetimos:

T5 FHE con las siguientes potencias y longitudes:

14W (549mm)

21W (849mm)

28W (1149mm)

35W (1449mm)

T5 FHO con las siguientes potencias y longitudes:



*Pero... ¡Atención! Aquí puede haber problemas porque hay tubos de la misma longitud y de potencia distintas.*

Veamos...

24W (549mm)

39W (849mm)

54W (1149mm)

49W (1449mm)

80W (1449mm)

Observemos:

549 mm para 14 y 24 W

849 mm para 21 y 39 W

1149 mm para 28 y 54 W

1449 mm para 35, 49 y 80W

Al tener un diámetro más reducido, que los tubos habituales, las luminarias pueden tener menor espesor y menor peso, lo que permitirá su montaje en techos de menor altura.

Tienen una temperatura de funcionamiento de 35°C frente a los 25°C del tubo T8, lo que hay que tener en cuenta para evitar corrientes de aire en el interior del techo.

### ¿Son los T5 amigables con el medio ambiente?

Si sumamos la mayor eficiencia del T5 en comparación al T8, con el hecho de que al ser mucho más pequeño reduce la cantidad de materiales utilizados en su fabricación, así como la presencia de elementos tóxicos.

Los gastos de transporte y el deshecho de tubos son menores y por ende generan un menor impacto al medio ambiente que los tubos T8.

Además de esto, los T5 tienen una capa de fósforo mejorada que previene que el mercurio sea absorbido en el fósforo y en el vidrio del tubo.

Un tubo T5 contiene menos de 5 miligramos de mercurio.

### ¿Necesitan los T5 un balasto diferente?

Sí. Los tubos T5 requieren de un balasto especial.

En la mayoría de los casos, los balastos de los T5 no funcionan con tubos T8 o T12.

Algunas empresas ofrecen balastos que operan con ambos tipos de tubos.

Los tubos T5 operan a frecuencias superiores a los 20 kHz.

La mayoría de los balastos de los T5 generan una distorsión armónica (THD) menor al 15%.

Esta leve distorsión previene potenciales desequilibrios en las redes eléctricas que pudiesen dañar transformadores u otros equipos.

En general, los balastos de los T5 tienen un factor de potencia superior 0,93.

### ¿El tubo T5 ilumina más que un tubo T8?

Los tubos T5 HO tienen un flujo luminoso mayor que un tubo T8, pero la luminosidad de un tubo T5 estándar es idéntica a la de un T8.

Sin embargo, el consumo en el T5 es menor, por lo cual la eficiencia lumínica (lm / W) es mejor en el T5.

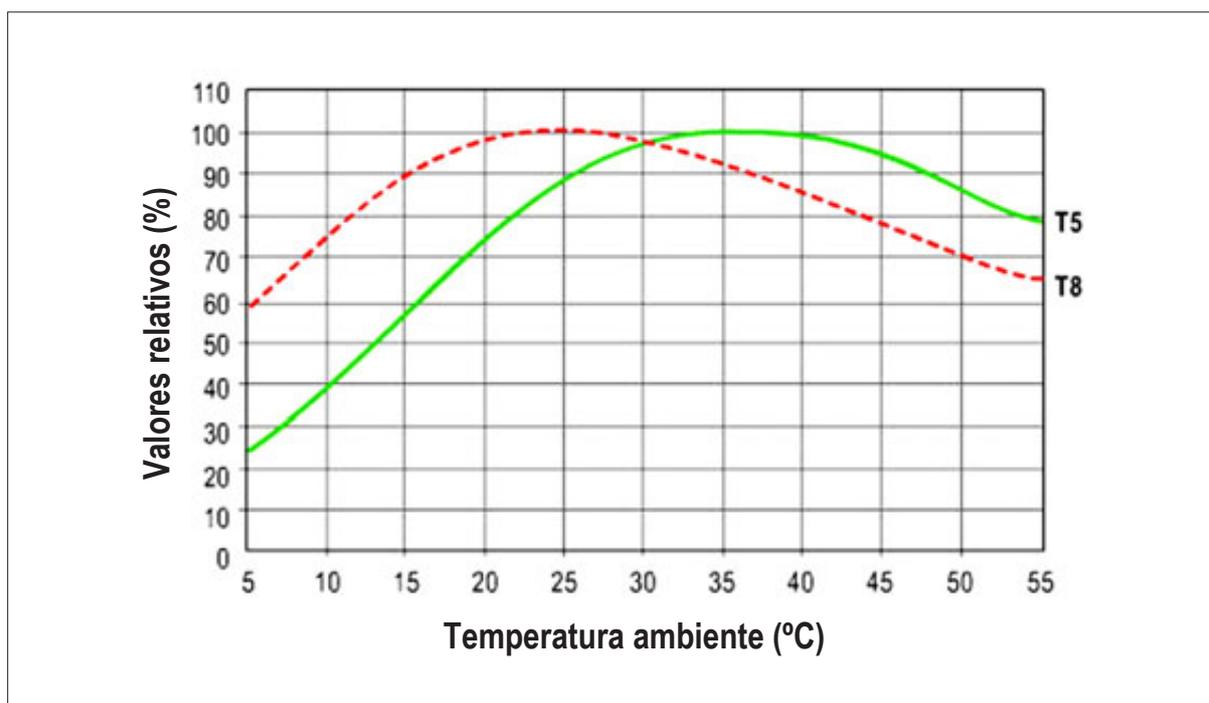


Fig. 364. Temperatura de funcionamiento del tubo T5 y T8.

Sin embargo, hay muchos factores que influyen en la luminosidad que genera al tubo.

El principal factor que afecta la luminosidad es la temperatura ambiente.

Por lo general, la luminosidad del tubo se especifica para una temperatura ambiental óptima para el tubo (35°C para tubos T5 y 25°C para tubos T8).

La siguiente tabla muestra la luminosidad de los tubos a diferentes temperaturas ambientes.

Se puede ver que la luminosidad del tubo T5 estándar es mayor al T8 para una temperatura ambiente de 35°C, pero es menor a 25°C.

Lamp Type	Lamp Power (W)	Temperature (°C)	Lamp Efficacy		Lamp-Ballast System Efficacy					
			Initial Light Output* (lm)	Efficacy (lm/W)	Manufacturer A**			Manufacturer B**		
					Input Power (W)	Ballast Factor	Efficacy (lm/W)	Input Power (W)	Ballast Factor	Efficacy (lm/W)
F28T5	28	25	2,610	93	63	0.90	75	62	1.00	84
		35	2,900	104	63	0.90	83	62	1.00	94
F54T5HO	54	25	4,400	81	117	1.00	75	117	1.00	75
		35	5,000	93	117	1.00	85	117	1.00	85
F32T8	32	25	2,950	92	59	0.88	88	59	0.90	90
		35	2,714	85	59	0.88	81	59	0.90	83

\* Initial lamp lumens are based on the Philips Lighting Company catalog, "SILHOUETTE T5, T5 HO & T5 Circular Fluorescent Lamp Technology Guide."

\*\* Manufacturers A and B are Universal Lighting Technologies and OSRAM SYLVANIA, Inc., respectively. The input powers and ballast factors (BF) are from their catalogs.

### Evolución reciente.

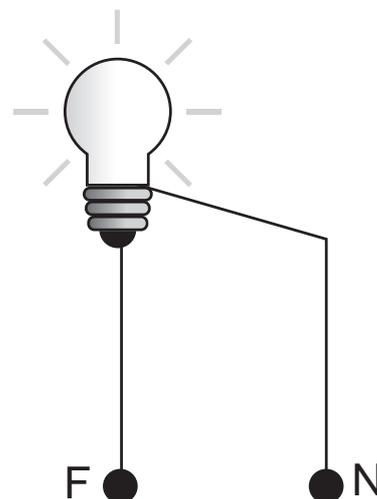
Los tubos Eco o Energy Saver.

Las potencias se reducen a 16, 32 y 51 vatios.

Y aparecen tubos con una duración de 42.000 y 75.000 horas.

### Equipos de encendido.

Conectar una bombilla es sencillo.



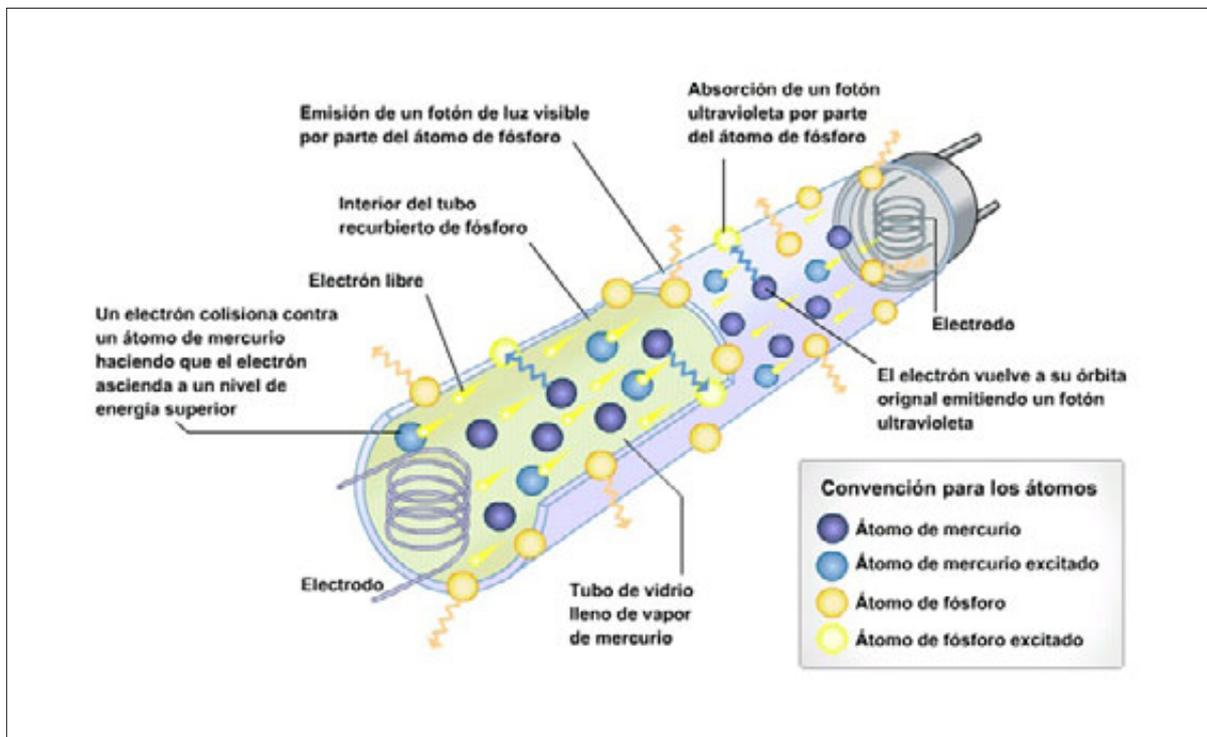


Fig. 365. Interior de un tubo fluorescente.

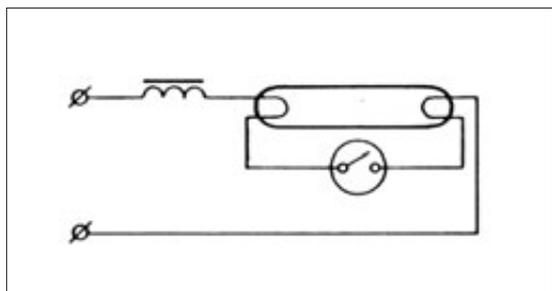


Fig. 366. Conectar un tubo.

Sin embargo, ante la conexión de un tubo podemos dudar.

Pero también es fácil.



*En lugar de un filamento hay dos y un concepto que a menudo se nos olvida:*

*definir un circuito como el paso de electrones a través de un conductor, debemos añadir que este conductor puede ser sólido, líquido o **gaseoso (plasma)**.*

En consecuencia podemos, una vez encendido el tubo, trazar una recta de electrodo a electrodo, y olvidar que existe el cebador porque ya no cumple ninguna misión, con lo cual se aprecia un circuito, **final**, similar al de la bombilla.

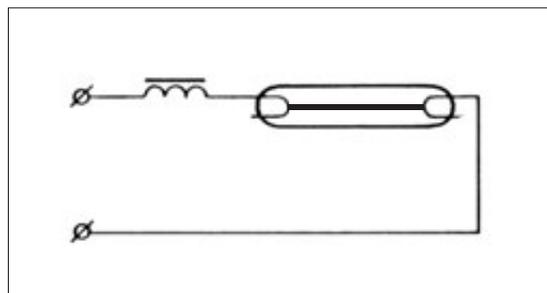


Fig. 367. Recorrido de la corriente por el tubo.

Aunque existe un elemento añadido, que es la reactancia.



Fig. 368. Reactancia electromagnética.

Que no es muy popular porque pesa.

Es fundamental para encender un tubo y mantenerlo encendido sin que se destruya.

Está formada por un núcleo de hierro y cerca de mil espiras de hilo de cobre esmaltado.

Y el cebador.

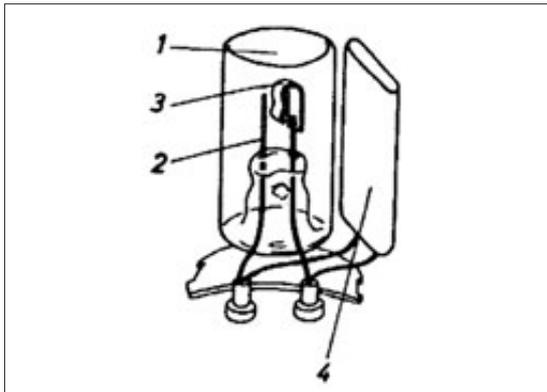


Fig. 369. Cebador convencional.

Que también es necesario en el encendido pero que luego no pinta nada, hasta la próxima solicitud.

### Cebador electrónico.



Fig. 370. Cebador electrónico.

Uno de los problemas que presenta un cebador convencional es el parpadeo que, inevitablemente, produce en cada encendido del tubo que le corresponde.

Esto no representa más que molestia visual.

Y se elimina con la sustitución del cebador convencional por uno electrónico.

También presenta un comportamiento curioso:

Más molestia visual.

Cuando un tubo está agotado e intenta encenderse una y otra vez, el cebador electrónico bloquea el circuito y no permite más intentos hasta que no se cambia el tubo en cuestión, evitando la molestia que el parpadeo significa.

La reactancia significa un valor añadido al consumo y puede llegar a representar un 25% más de éste, hasta el punto que un equipo del modelo 65 W de la segunda generación se convierte en un consumidor de 75 W ó más.

Por esta circunstancia y puesto que no se podía prescindir de este elemento, C.E.L.M.A., (Federación de Asociaciones Nacionales de fabricantes de luminarias y componentes eléctricos para luminarias en la Unión Europea) estableció un criterio mediante el cual se calificaba a las reactancias igual que a los electrodomésticos pero con otra secuencia de letras:

A1, A2, A3, B1, B2, C, D

Y su traducción es:

A1 Balastos electrónicos regulables.

A2 Balastos electrónicos con pérdidas reducidas.

A3 Balastos electrónicos.

B1 Balastos magnéticos con pérdidas muy bajas.

B2 Balastos magnéticos con bajas pérdidas.

C Balastos magnéticos con pérdidas moderadas.

D Balastos magnéticos con pérdidas muy altas.

Y en la serigrafía de la reactancia se deberá apreciar la siguiente expresión:  $EEI = C$

EEI es el índice de eficiencia energética.

Los modelos de eficiencia D dejaron de estar admitidos en el año 2003.

Los modelos de eficiencia C, lo dejaron en el 2005.

Observamos cómo se está llegando a unos límites muy estrictos del consumo accesorio.

A los modelos B2 y B1 se les conoce como bajas pérdidas y muy bajas pérdidas.

Los modelos A1, A2, A3 pertenecen a los balastos electrónicos y puede decirse que no consumen prácticamente nada porque añaden un rendimiento adicional al tubo al trabajar en alta frecuencia, por lo que son conocidos también como balastos de alta frecuencia.

¿Cómo son?

Exteriormente tienen este aspecto:



Fig. 371. Balasto electrónico.

Dentro:

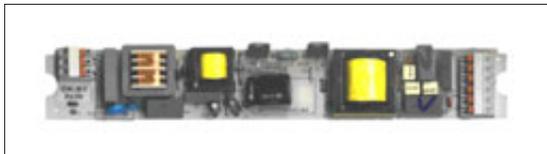


Fig. 372. Balasto por dentro.

Los balastos electrónicos, como los electromagnéticos, son dispositivos limitadores de la intensidad del arco eléctrico, que una vez cebado, va "in crescendo", evitando así la destrucción del tubo por avalancha de portadores de carga.

El uso de la electrónica da lugar a unas características que no se pueden conseguir con los balastos electromagnéticos como por ejemplo:

- Una mayor calidad de luz, al eliminarse el parpadeo, ya que el arco oscila pero lo hace de forma muy rápida y no se percibe.
- Por la misma razón se elimina el peligroso efecto estroboscópico.
- La vibración, baja pero perceptible, de las reactancias convencionales, desaparece.
- Pueden funcionar en corriente continua.
- Si una lámpara se agota, un mecanismo interno apaga inmediatamente el equipo, sin provocar molestos parpadeos.
- **Ahorro de energía de hasta un 25 %.**
- No necesita cebadores ni condensadores.

- **Alargan la vida de las lámparas con el consiguiente ahorro. Esto se debe a que al funcionar a menor intensidad se desgastan menos los cátodos y las sustancias fluorescentes de las paredes del tubo.**
- Incorporan filtros de armónicos.
- Posibilitan una disminución de la fatiga visual.
- **Disipan muy poca energía en forma de calor con el consiguiente ahorro en aire acondicionado.**
- Hay modelos que permiten regular el flujo luminoso, incluir automatismos o incluso informatizar el sistema.
- Están protegidos contra transitorios y trabajan en un amplio rango de tensión.
- La lámpara funciona más cerca de su temperatura óptima de servicio.

Existen varios tipos de balastos electrónicos:

- De encendido instantáneo: Producen el encendido de la lámpara en un tiempo prácticamente instantáneo, sin precalentamiento previo de los cátodos.

Se recomienda su uso en zonas donde no se produzcan más de tres encendidos al cabo del día.

- De encendido con precalentamiento: Se produce el encendido en un tiempo de aproximadamente un segundo.

Previamente los cátodos de la lámpara son precalentados, lo que origina un encendido suave pero no instantáneo.

- Regulables: Permiten la variación de la intensidad luminosa desde el 1 %.

El encendido es suave con precaldeo.

Pueden ser analógicos o digitales.

En los analógicos la regulación es por señal 1-10 V.

Los digitales permiten gestionar el punto de luz y dirigirlo de nuevo, por programación, sin tocar la instalación.

Conclusión:

¿Cómo interpretar lo leído?

La incorporación del tubo fluorescente a la gama de fuentes de luz significa la posibilidad de su utilización en la mayor parte de iluminaciones existentes tanto de interior como de exterior.

Desde el primer momento destacó por un menor consumo.

Además de ser más eficiente que las lámparas incandescentes y halógenas, el tubo molesta menos al mirarlo fijamente, cosa muy importante, por aquello de poder estar muchas horas en el ámbito de su luz.

Gracias a su integración en luminarias, incluso pequeñas con tubos compactos, podemos iluminar espacios de una forma racional.

La última generación de tubos T5 autoriza su anexión a luminarias de muy poco grosor, que permiten acoplarse a falsos techos de menor profundidad.

La utilización de balastos regulables permite un ahorro hasta del 75% gracias a que, en presencia de la luz natural, adecuarán el nivel de iluminación al valor prefijado, como por ejemplo 500 lux.

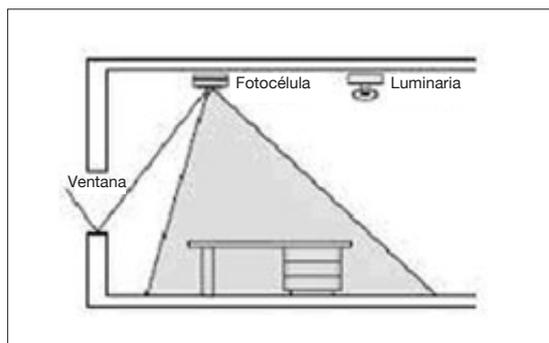


Fig. 373 Célula de control de la luz artificial en función de la luz que entra por las ventanas.

### Utilidad de lo aprendido sobre tubos fluorescentes.

Prácticamente en todas las industrias nos encontramos con una zona dedicada a oficinas en la que suele verse instaladas luminarias fluorescentes.

La envergadura de estas oficinas suele estar relacionada con la actividad fabril de una forma directamente proporcional: a mayor actividad, mayor número de operarios y mayor superficie para las oficinas, en general.

Pasos a considerar para la mejora del alumbrado.

- Identificar la situación actual de la instalación:
  1. Tecnologías existentes.
  2. Calidad del alumbrado actual (nivel de luz, reproducción cromática, etc.)
  3. Necesidades reales de iluminación.
- Analizar las posibilidades de mejora:
  1. Potenciales de ahorro energético.
  2. Posibilidades de ahorros de mantenimiento.
  3. Incremento de calidad del alumbrado.
- Proponer la soluciones de renovación (alternativas):
  1. Cambio de lámpara.
  2. Cambio de lámpara y equipo.
  3. Cambio de lámpara, equipo y sistemas de control.
  4. Cambio de luminaria.
  5. Cambio de luminaria y sistemas de control.

### Exigencias para elaborar el estudio.

1. Planos de planta (CAD).
2. Distribución actual de las luminarias de planta.
3. Alturas de montaje de las luminarias.
4. Tipos de lámparas y equipos.
5. Niveles de luz actuales.
6. Niveles requeridos.
7. Precio KWh.
8. Horarios de uso.

### Costes a considerar en el proyecto.

- Inversión inicial:
  1. Coste luminarias +Equipos + Lámparas.
  2. Coste de la instalación.
- Coste sustitución de las lámparas.
- Coste de la energía.
- Coste de mantenimiento:
  1. Coste de la mano de la mano de obra.
  2. Costes operacionales.
  3. Costes por alteración o interrupción de la producción.