

---

**Temas: Máquinas Eléctricas**

---

**Transformador**

Por razones de rendimiento es conveniente transportar la energía eléctrica a potenciales elevados e intensidades de corriente pequeñas, con la reducción consiguientes de cantidad de calor  $I^2 R$  (perdida por segundo en la línea de transporte). Por otra parte, las condiciones de seguridad y de aislamiento de las partes metálicas requieren voltajes relativamente bajos. Una de las propiedades más útiles de los circuitos de corriente alterna es la facilidad y rendimiento elevado con que puede variarse, por medio de transformadores, los valores de los voltajes (o intensidades del corriente).

**Propiedades del transformador**

Tiene la capacidad de transferir energía desde un arrollamiento primario a un arrollamiento secundario. Los pasos para transferir potencia del primario al secundario son los siguientes:

El suministro de potencia a través del transformador lo realiza el campo magnético del núcleo de hierro, es decir:

- la energía es suministrada al campo magnético por el arrollamiento primario,
- en el circuito secundario, la energía es absorbida del campo magnético por arrollamiento secundario y el circuito primario se alimenta desde una fuente de alimentación de C. A.

Como los devanados se hacen sobre el núcleo de hierro de alta permeabilidad, prácticamente todas las líneas de fuerza magnéticas producida por el inductor enlazan también al otro flujo mutuo.

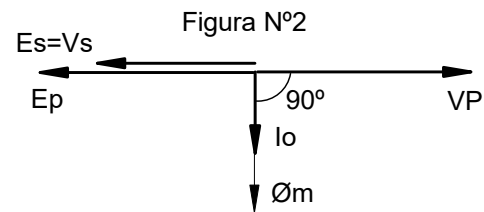
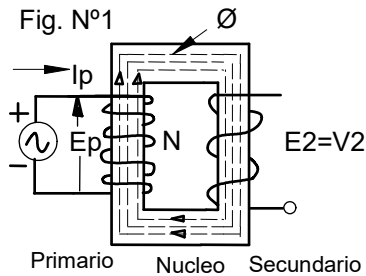
Cuando se quita el núcleo o del hierro, el flujo total ya no abraza los arrollamientos, por lo tanto, se arrolla directamente una bobina sobre otra.

El flujo que no enlaza al otro arrollamiento se llama “**Flujo disperso**”.

**Marcha del transformador**

- **Funcionamiento en vacío**

Esto significa que el circuito secundario está abierto, la corriente del primario produce todo el flujo magnético que circula por el núcleo, por lo tanto, el transformador actúa como simple inductor con núcleo de hierro. En esta condición presenta una alta reactancia inductiva a la fuente y la corriente es pequeña. La relación vectorial se observa en la figura N° 2. Las Fems  $E_p$  y  $E_s$  están fase entre sí porque ambas son producidas por el mismo flujo común  $\Phi_m$ . En estas condiciones el primario se comporta como un inductor y la corriente que fluye por él está desfasada  $90^\circ$ . El desfase entre  $V_p$  y  $E_p$  está dado por la ley de Lenz, es decir  $180^\circ$ .



- **Transformador en carga (resistiva)**

Por acción de un flujo variable, se induce una tensión variable ( $E_s$ ). Si se aplica una resistencia de carga, circulará una corriente  $I_s$ . Se puede hacer el mismo análisis que se hizo con la fig. N°1. La corriente produce una Fm.m. =  $I_s \cdot N_s$  que se opone a la  $I_p \cdot N_p$ , de manera que:

$$I_p N_p - I_s N_s = I_o N_p \quad \text{como la } I_o \text{ es muy pequeña } (I_o = 0,1 \text{ a } 0,005 I_p)$$

$$I_p N_p = I_s N_s$$

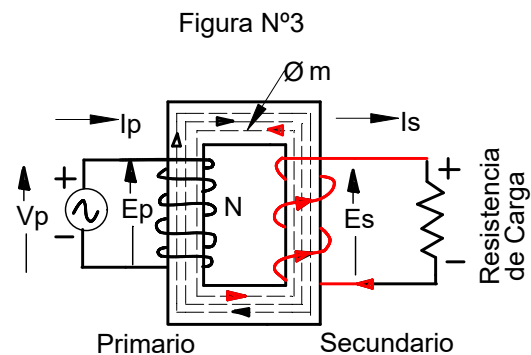
En definitiva, el flujo primario y secundario se resta, para mantener el flujo mutuo entre ambos arrollamientos ( $\Phi_m$ ).

Considerando la corriente de vacío  $I_o$ , esta se compone en  $I_m$  y  $I_{Fe}$  donde:

$I_m$  = corriente magnetizante, responsable de la creación del flujo magnético, por lo tanto, está en paralelo con este ( $\Phi$ ).

$I_{Fe}$  = corriente de pérdidas, que se disipa en potencia en el núcleo por pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

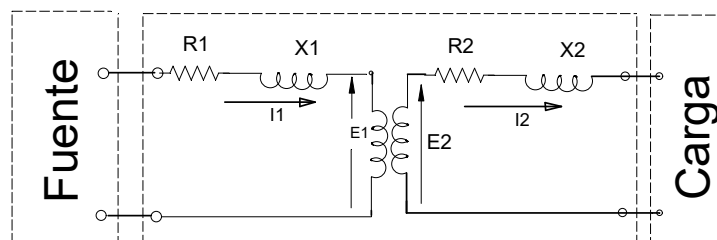
Finalmente, la corriente primaria ( $I_p$ ) es suma de la corriente de vacío ( $I_o$ ) más la corriente secundaria ( $I_s$ ).



### Modelo Circuitual del Transformador

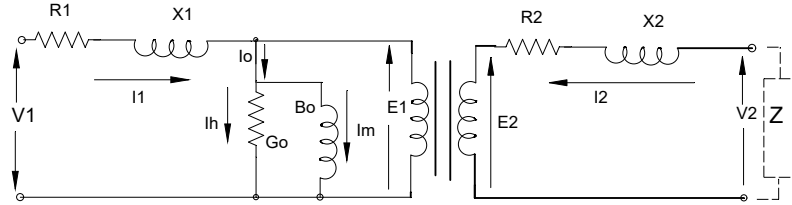
Fig. 4

Transformador



## Circuito Equivalente

Fig. 5

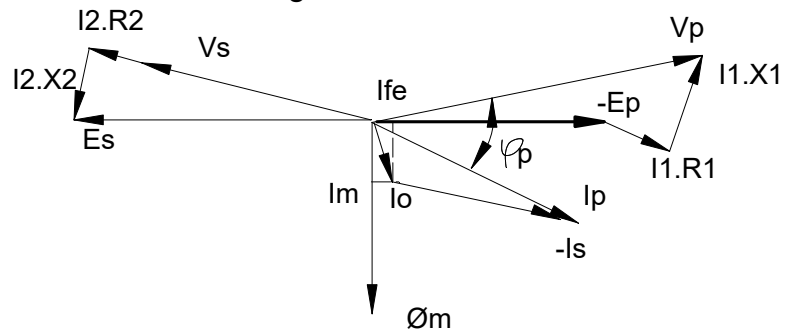


## Diagrama Vectorial completo

Pariendo del modelo circuital del transformador, se obtiene las siguientes ecuaciones:

- 1)  $V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1$
- 2)  $E_2 = I_2(R_2 + jX_2) + V_2$
- 3)  $N_1 \cdot I_o = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2$

Figura N° 6



## Relación de transformación

La tensión inducida en una bobina depende: del número de vueltas y del ritmo de variación del flujo que concatena la bobina, o sea:

$$\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t$$

$$e = N \frac{d(\Phi)}{dt} = N \frac{d(\Phi_{\max} \cdot \sin \omega t)}{dt}$$

$$e = N \Phi_{\max} \cdot \omega \cos \omega t$$

**Conclusión:** la tensión está adelantada respecto del flujo

Si dividimos por  $\sqrt{2}$  obtenemos el valor eficaz

$$E_{1\text{ ef}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \Phi_{\max} N_p = 4,44 f \Phi_{\max} N_p$$

Lo mismo ocurre en la f.m.e.i. En el secundario, por tenemos  $E_{2\text{ ef}} = 4,44 f \Phi_{\max} N_s$

Dividiendo  $E_1/E_2$  tenemos:

$$\text{Se puede establecer: } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{o} \quad \frac{N_p}{N_s} = a \quad (\text{relación de transformación})$$

**Ejemplo:** Esto último se puede ejemplificar así: si  $N_s$  es el doble de la  $N_p$ , la tensión inducida en el secundario será el doble que la tensión primaria.

- **Corriente y relación de transformación**

*El transformador ideal*, no consume potencia en la transformación de la energía.

Se puede establecer:

$$P_p = P_s \quad (1)$$

$$P_p = E_p \cdot I_p \quad (2)$$

$$P_s = E_s \cdot I_s \quad (3)$$

$$E_p \cdot I_p = E_s \cdot I_s$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{E_s}{E_p}$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{E_s}{E_p}$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a}$$

- **Relación entre impedancia y Relación de transformación**

Partiendo de la fórmula de impedancia:

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \quad Y \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}$$

$$V_p = \frac{V_s \cdot N_p}{N_s}$$

$$I_p = \frac{I_s \cdot N_s}{N_p}$$

$$Z_p = \frac{\frac{V_s \cdot N_p}{N_s}}{\frac{I_s \cdot N_s}{N_p}}$$

$$Z_p = Z_s \cdot \frac{(N_p)^2}{(N_s)^2} \quad \text{Operando}$$

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \frac{(N_p)^2}{(N_s)^2}$$

**Ejemplo:**

En la siguiente figura, se pide adaptar las impedancias, mediante un transformador para que se obtenga la máxima transferencia de potencia (\*):

Datos:  $Z_p = 300 \, \Omega$  Baja impedancia

$Z_s = 30000 \, \Omega$  Alta impedancia

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \frac{(N_p)^2}{(N_s)^2}$$

$$\frac{300 \, \Omega}{30000 \, \Omega} = \frac{(N_p)^2}{(N_s)^2} = \frac{1}{100}$$

$$\sqrt{\frac{N_p^2}{N_s^2}} = \sqrt{\frac{1}{100}} = \frac{1}{10} = 0,1 = \frac{N_p}{N_s} \text{ elevador}$$

(\*) Para lograr la máxima transferencia de potencia, la potencia absorbida por la carga debe ser igual a potencia consumida por la fuente.

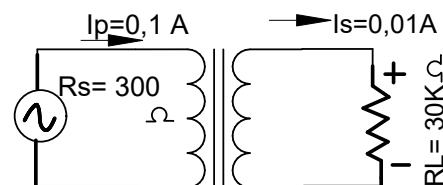


Fig.7

## Marcas de Polaridad

La polaridad de la tensión inducida en el arrollamiento secundario depende de la forma en que se ha devanado el secundario respecto del primario. Consideremos la **figura N° 3** en la cual se indica dos arrollamientos unidos por un único núcleo. En el instante en que la **corriente  $I_p$  está entrando** por el extremo superior de la bobina primaria, da lugar a un flujo dirigido hacia abajo, conforme a la ley de Lenz, esta induce una tensión en el secundario, haciendo que el mismo actúe como fuente de tensión.

Si se cierra el circuito, circulara la corriente  $I_s$  cuyo sentido será tal que producirá un flujo que se oponga o que contrarreste al flujo 1.

De manera que las polaridades instantáneas son como ser indicadas en la figura N° 8. Esto significa que si  $I_p$  **crece  $I_s$  debe crecer**, o de otra manera, si  $I_s$  sale del borne marcado con el punto, magnetiza al hierro y es inversa al sentido de  $I_p$  que es positiva. Los extremos superiores de ambas bobinas deberán marcarse con un punto negro.

### • Experiencia para determinar los bornes homónimos

Para marcar los bornes homónimos se pueden utilizar las iniciales “p” y “f” “principio” y “fin” o marcar especiales para cada par de bornes homónimos, asteriscos o puntos (0), etc. Cuando no es posible establecer la posición mutua y el sentido del arrollamiento de las espiras resulta como efectuar la señalización a base de una simple experiencia para la cual se necesita un elemento acumulador y un voltímetro. Una bobina se une con el voltímetro y la otra se conecta con la batería, según la figura. Al cerrar la llave S se origina por un breve espacio de tiempo la corriente  $I_2$  que debilita el campo magnético, creado por la corriente  $I_1$

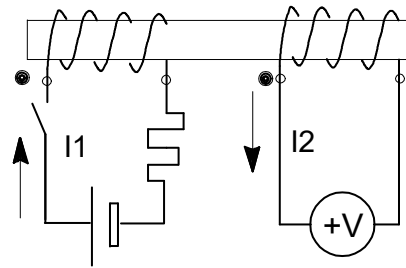


Fig. 8

*Por consiguiente, en el momento de conectar la fuente de alimentación, las corrientes  $I_1$  e  $I_2$  tienen respecto a los bornes homónimos, sentidos opuestos.*

## Transformador Trifásico

La mayoría de los sistemas importantes de distribución utilizan transformadores trifásicos. Estos últimos consisten generalmente en tres juegos de devanados enrollados sobre un núcleo en común, Figura N°9. También existe la alternativa de utilizar tres transformadores monofásicos independientes y conectarlos en grupos trifásico.

### Conexión de los devanados

Los devanados primarios y secundarios de un transformador trifásico pueden ser conectados independiente en Y (Estrella) o  $\Delta$  (triángulo). Esto da lugar a cuatro tipos de conexiones posibles, que pueden ser: Y-Y, Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y y  $\Delta$ - $\Delta$ , cada una con sus ventajas.

En la figura N° 9 se indica la conexión de un modo Y- $\Delta$

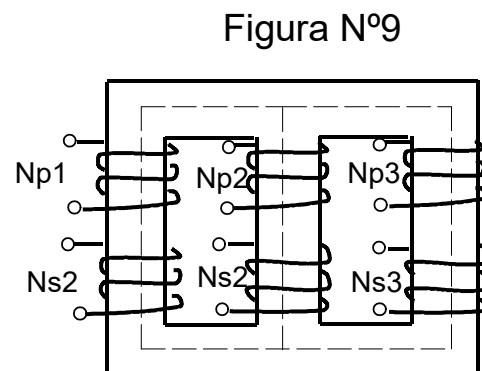
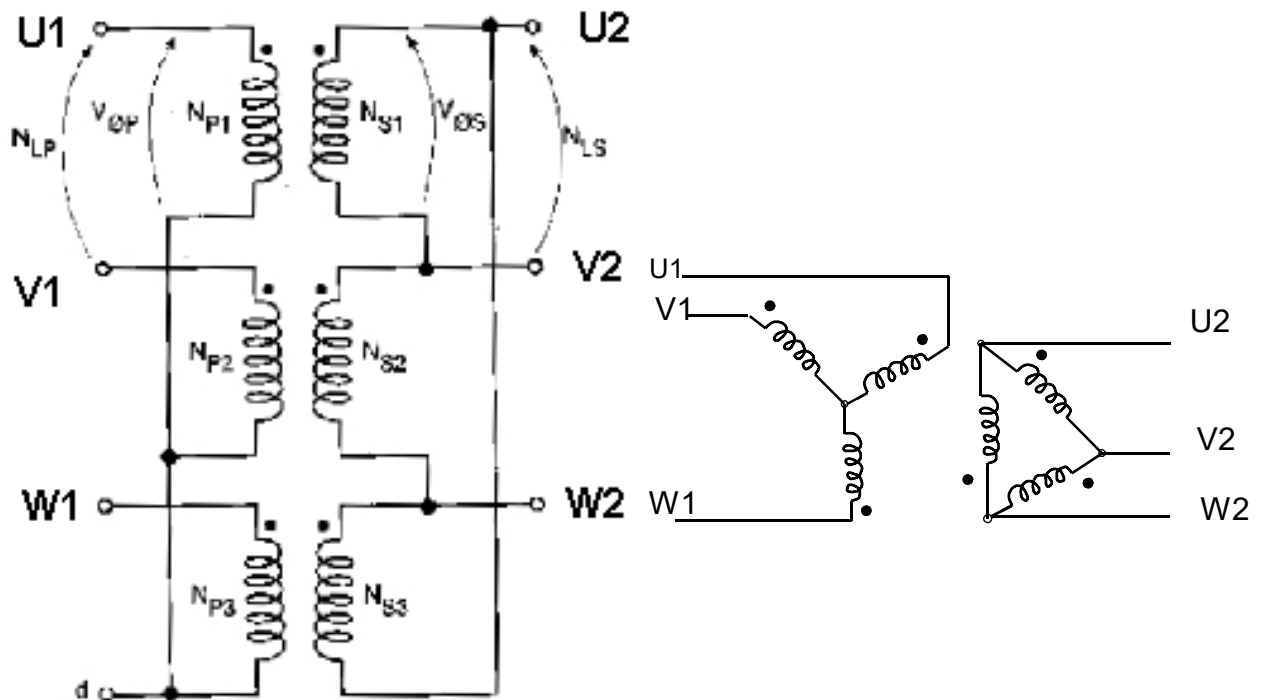


Figura N°9



**Figura N° 10**

### Relación de transformación

Debido a que en sistemas trifásicos existen dos tensiones: **tensión de fase** y **tensión de línea**. Debemos utilizar ambas tensiones, para hallar la relación de transformación, tomando como base la fig. 10, tenemos:

- Considerando la tensión de fase: 
$$a = \frac{V_{pf}}{V_{sf}} = \frac{N_p}{N_s}$$
- Considerando la tensión de línea 
$$\sqrt{3} \cdot a = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{N_{Lp}}{N_{fs}}$$

### Pérdidas del transformador

No hay máquinas que tengan 100% de rendimiento, todas ellas sufren pérdidas de alguna clase, estas pueden resumirse en las siguientes: a) resistencia de los arrollamientos, y b) perdidas en el núcleo. El método para calcula las pérdidas se da en la norma IRAM 2018.

#### **A. Perdidas en los alambres de cobre (Perdidas por Efecto Joule)**

Como en los arrollamientos del primario y secundario de un transformador, la corriente debe fluir a través de la resistencia de los alambres, se pierde una cierta cantidad de potencia por efecto de: 1) la distribución desigual de la corriente en la sección neta del conductor causada por distintos coeficientes de inducción da como resultado una utilización menos

eficiente del conductor., como si aumentara la resistencia. 2) por el aumento de la resistencia debido a la temperatura.

## B. Pérdidas en el núcleo

- **Pérdidas por histéresis**

En un transformador no es posible concatenar la totalidad del flujo, esto se puede reducir empleando núcleos de alta permeabilidad, esto produce pérdidas por histéresis. Este tema fue tratado en el apunte Electromagnetismo.

La superficie de un ciclo de histéresis representa la magnitud de las pérdidas por histéresis por cada ciclo de magnetización, es decir un área pequeña indica una relación pequeña mientras que un ciclo de gran superficie indica una pérdida grande.

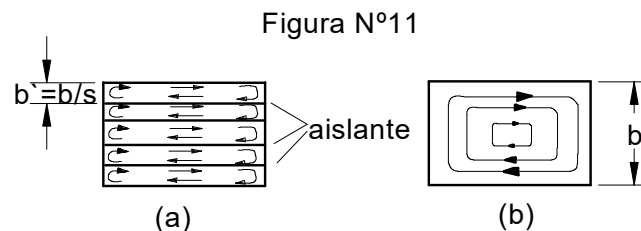
- **Pérdidas por saturación.**

Las pérdidas por saturación se deben al régimen de trabajo por encima del punto llamado codo o rodilla, en la curva B-H. El efecto de saturación produce disminución de rendimiento del transformador. La pérdida por saturación se consigue aumentando la sección del núcleo, pero aumenta el costo y el peso del transformador, por lo que en este caso se diseña al transformador para trabajar en bajas frecuencias para no sobrepasar el codo de la curva de magnetización.

- **Pérdidas por corrientes de Foucault**

Como un núcleo de hierro es un conductor de la electricidad, la variación del flujo alrededor de arrollamiento del transformador induce una tensión en el núcleo, a su vez, esta tensión hace fluir pequeñas corrientes en cortocircuito en el material del núcleo, que se denomina corrientes de Foucault.

Las corrientes de Foucault representan una pérdida de energía, como las pérdidas por histéresis, se disipa en forma de calor en el material del núcleo. Estas pérdidas pueden reducirse en un del núcleo si se divide en secciones, según se muestra en la figura., donde cada sección está aislada eléctricamente de las otras. Como cada filete de corriente de Foucault que fluye en este tipo de núcleo, está limitada a un paso que tiene una sección de superficie muy pequeña, y la resistencia que presenta es muy grande. De esta manera las pérdidas son pequeñas con respecto a núcleo sólido 11 (b).



Los circuitos magnéticos de las máquinas se construyen por medio de láminas superpuestas, aisladas entre sí con barniz, o papel, o el mismo óxido, tal como se ilustra en la figura 11(a) y en la (b).

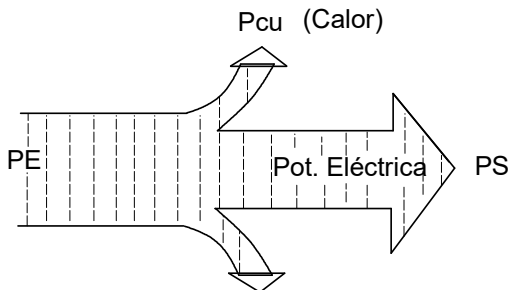
## Rendimiento

La diferencia entre la potencia de entrada y la salida constituye la energía perdida o simplemente “perdidas. Se transforma en calor y es causa de la elevación de la temperatura del transformador en funcionamiento; es lo que gasta o disipa para poder efectuar el proceso de transferencia. Tomando la salida como variable, la ecuación de rendimiento puede escribirse:

$$n = \frac{P_s}{P_e} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + \text{"pérdidas"}} \times 100 \quad \text{Fe} \quad \text{Perdidas} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + P_{ed}.$$

**Fig. 12**

Transferencia de Energía en el transformador



## Transformadores de banda ancha

Los transformadores de audio tienen la particularidad de trabajar con señales con un importante contenido de poli armónicas.

La transferencia (relación de transformación) deberá mantenerse constante en un rango de frecuencias audible, y la variación lineal de la fase con la frecuencia para evitar distorsión armónica. El circuito equivalente general del transformador de audio es el siguiente:

$R_1$  y  $R_2$ : Res. De los arrollamiento      primario y secundario

$R_H$  = Resistencia representativa de las pérdidas por histéresis.

$R_F$  = Resistencia representativa a las pérdidas de Foucault

$L_{d1}$  y  $L_{d2}$ : Inductancias de dispersión del primario y secundario

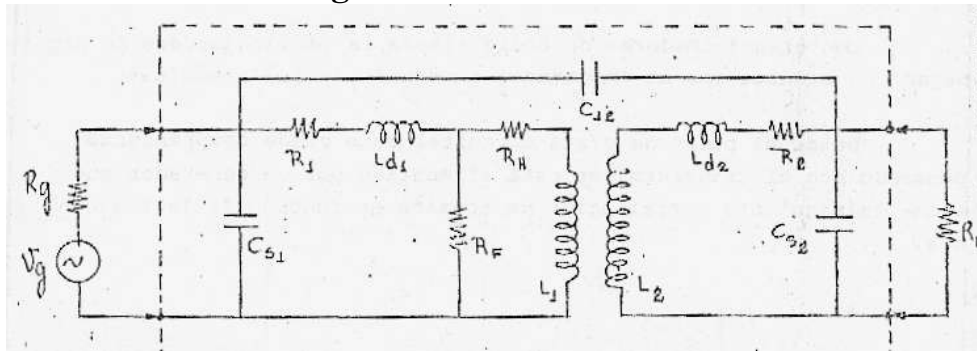
$C_{s1}$  y  $C_{s2}$  = Capacitancia distribuida entre primario y secundario

$C_{12}$ : Capacitancia distribuida entre primario y secundario

$L_1$  y  $L_2$  = Inductancia de magnetización de primario y secundario.

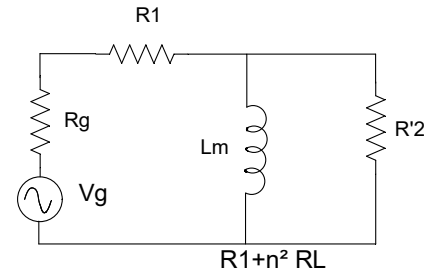


**Fig. 13**



### Baja frecuencia.

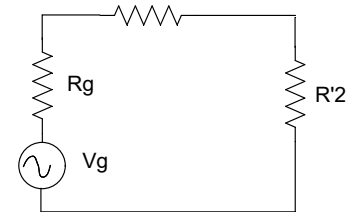
En este rango de frecuencias se puede ignorar las capacidades y las inductancias de dispersión



### Transformador para frecuencias medias.

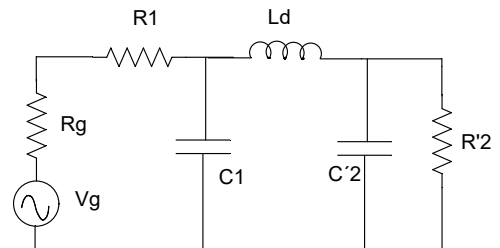
En este rango de frecuencias se desprecian todos los efectos reactivos. Dónde:  $R'_L = n^2 \cdot R_L$

En este rango de frecuencia, tanto el módulo como la fase de la ganancia permanecen constantes.



### Alta frecuencia.

En este rango de frecuencias no pueden despreciarse las inductancias serie ni las capacidades paralelo. El circuito equivalente referido al primario será:



### Construcción de transformadores de banda ancha

Para frecuencias superiores a 50 Hz, habrá que reducir el espesor de las chapas, con el objeto de que las pérdidas en el hierro estén dentro de límites aceptables. Cuando la frecuencia de funcionamiento es superior a unos cuantos kilociclos por segundo, se utilizan núcleos de hierro aglomerado o ferrites, los cuales presentan, junto con sus propiedades magnéticas bastante buenas, unas pérdidas muy pequeñas para las corrientes parásitas.

En estos tipos de transformadores funcionan a frecuencia variable, esto significa que las componentes del circuito equivalente van cambiando según se observa en las figuras anteriores.

## **CUESTIONARIO**

1. ¿Cuáles son las propiedades de los transformadores?
2. Explicar el funcionamiento en vacío. ¿Qué se obtiene a partir de esta puesta en marcha?
3. Explicar el funcionamiento con carga. ¿Qué se obtiene a partir de esta puesta en marcha?
4. Dibujar el modelo circuito completo y mencionar las partes del circuito. Realizar una comparación con el transformador físico y el circuito
5. ¿Qué son las marcas de polaridad? ¿Para que se utilizan?
6. ¿Cuáles son los sistemas de conexión de un transformador trifásico?
7. ¿Cuáles son las pérdidas presentes en un transformador? ¿En que parte del circuito y del transformador físico se presentan? Explicar cada una de ellas, realizar dibujos para facilitar la comprensión