

## 3 POTENCIA ELÉCTRICA

En este capítulo veremos las definiciones básicas asociadas a la medida de potencia eléctrica. Se revisarán conceptos de potencia eléctrica en corriente continua y en corriente alterna monofásica poniendo énfasis en su medida y control.

Los puntos a ser tratados son:

- Potencia eléctrica en DC.
- Potencia eléctrica en AC, activa, reactiva aparente.
- Medición de energía eléctrica en el consumo domiciliario e industrial. Corrección de reactiva.

### 3.1 Potencia eléctrica en corriente continua.

De forma general se define la potencia como la velocidad a la que se transfiere la energía o:

$$Potencia = \frac{\Delta Energía}{\Delta t} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Como recordamos de los cursos básicos de física, hay diversos mecanismos de transferir energía, Trabajo, Calor, Radiación Electromagnética, ... En el proceso más intuitivo, que es el trabajo mecánico realizado por una fuerza tenemos:

$$Potencia = \frac{Trabajo}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta x \cdot \cos(\alpha)}{\Delta t} = \underline{F \cdot v} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo entre la fuerza y el desplazamiento que produce. Intentaremos mostrar cómo se relaciona esto con el problema de la potencia eléctrica.

En un medio conductor con conductividad  $g$ , cuando se conecta una batería en sus extremos aparece un campo eléctrico que produce una corriente constante dada por la ley de ohm:

$$J = gE \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde  $J$  es la densidad de corriente o corriente por unidad de área [ $A/m^2$ ] y  $E$  es el campo eléctrico. La figura 3.1 nos muestra un tramo de conductor, sometido a una diferencia de potencial donde se establece una corriente  $I$

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta x} \quad \text{Ec. 3.4}$$

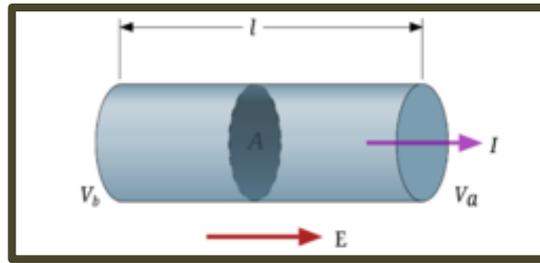


Figura 3.1 Conductor eléctrico con corriente

El modelo más simple de conducción (modelo de Drude) nos dice que el campo eléctrico acelera las cargas, y estas llegan a una velocidad de régimen (corriente constante) debido a los choques con la estructura del conductor. De esta forma el campo eléctrico entrega energía a las cargas y estas se la transfieren a la estructura del conductor por medio de choques.

La fuerza aplicada por el campo eléctrico es

$$F = qE \quad \text{Ec. 3.5}$$

La potencia mecánica que la fuerza  $F$  realiza sobre una partícula cargada  $q$  es

$$\text{Potencia sobre una carga} = \underline{F} \cdot \underline{v} = qE \cdot v \quad \text{Ec. 3.6}$$

La potencia sobre los  $n$  portadores que tengo por unidad de volumen es

$$P = n \cdot q \cdot v \cdot E \cdot \text{Volumen} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Sustituyendo obtenemos la potencia “eléctrica”

$$P = J \cdot E \cdot \text{Volumen} = \frac{I}{A \Delta x} \cdot V \cdot \text{Volúmen} = I \cdot V \quad \text{Ec. 3.8}$$

Esta es la expresión habitual de la potencia eléctrica, el producto del voltaje por la corriente o alternativamente:

$$P = I \cdot V = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Vemos que la potencia eléctrica es igual a la potencia mecánica transferida a las cargas por la batería. Podemos identificar:

- La batería es quien entrega la energía para que las cargas se muevan
- Las cargas le transfieren la energía a la estructura del conductor a través de los choques
- Los choques aumentan la vibración de la estructura y con ello su temperatura.

Esto es lo que se conoce como efecto Joule, toda la energía entregada por la batería se transforma en calor de la resistencia  $R$ .

### 3.2 Potencia instantánea y potencia media

Para el caso de la corriente alterna, debe tomarse en cuenta no sólo el módulo del voltaje y la corriente, sino que también importa el ángulo de fase.

Para la corriente alterna se define la potencia instantánea como el producto del voltaje por la intensidad

$$P_i(t) = i(t) \cdot v(t) \quad \text{Ec. 3.10}$$

Cuando hablamos de potencia en un sistema eléctrico nos referimos al valor medio de la potencia instantánea en un período

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot v(t) dt \quad \text{Ec. 3.11}$$

Como primer punto veremos la potencia media disipada en una resistencia de por una señal sinusoidal.

Para una resistencia, la corriente y el voltaje son proporcionales  $i(t) = \frac{v(t)}{R}$

De esta forma la potencia media es

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v^2}{R} dt$$

Sustituyendo la expresión de la señal sinusoidal

$$v(t) = \sqrt{2} V_{eff} \cos(\omega t)$$

$$P = \frac{2 V_{eff}^2}{T R} \int_0^T \cos^2(\omega t) dt$$

Recordando que la integral en un período del coseno cuadrado es T/2, tenemos la expresión de la potencia media sobre una resistencia

$$P = \frac{V_{eff}^2}{R} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Vemos aquí el origen de la definición de valor eficaz: El valor eficaz es el que disipa sobre una resistencia la misma potencia media que una batería (CC) de ese valor.

### 3.3 Triangulo de Potencia, aparente, activa y reactiva

Cuando la carga que se excita es una impedancia genérica, la corriente y la tensión no están en fase.

Si el faso de impedancia tiene un ángulo  $\delta$ , la corriente se atrasa ese mismo ángulo respecto a la tensión. De esa forma la potencia instantánea es

$$P(t) = \sqrt{2} V_{eff} \cos(\omega t) \cdot \sqrt{2} I_{eff} \cos(\omega t - \delta)$$

Es fácil ver que la potencia media, calculada por la integral de 3.11, queda como

$$P = V_{eff} \cdot I_{eff} \cos(\delta) \quad \text{Ec. 3.13}$$

Vemos que la potencia en alterna depende no solo de la corriente y la tensión, sino que también de su ángulo de fase.

Desde el punto de vista de la transferencia de energía, lo importante es cuanto se transfiere en valor medio, lo que está dado por Ec. 3.12. Esta es la llamada potencia activa  $P$ , también llamada potencia útil o potencia transferida a la carga.

Si medimos con un instrumento de mano el  $V_{eff}$  y la  $I_{eff}$  obtendremos un valor mayor correspondiente a la situación sin desfase. Esta es la llamada potencia aparente  $S$ . La potencia aparente coincide con la activa para una carga resistiva. Por otra parte, las líneas de transmisión y los transformadores se diseñan para el valor aparente, ya que se considera la situación máxima.

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Finalmente, el triángulo de potencias se cierra con la llamada potencia reactiva  $Q$ . La reactiva es causada por las bobinas y condensadores, estos elementos son capaces de almacenar energía durante medio ciclo y devolverlo durante el otro medio ciclo. Por ello no “consumen” la energía, la almacenan y devuelven luego.

$$Q = V_{eff} \cdot I_{eff} \sin(\delta) \quad \text{Ec. 3.15}$$

Podría pensarse que la potencia reactiva no es necesaria, ya que produce una ineficiencia en la transmisión de energía. Si embargo es inevitable en la mayoría de las máquinas eléctricas. Lo que puede hacerse es una estrategia de reducción de este valor a un aceptable.

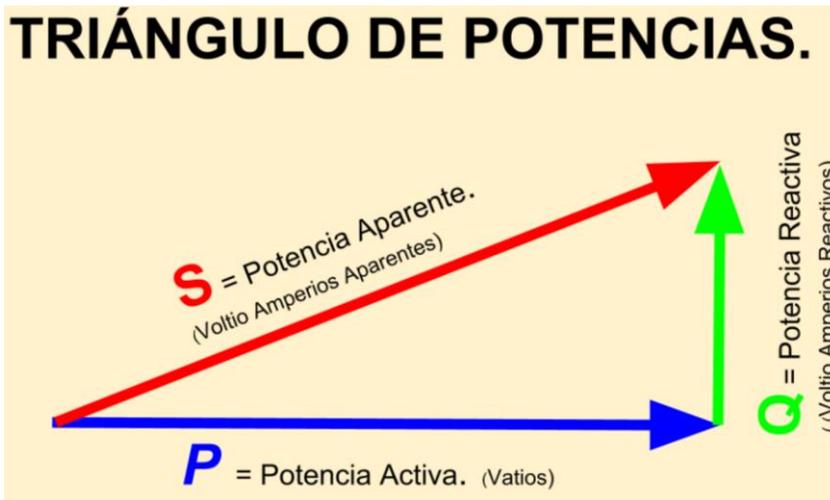


Figura 3.2 Triangulo de potencias

### 3.4 Medición de energía eléctrica en el consumo domiciliario

A nivel domiciliario lo que se mide es la energía entregada. Esto se calcula como la integral en el tiempo de la potencia activa

$$E = \int_0^T P(t) dt = \langle P \rangle \Delta t \quad \text{Ec. 3.16}$$

Recordando el teorema del valor medio, esta integral puede calcularse como la potencia media (o promedio) en el intervalo multiplicado por el intervalo de tiempo

Por ejemplo, si tenemos un motor de 10 Hp funcionando durante 3 horas, ¿cuánta energía consume?

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Hp} &= 745.7 \text{ W} \\
 10 \text{ Hp} &= 7457 \text{ W} \\
 E &= 80 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Este sería el valor en las unidades MKS, sin embargo, es muy grande para la mayoría de las aplicaciones de consumo eléctrico, mismo para el domiciliario pequeño.

En su lugar se utiliza el kilo Watt hora (kWh), que es el producto de la potencia media en kW por la cantidad de horas de consumo.

En nuestro caso sería

$$E = 7.5 \times 3 = 22,4 \text{ kWh}$$



Figura.3.3 Medidor de energía domiciliar.

El suministro especifica la potencia contratada, esto es el consumo máximo instantáneo que puede tener en la residencia [[Potencia Contratada UTE](#)].

Para la facturación se considera además el consumo en franjas, donde generalmente hay un precio incremental a medida que se superan las franjas de consumo.

Actualmente UTE está instalando medidores inteligentes que permiten una mayor discretización de la información y poseen conexión a internet para la transmisión de datos periódica. Esto permite la aplicación de regímenes de consumo horario, con tarifas dependientes del horario de consumo.



Figura. 3.4 Medidor inteligente de UTE

¿Qué características tiene un medidor inteligente? ([extraído página UTE](#))

- Comunicarse remotamente con UTE.
- Registrar el consumo en intervalos de 15 minutos.
- Realizar cambios de tarifa de forma remota, sin tener que concurrir al suministro.
- Realizar reconexiones y cortes del servicio.
- Detectar problemas en la conexión y problemas en las instalaciones internas.
- Detectar cortes del servicio.

### 3.5 Medición de energía eléctrica en el consumo industrial

Para el caso de consumo industrial, las tarifas sobre la potencia activa incluyen franjas de consumo, potencia instalada, voltaje suministrado y régimen horario. Pero además del consumo de potencia activa, se mide el consumo de reactiva en forma independiente.

A continuación, se extrae la información suministrada por la UTE sobre la facturación de energía reactiva.

UTE instala medición de energía reactiva en todos los servicios con potencia contratada superior a 10kW. Para servicios con potencias contratadas menores a 10kW UTE podrá instalar medición de energía reactiva en caso de que existan indicios que la instalación tiene equipamiento que genere reactiva [[UTE energía reactiva](#)].

La facturación depende de los siguientes factores:

El cociente entre las energías reactiva y activa medidas mensualmente.

La tarifa que tiene contratada el servicio.

Siempre que el cociente entre las energías reactiva ( $E_r$ ) y activa ( $E_a$ ) mensuales medidas supera el valor de 0,426, se generará un cargo adicional en la facturación de energía eléctrica por exceso de energía reactiva. En caso de que el cociente no supera dicho valor, no se facturarán cargos adicionales.

### 3.6 Corrección de Reactiva

Como el consumo de reactiva tiene un costo adicional para las empresas y como el trabajo útil que generan las máquinas depende solo de la activa, se implementa una estrategia de compensación de la misma. [[Notas curso Instalaciones](#)]

Lo que debe considerarse es el ángulo que se forma en el triangulo de potencias, que es el mismo que el de la impedancia equivalente de la instalación. Como vemos en la descripción de la UTE, se considera la tangente del ángulo

$$tg^{-1}(\delta) = \frac{E_r}{E_a}$$

Esta medida aumenta cuanto mayor es el consumo de reactiva en comparación con la activa. En general en la industria se habla de coseno de  $\delta$

$$cos(\delta) = \frac{E_a}{\sqrt{E_a^2 + E_r^2}}$$

Idealmente se trata de que el coseno de  $\delta$  sea lo mas parecido a 1. La UTE cobra por el consumo de reactiva y penaliza para un coseno menor que 0,92.

La situación más general en la industria es tener un consumo de reactiva inductivo. Los motores y transformadores tienen valores grandes de L que son necesarios para generar los campos magnéticos en que se basa su funcionamiento.

Para observar cómo opera esta compensación en la práctica, veremos el ejemplo de un motor de inducción alimentado por la red. En él se ven los equivalentes de los elementos

de la máquina,  $R_1$  y  $X_1$  son la resistencia y la inductancia del estator, la rama  $R_{fe}$  y  $X_{\mu}$  representan la magnetización y  $R_2$  y  $X_2$  son el rotor.  $R_2$  incluye el efecto de la carga en el eje.

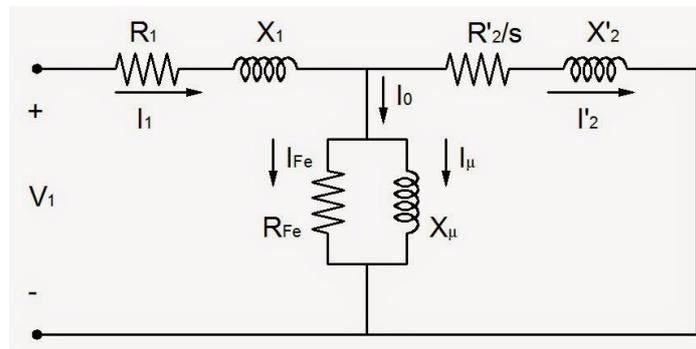


Figura 3.5 Modelo eléctrico motor de inducción

Desde el punto de vista del consumo realizado a la fuente, este modelo puede reducirse a una resistencia  $R_{eq}$  en serie con una bobina  $L_{eq}$ .

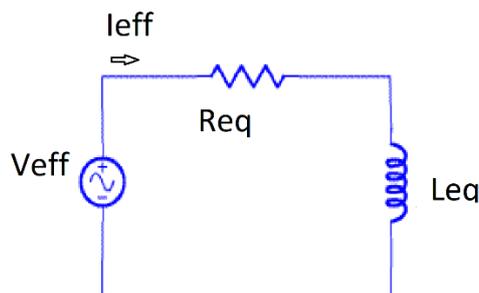


Figura 3.6 Circuito RL para estudiar el consumo a frecuencia fija

El coseno de la impedancia, que es el mismo que el del diagrama de potencias, se calcula como

$$\cos(\delta) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

Dependiendo del valor de  $L$  y del régimen de operación de la máquina, se aparta de 1 en forma apreciable.

La solución es agregar un condensador en paralelo con la entrada de la red, esto hace la impedancia se haga menos inductiva, disminuyendo el consumo de reactiva y aumentando el coseno de  $\phi$ .



Figura 3.6 Condensador de compensación

En la practica hay bancos de condensadores que se colocan para este fin. Estos bancos pueden estar fijos o conectarse en función de la carga de la instalación.