TEMA 56.

POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA:

- **<u>Tecnología eléctrica</u>**. Editorial McGraw Hill. Agustín Castejón, Germán Santamaría. 1993.
- **<u>Electrotecnia</u>** <u>Fundamentos teóricos y prácticos</u>. Editorial McGraw Hill. AA. VV. 1996.

1. INTRODUCCIÓN.

Debido a la naturaleza ondulatoria de la corriente alterna y a las características resistivas de los receptores eléctricos, la intensidad de corriente que circula por un circuito eléctrico alimentado por una tensión alterna, experimenta un cierto desfase con respecto a la tensión aplicada.

Este desfase entre tensión e intensidad se representa con la letra griega φ y corresponde al ángulo que existe entre el vector tensión y el vector intensidad en la representación gráfica vectorial de estas dos magnitudes.

Si la impedancia total del circuito tiene carácter inductivo, la intensidad, $\boldsymbol{I}$, que lo recorre irá desfasada un cierto ángulo, φ , en retraso respecto de la tensión aplicada $\boldsymbol{U}$.

Si, por el contrario, nos encontramos ante un circuito capacitivo, la intensidad que circulará por él, irá en adelanto respecto de la tensión aplicada.

En cualquier caso, este ángulo de desfase entre tensión e intensidad, va a influir directamente en la potencia absorbida por el circuito, ya que da lugar a la aparición de una potencia, llamada **reactiva**, que no produce efecto útil alguno y que se suma (vectorialmente) a la potencia **útil**, haciendo que la potencia total absorbida por el circuito se eleve, con los consiguientes perjuicios que ello ocasiona: aumento de la intensidad de corriente que circula por el circuito y por tanto de la sección de los conductores, aumento de las pérdidas por efecto Joule, aumento de la caída de tensión, aumento de la factura eléctrica …

Podemos decir que la potencia útil absorbida por el circuito será igual a la potencia total multiplicada por un factor numérico menor que la unidad. Este factor numérico recibe el nombre de **factor de potencia** y depende directamente del ángulo de desfase, $\boldsymbol{\varphi}$, ya que como veremos más adelante el factor de potencia es igual al ***cos*** $\boldsymbol{\varphi}$.

Por tanto, en un circuito eléctrico alimentado por corriente alterna, nos interesará corregir este factor de potencia de forma que su valor sea lo más próximo posible a la unidad ya que de esta forma la totalidad de la potencia absorbida por el circuito sería potencia útil o activa.

CORRIENTE ALTERNA SENOIDAL.

2.1. Producción de la corriente alterna senoidal.

La corriente alterna se genera al girar una espira conductora en el seno de un campo magnético. Supongamos que la espira, formada por un hilo conductor, encierra una superficie S, que la inducción del campo magnético es B. y supongamos también que esta espira gira con velocidad angular constante, ω .

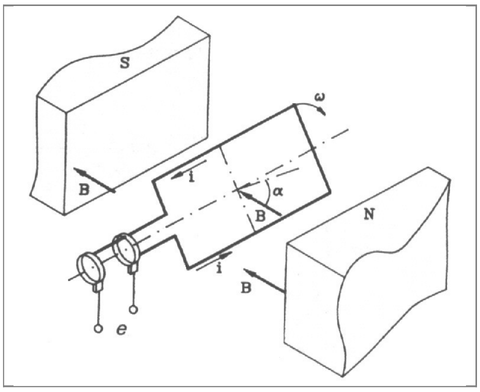

Figura 1. Producción de corriente alterna.

El flujo magnético, ϕ , a través de la espira irá variando en función de las diferentes posiciones que vaya tomando ésta en el seno del campo magnético:

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos\ \alpha \qquad [1]$$

α es el ángulo que forma la normal a la superficie de la espira con la dirección de las líneas de inducción magnética B.

En función de la velocidad angular con la que gira la espira, ω , y el tiempo transcurrido, **t**, el ángulo α valdrá:

$$\alpha = \omega \cdot t$$

De forma que la expresión [1] quedará:

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos\ \omega t$$

Según la ley de la **inducción electromagnética de Faraday**, al variar el flujo magnético a través de la espira, se induce en ésta una f.e.m., e, que será proporcional a esta variación:

$$e = \frac{d\phi}{dt} \qquad \rightarrow \qquad e = B \cdot S \cdot \omega \text{sen}\ \omega t$$

El producto $B \cdot S \cdot \omega$ es una constante, ya que B, S y ω son constantes. Esta constante representa el valor máximo de la tensión, vamos a llamar e_m[1] a esta constante. El valor de la f.e.m. quedará definitivamente como:

$$e = e_m \cdot \text{sen}\ \omega t \qquad [2]$$

[1] Según la norma UNE 5-100-87/5, para magnitudes senoidales, los valores **instantáneos** se designan con letras minúsculas, los valores **eficaces** con letras mayúsculas y los valores **máximos** con letras minúsculas con el subíndice *m.*

El valor del $\operatorname{sen} \omega{\cdot}t$ puede variar entre los valores 1 y –1 pasando por 0, por tanto el valor de ***e*** será también variable y variará entre un valor máximo positivo y un valor máximo negativo, que serán respectivamente: e_m y $-e_m$

Si representamos gráficamente, en un eje de coordenadas, los valores de esta f.e.m. con respecto al tiempo obtenemos una gráfica como esta:

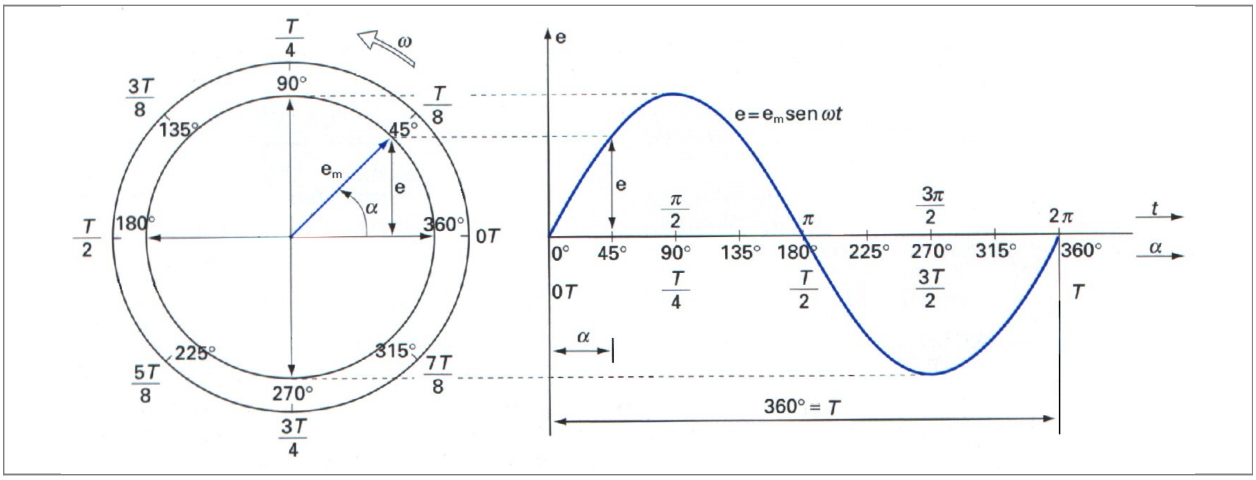

Figura 2. Representación gráfica de una onda alterna senoidal en forma **vectorial** y **cartesiana**.

Como vemos los distintos valores que va tomando la f.e.m. nos describen una onda alterna senoidal, que se repite a lo largo del tiempo de forma indefinida. Otro modo de representar el valor de esta f.e.m. es de forma vectorial, en esta, se supone un vector de módulo $\boldsymbol{e_m}$ que gira sobre su origen en sentido antihorario con una velocidad angular constante $\boldsymbol{\omega}$. El valor instantáneo de la f.e.m. ***e*** viene dado por la proyección de este vector sobre el eje de ordenadas.

La posición que va ocupando el vector $\boldsymbol{e_m}$ en cada momento se denomina **fase** y el ángulo que forma con el eje de abcisas, medido en el sentido de giro del vector, se denomina **ángulo de fase (α)**.

El tiempo que tarda el vector en completar una vuelta, o ciclo, recibe el nombre de **periodo** (**T**) y la cantidad de vueltas o ciclos que completa en la unidad de tiempo (1s) se denomina **frecuencia** (***f***).

La velocidad angular, $\boldsymbol{\omega}$, con la que gira el vector $\boldsymbol{e_m}$ se denomina, en electricidad, **pulsación** y en función de la frecuencia, ***f***, tiene un valor de: $\omega = 2{\cdot}\pi{\cdot}f$

2.2. Valores característicos de una onda alterna senoidal.

La expresión [2] nos define matemáticamente el valor de la f.e.m. en función del tiempo transcurrido, t. Este valor se denomina **valor instantáneo**. Pero este valor instantáneo no es práctico a la hora de realizar cálculos y mediciones eléctricas, ya que los aparatos de medida no detectan los valores instantáneos[2], sino los valores efectivos o **valores eficaces**.

Estos valores eficaces se definen como el promedio cuadrático en un ciclo y su valor es $1/\sqrt{2}$ del **valor máximo** de esa magnitud. Los valores eficaces de la tensión y la intensidad serán:

[2] El único aparato capaz de proporcionar valores instantáneos es el osciloscopio.

$$E = \frac{e_m}{\sqrt{2}} \qquad I = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

3. POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA MONOFÁSICA.

La corriente alterna monofásica es aquella en la que existe una sola fase, es decir, un único conductor activo o de fase. Para que el circuito esté cerrado, y pueda circular la corriente eléctrica, necesitamos otro conductor por el que pueda "retornar" la corriente. Este otro conductor, que teóricamente no está sometido a tensión (0V), se denomina conductor **neutro**.

Cuando a un circuito eléctrico le aplicamos una tensión alterna senoidal pueden ocurrir dos casos: que las ondas de tensión e intensidad estén en fase y que no lo estén. Veamos que ocurre en cada caso.

3.1. Potencia en un circuito sin desfase entre la tensión y la intensidad.

Esta situación se da exclusivamente en circuitos en los que los receptores tienen únicamente resistencia óhmica (o se ha corregido perfectamente el desfase entre tensión e intensidad).

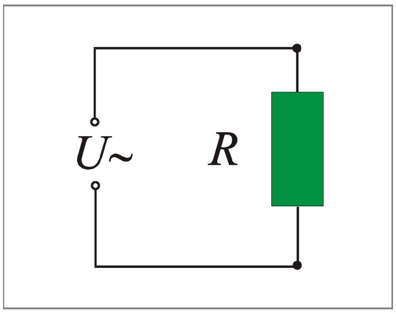

Figura 3. Circuito resistivo puro.

Suponiendo un circuito en el que como único receptor tenemos una resistencia de valor ***R***. Al aplicar una tensión alterna, ***u***, se establecerá en el circuito una intensidad de corriente que, según la ley de Ohm, tendrá un valor instantáneo igual a:

$$i = \frac{u}{R} \qquad \rightarrow \qquad i = \frac{u_m \cdot \text{sen}\ \omega t}{R}$$

Llamando i_m al valor $\frac{u_m}{R}$ tendremos que el valor instantáneo de la intensidad será: $i = i_m \cdot sen\ \omega t$ [3]

En este caso, la intensidad que recorre el circuito es otra onda alterna senoidal, que está **en fase**[3] con la onda de la tensión aplicada, es decir, las dos ondas pasan simultáneamente por sus valores máximos positivos, cero y máximos negativos.

[3] Están en fase porque ambos valores, u e i, dependen del $sen \omega t$.

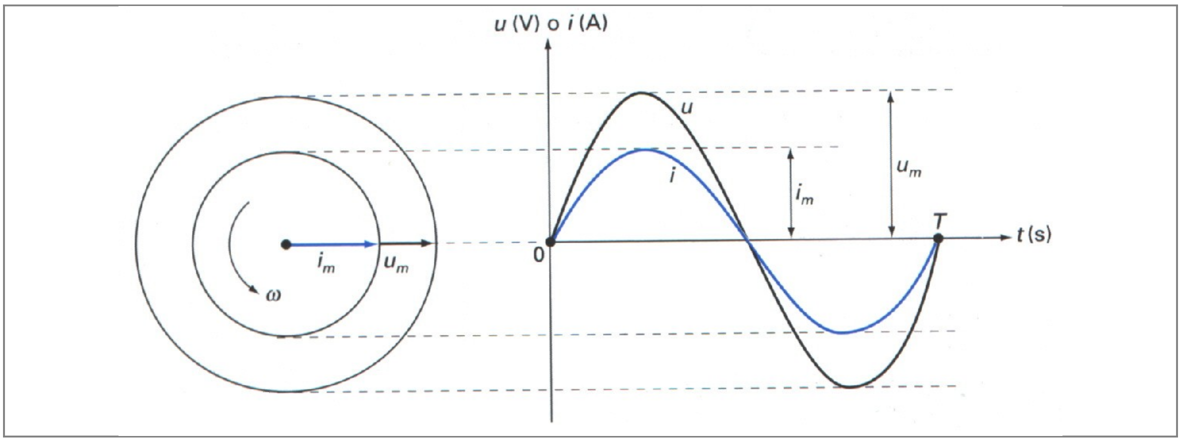

Figura 4. Representación gráfica de las ondas de tensión e intensidad, que están en fase.

En este caso los valores eficaces de la tensión y la intensidad, en forma vectorial, quedarán así:

$$\vec{E} = E_{0°} \qquad \vec{I} = I_{0°}$$

Potencia

La potencia instantánea vendrá dada por el producto de los valores instantáneos de la tensión y la intensidad:

$$p = u \cdot i$$

$$p = (u_m \cdot \text{sen } \omega t) \cdot (i_m \cdot \text{sen } \omega t)$$

$$p = u_m i_m \text{ sen}^2 \omega t$$

$$p = p_m sen^2 \omega t \qquad [4]$$

Según la expresión [4] la potencia instantánea es proporcional al $sen^2 \omega t$, por lo que sólo tendrá valores positivos.

La figura 5 nos muestra la representación gráfica de la ecuación [4] junto a los valores instantáneos de la tensión, ***u***, y la intensidad, ***i***.

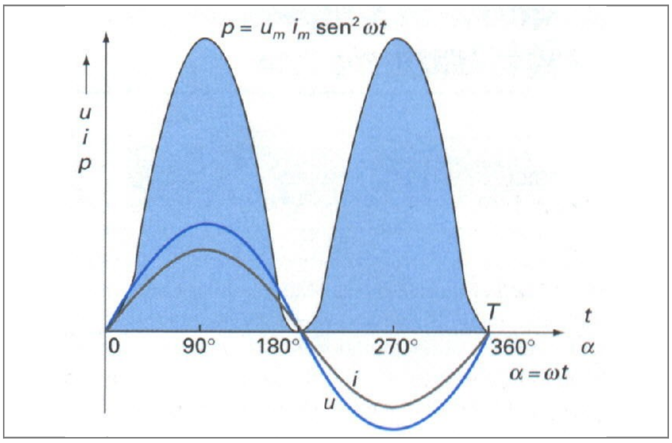

Figura 5. Potencia en un circuito resistivo puro.

En este circuito la potencia siempre tiene valores positivos, esto quiere decir que toda la potencia ofrecida por la fuente de alimentación es consumida por la resistencia[4].

En corriente alterna, el cálculo práctico de la potencia se realiza usando los valores eficaces y operando en forma vectorial.

[4] Suponiendo despreciables la pérdidas de potencia en los conductores.

La potencia total se representa con la letra ***S*** y, por definición, es igual al producto de la tensión por la intensidad (en forma vectorial). Esta **potencia total** también recibe el nombre de **potencia aparente**, y se mide, en corriente alterna, en **VA** (voltamperios = voltios x amperios).

En este circuito la potencia total *consumida* vendrá dada por:

$$\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I} = U_{0^\circ} \cdot I_{0^\circ} = (U \cdot I)_{0^\circ} \Rightarrow (U \cdot I) + j0 \qquad [5]$$

La **potencia total** (***S***)**,** expresada en forma binómica [5], tiene dos componentes: una real y otra imaginaria. La parte real representa la potencia que tiene efectos útiles, que realiza un trabajo efectivo, y recibe el nombre de **potencia activa** (***P***). Esta potencia se mide en **W** (vatios). La parte imaginaria representa un tipo de potencia que no tiene efectos útiles aparentes, y recibe el nombre de **potencia reactiva** (***Q***). Esta potencia reactiva se mide en **VAR** (voltamperios reactivos).

La expresión [5] nos dice que, en este circuito, toda la potencia es **potencia activa**.

3.2. Potencia en un circuito con desfase entre la tensión y la intensidad.

Esta situación se da cuando en un circuito existen receptores o elementos que tienen carácter inductivo (bobinas) y/o capacitivo (condensadores). Además puede existir o no resistencia óhmica. Veamos que ocurre en cada caso.

Circuito inductivo puro.

Si a un circuito con un elemento **inductivo puro** (con un coeficiente de autoinducción ***L***) le aplicamos una tensión alterna, ***u***, se originará en este elemento (una bobina, por ejemplo) una fuerza contraelectromotriz, ***ε '***, que se opondrá a la variación de la corriente, ***i***.

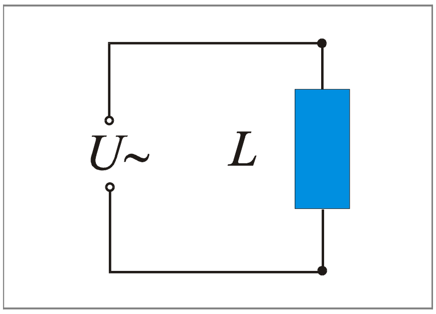

Figura 6. Circuito inductivo puro.

Suponiendo que $i = i_m \cdot \text{sen } \omega t$ [6]

tendremos que: $\varepsilon' = L\dfrac{di}{dt} = \omega L i_m \cos \omega t$

Aplicando la ecuación de las mallas al circuito y como ***R*** = 0

$$\Sigma\varepsilon = \Sigma R \cdot I \Rightarrow u - \varepsilon' = 0$$

$$u = \varepsilon' = \omega L i_m \cos \omega t$$

$$u = \omega L i_m sen\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \qquad [7]$$

De la comparación de las expresiones [6] y [7] se deduce que la tensión, ***u***, está adelantada $\pi/2$ radianes (90º) respecto de la intensidad, ***i***.

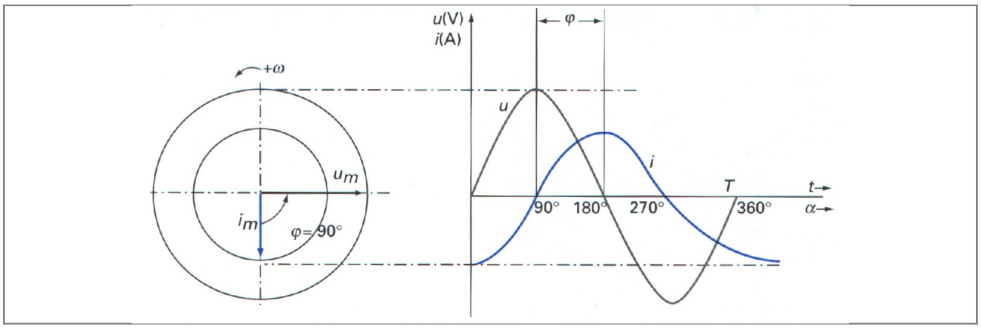

Figura 7. Ondas de la tensión e intensidad en un circuito inductivo puro.

Según la expresión [7] el valor de la tensión máxima será igual a:

$$u_m = \omega L i_m \qquad \rightarrow \qquad i_m = \frac{u_m}{L\omega}$$

Como los valores máximos y los valores eficaces son proporcionales podemos escribir que:

$$I = \frac{U}{L\omega} \qquad [8]$$

La magnitud $L\omega$ representa la *dificultad* que ofrece el circuito a la circulación de la corriente eléctrica alterna, recibe el nombre de **reactancia inductiva** y se representa por $\boldsymbol{X_L}$.

$$X_L = L\omega \qquad [9]$$

La reactancia inductiva se mide en **Ω** [5] y depende de la frecuencia de la corriente alterna, su valor crece con ésta. Para frecuencias bajas puede considerarse que se produce un cortocircuito.

La expresión [9] nos da el valor del módulo de $\boldsymbol{X_L}$ pero esta magnitud tiene carácter vectorial, así como $\boldsymbol{U}$ e $\boldsymbol{I}$. La forma vectorial de la reactancia inductiva la podemos obtener de la expresión [8], que, de forma vectorial, no es otra que la **ley de Ohm** generalizada para corriente alterna, así tendremos que:

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{X}_L} \qquad \rightarrow \qquad \vec{X}_L = \frac{\vec{U}}{\vec{I}} = \frac{U_{0^\circ}}{I_{-90^\circ}} = \left(X_L\right)_{90^\circ} = \left(L\omega\right)_{90^\circ} \qquad [10]$$

Potencia

La potencia instantánea, en este circuito, vendrá dada por:

$$p = u \cdot i \qquad \rightarrow \qquad p = \left(u_m \cos \omega t\right)\left(i_m sen\, \omega t\right) \qquad \rightarrow \qquad p = \frac{p_m}{2} sen\, 2\omega t \qquad [11]$$

En la figura 8 se muestra la

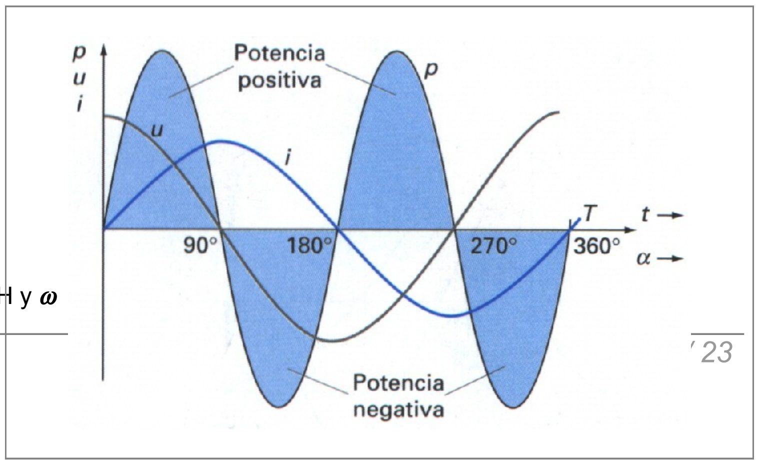

Figura 8. Potencia en un circuito inductivo puro.

5 Siempre que $\boldsymbol{L}$ venga expresada en H y $\boldsymbol{\omega}$

representación gráfica de la función [11]. La frecuencia de la potencia instantánea es el doble ($2\omega\ t$) que la de la tensión, o la de la intensidad.

La potencia tiene zonas positivas, y otras zonas negativas. La potencia media disipada en el circuito, en un ciclo, es nula.

La potencia total del circuito, en forma vectorial, será:

$$\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I} \qquad \rightarrow \qquad \vec{S} = U_{0^\circ} I_{-90^\circ} = (U \cdot I)_{-90^\circ} \Rightarrow 0 - j(U \cdot I) \qquad [11]$$

En este caso, la potencia total, solamente tiene componente imaginaria, que representa a la **potencia reactiva** ($\boldsymbol{Q}$).

Circuito capacitivo puro.

Se trata de un circuito en el que tenemos un condensador ideal, sin ningún tipo de resistencia óhmica. En corriente continua, por este circuito, sólo circulará corriente en el momento de la conexión y de la desconexión al generador, es decir, mientras se está cargando o descargando el condensador.

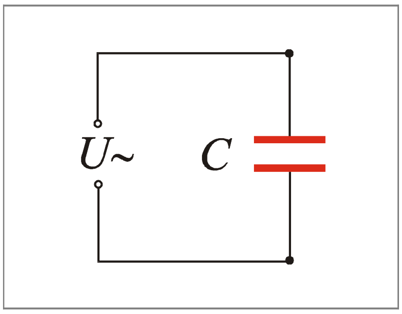

Figura 9. Circuito capacitivo puro.

En corriente alterna, por la propia naturaleza alterna de la tensión, el condensador se irá cargando y descargando continuamente con la misma frecuencia de aquella, esto hará que por el circuito circule una corriente eléctrica alterna de intensidad, $\boldsymbol{i}$,

Recordando el concepto de intensidad de corriente, $i = \frac{dq}{dt}$, y el de capacidad de un condensador, $C = \frac{Q}{U}$, podemos decir que: $i = \frac{dq}{dt} = C\frac{du}{dt}$

Considerando que $u = u_m\, sen\ \omega t$ y operando tendremos que:

$$i = \omega C u_m \cos \omega t = \omega C u_m\, sen\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \qquad [12]$$

De la expresión [12] se deduce que la corriente, $\boldsymbol{i}$, está adelantada $\pi/2$ rad (90º) respecto a la tensión, $\boldsymbol{u}$.

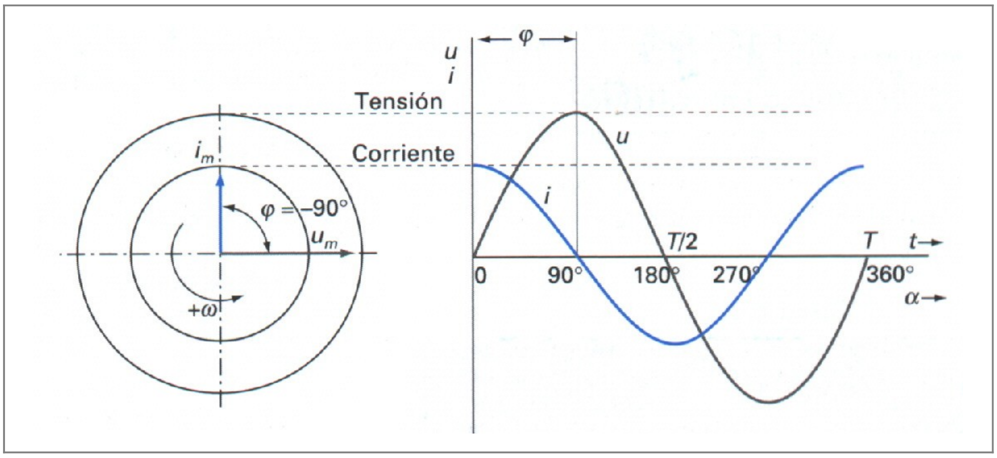

Figura 10. Tensión e intensidad en un circuito capacitivo puro.

A partir de la expresión [12] podemos escribir que: $i_m = \omega C u_m$

Como los valores eficaces son proporcionales a los valores máximos podemos decir que:

$$I = \omega C U \qquad \rightarrow \qquad I = \frac{U}{\frac{1}{C\omega}}$$

La magnitud $\frac{1}{C\omega}$ representa la *dificultad* que ofrece el circuito a la circulación de la corriente eléctrica alterna, recibe el nombre de **reactancia capacitiva**, se representa por X_C y se mide en **Ω** [6].

$$X_C = \frac{1}{C\omega} \qquad [13]$$

La reactancia capacitiva, en forma vectorial y aplicando la ley de Ohm para corriente alterna, queda de la siguiente forma:

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{X}_C} \qquad \rightarrow \qquad \vec{X}_C = \frac{\vec{U}}{\vec{I}} = \frac{U_{0^\circ}}{I_{90^\circ}} = \left(X_C\right)_{-90^\circ} = \left(\frac{1}{C\omega}\right)_{-90^\circ} \qquad [14]$$

Potencia

La potencia instantánea, en este circuito, vendrá dada por:

$$p = u \cdot i \quad \rightarrow \quad p = \left(u_m \, sen\, \omega t\right)\left(i_m \cos \omega t\right) \quad \rightarrow \quad p = \frac{p_m}{2} sen\, 2\omega t$$

La figura 11 representa la potencia instantánea.

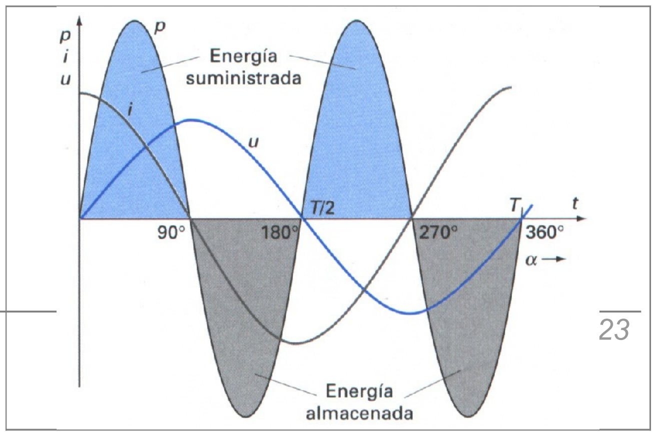

Figura 11. Potencia en un circuito capacitivo puro.

[6] Siempre que C venga en F y ω en rad·s^{-1}.

La frecuencia de la potencia instantánea es el doble que la de la tensión, o la de la intensidad.

La potencia instantánea presenta valores positivos y valores negativos. El promedio de la potencia en un ciclo es cero.

La potencia total del circuito, vendrá dada por:

$$\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I} \quad \rightarrow \quad \vec{S} = U_{0^\circ} I_{90^\circ} = (U \cdot I)_{90^\circ} \Rightarrow 0 + j(U \cdot I) \qquad [15]$$

En esta ocasión tenemos, como en el circuito anterior, solamente potencia reactiva, pero ahora es de **signo contrario** a la que se producía en aquel.

3.3. Triángulo de potencias.

Los tres tipos de potencia que hemos visto que existen en corriente alterna, ***aparente***, ***activa*** y ***reactiva***; se pueden representar gráficamente en forma vectorial. La representación de estas potencias, para un circuito en el que existan varios elemento de los estudiados (R,L,C), tiene forma de triángulo rectángulo; es el llamado **triángulo de potencias**.

Veamos esto en un circuito, ya más real, en el que tenemos reunidos los tres tipos de componentes que hemos estudiado anteriormente de forma separada.

Las posibilidades de conexión (serie, paralelo y mixto) entre estos elementos son prácticamente ilimitadas, por tomar un ejemplo concreto a estudiar, vamos a suponer que estos elementos están conectados en serie.

Al conectar el circuito de la figura 12 a una tensión alterna, U, se establecerá en él una corriente eléctrica, también alterna, I. Esta corriente recorre todos los elementos del circuito, es decir, es común a todos ellos; por lo tanto la vamos a tomar como referencia a la hora de trabajar de forma vectorial y vamos a suponerla en el origen de fases. Por tanto la expresión vectorial de la intensidad será:

$$\vec{I} = I_{0^\circ} \qquad [16]$$

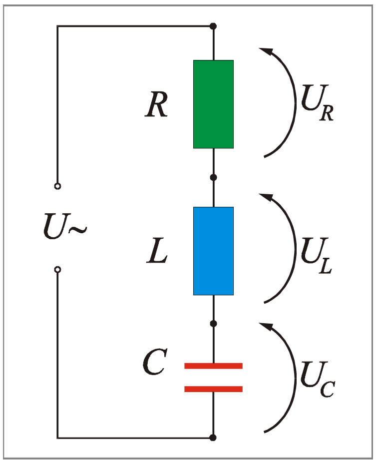

Figura 12. Circuito RLC.

En cada uno de los elementos del circuito se producirá una caída de tensión que, según la ley de Ohm, valdrá:

$$\boldsymbol{R} \rightarrow \quad \vec{U}_R = \vec{R} \cdot \vec{I} = R_{0^\circ} \cdot I_{0^\circ} = (RI)_{0^\circ} = RI + j0$$

$$\boldsymbol{L} \rightarrow \quad \vec{U}_L = \vec{X}_L \cdot \vec{I} = (L\omega)_{90^\circ} \cdot I_{0^\circ} = (L\omega I)_{90^\circ} = 0 + j(L\omega I)$$

$$\boldsymbol{C} \rightarrow \quad \vec{U}_C = \vec{X}_C \cdot \vec{I} = \left(\frac{1}{C\omega}\right)_{-90^\circ} \cdot I_{0^\circ} = \left(\frac{I}{C\omega}\right)_{-90^\circ} = 0 - j\left(\frac{I}{C\omega}\right)$$

La suma vectorial de todas esta caídas de tensión debe ser igual a la tensión, U, aplicada al circuito.

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

$$\vec{U} = RI + j(L\omega I) - j\left(\frac{I}{C\omega}\right)$$

$$\vec{U} = RI + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)I$$

$$\vec{U} = RI + j(X_L - X_C)I$$

$$\vec{U} = I(R + j(X_L - X_C)) \qquad [17]$$

La expresión [17] representa la **ley de Ohm** aplicada a corriente alterna. El término $R + j(X_L - X_C)$ es equivalente a la *resistencia* en corriente continua. En corriente alterna, esta *resistencia* recibe el nombre de **impedancia** (Z) y se mide en **Ω** .

$$\boxed{\vec{Z} = R + j(X_L - X_C)}$$

La impedancia tiene carácter vectorial y su representación gráfica podemos observarla en la figura 13.

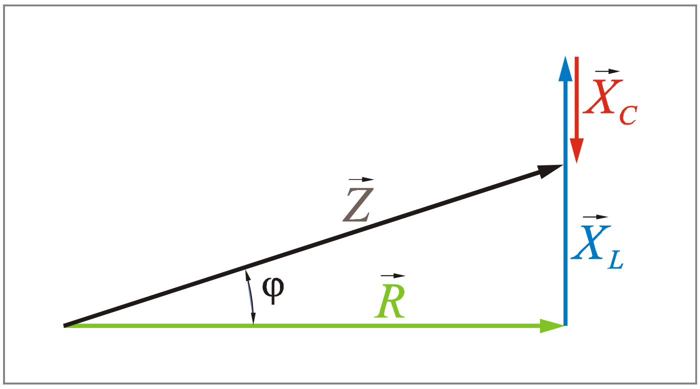

Figura 13. Triángulo de impedancias.

La potencia total, vendrá dada por $\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I}$

Multiplicando por $\vec{I}$ la expresión [17] y teniendo en cuenta que $\vec{I} = I_{0^\circ} = I$

$$\vec{S} = I^2 \cdot \vec{Z}$$

$$\vec{S} = I^2 \cdot R + j(I^2 \cdot X_L - I^2 \cdot X_C)$$

$$\vec{S} = P + j(Q_L - Q_C)$$

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$$

La **potencia total** o **aparente** es igual a la suma vectorial de la **potencia activa** más la **potencia reactiva**. La representación gráfica de esta suma nos da el llamado **TRIÁNGULO DE POTENCIAS.**

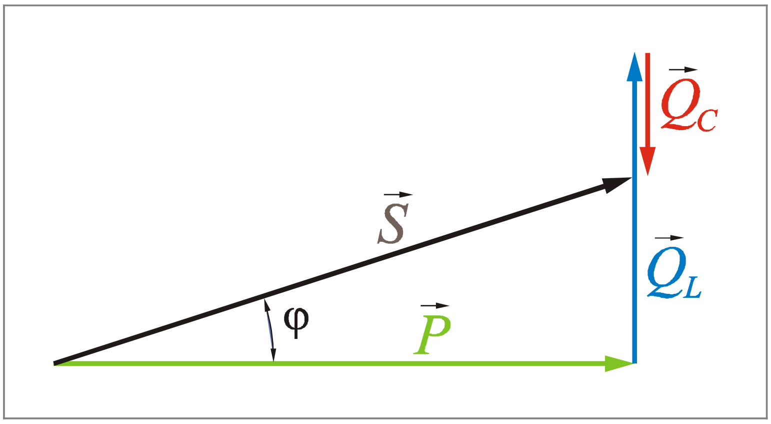

Figura 14. Triángulo de potencias.

El coseno del ángulo **φ** representa la relación que existe entre la potencia activa, ***P***, y la total, ***S***, y recibe el nombre de **FACTOR DE POTENCIA**.

$$\boxed{\cos\varphi = \frac{P}{S}} \qquad [18]$$

El **factor de potencia** indica qué parte de la **potencia aparente** se transforma en **potencia activa** en el circuito.

Teniendo en cuenta el triángulo de potencias, podemos escribir que:

$$S = U \cdot I \qquad [19]$$

$$P = S \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi \qquad [20]$$

$$Q = S \cdot sen\ \varphi = U \cdot I \cdot sen\ \varphi \qquad [21]$$

4. POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA.

4.1. Sistema trifásico.

Un sistema trifásico es aquel que está formado por **tres conductores activos** o fases. Eventualmente pueden existir hasta dos conductores más, el **neutro** y/o el de **protección** (tierra). En el sistema trifásico, al contrario que en el monofásico, el conductor neutro ya no es estrictamente necesario.

La corriente alterna monofásica se generaba al girar una espira en el interior de un campo magnético, pues bien, si ahora colocamos **tres espiras** en lugar de una, obtendremos tres corrientes monofásicas que combinadas adecuadamente nos darán un sistema trifásico. Se puede decir que un sistema trifásico está formado por tres sistemas monofásicos.

Las espiras se hayan dispuestas de forma que se encuentran repartidas a distancias (ángulos) iguales en el plano de giro, por tanto entre cada una de ellas existirá un ángulo de 360º/3 = 120º, que será, exactamente, el mismo ángulo de desfase que existirá entre las tres f.e.m. que se generarán en cada una de ellas.

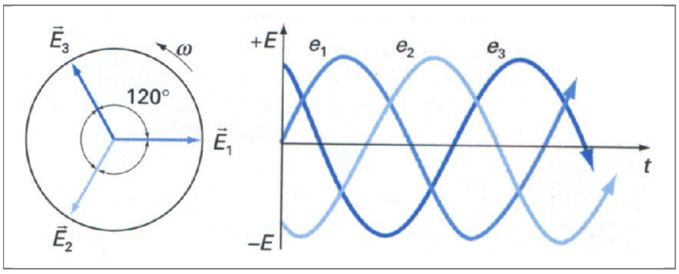

Figura 15. Sistema trifásico de fems.

4.2. Tipos de acoplamiento.

En los sistemas trifásicos, tanto los generadores como los receptores están formados por tres circuitos monofásicos. Estos tres circuitos se pueden acoplar o conectar de dos maneras diferentes: en **estrella**, o en **triángulo**.

El acoplamiento en **estrella** se realiza uniendo entre sí todos los finales de los circuitos o fases (bobinas de un generador, por ejemplo), mientras que los principios se conectan a los conductores de línea[7]. En este tipo de acoplamiento puede existir, o no, conductor neutro.

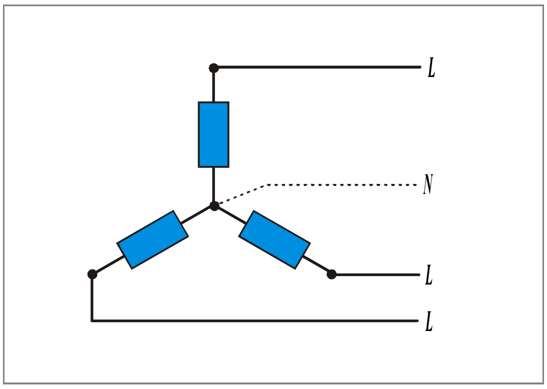

Figura 16. Acoplamiento en estrella.

El acoplamiento en **triángulo** se realiza uniendo el final de un circuito (fase) con el principio del siguiente, y así sucesivamente. En estos puntos de unión se conectan los conductores de línea. En este tipo de acoplamiento no existe conductor neutro.

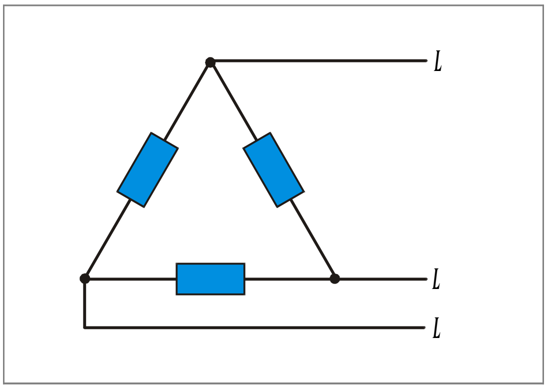

Figura 17. Acoplamiento en triángulo.

4.3. Sistema equilibrado y sistema desequilibrado.

Se dice que un sistema está equilibrado cuando las impedancias de las fases que lo forman son exactamente iguales, y por tanto, la intensidad de corriente que circula por cada una de ellas tiene el mismo valor y el ángulo de desfase producido por esta impedancia, entre tensión e intensidad, es igual en todas ellas.

El sistema está desequilibrado cuando no se cumple lo anterior y cada fase posee una impedancia diferente, una intensidad diferente y un $\cos\varphi$ diferente.

4.4. Valores de fase y de línea.

Las tensiones e intensidades, en el sistema trifásico, pueden tener dos valores característicos: valor de **FASE** y valor de **LÍNEA**.

El valor de **fase** se refiere al que tiene la magnitud (tensión o intensidad) en una fase, es decir, en uno de los circuitos monofásicos que forman el sistema trifásico. La **tensión de fase** será la d.d.p. que exista entre los dos extremos de una fase (bobina de una de las fases de un motor, por ejemplo) y la **intensidad de fase** será aquella que recorre esa fase.

El valor de **línea** se refiere a aquel valor que existe en o entre los conductores de línea, así, la **tensión de línea** será la d.d.p. que exista entre dos conductores de línea (L_1, L_2 o L_3) y la **intensidad de línea** será aquella que recorre cada uno de los conductores de línea.

[7] A los conductores de línea en los sistemas polifásicos se les denomina: ***L1, L2, L3*** … y ***N*** al neutro.

En la conexión en **estrella**, la intensidad de línea, I_L, es igual a la intensidad de fase, I_f, ya que cada circuito de fase está en serie con la línea correspondiente, y la tensión de línea, U_L, es $\sqrt{3}$ veces mayor que la tensión de fase, U_f.

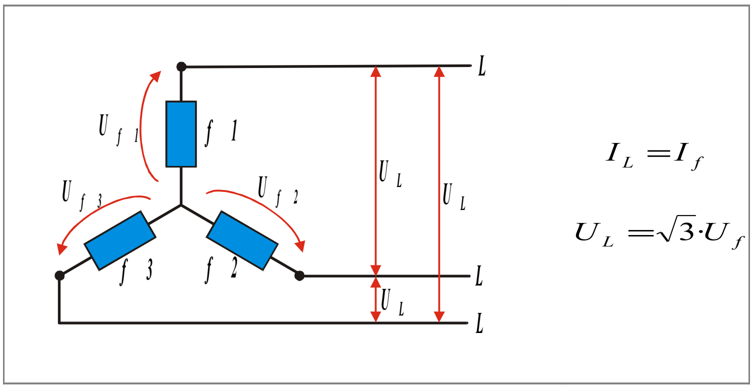

Figura 18. Valores de fase y de línea en el acoplamiento en estrella.

En la conexión en **triángulo**, la tensión de línea, U_L, coincide con la tensión de fase, U_f, y la Intensidad de línea, I_L, es $\sqrt{3}$ veces mayor que la fase, I_f.

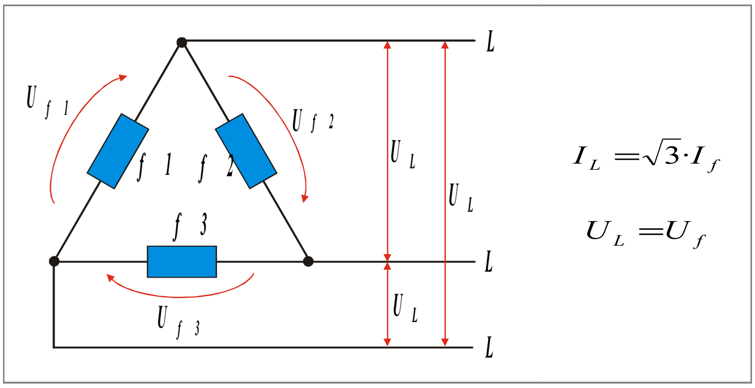

Figura 19. Valores de fase y de línea en el acoplamiento en triángulo.

4.5. Potencia en el sistema trifásico.

Al estar formado el sistema trifásico por tres sistemas monofásicos, la potencia consumida por éste será igual a la suma de las potencias consumidas por cada uno de los circuitos monofásicos.

Si el sistema está **equilibrado**, las intensidades y los desfases son iguales en todas las fases:

$$I_{f1} = I_{f2} = I_{f3} = I_f$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

Por tanto, las potencias totales serán, según las expresiones [19] ~ [21]:

Potencia aparente total → $S_T = 3 \cdot U_f \cdot I_f$ [22]

Potencia activa total → $P_T = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi$ [23]

Potencia reactiva total → $Q_T = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot sen\,\varphi$ [24]

Si se trata de un sistema **desequilibrado**, cada fase tendrá una intensidad y un desfase diferentes. En este caso la potencia total del sistema será igual a la suma vectorial de las potencias aparentes de cada fase, es decir:

$$\vec{S}_T = \vec{S}_{f1} + \vec{S}_{f2} + \vec{S}_{f3}$$

La potencia activa total del sistema será igual a la suma de las potencias activas de las tres fases. Y lo mismo ocurrirá con la potencia reactiva total[8]:

$$P_T = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3}$$

$$Q_T = Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3}$$

Teniendo en cuenta el triángulo de potencias y en función de las potencias activa y reactiva totales, la potencia aparente total será igual a:

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

4.6. Potencias en función de los valores de línea.

Las expresiones anteriores calculan las distintas potencias a partir de los valores de fase, sin embargo, los valores nominales de una línea eléctrica o una instalación son los de línea, por tanto son estos los más utilizados. Veamos como se calculan las potencias en el sistema trifásico en función de estos valores y según el tipo de conexión

Partiendo de las expresiones [22] ~ [24] y sustituyendo los valores de fase por los de línea tenemos que:

$S_T = 3\frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$ $P_T = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$ $Q_T = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot sen\ \varphi$	$S_T = 3U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$ $P_T = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$ $Q_T = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot sen\ \varphi$
Conexión en estrella.	*Conexión en triángulo.*

Las expresiones de las potencias son idénticas para ambas conexiones.

Para la misma tensión de red (U_L) **La potencia absorbida por un receptor conectado en triángulo es tres veces superior a la que consumiría ese mismo receptor conectado en estrella.**

Demostración:

Para un sistema trifásico equilibrado tenemos que la potencia total es:

[8] En el caso de las potencias activas y reactivas se puede sumar directamente los módulos de éstas, ya que todos tienen la misma dirección, los catetos del triángulo de potencias. Las potencias aparentes al tener direcciones diferentes se deben sumar de forma vectorial.

$$S = 3 \cdot S_f$$

$$S_f = U_f \cdot I_f \qquad I_f = \frac{U_f}{Z} \quad \rightarrow \quad S_f = \frac{U_f^{\,2}}{Z} \quad \rightarrow \quad S = 3\frac{U_f^{\,2}}{Z}$$

Para una conexión en **estrella** tenemos que:

$$U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \quad \rightarrow \quad S = 3\frac{U_L^{\,2}}{3Z} = \frac{U_L^{\,2}}{Z}$$

Para una conexión en **triángulo** tendremos que:

$$U_f = U_L \quad \rightarrow \quad S = 3\frac{U_L^{\,2}}{Z}$$

5. MEDICIÓN DE POTENCIAS EN CORRIENTE ALTERNA.

5.1. Medición de potencias en C.A. monofásica.

Medida de la potencia activa. Para la medida de la potencia activa se emplea el **vatímetro**. Los vatímetros más empleados utilizan el sistema de medida electrodinámico, que dispone de dos bobinas de medida, una fija y otra móvil. La bobina fija se conecta en serie con el receptor, de manera que la corriente que circula por el circuito pasa a través de ella; esta bobina es la llamada bobina de intensidad. La bobina móvil se conecta en paralelo con el receptor y es recorrida por una corriente proporcional a la tensión aplicada; esta bobina es la de tensión.

Medida de la potencia reactiva. Para medir este tipo de potencia se emplea el **vármetro**, o varímetro. El vármetro indica directamente la potencia reactiva.

Medida de potencias con voltímetro, amperímetro y vatímetro. El método más sencillo para conocer las potencias activa, reactiva y aparente de un circuito monofásico es utilizar el montaje indicado en la figura 21.

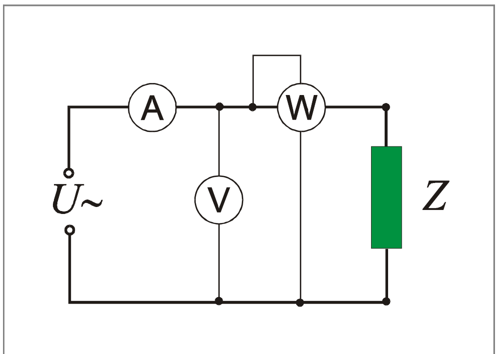

Figura 21. Medida de potencias con voltímetro, amperímetro y vatímetro.

Las lecturas de cada aparato son las siguientes:

- **Voltímetro** → Tensión (***U***)
- **Amperímetro** → Intensidad (***I***)
- **Vatímetro** → Potencia activa (***P***)

Con estos valores se puede calcular:

La potencia aparente $\rightarrow$ $S = U \cdot I$

El factor de potencia $\rightarrow$ $\cos\varphi = \dfrac{P}{S}$

Y la potencia reactiva $\rightarrow$ $Q = S \cdot sen\ \varphi$

5.2. Medición de potencias en C.A. trifásica.

- ***Con un vatímetro*.**

En un sistema trifásico **equilibrado** la potencia es igual en cada una de las fases, por tanto, bastará con medir la potencia de una de las tres fases, P_f, y multiplicar la lectura del vatímetro por tres:

$$P = 3 \cdot P_f$$

En un sistema trifásico de cuatro conductores la conexión del vatímetro se realizaría como se indica en la figura 22. En este caso la bobina de intensidad del vatímetro es recorrida por la intensidad que circula por la fase y la bobina de tensión está conectada entre la fase y el neutro, por tanto tiene aplicada la tensión de fase.

En un sistema trifásico de tres conductores no se dispone de neutro para conectar para conectar la bobina de tensión del vatímetro a la tensión de fase, pero se puede formar un neutro artificial con dos resistencias, $\boldsymbol{R}$, que tengan el mismo valor óhmico que el circuito voltimétrico del vatímetro, $\boldsymbol{R_{WU}}$ (figura 23). En los vatímetros comerciales para sistemas trifásicos sin neutro, las dos resistencias, ***R***, ya van instaladas en el interior del aparato, presentando éste dos bornes de intensidad, para intercalar en una fase, y tres bornes de tensión que se deben conectar en cada una de las tres fases.

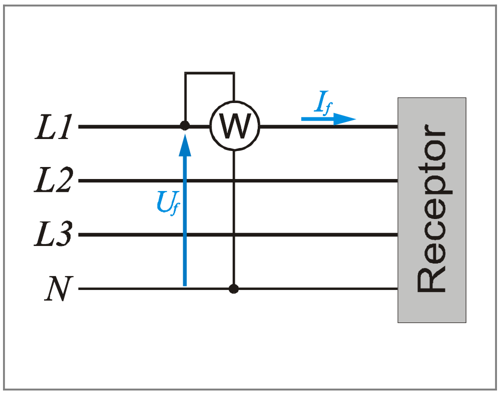

Figura 22. Conexión del vatímetro para un sistema de cuatro conductores.

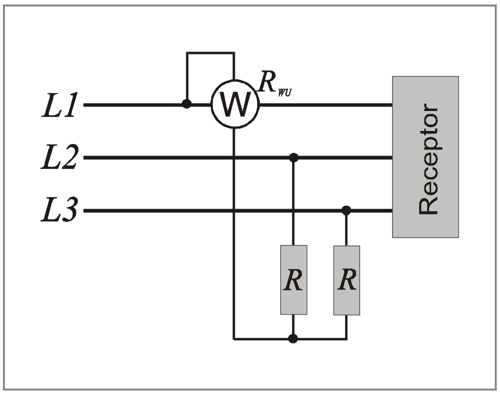

Figura 23. Conexión del vatímetro para un sistema de tres conductores.

- ***Con dos vatímetros*.**

Este es el método que se emplea normalmente en sistemas trifásicos de **tres conductores**, tanto **equilibrados** como **desequilibrados**. Este método también se conoce como **método Aron**.

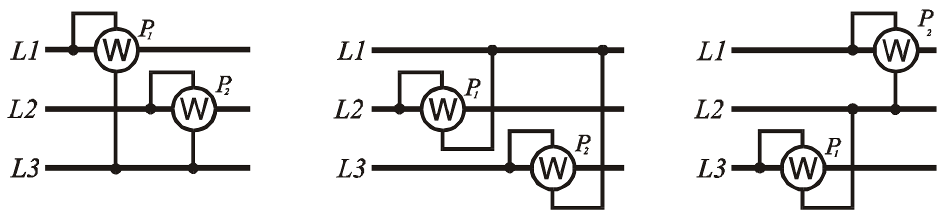

Figura 24. Posibilidades de conexión de dos vatímetros en un sistema trifásico.

Cualquier combinación de conexiones de los dos vatímetros es válida, siempre que se cumpla que los principios u orígenes de las bobinas de tensión estén conectados a las mismas fases en las que estén conectadas las bobinas de intensidad y los finales de las bobinas de tensión se conecten a la fase en la que no se conectan bobinas de intensidad.

Si el sistema es **equilibrado**, de las lecturas de los vatímetros, podemos obtener más información acerca del receptor o instalación, si se cumple que:

$P_1 = P_2 \rightarrow$ El receptor es resistivo y $\cos\varphi = 1$.
$P_1 > P_2 \rightarrow$ El receptor es inductivo.
$P_1 < P_2 \rightarrow$ El receptor es capacitivo.

En el caso de que un vatímetro marcase un valor negativo, se deben invertir las conexiones de su bobina voltimétrica y restar su lectura al valor del otro vatímetro.

- ***Con tres vatímetros.***

Este método se emplea en los sistemas trifásicos **desequilibrados** de tres y cuatro conductores[9]. Al ser el sistema desequilibrado, la potencia es distinta en cada una de las tres fases. Para obtener la potencia total del sistema debemos medir la potencia de cada una de ellas y, a continuación, sumar las tres medidas.

En el caso de un sistema de cuatro conductores la conexión de los tres vatímetros se realiza como se indica en la figura 25. Si se trata de un sistema con tres conductores (figura 26), y por tanto no dispone de neutro, se puede conseguir un neutro artificial si se dispone de tres vatímetros exactamente iguales, y se conectan sus circuitos voltimétricos en estrella, de esta manera, dichos circuitos quedan sometidos a la tensión de fase.

[9] En el caso de un sistema desequilibrado de cuatro conductores no se puede emplear el método Aron, ya que éste se emplea con sistemas de tres conductores, por lo tanto hay que emplear el método de los tres vatímetros.

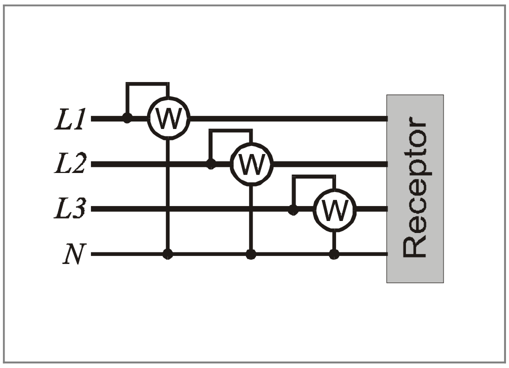

Figura 25. Medida de potencia en un sistema trifásico desequilibrado de cuatro conductores.

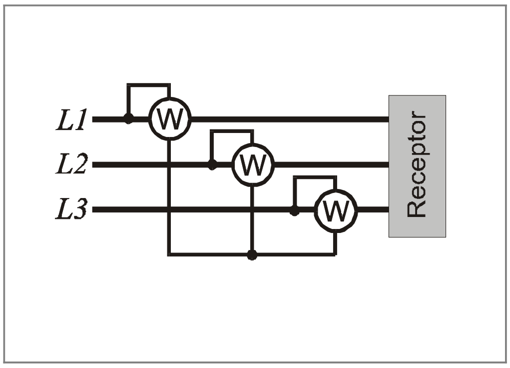

Figura 26. Medida de potencia en un sistema trifásico desequilibrado de tres conductores.

6. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

La electricidad es una de las formas de energía más usadas. Esto es debido a la facilidad con la que se transforma, mediante los receptores adecuados, en otras formas de energía como la mecánica, la luminosa o la calorífica.

La mayoría de los receptores son predominantemente inductivos y, por tanto, producen un desfase entre la tensión y la intensidad, retrasando a ésta con respecto a aquella. En consecuencia, la potencia aparente, S, que absorben de la red tiene una componente activa, P, y otra componente reactiva, Q, de carácter inductivo.

La potencia activa representa la medida del trabajo útil por unidad de tiempo que realiza el receptor. La potencia reactiva representa un bombeo de energía necesario para el propio funcionamiento del receptor, que no nos da ninguna energía útil y si repercute en el aumento de la potencia aparente que tenemos que transportar por la línea eléctrica.

El aumento de la potencia aparente implica un aumento de la intensidad que circula por la línea, con lo cual debemos aumentar la sección de los conductores, la instalación es más cara, las perdidas de energía por efecto joule son mayores, se producen mayores caídas de tensión a lo largo de la línea, se incrementa la factura eléctrica (las compañías suministradoras aplican un recargo para un cos φ < 0,9) …

Por tanto, para una misma potencia útil, o activa, nos interesa que la potencia reactiva sea lo menor posible, es decir, que el factor de potencia sea lo más próximo a la unidad. Esto se consigue anulando total o parcialmente los efectos de la potencia reactiva inductiva mediante la instalación, en paralelo con el receptor, del elemento que es capaz de producir el efecto contrario: **el condensador**.

6.1. Cálculo del condensador necesario.

Supongamos un receptor inductivo que produce un desfase, **φ** , entre tensión e intensidad, y que queremos reducir ese desfase hasta **φ ’**. El condensador que tendremos que conectar en paralelo con el receptor debe tener una capacidad C y contrarrestar una potencia reactiva Q_C.

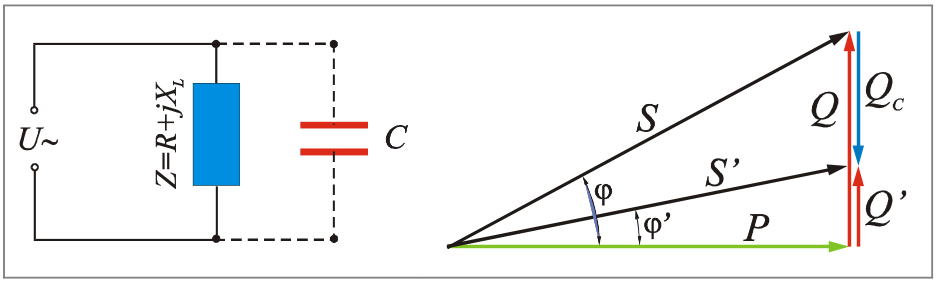

Figura 27. Mejora del factor de potencia.

Si observamos el triángulo de potencias de la figura 20 vemos que, antes de corregir el factor de potencia, el receptor absorbe una potencia reactiva igual a:

$$Q = P \cdot tg\,\varphi$$

Después de corregido el desfase hasta **φ ’** la potencia reactiva será:

$$Q' = P \cdot tg\,\varphi'$$

La potencia que ha de contrarrestar el condensador será:

$$Q_C = Q - Q' = Ptg\,\varphi - Ptg\,\varphi' = P(tg\,\varphi - tg\,\varphi')$$

Como $Q_C = U^2 / X_C$ y $X_C = 1/\omega C$ tendremos que la capacidad del condensador será:

$$U^2 \cdot \omega C = P(tg\,\varphi - tg\,\varphi')$$

$$\boxed{C = \frac{P(tg\,\varphi - tg\,\varphi')}{\omega U^2}}$$

6.2. Instalación de las baterías de condensadores.

Los condensadores necesarios se pueden colocar en la instalación consumidora (industria, por ejemplo) en tres zonas que representan tres niveles de precisión en la corrección del factor de potencia.

Nivel 1. La compensación se realiza de modo global para toda la instalación, colocando los condensadores a la salida de baja tensión del centro de transformación que alimenta la industria en cuestión. De esta manera se suprimen las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva y se descarga al centro de transformación, pero la corriente reactiva está presente en la instalación desde este nivel hacia los receptores. Las pérdidas por efecto joule no quedan disminuidas.

Nivel 2. Los condensadores se colocan a la entrada de cada taller o zona dentro de la instalación industrial. La compensación es parcial. Disminuyen las pérdidas por efecto Joule, pero siguen existiendo desde este punto hasta los receptores.

Nivel 3. Los condensadores se colocan en los bornes de cada receptor. La compensación es individual y se produce una optimización total. La intensidad reactiva no está presente en ningún conductor de la instalación.