

Unidad 4

**MÁQUINAS ELÉCTRICAS:
TRANSFORMADORES**

ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

(INGENIERÍA MECÁNICA)

M - 14

Ing. Julián J. Ronco (Prof. Adj.)

Ing. Jorge C. Ronco (Prof. Adj.)

Mauro Curli (Aux.)

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

4.1 INTRODUCCIÓN

“Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas, destinadas a funcionar con corrientes alterna, que permiten transformar la energía eléctrica, con unas magnitudes de tensión y corriente determinadas, a otras con valores en general diferentes”

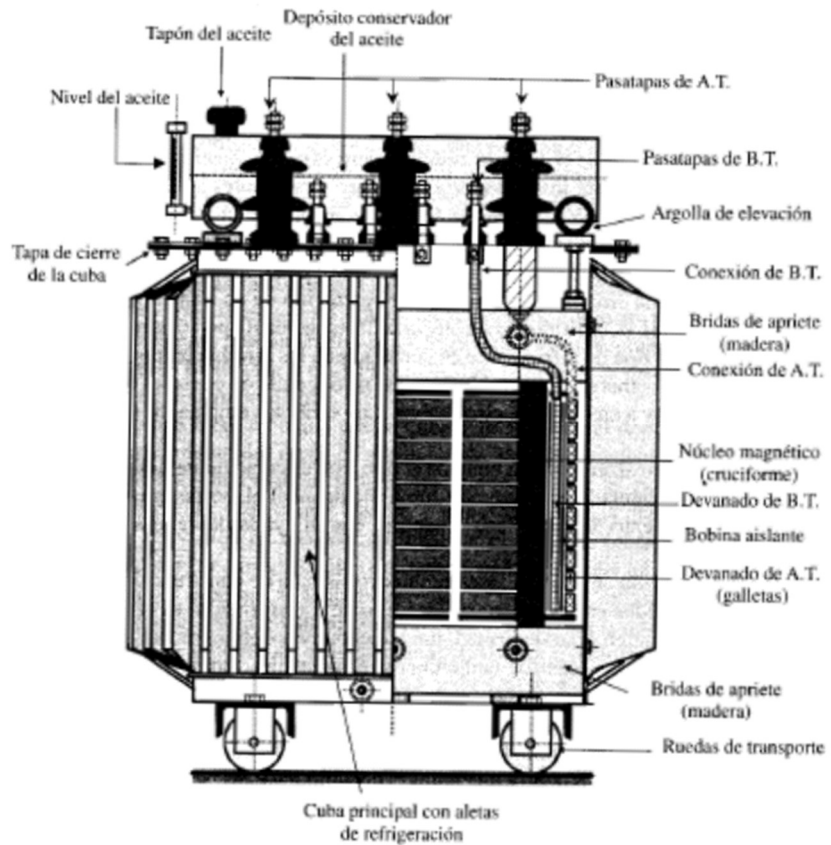
Existen distintos tipos de transformadores:

- De Potencia: son los que trabajan con potencias considerables y tienen como función principal variar la tensión de un sistema de distribución y/o alimentación de una carga.
- De Medida: son los que se emplean para modificar/adaptar los alcances de los instrumentos de medición de corriente alterna y/o aparatos de maniobra y protección, y a su vez se clasifican en:
 - Transformadores de Tensión (TT)
 - Transformadores de Corriente (TI)

Un transformador de potencia consta de las siguientes partes principales:

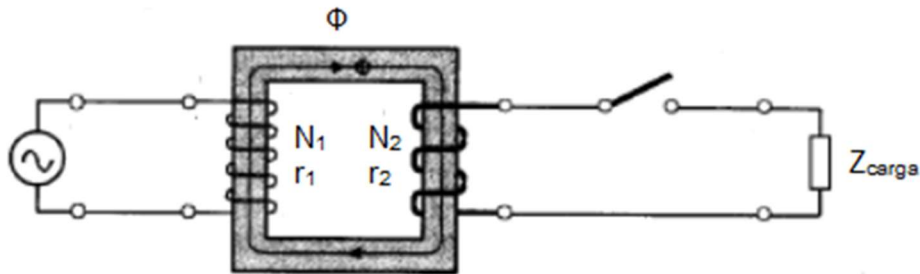
- Núcleo: es el sistema que forma su circuito magnético, constituido por chapas de acero cilicio o “para transformadores”. Estará compuesto por *columnas*, partes donde se montan los devanados, y *culatas*, que realizan los cierres magnéticos o la unión entre columnas.
- Devanados o arrollamientos: conforman el circuito eléctrico del transformador, debiendo estar recubiertos por una capa aislante. Debe haber al menos dos: uno primario (activo), el cual recibe la energía de la red o fuente de alimentación; y otro/s secundario/s (pasivos), los cuales suministran la energía a las cargas correspondientes.
- Sistema de refrigeración y aislante: en transformadores de gran potencia, esta doble función la cumple el aceite: “transformadores en baño de aceite”. En instalaciones que requieran gran seguridad, el uso de aceite (inflamable y explosivo) es reemplazado por resina epoxi: “transformadores secos”.

En la siguiente figura se detallan las partes constitutivas de un transformador de potencia, donde se pueden apreciar los aspectos constructivos el mismo:



4.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Un transformador monofásico, en su concepción teórica puede representarse para su análisis de la siguiente manera:



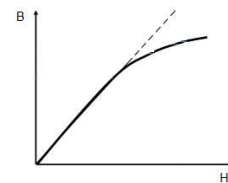
donde:

- N_1 y N_2 son el número de espiras o vueltas de los arrollamientos primario y secundario respectivamente.
- r_1 y r_2 son las resistencias de los arrollamientos primario y secundario respectivamente.

4.2.1 TRANSFORMADOR IDEAL

Consideremos primeramente al transformador ideal, para lo cual se deberían poseer las siguientes características:

- No existen pérdidas en el hierro (Histéresis y Foucoult).
- r_1 y r_2 despreciables, por lo que no existen pérdidas por efecto Joule ni caídas de tensiones en los arrollamientos.
- No existen flujos de dispersión, o sea que el flujo creado por la corriente primaria se canaliza íntegramente por el núcleo.
- Núcleo magnético de alta permeabilidad y constante en todo su volumen, no habiendo saturación del núcleo.



- La tensión de alimentación es senoidal pura: $v_1 = V_{máx} \text{ sen } \omega t$

Si bien un transformador no se puede fabricar cumpliendo estos requisitos, sirve para que en su construcción y diseño se intente aproximar a dicho ideal.

Para comenzar con el análisis, arrancaremos con un transformador monofásico con núcleo real, considerando que se cumplen el resto de las condiciones planteadas para un transformador ideal (b, c, d, e y d). Luego, se irán incluyendo el resto de las características reales y los efectos en el funcionamiento del mismo.

4.2.2 TRANSFORMADOR IDEAL CON NÚCLEO MAGNÉTICO REAL

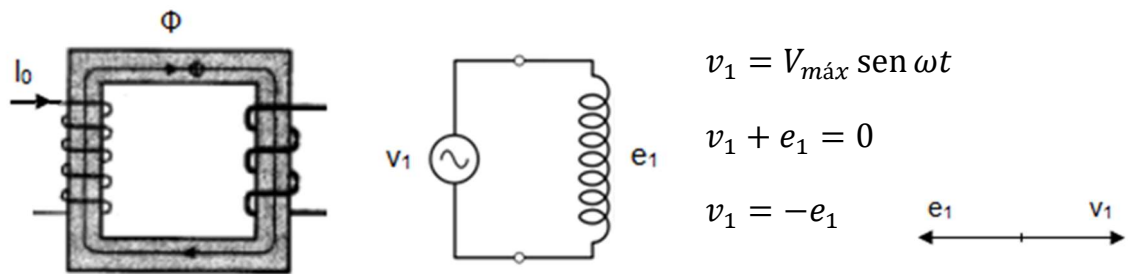
Consideremos un transformador monofásico constituido por un núcleo magnético de alta permeabilidad *real*, por lo que presentará unas pérdidas en el hierro P_{Fe} , y unos arrollamientos primario y secundario con un número de espiras N_1 y N_2 , respectivamente. Como se indicó, los mismos tienen resistencias óhmicas despreciables y no existirán flujos de dispersión, por lo que todo el flujo magnético estará confinado al núcleo, enlazando a ambos devanados.

Funcionamiento en Vacío

El funcionamiento en vacío se da cuando el transformador funciona sin carga, o bien $Z_c \Rightarrow \infty$.

Al aplicar una tensión variable en el tiempo, al devanado primario (1) circulará una corriente I_0 , también variable en el tiempo, que creará un flujo variable Φ_0 .

El circuito eléctrico es el siguiente:



Si la tensión de alimentación es senoidal, la fem inducida (e_1) también será senoidal:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \Phi = -\int e_1 dt / N_1$$

$$\Phi = -\int (-V_{m\acute{a}x} \text{sen } \omega t) dt / N_1 = -V_{m\acute{a}x} \cos \omega t / \omega N_1 = \Phi_{m\acute{a}x} \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (*)$$



Por lo tanto: si la tensión es senoidal \Rightarrow la fem es senoidal \Rightarrow el flujo es senoidal.

de (*)
$$\Phi_{m\acute{a}x} = -V_{m\acute{a}x} / \omega N_1 = -E_{m\acute{a}x} / \omega N_1$$

por lo tanto:
$$E_{m\acute{a}x} = N_1 \omega \Phi_{m\acute{a}x} = N_1 2 \pi f \Phi_{m\acute{a}x}$$

$$E_{ef} = 4,44 N_1 f \Phi_{m\acute{a}x}$$

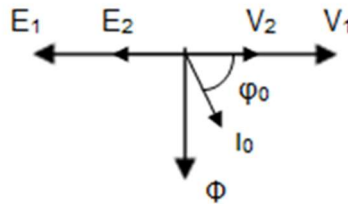
Al igual que en el arrollamiento primario, en el secundario el flujo creará una fem de valor $e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ la que será también senoidal, y donde $E_{2e} = 4,44 N_2 f \Phi_{m\acute{a}x}$

Definimos como **Relación de Transformación** a:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \xrightarrow{\text{para el trafa ideal}} a = \frac{E_1}{E_2}$$

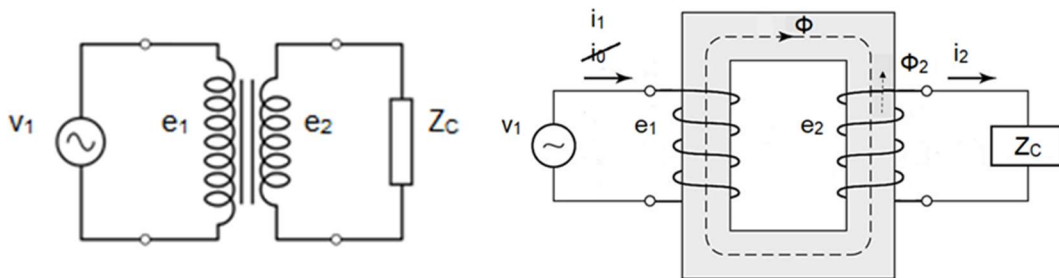
Corriente de vacío (I_0) → La corriente que el transformador absorbe en vacío (circuito abierto), forma un ángulo φ_0 con la tensión aplicada V_1 , de modo que la potencia absorbida en vacío (P_0) será igual a las pérdidas en el hierro P_{Fe} en el núcleo del transformador.

I_0 tiene entonces dos componentes: una activa (I_{Fe}) y otra reactiva (I_μ), quedando el diagrama fasorial de un transformador ideal en vacío con núcleo real:



Funcionamiento en Carga

Se conecta ahora en el secundario una carga cuya impedancia es Z_C ($Z_C \ll \infty$):



Al conectar la carga en el secundario del transformador tengo $v_1 = -e_1 \Rightarrow i_0 \Rightarrow e_2$, lo que hará circular por este una corriente i_2 :

$$i_2 = \frac{e_2}{Z_C} \quad \text{la cual estará retrasada } \varphi_2$$

respecto de la fem e_2 .

Esta corriente i_2 , al circular por el devanado secundario, produce una fuerza magnetomotriz (fmm) $N_2 \cdot i_2$ que se opone a la causa que la origina (desmagnetizante) $N_1 \cdot i_0$, creando un flujo Φ_2 opuesto a Φ , por lo tanto:

$$\Phi_{neto} = \Phi - \Phi_2$$

pero $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$, por lo que si el flujo neto disminuyera trataría de disminuir e_1 pero como este valor a su vez está fijo por la tensión de entrada v_1 , el flujo neto no puede variar, lo que implica que el flujo Φ , el creado por la corriente primaria debe aumentar, y lo hace a expensas de tomar una mayor corriente primaria i_1 .

Es decir, el flujo en el circuito magnético es constante tanto en vacío como en carga. Para ello, el efecto desmagnetizante producido por la corriente por el secundario (i_2) debe ser neutralizada por una corriente adicional que circule por el primario:

$$N_1 i'_2 = N_2 i_2$$

de donde se deduce que la corriente i'_2 adicional primaria: $i'_2 = \frac{N_2}{N_1} i_2 = \frac{i_2}{a}$; $a = \frac{N_1}{N_2}$

De este modo, la corriente total necesaria en el primario i_1 será igual a:

$$i_1 = i_0 + i'_2 = i_0 + \frac{i_2}{a}$$

Cuando un transformador trabaja a plena carga (carga nominal), la corriente i'_2 es, normalmente, por lo menos veinte veces mayor que i_0 , por lo que puede despreciarse en la expresión anterior quedando:

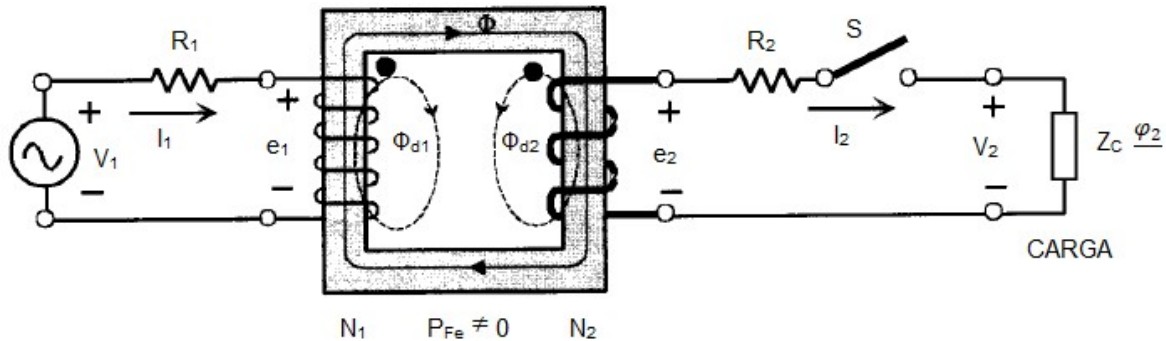
$$i_1 \approx i'_2 = \frac{i_2}{a} ; a \approx \frac{i_2}{i_1}$$

4.2.3 TRANSFORMADOR REAL

En el caso de un transformador real, hay que considerar la existencia de todas las pérdidas presentes en el mismo, las cuales son:

- a) Pérdidas en hierro:
 - *Foucault* → para atenuarlas se laminan los núcleos
 - *Histéresis* → se mejora empleando mejores materiales ferromagnéticos, por ej. el Fe-Si
- b) Pérdidas en los arrollamientos, ya que r_1 y r_2 son $\neq 0$
- c) Flujos de dispersión → se disminuye mejorando el diseño (se analiza en clase)
- d) La permeabilidad μ no es constante (se debe tratar de no saturar el núcleo, lo que se consigue aumentando la sección del núcleo)
- e) En el caso de la tensión de alimentación, consideraremos que es accesible una tensión senoidal.

En la siguiente figura se representan las pérdidas recién enumeradas y/o los elementos en los cuales se presentan (R_1 y R_2):



Funcionamiento en Vacío (S abierto)

Se aprecia en la figura que, de todo el flujo producido por los devanados, solo existe una parte común a ambos, representada por Φ . Esto es consecuencia de los flujos de dispersión que aparecen en los arrollamientos (Φ_{d1} y Φ_{d2} , respectivamente) y que se cierran por el aire que rodea a las bobinas.

Teniendo en cuenta el sentido de los mismos, los flujos totales en los arrollamientos (Φ_1 y Φ_2) se expresan:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} \quad ; \quad \Phi_2 = \Phi - \Phi_{d2}$$

Los circuitos primarios y secundarios de la figura, aplicando de la segunda ley de Kirchhoff, resultan:

$$v_1 = e_1 + R_1 I_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} \quad ; \quad v_2 = e_2$$

En el transformador real dejan de cumplirse $v_1 = e_1$, lo que ocurría en el transformador ideal, por lo que el cociente entre las tensiones primaria y secundaria (V_1 y V_2) deja de ser igual a la relación del transformador (a).

Como se expresó, la corriente de vacío I_0 es despreciable frente a la corriente nominal del transformador I_{1n} , por lo que puede considerarse:

$$v_1 \approx e_1 \quad ; \quad v_{20} = e_2$$

donde v_{20} representa la tensión secundaria en vacío. Por consiguiente, y considerando los valores eficaces de las tensiones, se podrá escribir:

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{V_1}{V_{20}}$$

Esta última relación, es la que se incluye en la placa de características técnicas de la máquina.

Funcionamiento en Carga (S cerrado)

Tanto en vacío como en carga, los flujos magnéticos son prácticamente iguales, por lo que las fmm en ambos estados de carga coinciden:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad \Rightarrow \quad I_1 = I_0 + \frac{I_2}{a}$$

Para resolver diferentes problemas del transformador, analizar su funcionamiento en diferentes estados, o diseñar el mismo, se recurre a su representación por medio de un circuito equivalente que incorpora todos los fenómenos físicos que se producen en la máquina real hasta acá enumerados. De esta forma, se pueden aplicar todos los conocimientos desarrollados de la teoría de redes eléctricas vistas en la Unidad 1.

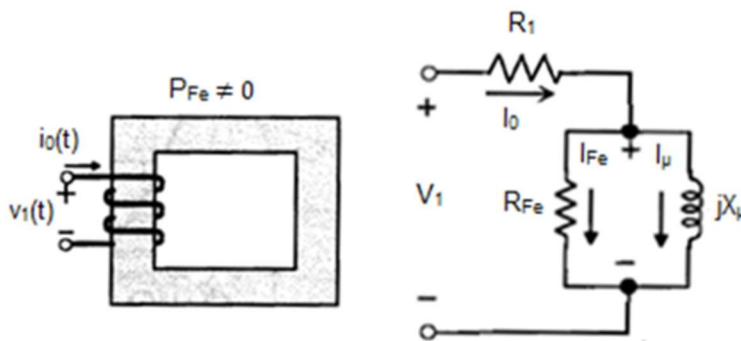
4.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

Analizaremos el comportamiento de cada circuito eléctrico por separado para luego conseguir un único "circuito eléctrico equivalente".

Análisis del Circuito Primario

Como se vio, funcionando el transformador en vacío, al cerrar el circuito primario habrá un consumo de potencia activa: $P_{Fe} + I_0^2 R_1$; por lo que V_1 e I_0 no estarán en cuadratura, pudiendo pensar que la corriente I_0 está compuesta por I_μ (corriente magnetizante) en fase con el flujo, y una I_{Fe} (corriente de pérdidas) en fase con V_1 .

Las pérdidas en el hierro estarán dadas por una resistencia R_{Fe} equivalente pura, que estará en paralelo con una inductancia pura:



En carga, circulará por el arrollamiento primario una corriente $i_1 = i_0 + i'_2$, siendo las pérdidas en el cobre $R_1 I_1^2$.

Hasta acá tenemos:
$$v_1 = R_1 i_0 + N_1 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

donde Φ_1 es el flujo en el núcleo más el flujo de dispersión: $\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1}$

entonces:
$$v_1 = R_1 i_0 + N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

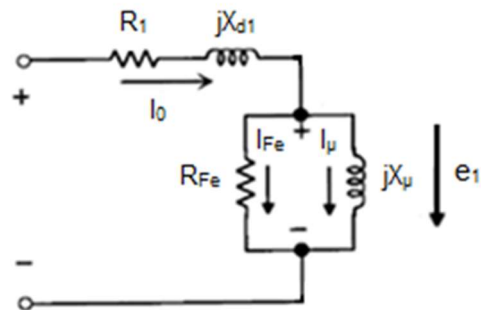
El segundo término representa la caída de tensión en una reactancia ficticia que denominaremos reactancia de dispersión. [La misma puede pensarse como una bobina en serie con el mismo número de espiras que el devanado en cuestión, pero con núcleo de aire.]

Hemos visto: $\Phi = \frac{L}{N} i \Rightarrow \Phi_{1d} = \frac{L_{d1}}{N_1} i_0 \Rightarrow N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} = L_{d1} \frac{di_0}{dt} \Rightarrow j X_{d1} i_0$

Por lo que, en forma compleja, la ecuación del circuito primario queda de la siguiente manera:

$$\dot{V}_1 = R_1 \dot{I}_0 + j X_{d1} \dot{I}_0 + \dot{e}_1$$

donde e_1 es la fem de autoinducción debido al flujo en el núcleo (Φ).

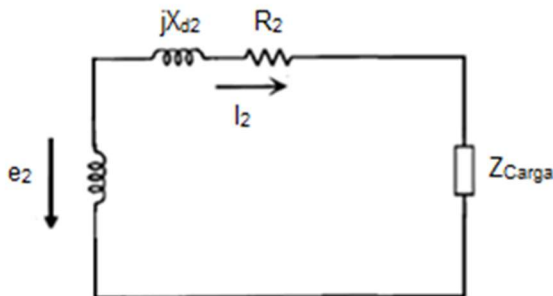


Análisis del Circuito Secundario

Al existir un flujo en el núcleo se inducirá en el secundario una fem que hará circular una corriente i_2 , la que a su vez creará un flujo que tenderá a oponerse al que lo crea. Análogamente al circuito primario, en el secundario también habrá un flujo disperso.

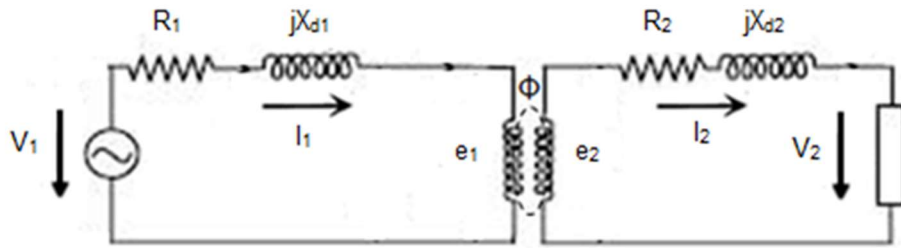
Como ya se ha visto, fijado V_1 , el flujo en el circuito magnético permanece sensiblemente constante, por lo que debe aumentar i_1 .

El circuito secundario queda entonces:



donde:
$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

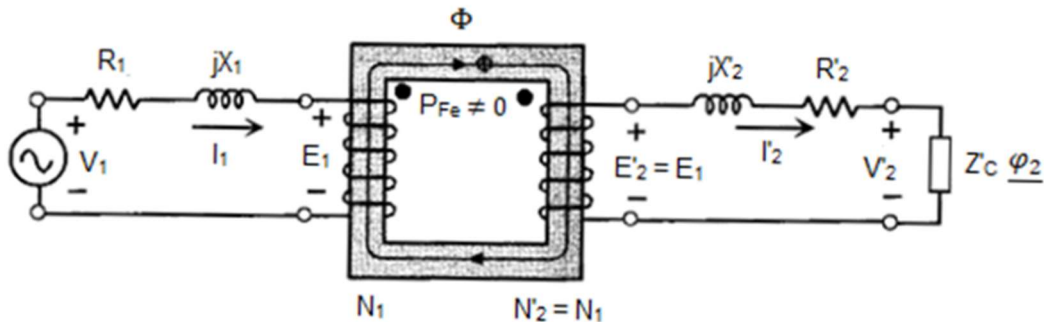
Del análisis precedente, se puede ver que ambos circuitos están vinculados entre sí mediante el flujo común que circula por el núcleo, habiendo tenido en cuenta los efectos de los flujos de dispersión de ambos arrollamientos en las "caídas de tensión" en X_{d1} y X_{d2} respectivamente:



De acuerdo a las Leyes de Kirchhoff, en ambos circuitos:

- Primario: $V_1 = (R_1 + jX_{d1})I_1 + E_1$
- Secundario: $V_2 = -(R_2 + jX_{d2})I_2 + E_2$

Para obtener una representación del transformador en la que no exista la función transformación, o sea que el circuito anterior que está acoplado magnéticamente, pase a otro cuyos elementos estén acoplados solo eléctricamente. Para ello, es necesario igualar el número de espiras del arrollamiento secundario al primario, o viceversa. De esta forma se dice que el circuito equivalente está referido al primario, o al secundario respectivamente:



En el transformador real se cumple: $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \Rightarrow E_2 = \frac{E_1}{a}$

y en el transformador equivalente al ser $N'_2 = N_1$, se tiene:

$$\frac{E_1}{E'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \Rightarrow E'_2 = E_1 = a E_2$$

Para que este circuito sea equivalente al original, se deben conservar las condiciones energéticas de la máquina, por lo que la potencia en el secundario del circuito equivalente deber ser igual que en el circuito real; esto es:

$$S_2 = E_2 I_2 = E'_2 I'_2$$

teniendo en cuenta que: $E'_2 = a E_2$ se obtiene: $E_2 I_2 = a E_2 I'_2$

por lo que: $I'_2 = \frac{I_2}{a}$

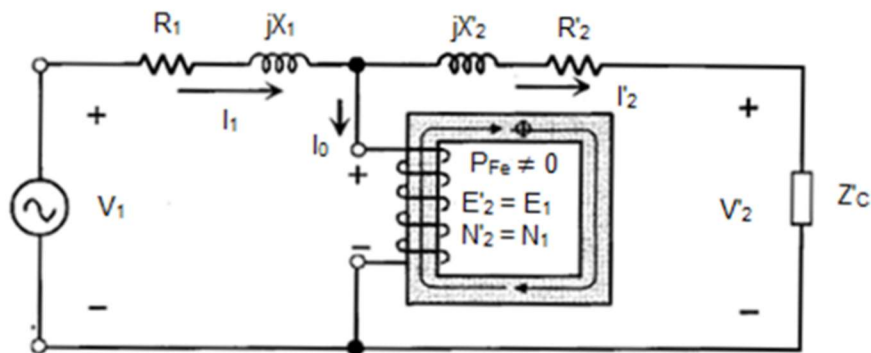
Si ahora analizamos la potencia activa que se disipan en las resistencias, se obtiene:

$$R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2$$

de donde se deduce: $R'_2 = a^2 R_2$

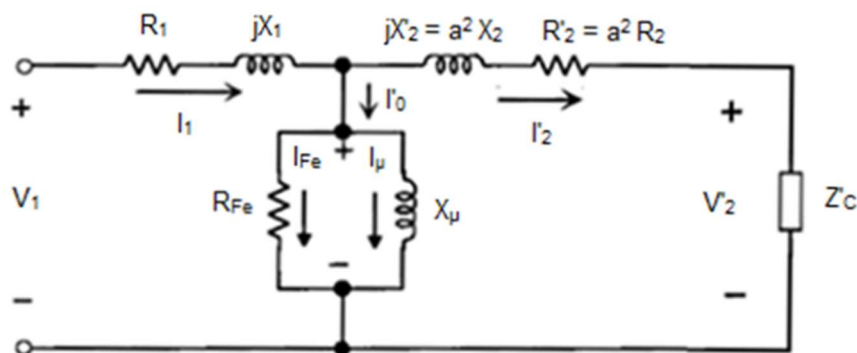
De forma similar se llega a: $X'_2 = a^2 X_2$ y $Z'_C = a^2 Z_C$

Lo hasta aquí desarrollado, nos permite reunir los extremos de ambas bobinas, sustituyendo ambos devanados por uno solo:



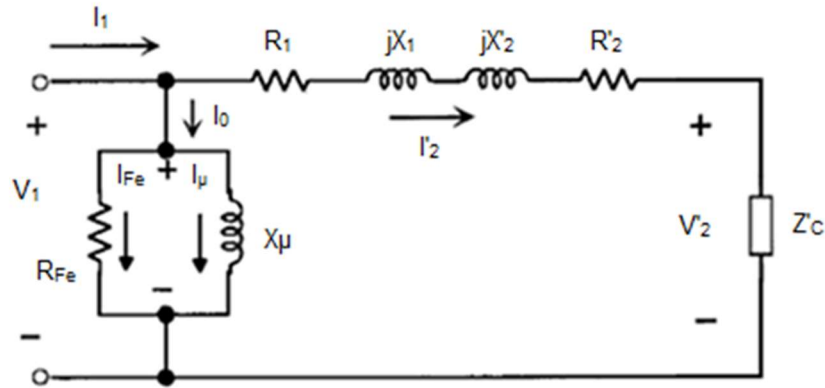
Por dicho arrollamiento único circulará una corriente diferencia: $I_1 - I'_2 = I_0$, que como se explicó tiene dos componentes: una activa I_{Fe} a través de una resistencia R_{Fe} , que representa las pérdidas en el hierro (Foucoult e Histéresis); y otra reactiva I_μ a través de una reactancia X_μ , en paralelo con R_{Fe} , que representa la corriente de magnetización de la máquina.

El circuito anterior puede entonces representarse por lo que se conoce como **“Circuito equivalente exacto”** o **“T”** de un transformador, en este caso reducido al primario:



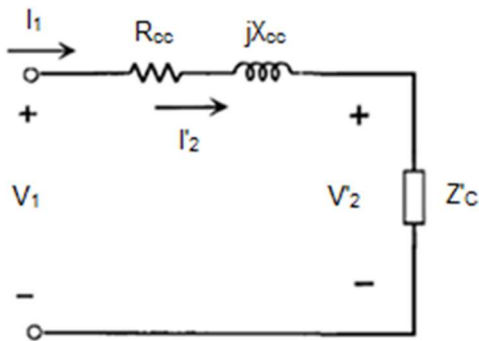
Circuito Equivalente Exacto; Real o T referido al primario

En condiciones normales de funcionamiento, el valor reducido de I_0 frente a las corrientes I_1 e I_2 , permite trabajar con un “**Circuito equivalente aproximado**” que se obtiene trasladando la rama en paralelo por la que se deriva la corriente de vacío, a los bornes de entrada del primario, resultando el siguiente esquema:



Circuito Equivalente Aproximado

En algunos casos prácticos, donde interese calcular la caída de tensión del transformador o bien su rendimiento o regulación, se puede prescindir de la rama paralelo del circuito anterior, obteniendo el “**Circuito equivalente Simplificado**”:



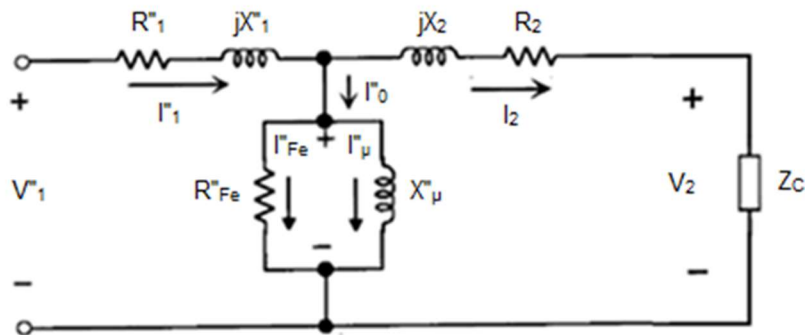
donde:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2: \text{resistencia de cortocircuito}$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2: \text{reactancia de cortocircuito}$$

En grandes transformadores se cumple que X_{cc} es varias veces R_{cc} , por lo que se puede utilizar solamente la reactancia en serie X_{cc} para representar el circuito equivalente del transformador.

Análogamente, se pueden tener los circuitos anteriores referidos al secundario:



Circuito Equivalente Exacto; Real o T referido al secundario

Hemos visto:

$$\frac{E_1}{E_2} = a \Rightarrow \frac{E_1}{a} = E_2 \Rightarrow \mathbf{E_1'' = \frac{E_1}{a}}$$

Además:
$$E_1'' I_1'' = E_1 I_1 \Rightarrow I_1'' = \frac{E_1}{E_1''} I_1 = a I_1$$

$$\mathbf{I_1'' = a I_1} \quad \text{y} \quad \mathbf{Z_1'' = \frac{Z_1}{a^2}}$$

4.4 ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR

Como se mencionó, el comportamiento de un transformador bajo cualquier condición de trabajo, puede predecirse con suficiente exactitud mediante el circuito equivalente. Por lo tanto hay que conocer los parámetros del mismo, los cuales se obtienen con unos ensayos que requieren muy poco consumo de energía (la suficiente para suministrar únicamente las pérdidas de la máquina):

Los ensayos a realizar a un transformador son los siguientes:

- **Determinación de la polaridad de los terminales**
- **Medición de resistencias de arrollamientos:** se realiza empleando un método de cero aplicando corriente continua a cada uno (Puente de Wheatstone o Amperímetro y Voltímetro) y luego hay que utilizar un factor de corrección para referir los valores hallados a corriente alterna (teniendo en cuenta el efecto pelicular que se produce con esta). Luego referirse a 75°C.
- **Determinación de la Relación de Transformación:** se utiliza un Relaciómetro, o bien se alimenta con tensión nominal senoidal uno de sus arrollamientos y se miden las tensiones en ambos, entando el transformador sin carga (vacío).
- Ensayo de vacío
- Ensayo de cortocircuito

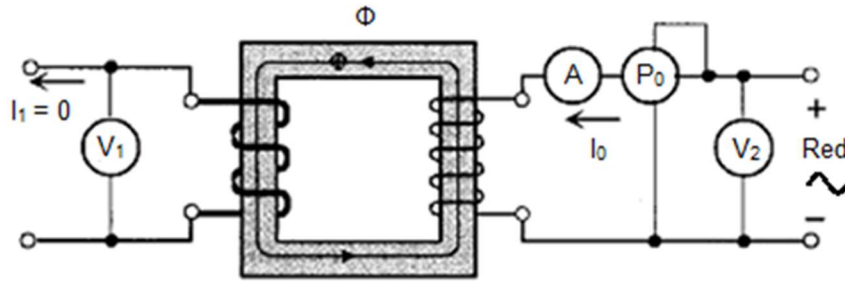
Desarrollaremos brevemente estos dos últimos ensayos.

4.4.1 ENSAYO DE VACÍO

Consiste en alimentar al transformador con la tensión nominal (en la práctica real en el lado de B.T., por disponibilidad de escalas de los equipos de medida empleados, provisión de energía y seguridad para el operador al trabajar con B.T.), dejando el otro lado en circuito abierto.

Debe controlarse además el factor de forma y que la frecuencia durante el ensayo sea la nominal.

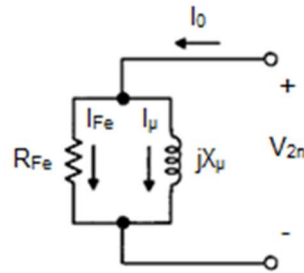
En estas condiciones, alimentando el secundario (lado de B.T.), debe medirse la potencia absorbida P_0 , la corriente de vacío I_0 y la tensión de salida:



Resumiendo, las lecturas de los instrumentos serán: P_0 ; V_2 ; V_{10} ; I_0

La potencia consumida en el circuito será: $P_0 = (R_2 + R_0'')I_0^2$ pero como las pérdidas en el cobre secundario en vacío $R_2 I_0^2$ son despreciables (debido al pequeño valor de I_0 y que $R_2 \ll R_0$), la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro, lo que está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado al ser $I_2 = 0$:

$$P_0 = R_0'' I_0^2 \Rightarrow R_0'' = \frac{P_0}{I_0^2}$$



Por otra parte:

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = \sqrt{(R_2 + R_0'')^2 + (X_2 + X_0'')^2} \cong \sqrt{R_0''^2 + X_0''^2}$$

$$X_0'' = \sqrt{Z_0''^2 - R_0''^2}$$

Es decir, el ensayo de vacío permite determinar las pérdidas en el hierro del transformador (Histéresis y Foucoult) y también los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente del mismo. También puede obtenerse la relación de transformación, debido a que V_{2n} aplicada es prácticamente coincide con E_2 ; además, las fem E_1 es igual a la tensión medida en el lado primario en vacío V_{10} .

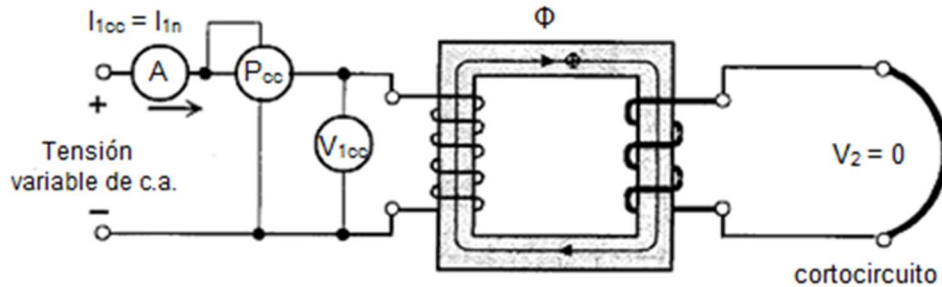
4.4.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Consiste en cortocircuitar el devanado secundario (el lado de B.T., debido a que la corriente a medir del lado primario será de valor razonable, la tensión de alimentación solo

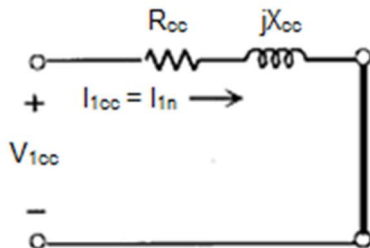
será una pequeña parte de la nominal, estando la misma dentro de las escalas de los equipos de medición utilizados), aplicando al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente nominal por los devanados.

Debe controlarse además que la frecuencia durante el ensayo sea la nominal.

En estas condiciones, alimentando el primario (lado de A.T.), debe medirse la potencia absorbida P_{cc} , la corriente de ensayo I_n y la tensión de ensayo V_{cc} :



La tensión aplicada necesaria en este ensayo representa una pequeña parte respecto a la nominal, por lo que el flujo en el núcleo es pequeño, siendo despreciables entonces las pérdidas en el hierro. Teniendo esto en cuenta, y que Z'_0 está en paralelo Z'_2 siendo $Z'_0 \gg Z'_2$, puede omitirse en el circuito equivalente del transformador la rama paralelo, quedando conformado el mismo de la siguiente manera:



La potencia que lee el vatímetro será:

$$P_{cc} = (R_1 + R'_2) I_{1n}^2 \Rightarrow (R_1 + R'_2) = \frac{P_{cc}}{I_{1n}^2}$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{cc} &= \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1n}} \Rightarrow \tan \varphi_{cc} \\ &= \frac{X_1 + X'_2}{R_1 + R'_2} \Rightarrow X_1 + X'_2 \end{aligned}$$

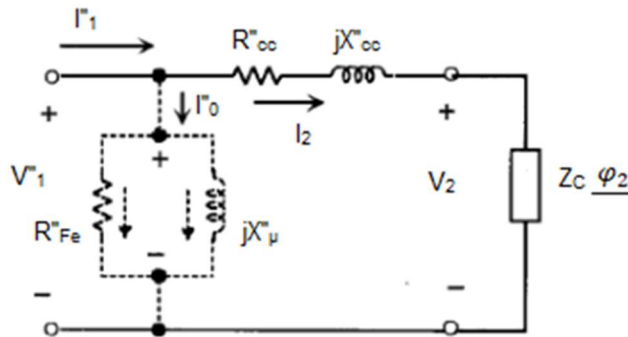
Como se observa, este ensayo permite determinar los parámetros de la rama serie del circuito equivalente del transformador: R_{cc} y X_{cc} .

Ya se mencionó que las resistencias R_1 y R'_2 de los arrollamientos primario y secundario pueden determinarse mediante la medición con corriente continua, aplicando luego el factor de corrección para corriente alterna. Sin embargo, no existen procedimientos para separar los valores X_1 y X'_2 . En la práctica de la ingeniería eléctrica es frecuente recurrir a la solución aproximada siguiente:

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_{cc}}{2} \quad \text{y si no se conocen } R_1 \text{ y } R'_2: \quad R_1 = R'_2 = \frac{R_{cc}}{2}$$

4.5 REGULACIÓN DEL TRANSFORMADOR

Sea el transformador en carga representado por el circuito equivalente aproximado referido al secundario:



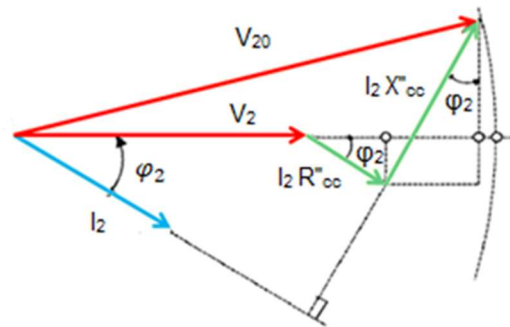
donde:

$$Z''_{cc} = (R''_1 + R_2) + j(X''_1 + X_2)$$

En vacío, el secundario proporciona una tensión V_{20} ; cuando se conecta una carga al transformador, debido a la impedancia interna del mismo (Z''_{cc}), la tensión en el secundario será V_2 :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1'' - \dot{I}_2 Z''_{cc} = \dot{V}_{20} - \dot{I}_2 Z''_{cc}$$

donde $\dot{I}_2 Z''_{cc}$ representa la caída de tensión interna del transformador.



Del diagrama fasorial puede calcularse V_{20} como:

$$|V_{20} - V_2| \approx (R''_{cc} I_2 \cos \varphi_2 +) \sqrt{(V_2 \cos \varphi_2 + I_2 R''_{cc})^2 + (V_2 \sin \varphi_2 + I_2 X''_{cc})^2}$$

Se denomina **regulación**, a la caída de tensión interna respecto a la tensión secundaria en vacío:

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \quad \text{o} \quad \varepsilon\% = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \cdot 100\%$$

4.6 PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

En un transformador se presentan diferentes tipos pérdidas, las cuales pueden diferenciarse como fijas o variables.

4.6.1 PÉRDIDAS VARIABLES

Estas pérdidas, que cambian según sea el régimen de carga, son debidas a las pérdidas en el cobre. Como se vio, estas pueden obtenerse del ensayo de cortocircuito:

$$[P_{cu}]_n = P_{cc} = R_{cc} I_2'^2$$

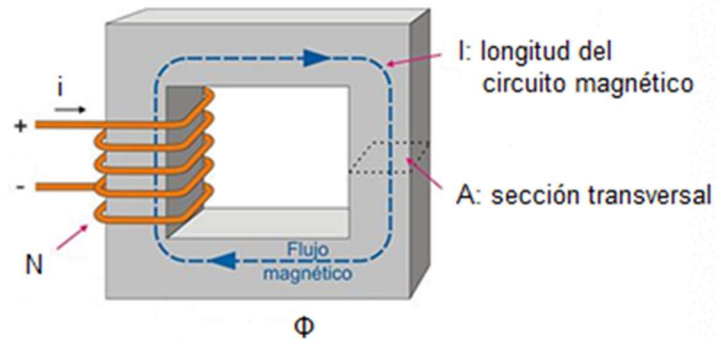
En general, para una corriente secundaria I_2' se cumplirá: $P_{cu} = R_{cc} I_2'^2$

4.6.2 PÉRDIDAS FIJAS O EN EL HIERRO (NÚCLEO)

Pérdidas por histéresis

$$\Phi = B \cdot A$$

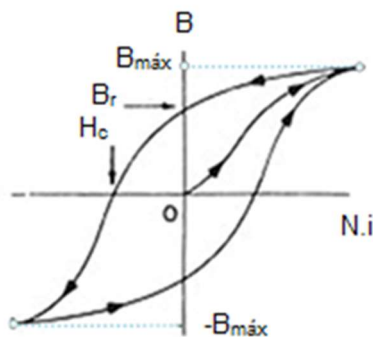
$$H = \frac{F_{mm}}{l} = \frac{N I}{l}$$



$$B \cdot A = \Phi = \frac{F_{mm}}{R} = \frac{N I}{\frac{l}{\mu A}} \quad \therefore \quad B = \mu H$$

Cuando los circuitos magnéticos se hallan sometidos a densidades de flujo que varían en el tiempo, se producen en ellos pérdidas de energía en forma de calor.

Una causa de estas pérdidas se debe al fenómeno de Histéresis, que consiste en lo siguiente:



Partiendo del material desmagnetizado (punto 0), al aumentar la corriente i de cero hasta su valor $I_{máx}$, el campo B va aumentando de 0 a $B_{máx}$, pero cuando empieza a disminuir la corriente el valor de B disminuye por otro "camino" como se ve en la figura.

Al volver i al valor cero, quedó en el material un campo B denominado *magnetismo* o *inducción remanente*. Es decir que toda la energía entregada al circuito magnético no es devuelta totalmente al sistema. Este fenómeno se repetirá f (frecuencia) veces por unidad de tiempo.

El valor H_c se denomina *campo coercitivo*, que es el valor de campo (o corriente) opuesta que es necesario aplicar para desmagnetizar el material. Luego el ciclo se completa alcanzando valores negativos máximos de corriente y volviendo a repetir el ciclo, denominado *ciclo de histéresis*.

Se puede verificar que las pérdidas por unidad de volumen del material del núcleo son proporcionales al área encerrada por el ciclo de histéresis y al número de ciclos por segundo.

$$P_H = k_H f V B_m^\alpha \quad [\text{Wattios}]$$

siendo:

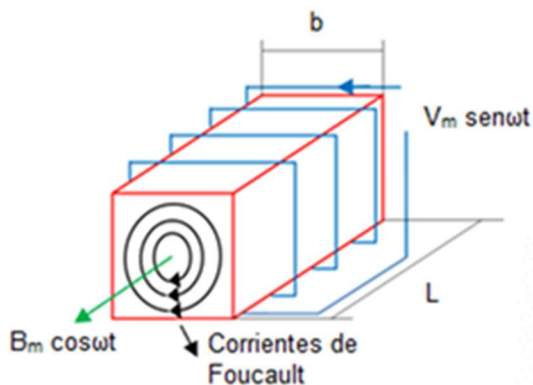
- k_H : constante denominada coeficiente de Steinmetz.
- B_m : valor máximo de la densidad de flujo ($B_m = \Phi_m/A$); pero Φ_m depende de $E_{m\acute{a}x}$, es decir de la tensión de alimentación).
- f : frecuencia
- α : exponente de Steinmetz, que depende de la naturaleza del núcleo ferromagnético; varía entre 1,5 y 2,5.
- V : volumen del material

Es evidente que para disminuir las pérdidas por histéresis, para una dada tensión de alimentación y una determinada frecuencia, se debe utilizar un material que tenga un bajo k_H (un lazo o ciclo de histéresis angosto – área cerrada pequeña).

Para la construcción de transformadores se utilizan por lo general, en la industria, chapa de Fe-Si grano orientado.

Pérdidas por corrientes de Foucault o parásitas

La segunda causa de pérdidas en el núcleo se debe a que por dicho elemento atraviesa un flujo variable, que da lugar a fems inducidas en el núcleo, que al ser conductor creará corrientes inducidas, las que originarán una pérdida de energía ($i^2 R$).



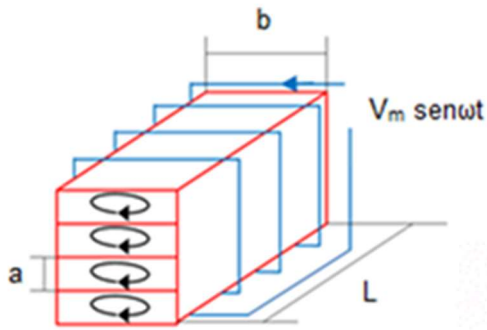
Estas pérdidas vienen dadas por la siguiente expresión:

$$P_F = k_F f^2 V B_m^2 \quad [\text{Wattios}]$$

donde:

- k_F : es una constante característica del núcleo.

Vemos que las pérdidas dependen del $B_{m\acute{a}x}$, de la frecuencia (f) y del volumen por el que circulan dichas corrientes parásitas.



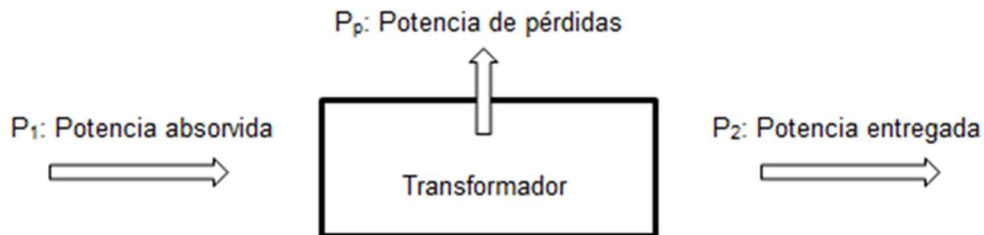
A los efectos de disminuir dichas corrientes parásitas, se deberá aumentar la resistencia donde se cierran las mismas, lo que se consigue laminando el núcleo mediante chapas magnéticas de pequeño espesor (disminuyendo el volumen), aisladas entre sí por medio de un barniz o el simple óxido de la chapa.

Por lo tanto, las pérdidas totales en el núcleo (fijas) serán:

$$P_{Fe} = P_H + P_F$$

Para un transformador ya construido, como se vio, las pérdidas en el núcleo sólo dependerán de la frecuencia y la tensión de alimentación; es por ello que, para condiciones normales de servicio, permanecerán prácticamente constantes en todas las condiciones de carga del mismo.

4.6.3 RENDIMIENTO - η

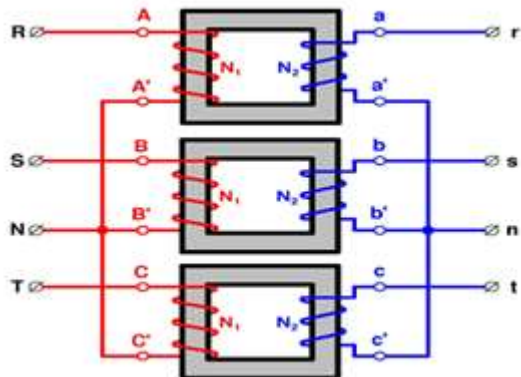


Como en cualquier máquina eléctrica, el rendimiento es el cociente entre la potencia útil o entregada a la carga y la potencia total o absorbida por la máquina, es decir:

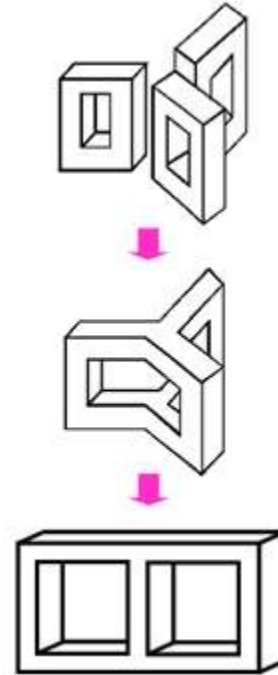
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_p}$$

4.7 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

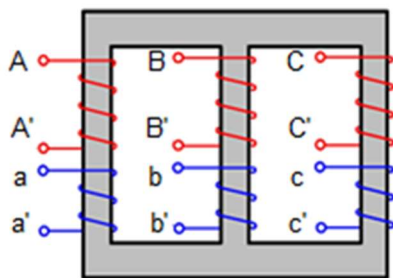
Tres transformadores monofásicos pueden conectarse entre de distintas maneras, formando un sistema trifásico, con circuitos magnéticos independientes. Este sistema es poco económico, ya que emplea mucho volumen de hierro, pero es utilizado en casos particulares, ya sea por la energía puesta en juego o requerimientos particulares de instalación.



Banco de transformadores monofásicos



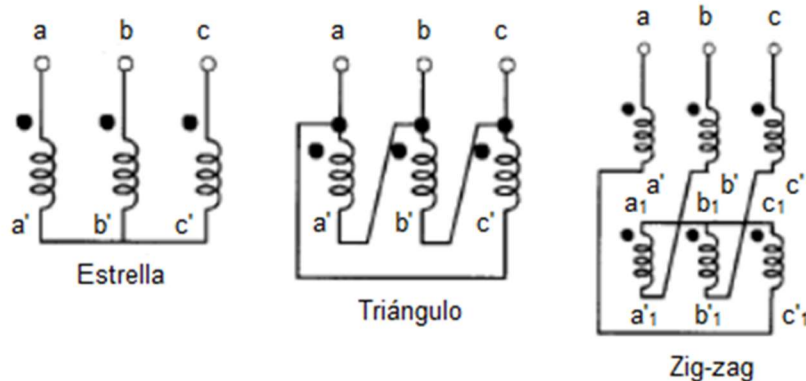
Como se aprecia en la figura de la derecha, la disposición física se puede pensar con una columna central en común, la cual al ser: $\Phi_s + \Phi_r + \Phi_t = 0$ puede eliminarse y reducirse el sistema a solo tres columnas iguales, en las cuales se alojarán todos los arrollamientos de cada fase, tanto primarios y secundarios, que constituyen el transformador:



Transformador de núcleo trifásico

Ahora, las longitudes de los circuitos magnéticos no serán iguales, lo que traerá una pequeña asimetría en las I_0 . Sin embargo, la corriente de vacío es de pequeño valor (3 al 8% de la nominal primaria), por lo que el efecto de dicha asimetría cuando el transformador trabaja en carga es prácticamente despreciable, y no se apreciarán asimetrías de las corrientes en dicha situación.

Las formas que más frecuentemente se emplean para realizar las conexiones de los arrollamientos son: estrella (con o sin neutro), en triángulo y en zig-zag:



Estas diferentes conexiones se designan con letras, como se indica a continuación:

- Estrella: Y (en el lado de A.T.) - y (en el lado de B.T.)
- Triángulo: D (en el lado de A.T.) - d (en el lado de B.T.)
- Zig-zag: Z (en el lado de A.T.) - z (en el lado de B.T.)

Si bien pueden combinarse estas conexiones del lado de A.T. y B.T., en la práctica se utiliza un número limitado, que dependerá de la aplicación que se quiera dar y fundamentalmente de un problema de armónicos en la corriente y/o tensión, así como distinto comportamiento frente a cargas desequilibradas.

En la industria, el que se utiliza normalmente para reducir de media (13,2 o 33kV) a baja tensión (0,4kV) es el tipo **Dy₁₁** (triángulo-estrella). La conexión estrella en el lado de B.T. permite tener acceso al punto neutro, obteniendo tensiones de fase.

Dependiendo de los tipos de conexión de los devanados del transformador, pueden aparecer unas diferencias de fase entre las tensiones compuestas (de línea) del primario y secundario. Por eso, cuando se expresó en el tipo **Dy₁₁**, se incluyó el sufijo 11 para indicar este desfase, el cual se denomina *índice horario* del transformador. Estos ángulos no se miden en grados, sino en múltiplos de 30°, lo que permite identificarlos con los que forman entre sí las agujas de un reloj; ejemplos:

- Índice horario o grupo 1: significa un retraso $1 \times 30^\circ = 30^\circ$
- Índice horario o grupo 6: significa un retraso $6 \times 30^\circ = 180^\circ$
- Índice horario o grupo 11: significa un retraso $11 \times 30^\circ = 330^\circ$

En el estudio de transformadores trifásicos se considera cada columna como un transformador monofásico, de forma que los ensayos, esquemas equivalentes, etc., se pueden expresar en valores simples, pudiéndose aplicar entonces, las mismas técnicas de análisis empleadas en el estudio de los transformadores monofásicos.

4.8 PARALELO DE TRANSFORMADORES

Cuando aumenta la demanda en un sistema eléctrico, es necesario con frecuencia elevar la potencia de los transformadores de alimentación. Antes que retirar una unidad antigua y sustituirla por otra de mayor potencia, resulta conveniente tanto económica como técnicamente, disponer de un transformador adicional, el cual deberá conectarse en paralelo.

Lo recién mencionado puede verse si, por ejemplo, en una instalación eléctrica, en lugar de un transformador de gran potencia para cubrir toda la demanda, se disponen de dos o tres transformadores más pequeños en paralelo. Así, en los períodos de menor demanda funcionará solamente uno de ellos y en épocas de mayor consumo se incorporaran otras unidades. De esta manera los transformadores trabajar siempre más próximos a su potencia nominal, mejorando considerablemente el rendimiento de la instalación. También, en el caso de falla de uno de los equipos, se podrá continuar alimentando la carga más esencial con el o los transformadores restantes.

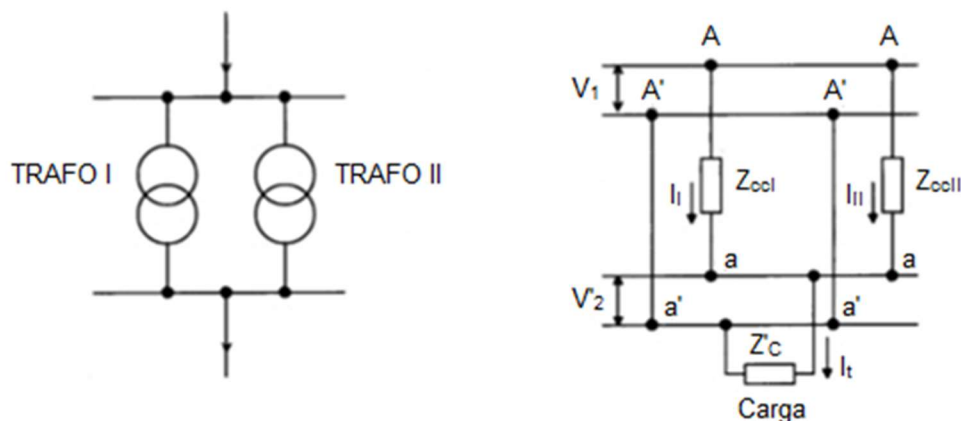
Las condiciones necesarias para el acoplamiento en paralelo de transformadores sea perfecto son las siguientes:

- Deben poseer las mismas relaciones de transformación, esto es, las tensiones nominales primarias y secundarias (compuestas o de línea en el caso de transformadores trifásicos) deben ser iguales.
- Los transformadores deben tener el mismo índice horario (pertenecer al mismo grupo de conexiones en el caso de transformadores trifásicos).
- Deben tener idénticas tensiones relativas de cortocircuito (μ_{cc}).

Las dos primeras son condiciones necesarias en cualquier estado de carga de los transformadores; aún en vacío para evitar corrientes de circulación entre ambos transformadores en ausencia de carga.

La tercera condición es necesaria para el correcto funcionamiento en carga, de forma que esta última se distribuya entre los transformadores, proporcionalmente a sus potencias nominales. Sin embargo, se admiten desviaciones máximas del 10% de las μ_{cc} .

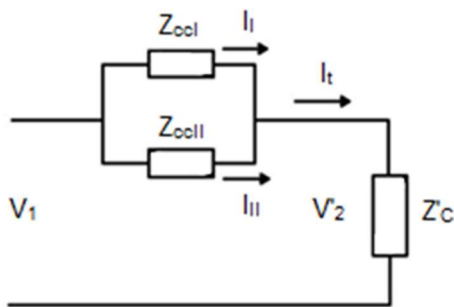
Analicemos el funcionamiento de dos transformadores conectados en paralelo:



donde:

- Z_{ccl} y Z_{cclI} son, respectivamente, las impedancias complejas de cortocircuito de cada transformador reducidas al primario;
- I_I en I_{II} son las corrientes de carga de ambos transformadores reducidas al primario;
- U'_2 en la tensión compleja secundaria reducida al primario;

Supongamos que ambos transformadores tienen igual relación de transformación y grupo de conexión, pero que $\mu_{ccl} \neq \mu_{cclI}$. El esquema equivalente simplificado del acoplamiento se puede representar de la siguiente manera:



Al ser comunes las tensiones primaria y secundaria, las caídas de tensión serán idénticas, es decir:

$$Z_{ccl} I_I = Z_{cclI} I_{II}$$

Por lo tanto, las corrientes que toma cada transformador es inversamente proporcional a sus impedancias de cortocircuito.

Ejemplo: sean dos transformadores 13,2/0,38kV (Y-y)

I₁) $S_n = 100\text{kVA}$ - $\mu_{ccl} = 5\%$ / **I₂**) $S_n = 200\text{kVA}$ - $\mu_{cc2} = 4\%$

que deben alimentar una carga de 300kVA con un $\cos\phi = 0,8$.

Trafo 1

$$V_{f2n_1} = 220V$$

$$I_{2n_1} = \frac{100\text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,38\text{kV}} = 152A$$

$$\frac{V_{e_1}}{V_n} \cdot 100 = 5 \Rightarrow V_{e_1} = 11V$$

$$Z''_{cc_1} = \frac{V_{e_1}}{I_{n_1}} = \frac{11V}{152A} = 0,0724\Omega$$

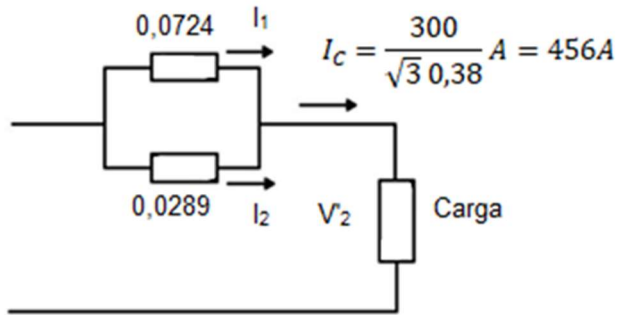
Trafo 2

$$V_{f2n_2} = 220V$$

$$I_{2n_2} = \frac{200\text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,38\text{kV}} = 304A$$

$$\frac{V_{e_2}}{V_n} \cdot 100 = 5 \Rightarrow V_{e_2} = 8,8V$$

$$Z''_{cc_1} = \frac{V_{e_2}}{I_{n_1}} = \frac{8,8V}{304A} = 0,0289\Omega$$



$$I_2 = 456 \frac{0,0724}{(0,0724 + 0,0289)}$$

$$I_2 = 326A > I_{n_2}$$

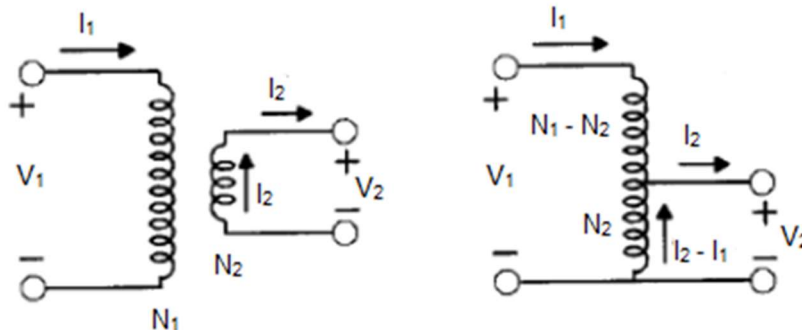
De la misma manera: $I_1 = 130A < I_{n_1}$

Vemos que el transformador que posee un μ_{cc} menor alcanza antes que el otro transformador sus valores nominales (corriente y potencia aparente), por lo que trabajará sobrecargado en el caso de estudio. También, puede pensarse que el T₂ limitará la potencia que el otro puede aportar en paralelo, siendo menor a la que puede aportar independientemente.

4.9 AUTOTRANSFORMADOR

El autotransformador es un transformador especial formado por un devanado continuo que se utiliza a la vez como primario y secundario.

Veamos los esquemas de un transformador y un autotransformador, ambos con la misma relación de transformación, o sea iguales tensiones de entrada y salida:



Una de las primeras observaciones es que el transformador necesita N_1 espiras en el primario y N_2 espiras en el secundario; mientras que el autotransformador solo emplea N_1 espiras: $N_1 - N_2$, por la que circula la corriente I_1 ; y una derivación que recoge N_2 espiras, por la que circula una corriente $I_2 - I_1$ en el sentido indicado.

Si se considera que las dos máquinas son ideales, no existirán caídas de tensión, corriente de vacío, etc., y se verificará:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

A demás, si se tiene en cuenta que el peso insumido en cobre es proporcional al número de espiras y a la corriente que las recorre (la sección de los conductores es proporcional a la intensidad que circula por ellos), la relación entre el peso de cobre como autotransformador G_a y como transformador G_t será:

$$\frac{G_a}{G_t} = \frac{I_1(N_1 - N_2) + (I_2 - I_1)N_2}{I_1N_1 + I_2N_2} = 1 - \frac{V_2}{V_1}$$

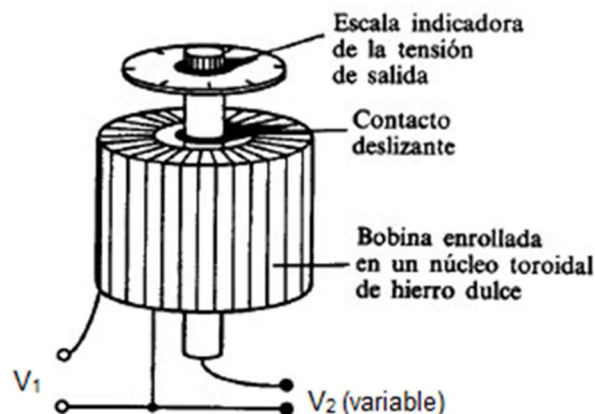
lo que indica un ahorro en material para el autotransformador frente al transformador. Por ejemplo, si $U_1/U_2 = 2$, se obtiene un ahorro en el cobre del 50%. Además, la reducción en el número de espiras total permite también emplear circuitos magnéticos con menos *ventana*, lo que supone un menor peso en hierro invertido en la construcción.

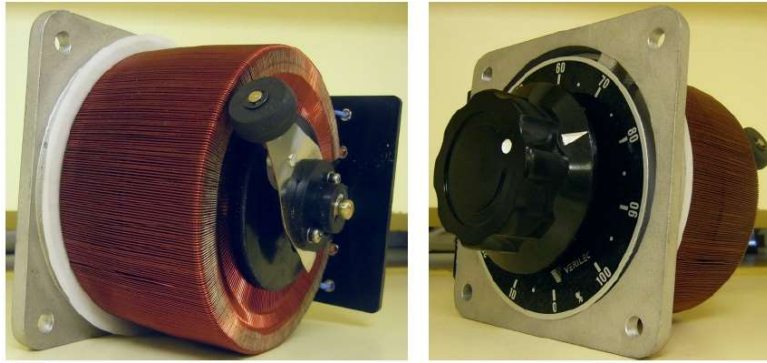
El autotransformador tiene, en consecuencia, menos pérdidas en el cobre y en el hierro, lo que mejora su rendimiento y regulación frente al transformador.

El autotransformador, sin embargo, presenta dos inconvenientes a atender: **a)** debido a su reducido valor de resistencia y reactancia al existir menos espiras, resulta un bajo valor de μ_{cc} , lo que supone en caso de una falta de cortocircuito corrientes muy elevadas; **b)** si la relación de transformación es muy elevada, la reducción en la cantidad de cobre ya no es considerable. A demás, hay que recordar que las tensiones de alimentación y salida no van aisladas entre sí, por lo que parte de la energía se transfiere por conexión eléctrica directa (no todo por acoplamiento magnético como el caso del transformador). Una alta relación de transformación puede significar un riesgo de seguridad eléctrica para el usuario del autotransformador.

Por estas razones, el uso de los autotransformadores se limita a los casos en que no exista mucha diferencia entre las tensiones V_1 y V_2 (con $a > 2$ las ventajas casi desaparecen).

Los autotransformadores suelen construirse con un contacto deslizante, se forma de obtener diferentes relaciones de transformación con el mismo equipo; a este equipo se lo conoce con el nombre de *autotransformador variable*, y su configuración habitual es la de un núcleo en forma toroidal en donde está devanado todo el hilo conductor, existiendo en su superficie lateral un contacto deslizante que permite la toma del secundario. Estos equipos son utilizados en laboratorios para poder regular la tensión de alimentación en diferentes ensayos. Los mismos presentan la siguiente disposición:





4.10 TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Como se ha visto, es frecuente el empleo de tensiones (generación, transporte, distribución, etc.) y corrientes (grandes potencias instaladas) elevadas, que conviene medir. Por lo general, no será posible conectar de manera directa los aparatos de medida, por lo que se requieran transformadores de medida para adaptar estas tensiones y corrientes a medir a los diferentes alcances de los instrumentos correspondientes.

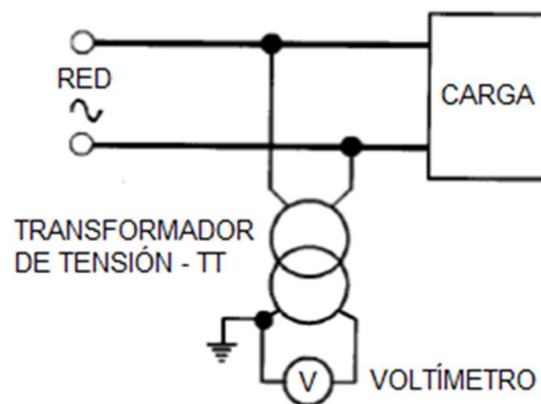
Para adaptar las corrientes se emplean los denominados *transformadores de corriente* o *intensidad (TI)*, mientras que en el caso de las tensiones se emplean los *transformadores de tensión (TT)*.

Los transformadores de medida permiten separar el circuito a medir de los instrumentos de medición, lo que significa una medida de protección y seguridad para el personal. A su vez, deben reproducir con la mayor precisión las magnitudes primarias, evitando así errores en la medición.

4.10.1 TRANSFORMADOR DE TENSIÓN - TT

Su forma de funcionamiento y conexión es análoga a la del transformador de potencia ya analizado. Al conectarse a su secundario un voltímetro, o bien todas las bobinas voltimétricas en paralelo de los aparatos de medida, debido a la alta impedancia de los mismos, el transformador de tensión funciona casi en vacío.

Para el caso en que la carga del TT sea solamente un voltímetro, el esquema será:



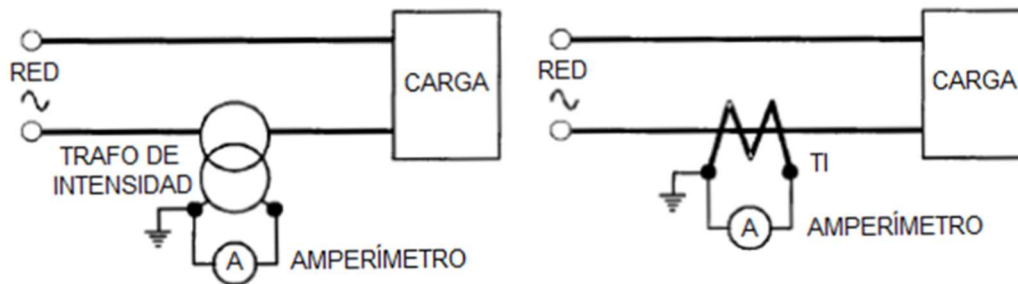
Como se ve en la figura, un borne del secundario debe conectarse a tierra para prevenir el peligro de un contacto accidental entre primario y secundario.

Las tensiones primarias de los transformadores de tensión están normalizadas, siendo de interés para el sistema y la industria local las siguientes: 110 – 220 – 385 – 440 - 3.300-6.600 - 13.200 - 33.000 - 110.000 - 132.000 - 220.000 V. La tensión secundaria nominal está normalizada en 110V.

Los TT se definen según su carga asignada en VA, que es la máxima carga que puede conectarse a su secundario.

4.10.2 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE - TI

La escala de los instrumentos de medición de corriente, por lo general es de 5A, pudiendo ser también de 1A. Para adaptar la corriente de la red a medir a dichos valores, se emplean los transformadores de corriente, los cuales se conectan en serie con el circuito:



El primario de un transformador de corriente consta de una o varias espiras de sección relativamente grande que se conecta en serie al circuito cuya corriente se desea medir.

En el secundario se conectan en serie los amperímetros y bobinas amperométricas de los instrumentos de medida. Debido a su baja impedancia de estos equipos, los TI trabajan prácticamente en cortocircuito. Es por ello que puede desprejarse la corriente magnetizante I_0 , quedando entonces: $a = I_1/I_2 = N_2/N_1$. En realidad, por más reducido que sea su valor, siempre existirá I_0 , el cual trae aparejado un **error de corriente ΔI** , y a su vez hará que I_2 no esté en fase con I_1 , lo que conlleva a un **error angular**. Según el error garantizado por el fabricante, los transformadores de corriente tienen las siguientes Clases de exactitud: 0,2 – 0,5 – 1 – 3 y 10; tomando como definición de clase el máximo error de corriente a valor nominal. Ejemplo: sea un TI 150/5A; CI: 0,5. Cuando circulan 150A en el primario, por el secundario pasará $5A \pm 0,5\%$ o $5 \pm 0,025A$.

IMPORTANTE: es necesario subrayar que *debe evitarse terminantemente dejar en circuito abierto (sin carga) un TI*. En dicha situación, el transformador pasaría a trabajar en vacío, haciendo que $I_1 = I_0$. De esta manera, al no variar I_1 , ya que depende de la red, el flujo crecerá peligrosamente, lo cual produce un aumento en las pérdidas en el hierro y en las tensiones del secundario, haciendo peligrar la vida de los aislantes y la seguridad del personal. Si se desea cambiar la carga (por ejemplo, el amperímetro), hay dos alternativas: o se interrumpe el servicio de la línea; o se puede cortocircuitar previamente el secundario del TI.

Las corrientes primarias de los transformadores de tensión están normalizadas en los valores nominales siguientes: 5 – 10 – 15 – 20 – 25 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 400 – 500 – 600 – 750 – 1.000 – 2.000 – 3.000 – 4.000 – 6.000 – 10.000 A. La corriente secundaria nominal está normalizada en 5A y también se utiliza la escala de 1,5A.

Al igual que los TT, los TI se definen según su carga asignada en VA, que es la máxima carga que puede conectarse a su secundario.

En la industria o redes de baja tensión, se utilizan los transformadores de corriente de **núcleo pasante**, donde el primario se reduce a un solo conductor que pasa por el interior del núcleo magnético. En el caso de la **pinza amperométrica** su núcleo rebatible, permitiendo medir sin interrumpir el circuito, y su arrollamiento secundario alimenta un amperímetro incorporado, existiendo la posibilidad de obtener varias escalas, conmutando el juego de espiras de este devanado. Ambos casos se aprecian en las siguientes figuras:

