

Capítulo 2

Transformadores**1 – GENERALIDADES**

A los transformadores los podemos clasificar según su potencia (monofásicos, trifásicos y de potencia) o mediante su estado (en vacío, en carga o en cortocircuito). Describiremos el primer criterio, de los estados del transformador, nos ocuparemos en la siguiente sección.

- **Monofásicos:** son de baja potencia (desde **5 a 63 [KVA]**¹), la tensión de salida se la obtiene entre fase y neutro, están montados en postes de madera, tienen una cuba lisa y su única refrigeración es la provista por el aire del exterior que se cuela por entre una rejilla. Están embebidos en aceite. Son los cilindros naranjas que están montados en los postes en las rutas.
- **Trifásicos:** media potencia (desde **63 a 1000 [KVA]**). Usados para la distribución urbana de media tensión, en las viviendas e industrias chicas. Son los que están montados en los barrios sobre dos postes. En Argentina, la relación estándar del transformador es **13200/400/231 [V]**.²
- **De potencia:** manejan potencia por arriba de los **1000 [KVA]**. Además de tener por cada bobina, un primario y secundario, poseen un terciario conectado en corto. La función de este devanado es entretejer a la cuarta armónica (armónica de 4to orden en la serie de Fourier) la cual no se puede eliminar, como las de orden superior, y que provoca interferencia y otros fenómenos no deseables en el transformador. A los transformadores con potencias mayores de **400 [MVA]** se los construye desde bancos monofásicos conectados entre sí, esto es así porque a partir de cierta potencia, la cantidad de aceite utilizada para refrigerar el transformador –y dentro de la cual éste está sumergido– provocaría un siniestro imposible de controlar en caso de incendio.

¹ El **voltiamperio**, de símbolo **VA** (también llamado voltamperio, voltampere, volt-amperio, y voltio-amperio) es la unidad de la potencia aparente y de la potencia compleja de un aparato eléctrico. Su múltiplo el **kVA** (kilovoltiamperio) se deletrea a menudo como kabea, como si se tratara de una sigla, y designa la potencia aparente de un aparato eléctrico de características principalmente inductivas cuando funciona con corriente alterna.

² Se lo da así porque siempre que se especifica la relación de un transformador se lo hace en vacío, sabiendo que al conectar una carga, se producirá una caída de tensión midiendo para trifásica **380 [V]** y para monofásica **220 [V]**, todo esto siempre y cuando tenga a la entrada **13200 [V]**.

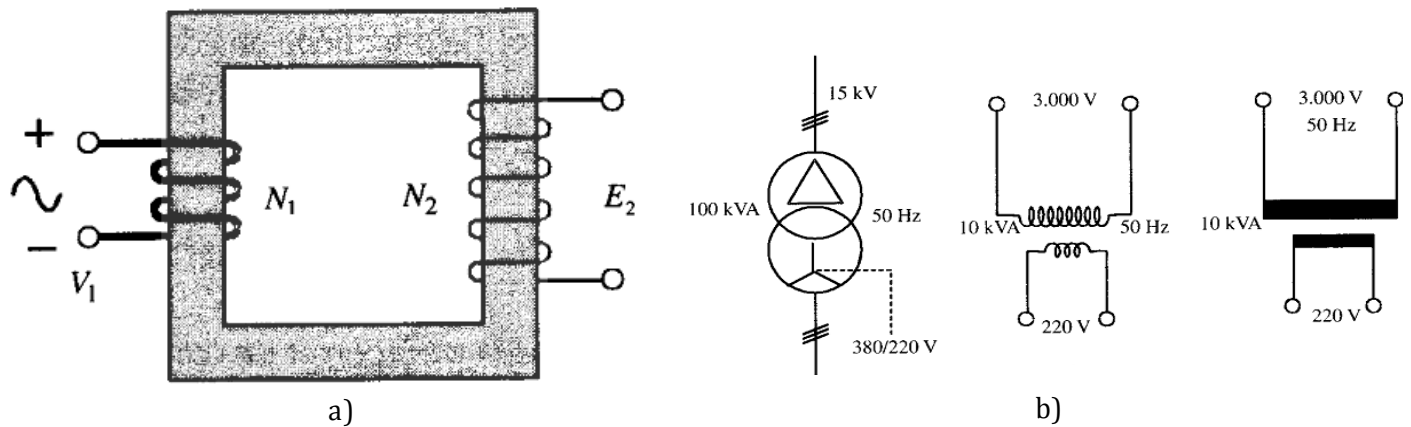


Figura 1-1: a) Forma constructiva de un transformador elemental y b) símbolos usados para designar un transformador.

2 – ESTADOS DEL TRANSFORMADOR

En un transformador, podemos distinguir tres tipos de estado:

- En vacío: el secundario no tiene carga (no entrega potencia);
- En carga: el primario alimenta la carga conectada al secundario y
- En cortocircuito: las salidas del secundario están unidas entre sí.

2.1 – Transformador en vacío

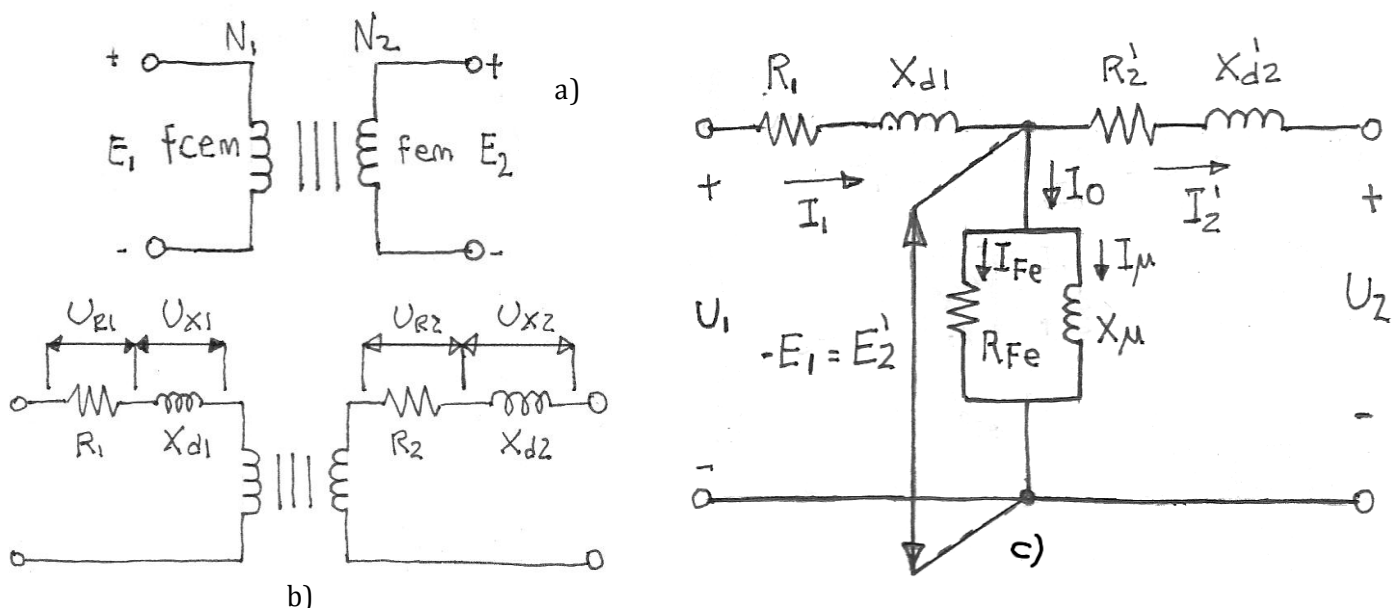


Figura 2-1: Transformador en vacío, a) esquema, b) caídas de tensión en el primario y secundario y c) circuito equivalente.

La Figura 2-1a corresponde a un transformador en vacío, es decir, con el primario conectado a la red y el secundario abierto, sin carga. Al aplicar E_1 al primario, induce una fuerza electromotriz (**fem**) en el secundario (E_2), la que por ley de Lenz³ crea en el primario una fuerza contra electromotriz (**fcem**). En el primario aparecen las caídas de tensión que se ven en la Figura 2-1b. En donde U_{R1} es la caída de tensión

³ Ley: «El sentido de la corriente inducida sería tal que su flujo se opone a la causa que la produce». La Ley de Lenz plantea que las tensiones inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produce.

en la resistencia óhmica interna R_1 del devanado primario (en fase con la corriente) y U_{X1} es la caída de tensión reactiva, debido a la resistencia reactiva de dispersión X_{d1} .

$$U_{R1} = I_o \cdot R_1 \quad (2-1)$$

$$U_{X1} = I_o \cdot X_{d1} \quad (2-2)$$

Relación de transformación

Para poder trazar el diagrama vectorial (lo que hacemos después) es necesario un artificio: referir los valores de un arrollamiento (corriente, caída de tensión, reactancia y resistencia) a los valores del otro, para que sean compatibles. Hacemos esto porque E_1 es demasiado grande respecto E_2 como para graficarlo. Comenzamos llamando E'_2 a

$$E'_2 = E_2 \frac{N_1}{N_2} = E_2 \cdot r_t \quad (2-3)$$

Donde r_t es la relación de espiras. Por conservación de la energía tengo que la potencia en el devanado secundario (P_2) debe ser igual a la nueva potencia transformada (P'_2), es decir que

$$\begin{aligned} P'_2 &= P_2 \\ E'_2 \cdot I'_2 &= E_2 \cdot I_2 \\ E_2 \cdot r_t \cdot I'_2 &= E_2 \cdot I_2 \\ I'_2 &= \frac{I_2}{r_t} \end{aligned} \quad (2-4)$$

Basándonos en la ecuación (2-3) deducimos que la caída de tensión en R'_2 tendrá la misma conversión, es decir que $U'_{R2} = U_{R2} \cdot r_t$, entonces para obtener la resistencia transformada en el devanado secundario R'_2 hacemos el cociente entre la tensión en sus bornes (U'_{R2}) y la corriente que la atraviesa (I'_2)

$$R'_2 = \frac{U'_{R2}}{I'_2} = \frac{U_{R2} \cdot r_t}{I_2 / r_t} = R_2 \cdot r_t^2 \quad (2-5)$$

Haciendo un procedimiento similar, hallamos X'_{d2} , así

$$X'_{d2} = \frac{U'_{X2}}{I'_2} = \frac{U_{X2} \cdot r_t}{I_2 / r_t} = X_{d2} \cdot r_t^2 \quad (2-6)$$

Ahora prestamos atención al flujo. Al ser alterno, pasa por N_1 y N_2 provocando las siguientes fems respectivamente

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N_1 \text{ [V]} \quad (2-7)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N_2 \text{ [V]} \quad (2-8)$$

Donde el sufijo **m** de Φ hace referencia al flujo máximo y **4,44** es el factor de forma.⁴ Dividiendo las dos expresiones anteriores tenemos

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = r_t \quad (2-9)$$

Esta relación se llama **Relación de transformación**. Dicha fórmula nos dice que **las fems son proporcionales al número de espiras**. Comparando la ecuación (2-9) con la (2-3), llegamos a la conclusión de que $E'_2 = E_1$.

Ahora estamos en condiciones de realizar el circuito equivalente (Figura 2-1c), donde reemplazamos al transformador por su equivalente: un paralelo compuesto por R_{Fe} y X_μ , que son las componentes resistiva e inductiva del núcleo del transformador respectivamente. La corriente de excitación o de vacío I_o ,

⁴ En realidad el factor de forma para una onda sinusoidal es **1,11** y surge del cociente entre el valor eficaz de la onda y su valor medio; el **4** que lo multiplica aparece durante el desarrollo de la fórmula (cosa que no es de nuestro interés).

cumple la función de producir el flujo en el núcleo magnético y vencer las pérdidas en el hierro a través de sus componentes I_μ e I_{Fe} respectivamente. La componente de carga I'_2 , ya vista, equilibra o contrarresta la acción desmagnetizante de la fmm_2 para que el flujo en el núcleo permanezca constante e independiente de la carga, tal como lo requiere la ecuación (2-8). La tensión U_1 es la tensión que se aplica en los bornes del primario, la tensión E_1 es la tensión que «llega» a los bornes del núcleo del transformador después de haber pasado por R_1 y X_{d1} , estas dos tensiones son iguales en un transformador ideal ($U_1=E_1$). La tensión E'_2 (que como hemos visto es igual a E_1) es la tensión que hay en el núcleo en el lado del secundario. U_2 es la tensión que hay en los bornes de salida del secundario, teniendo en cuenta la caída de tensión provocada por las imperfecciones del devanado secundario (R'_2 y X'_{d2}).

2.1 – 1: Diagrama vectorial de un transformador en vacío

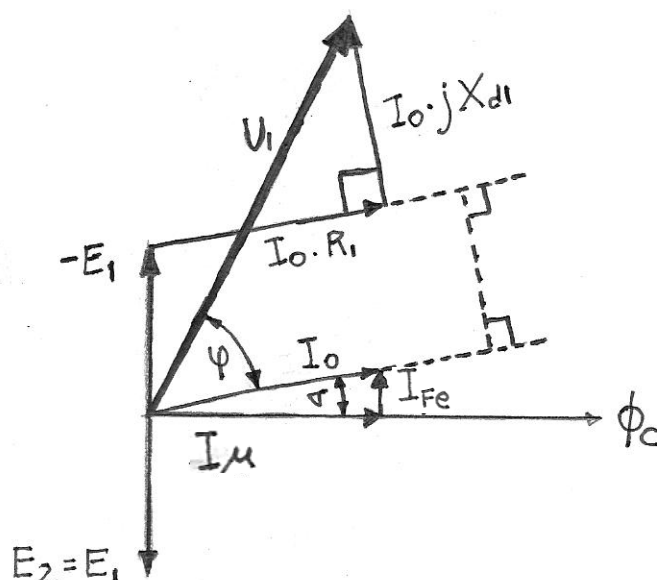


Figura 2-2: a) Trazado del diagrama vectorial de un transformador en vacío.

Partimos del flujo Φ_c común a ambos devanados representado por el eje de las abscisas, que es el que da origen en cada espira a las fems E_1 y E'_2 . En la práctica la $I'_2 \approx 0$,⁵ lo cual hace que $I_1 = I_0$. Para obtener la caída de tensión U_1 aplicada a la entrada del devanado primario, hacemos –sacada de la Figura 2-1c– la siguiente suma, que puede expresarse en forma compleja.

$$U_1 = U_{R1} + U_{X1} - E_1 = (I_0 R_1 - E_1) + j \cdot (I_0 X_{d1}) \quad (2-10)$$

- **Paso 1 – Situar E'_2 , I_μ e I_{Fe} :** la corriente I_μ la situamos en el lado positivo de las abscisas (puesto que está en fase con el flujo que la origina), de su extremo nacerá (a 90° en adelante, pues es la corriente de un inductor) la corriente I_{Fe} .
- **Paso 2 – Obtención de I_0 y $-E'_2$:** podemos obtener la corriente I_0 haciendo la suma vectorial de las corrientes I_μ e I_{Fe} , es decir

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_\mu + \vec{I}_{Fe}$$

Para obtener $-E'_2$ (que es igual a E_1) cambiamos de signo a E_1 , es decir, el equivalente a dibujar a E_1 sobre el eje positivo de las ordenadas. Esto lo hacemos así, dice Ubal, porque E_2 es inducida por la corriente que circula por el secundario, oponiéndose (Ley de Lenz) a la causa que la origina (es decir, oponiéndose a U_1). El ángulo σ (no colocado en la figura para simplificar) formado por I_0 e I_μ constituye un índice inmediato de las pérdidas y se lo denomina «Ángulo de pérdidas».

⁵ La corriente I'_2 es (a circuito abierto) del 0,6 al 8% de I_m (i sub uno ene, por si no se lee bien, es la corriente asignada o a plena carga del primario), por lo que consideramos que $I'_2 = 0$.

- **Paso 3 – Obtención de las caídas de tensión en R_1 y X_{d1} :** para obtener U_{R1} multiplicamos a I_0 por R_1 (de valor real) lo que dará un vector linealmente dependiente de I_0 , el cual colocaremos en el extremo de $-E_1$. Un proceso similar realizamos para hallar U_{X1} , multiplicamos el vector I_0 por X_{d1} (puramente imaginario, ya que $X_{d1}=j\omega L$) lo que dará un vector girado 90° en adelante respecto de I_0 ; que colocaremos en el extremo del vector obtenido anteriormente, o sea, en $U_{R1}=I_0 \cdot R_1$.
- **Paso 4 – Obtención de U_1 :** estamos ya en condiciones de realizar la suma (2 – 10). Para obtener U_1 unimos el origen con el extremo de U_{X1} .

El ángulo formado por U_1 e I_0 , se lo denomina φ ; y es elevado aunque no lo parezca en el gráfico. Esto es así porque la tensión U_1 adelanta casi 90° con la corriente I_μ . Por lo que debemos procurar que φ sea lo más chico posible para evitar el calentamiento y un rendimiento bajo, esto lo logramos usando núcleos con chapas especiales de hierro-silicio con grano orientado, y efectuando cuidadosamente las uniones entre columnas y culatas de forma que no existan espacios de aire.

2.2 – Transformador en carga

Si ahora conectamos en los bornes del devanado secundario una carga, circulará una corriente de carga I_2 que será de la misma naturaleza que la de la carga (real o compleja). El $\cos \varphi$ queda también afectado por esto. El circuito equivalente lo podemos obtener de la [Figura 2-1c](#) conectando una carga a los bornes del secundario.

El flujo, que en el caso anterior era solamente afectado por la fmm_1 , ahora se ve afectado también por fmm_2 , pues ésta última apareció debido a la circulación de I_2 . La corriente I_2 , casi siempre, retrasa respecto de la tensión E_2 un ángulo entre 0 y 90° , por lo que I_2 estará en contraposición con la corriente de vacío I_0 . Si suponemos que I_0 se mantiene constante en el primario, I_2 hace variar al flujo, que hace variar a su vez (en realidad disminuir) a E_1 ; esta disminución provoca que la diferencia entre U_1 y $-E_1$ se agrande y por ende aumenta (la magnitud de) la corriente I_1 en el primario.

Es decir, que con la aparición de I_2 , la corriente I_1 no vale más I_0 (como en el transformador conectado en el vacío) sino que debe modificar su valor. Lo que sucede es que interactúan las fems de los devanados primario y secundario y los flujos que crean los mismos, provocando una interdependencia entre I_1 e I_2 , que puede ser expresada como

$$\vec{I}_1 = +\vec{I}_0 + (-\vec{I}_2) \quad (2 - 11)$$

La corriente I_0 es constante y provoca el flujo máximo Φ_m . La fem de la corriente de carga $-I_2$ equilibra la fmm creada por la corriente I_2 del secundario. Debido a esta mutua dependencia de las corrientes de los devanados, en un transformador de carga el funcionamiento se basa en un doble equilibrio (de tensiones y de corrientes).

La variación de I_1 al conectarse una carga es también necesaria para que se produzca el intercambio de energía; podemos hablar entonces de una potencia utilizada P_2 que puede ser mono o trifásica

$$P_{2,mono} = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \quad P_{2,tri} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \quad (2 - 12)$$

potencia que será compensada por otra de aproximadamente igual valor tomada de la red primaria

$$P_{1,mono} = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad P_{1,tri} = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (2 - 13)$$

Por último, el esquema equivalente simplificado es igual al del vacío con la salvedad de que en lugar de que los bornes del secundario estén a circuito abierto, ahora habrá una carga conectada. También aquí reducimos los parámetros de un devanado a los valores del otro. Son válidas entonces las ecuaciones y desde el punto de vista eléctrico, quedan así definidas sus seis constantes principales: R_1 , X_{d1} , R'_2 , X'_{d2} , G_{Fe} y B_μ . Donde a los primeros cuatro podemos obtenerlos con las ecuaciones (2 – 3) a la (2 – 6); G_{Fe} es la admitancia del núcleo del transformador, igual a $1/R_{Fe}$ y B_μ es la permanencia del mismo, es decir, que es igual a $1/X_\mu$.

2.2 – 2: Diagrama vectorial del transformador en carga

Se nos pueden presentar dos tipos de carga: la inductiva y la capacitiva. De la Figura 2-1(c), deducimos que las ecuaciones para el trazado del diagrama son

$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1 \vec{I}_1 + X_{d1} \vec{I}_1 \quad (2-14)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{U}'_2 + R'_2 \vec{I}_2 + X'_{d2} \vec{I}_2 \quad (2-15)$$

Con carga inductiva

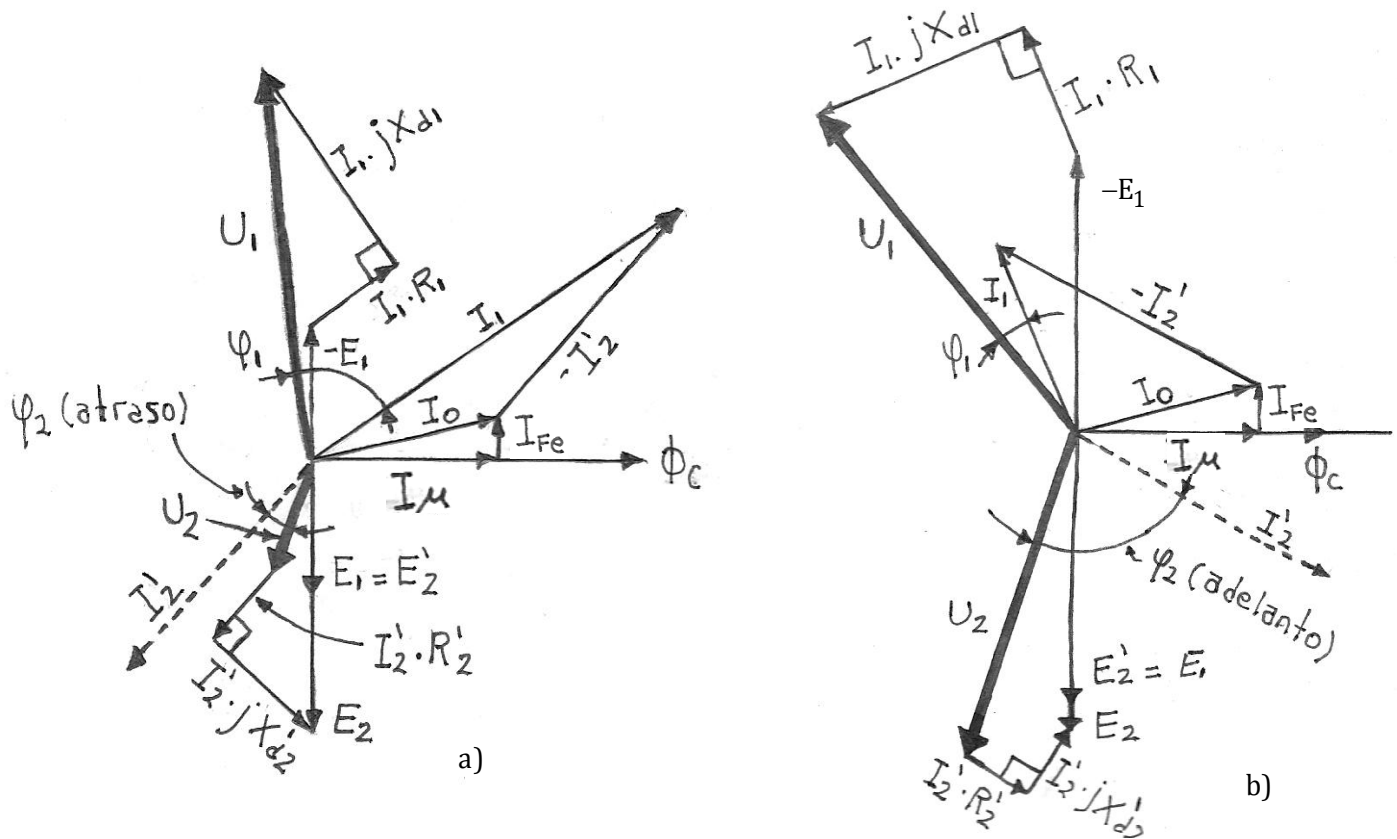


Figura 2-3: Trazado del diagrama vectorial de un transformador con una carga **a)** inductiva y **b)** capacitiva.

- **Paso 1 – Colocar E_1 , E_2 , $-E_1$, I_0 e I_2 :** aquí, E_1 , $-E_1$ e I_0 son los mismos que para el caso del vacío. E_2 está en fase con E_1 ; e I_2 , al ser de naturaleza inductiva (puesto que la carga también lo es) está desfasada en retraso respecto de E_2 .
- **Paso 2 – Colocar I_1 y U_1 :** para encontrar I_1 hacemos la suma de la ecuación (2-11), es decir, del extremo de I_0 dibujamos I_2 cambiado de signo ($-I_2$) y luego unimos el origen con la punta de $-I_2$, queda conformado así el vector de I_1 . Para U_1 hacemos lo mismo que en el caso del vacío pero esta vez reemplazando I_0 por I_1 ; así realizamos la suma vectorial de la ecuación (2-14).
- **Paso 3 – Colocar U_2 :** para hallar U_2 hacemos la suma vectorial de la ecuación (2-15).

Con carga capacitiva

Hacemos exactamente lo mismo que en el caso anterior. Vemos que, al ser una carga capacitiva, la corriente I_2 adelanta a la tensión E'_2 , por lo que I_2 está ahora dibujada en el IV cuadrante. Vemos también que $|U'_2| > |E_2|$, de lo cual deducimos que **la carga capacitiva produce el efecto de aumentar la tensión en los bornes del devanado secundario**.

2.3 – Transformador en cortocircuito

Nos resta el caso cuando el devanado del secundario está en cortocircuito. El circuito es el de la [Figura 2-1c](#) con los bornes del secundario en corto, en donde la corriente $I_1 \approx I'_2$, puesto que I_0 es despreciable debido a que el entrehierro se fabricó con una longitud lo más pequeña posible. La figura puede simplificarse obteniéndose la [Figura 2-4a](#), en donde hicimos los siguientes reemplazos

$$R_{CC} = R_1 + R'_2 \quad \rightarrow U_R = R_{CC} \cdot I_1 \quad (2-16)$$

$$X_{dCC} = X_{d1} + X'_{d2} \quad \rightarrow U_X = X_{dCC} \cdot I_1 \quad (2-17)$$

$$U_{CC} = Z_{CC} \cdot I_1 = (R_{CC} + j \cdot X_{dCC}) \cdot I_1 \quad (2-18)$$

$$I_{CC} = I_1 = I_2 \quad (2-19)$$

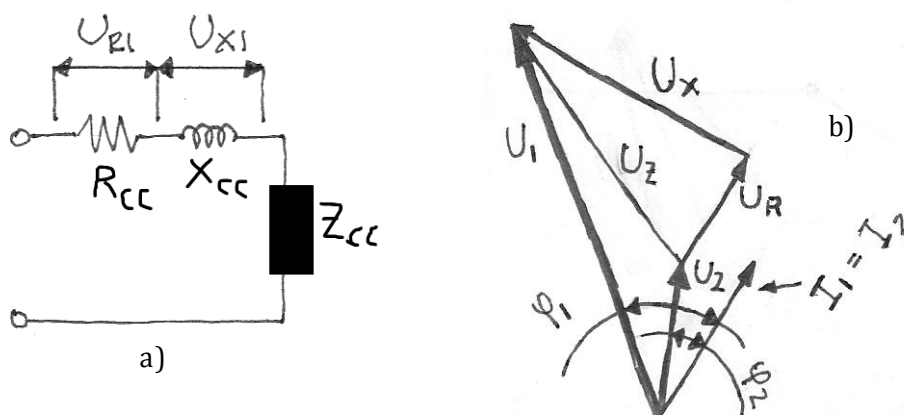


Figura 2-4: Transformador en cortocircuito, a) esquema simplificado y b) diagrama vectorial.

El diagrama vectorial es simple ([Figura 2-4b](#)): partimos de la tensión en los bornes del primario U_1 , esta tensión se encuentra desfasada un ángulo φ_1 en adelante respecto a la corriente I_1 . Para encontrar U'_2 hacemos la siguiente suma vectorial

$$\vec{U}_1 = \vec{U}'_2 + \vec{U}_{CC} = \vec{U}'_2 + R_{CC} \cdot \vec{I}_1 + X_{dCC} \cdot \vec{I}_1 \quad (2-20)$$

2.3 – 1: Tensión de cortocircuito

La tensión de cortocircuito es la que aplicada a uno de los devanados, estando el otro en cortocircuito, hace que por ambos circule la corriente nominal. Esta tensión se mide en voltios pero se la expresa en tanto por ciento respecto de la tensión nominal.

$$U_{CC} [\%] = \frac{U_{CC} [V]}{U_n [V]} \cdot 100 \quad (2-21)$$

La tensión de cortocircuito es de suma importancia, tal es así que su valor está incluido en la chapa característica del transformador.

Comencemos teniendo en cuenta el transformador de la [Figura 3-6a](#), donde ℓ_{d1} y ℓ_{d2} son las longitudes medias de los devanados primario y secundario respectivamente. Si consideramos una columna de este transformador, veremos que la fem de dispersión (e_{disp}) en la misma será

$$e_d = -N \cdot \frac{d\Phi_{disp}(t)}{dt} = -L_d \cdot \frac{di}{dt} \quad (2-22)$$

Donde L_d es la inductancia del devanado. Integrando esta ecuación respecto del tiempo tenemos

$$N \cdot \Phi_{disp} = L_d \cdot I \quad (2-23)$$

Por otro lado, del capítulo 1, tenemos que el flujo de dispersión también es

$$\Phi_{disp} = \frac{N \cdot I}{\mathfrak{R}_d} = N \cdot I \cdot \frac{\mu \cdot S_{disp}}{\ell_d} \quad (2-24)$$

Donde μ es la permeabilidad magnética, S_{disp} es la superficie de dispersión y ℓ_d es la longitud media axial de la bobina igual a $(\ell_{d1} + \ell_{d2})/2$. Reemplazando este valor de L_d en la ecuación (2-23) y despejando L_d nos queda

$$L_d = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot S_{disp}}{\ell_d} \quad (2-25)$$

Si multiplicando este valor de L_d por ω , obtenemos la reactancia de dispersión X_{disp}

$$X_{disp} = \omega \cdot L_d = \frac{\omega \cdot N^2 \cdot \mu \cdot S_{disp}}{\ell_d} \quad (2-26)$$

y si multiplicamos este valor por la corriente I , obtenemos la caída de tensión en dicha reactancia

$$U_X = I \cdot X_{disp} = \frac{I \cdot \omega \cdot N^2 \cdot \mu \cdot S_{disp}}{\ell_d} \quad (2-27)$$

La caída porcentual de tensión en la reactancia de dispersión respecto a la tensión nominal será

$$U_X [\%] = \frac{U_X}{U_n} \cdot 100 = \frac{K \cdot (NI)}{\ell_d} \cdot \frac{S_{disp}}{U_n / N} \cdot 100$$

El cociente (U_n/N) es la tensión por espira y se mide en [Voltio/espira]. Para la construcción de los devanados, la tensión por espira es un dato fundamental, pues determina la tensión entre capas. Es decir, la tensión que existe entre el principio de una capa y el final próximo de la inmediata superior. Lo ideal es que este cociente sea cero.

Para encontrar la tensión de cortocircuito U_{CC} expresada en la ecuación (2-18) nos resta saber cuál es la caída de tensión en la resistencia. Definimos esta caída como el cociente entre las pérdidas en el cobre y las pérdidas aparentes, entonces

$$U_R = \frac{P_{cu}}{P_{ap}} = \frac{R \cdot I^2}{U \cdot I} = \frac{R \cdot I}{U} \quad (2-28)$$

Para encontrar el módulo de la ecuación (2-18) hacemos

$$|U_{CC}| = \sqrt{U_R^2 + U_X^2} \quad (2-29)$$

Resumiendo el desarrollo, hicimos

$$|U_{CC}| = \sqrt{U_R^2 + U_X^2}$$

$$\bullet U_R = \frac{P_{cu}}{P_{ap}} = \frac{R \cdot I^2}{U \cdot I} = \frac{R \cdot I}{U} \quad \text{caída de tensión en la reactancia del devanado}$$

$$\bullet U_X = I \cdot X_{disp} = \frac{I \cdot \omega \cdot N^2 \cdot \mu \cdot S_{disp}}{\ell_d} \quad \text{caída de tensión en la reactancia del devanado}$$

$$\bullet \bullet X_{disp} = \omega \cdot L_d = \frac{\omega \cdot N^2 \cdot \mu \cdot S_{disp}}{\ell_d}$$

$$\bullet \bullet \bullet e_d = -N \cdot \frac{d\Phi_{disp}(t)}{dt} = -L_d \cdot \frac{di}{dt} \quad \rightarrow \therefore L_d = \frac{N \cdot \Phi_{disp}}{I} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot S_{disp}}{\ell_d}$$

$$\bullet \bullet \bullet \bullet \Phi_{disp} = \frac{N \cdot I}{\mathfrak{R}_d} = N \cdot I \cdot \frac{\mu \cdot S_{disp}}{\ell_d}$$

23 | P á g i n a

$$\eta = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{abs}}} \quad (3-3)$$

La potencia absorbida a su vez, es la suma de la potencia útil y la potencia de pérdidas. Ésta última a su vez se subdivide en

- Pérdidas en el hierro (P_{Fe})
 - Pérdidas por histéresis (P_{H})
 - Pérdidas por Foucault (P_{F})
- Pérdidas en el cobre (P_{Cu})
 - Pérdidas por Joule (P_{J})
 - Pérdidas adicionales (P_{A})

3.2 – 1: Pérdidas

En los transformadores, como en cualquier otra máquina, no toda la energía se aprovecha. Una parte de ella se pierde en vacío y no depende de la carga, son las llamadas **pérdidas en el hierro**; hay otra porción que se pierde también y éstas sí dependen de la carga, son las **pérdidas en el cobre**.

Por histéresis

En todo transformador, este tipo de pérdidas en el hierro son proporcionales al área del ciclo de histéresis y vienen expresadas por la siguiente expresión

$$P_{\text{H}} = \gamma \cdot B_{\text{max}}^2 \cdot f \cdot G_{\text{Fe}} \quad (3-4)$$

Donde γ se llama *coeficiente de Steinmetz* o de *histéresis*, su valor es **4** para el acero y **3** para el hierro dulce; f es la frecuencia de trabajo y G_{Fe} es el peso, en [Kg], de las chapas de hierro-silicio del núcleo. En un transformador ya construido es posible, vatímetro de por medio, medir la potencia absorbida por el mismo en vacío a tensión nominal, alimentándolo por el lado de baja tensión. La *Figura 3-2(a)* muestra lo que se llama un ciclo de histéresis pertenecientes al acero al carbono y hierro dulce.

Por Foucault

La ecuación para obtener estas pérdidas es

$$P_{\text{F}} = \gamma_1 \cdot B_{\text{max}}^2 \cdot f \cdot G_{\text{Fe}} \cdot \tau \quad (3-5)$$

Donde $\gamma_1 = f/\rho$ es el *coeficiente de Foucault*; ρ es la resistividad; f es la frecuencia y τ es el espesor, en milímetros, de las chapas (**0,35 a 0,5 mm**). La *Figura 3-2(b)*, muestra un flujo variable en el tiempo atravesando una chapa. Mientras mayor es el espesor de la misma, las corrientes parásitas se cierran sobre sí mismas y no contribuyen al proceso de transformación de energía, pero sí provoca pérdidas, pues esta energía se disipa en forma de calor. Es por ello que al hierro se le agrega silicio, a fin de aumentar la resistividad y disminuir con ello el coeficiente de Foucault y las pérdidas.

En el cobre

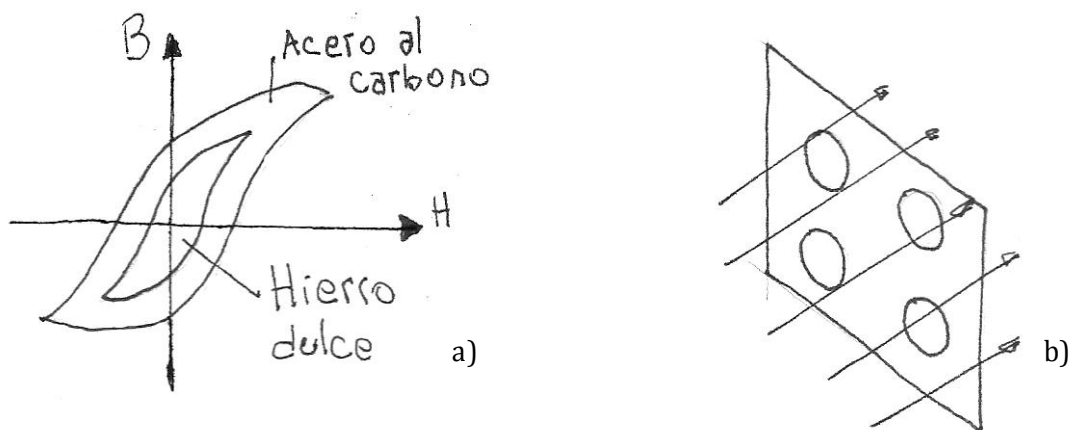


Figura 3-2: a) Ciclo de histéresis y b) chapa atravesada por un flujo variable en el tiempo.

Son las pérdidas que se generan por la resistencia óhmica de los devanados, que disipan calor cuando existe circulación de corriente en los mismos. A esto se le llama Efecto Joule. En general

$$P_{Cu} = R_{CC} \cdot I_2'^2 \quad (3 - 6)$$

3.3 – Aspectos constructivos del transformador

En esta sección repasamos brevemente los aspectos constructivos más importantes de un transformador. Los elementos más significativos son el núcleo y los devanados. Tomando como criterio el primero, podemos clasificar a los transformadores en 1) **acorazados**: en donde los devanados están abarcados parcialmente por el núcleo y 2) **de columnas**: el devanado abraza toda la columna del núcleo. La Figura 3-3 muestra esto, además de ser uno un mono y el otro un trifásico. Debemos tener cuidado con el entrehierro, pues al aumentar también lo hace la corriente de vacío y por ende las pérdidas.

La unión entre las columnas y las culatas (Figura 3-4) se efectúan de dos formas: 1) **a tope**, en donde columnas y culatas se arman por separado y se unen por piezas de sujeción; en este tipo de unión es necesario disponer de aislante para que no se produzcan corrientes parásitas entre los elementos de sujeción y las chapas. 2) Por **entre-laminación** (o al solape): al contrario al caso anterior, columnas y culatas se arman de una sola tirada, este tipo de unión es mejor que el anterior, porque el juego de dilatación en las juntas de las chapas de las columnas y las culatas se puede hacer mínimo, pues la unión de una chapa se cubre con otra.

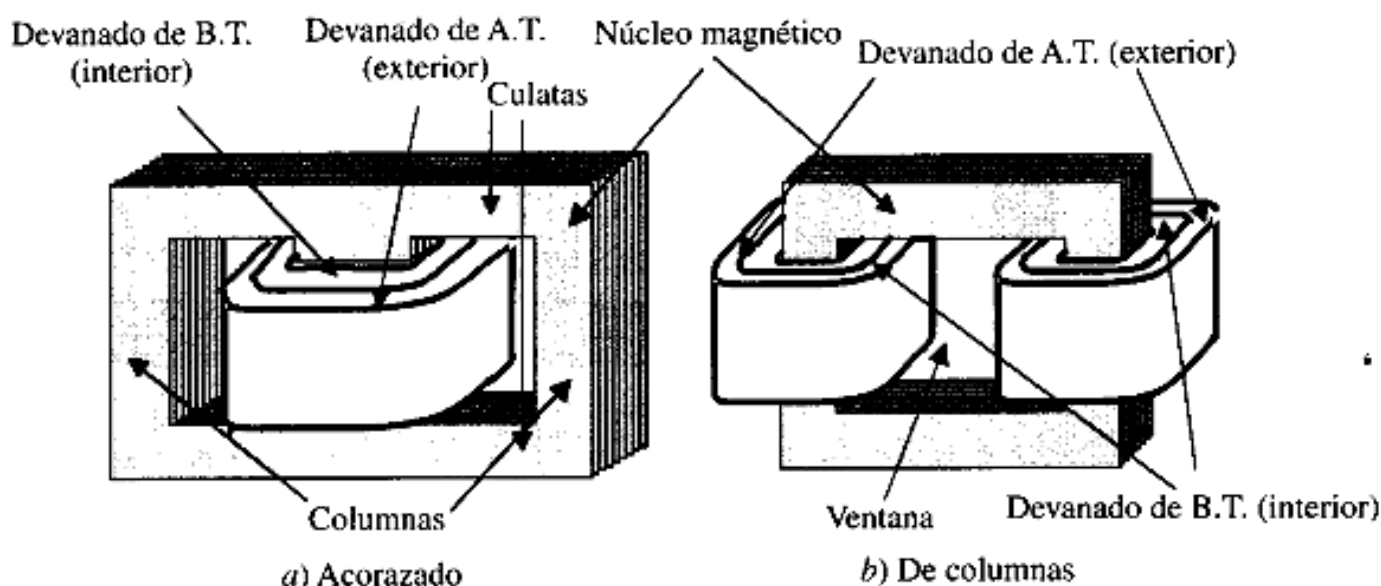


Figura 3-3: Tipo de transformadores, a) acorazado y b) de columnas.

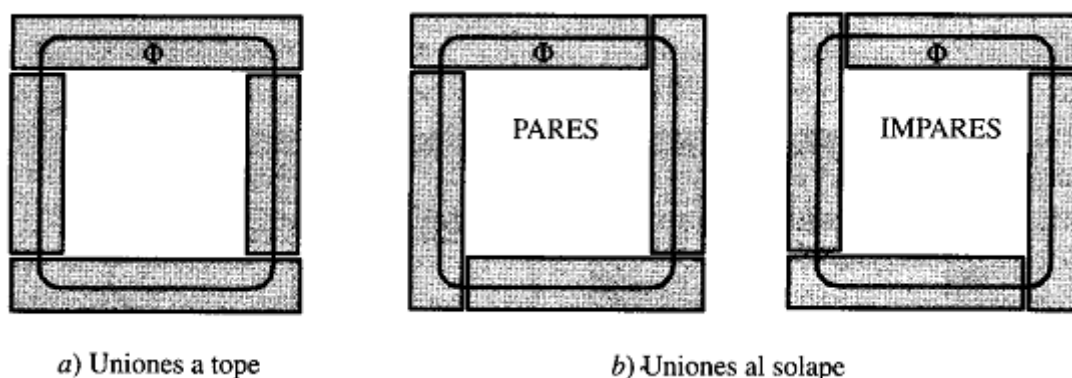


Figura 3-4: Uniones entre culata y columnas, a) a tope y b) por entre-laminación.

3.3 – 1: Columnas

En la [Figura 3-5](#) podemos ver un corte transversal de la columna de un transformador. En el primer caso ([Figura 3-5a](#)) el apilamiento de las chapas tiene forma de un polígono escalonado inscripto en una circunferencia para aprovechar al máximo el espacio. Cuando la potencia a manejar es elevada, suelen utilizarse canales de refrigeración por donde circula aceite ([Figura 3-5b](#)).

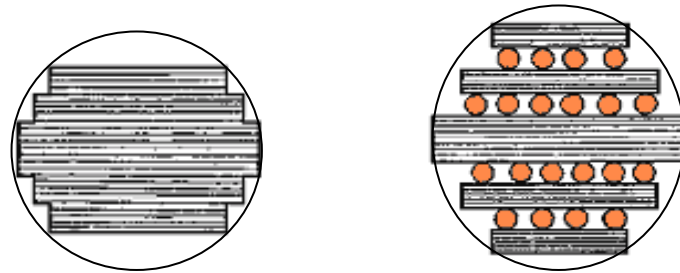


Figura 3-5: Columnas en un transformador, **a)** escalonado y **b)** escalonado con canales de refrigeración.

3.3 – 2: Devanados

Los devanados de un transformador deben cumplir con una serie de requisitos:

- Deben ser económicos;
- El régimen térmico debe cumplir las normas;
- Deben resistir mecánicamente a los esfuerzos producidos por posibles cortocircuitos instantáneos y
- Su resistencia eléctrica debe ser acorde a las posibles sobretensiones.

Por lo general resulta muy difícil reunir todas estas condiciones, así que lo que hacemos es adoptar una solución intermedia. Surgen así las distintas formas de agrupación de los devanados. Concéntricos, biconcéntricos y alternados.

En los **devanados concéntricos** ([Figura 3-6a](#)) los bobinados tienen forma de cilindros coaxiales; por lo general el arrollamiento de baja tensión (BT) se coloca más cercano al núcleo ya que es más fácil de aislar que el arrollamiento de alta tensión (AT), también con esta disposición resulta más sencillo reparar o cambiar el arrollamiento de AT puesto que está del lado exterior, siendo el que más se avería y entre ambos arrollamientos se coloca un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado. En los **devanados bi-concéntricos** ([Figura 3-6b](#)), que es el mismo caso que el anterior solo que se ha dividido al arrollamiento de BT en dos partes iguales y concéntricas alrededor del de AT; si bien resulta más difícil de bobinar y reparar, se recurre a esto cuando el arrollamiento de BT lleva muchas espiras. Por último, en la [Figura 3-6a](#) tenemos **devanados alternados**, que consiste en subdividir los arrollamientos en partes más pequeñas (galletas) de forma tal que arrollamientos de AT y BT se sucedan alternativamente a lo largo de la columna; aunque son más difíciles de aislar y reparar, se recurre a ellos cuando el transformador tiene una importante sección de núcleo y está diseñado para trabajar con grandes corrientes.

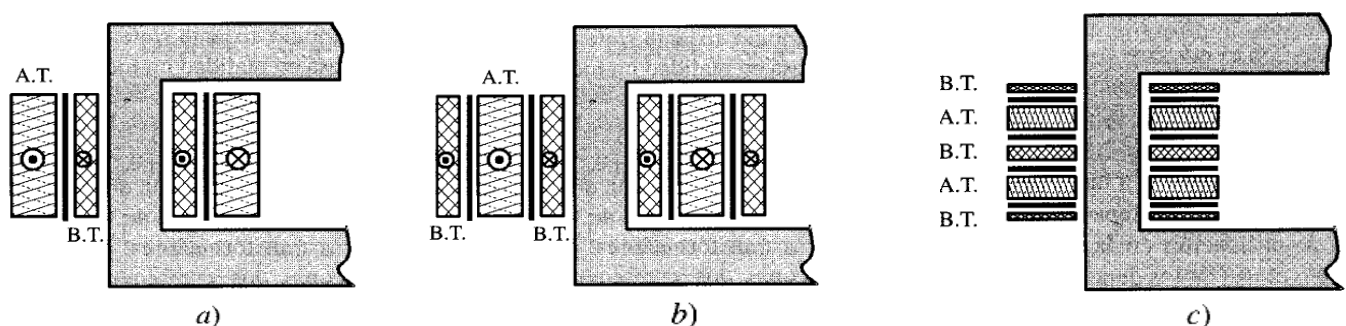


Figura 3-6: Devanados **a)** concéntricos, **b)** bi-concéntricos y **c)** alternados (con galletas).

3.3 – 3: Núcleos

La sección siguiente se refiere a los distintos aspectos constructivos de los núcleos. Para disminuir las corrientes parásitas y aumentar el flujo útil, se los construye con chapas laminadas de espesor entre **0,35 y 0,5 [mm]**. Las chapas son por lo general de hierro-silicio de grano orientado y se encuentran aisladas entre sí con papel prespan o con barniz.

La [Figura 3-7a](#) muestra el armado de estas chapas para un transformador monofásico de pequeña potencia, como los que se usan en electrónica; y en la [Figura 3-7a](#), la manera de realizar el corte para no desperdiciar superficie.

Para armar el núcleo en los transformadores de hierro-silicio con grano orientado, las culatas y columnas se cortan a 45° (teóricamente), que pasan a ser en la práctica a 42° y 48° de manera que la unión ([Figura 3-7c](#)) se encuentre superpuesta y no existan espacios de aire (para reducir las corrientes parásitas). En los transformadores trifásicos de potencia el armado del núcleo es como en la figura, en donde, por no ser perfecta, no produce flujo disperso.

Armadas las tres columnas y la culata inferior se sujeta el conjunto con perfile de hierro en «U», uno de cada lado y aislado de la culata por papel prespan ([Figura 3-7d](#)); luego se lo aprieta rígidamente por medio de tornillos con aislantes para evitar que pongan en corto las chapas o que constituyan con ellas espiras cerradas que producirían pérdidas considerables si fueran atravesadas por flujo alterno.

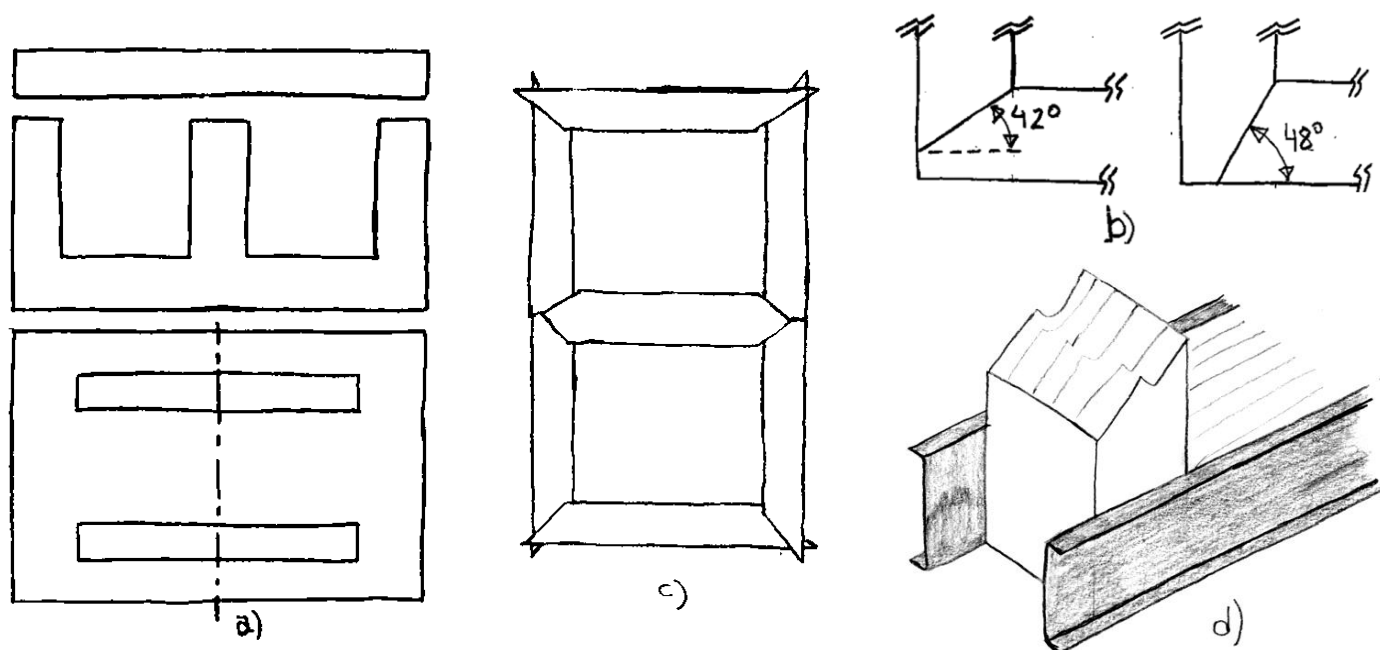


Figura 3-7: Láminas del núcleo **a)** chapas que conforman el núcleo de un transformador de pequeña potencia y la forma de cortarlas para aprovecharlas al máximo, **b)** cortes de las columnas y culatas, **c)** armado de un núcleo de un transformador trifásico de potencia y **d)** sujeción con ángulos «U».

3.3 – 4: Generación de un transformador trifásico

Un criterio importante para clasificar un transformador es basarse la cantidad de fases que poseen. Así, podemos dividir a los transformadores en dos tipos: monofásico y trifásicos. Los devanados constituyen un sistema único, rodeados íntegramente por el núcleo.

Los **transformadores monofásicos** poseen una sola fase ya que solamente tienen un solo circuito magnético. Por esto solamente pueden manejar corriente de una red monofásica o una fase de una corriente trifásica. En la [Figura 3-8](#) podemos ver los distintos tipos de montaje para transformadores monofásicos. En la [Figura 3-8a](#) se ve la disposición anular, que se usa solo en casos especiales; en la [Figura 3-8b](#) está la disposición «a dos columnas», que distribuye el peso de los devanados en dos columnas; y en la [Figura 3-8c](#) está la disposición acorazado, que al igual que los anulares sólo abrazan una columna.

Es posible reunir tres transformadores monofásico como se muestra en la [Figura 3-8d](#) para dar origen a un **transformador trifásico**, lo que conduce a una economía de peso y tamaño.

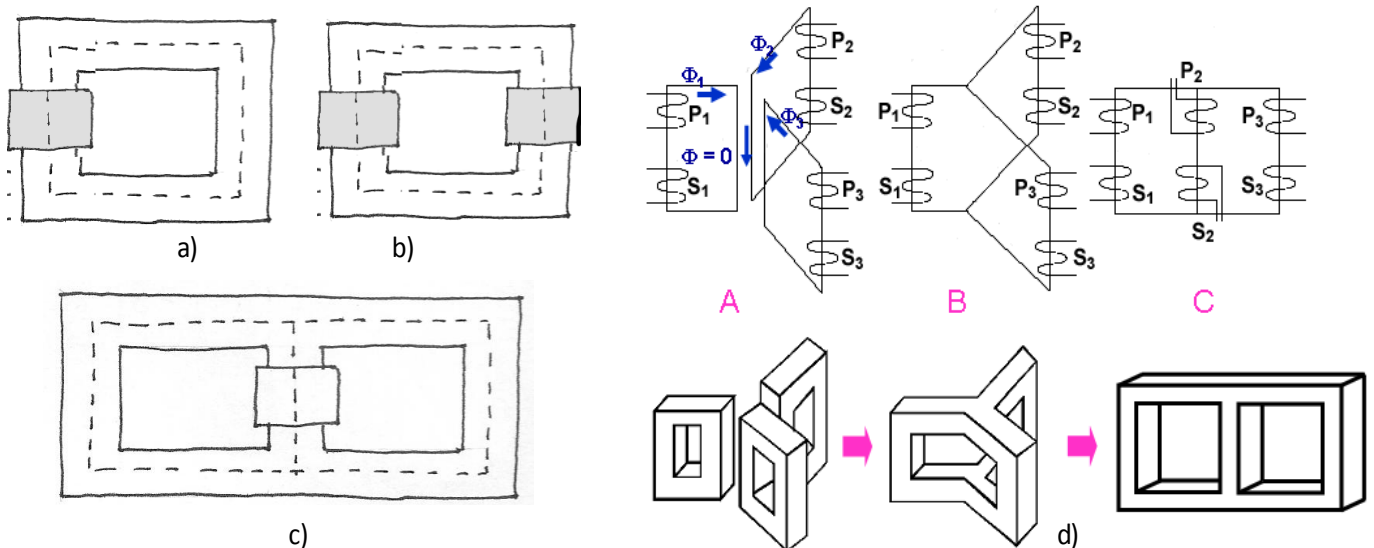


Figura 3-8: Generación de un transformador trifásico a partir de tres monofásicos.

3.3 – 5: Conexión de los devanados en un transformador trifásico

Tanto primario como secundario de un transformador trifásico pueden conectarse para producir un acoplamiento en paralelo, de los cuatro grupos generales que lo permiten, debido al desfase que introducen, nos referiremos a dos: la conexión en estrella y en triángulo.

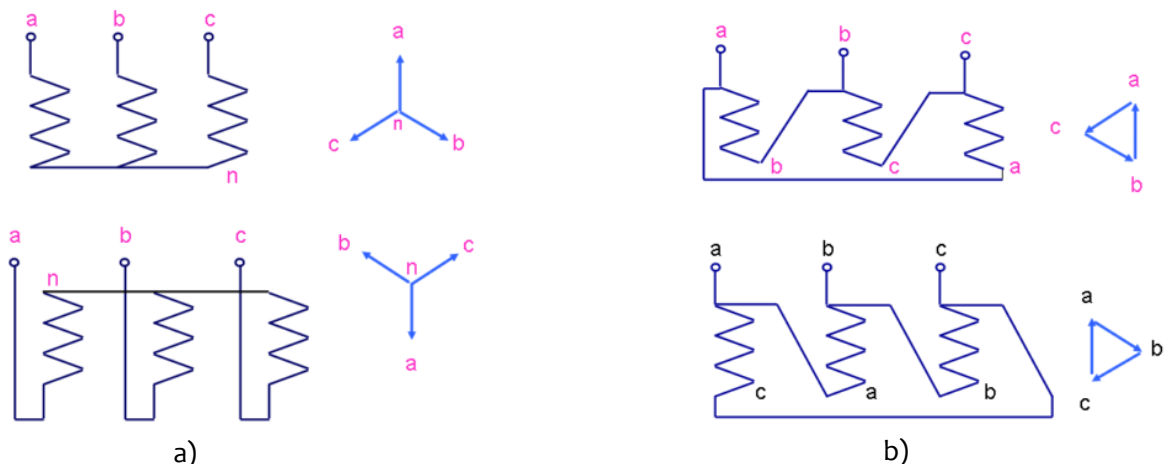


Figura 3-9: Conexión de los devanados de un transformador, **a)** en estrella y **b)** en triángulo.

- En la **conexión en estrella** ([Figura 3-9a](#)), los comienzos de bobina se unen y los finales se dejan libres. La tensión entre líneas no posee armónicas múltiplos de tres, o sea, que cada dos circuitos éstas armónicas se anulan entre sí. Aquí, las corrientes de fase y de línea son iguales mientras que la tensión de fase es menor a la de línea.
- En la **conexión en triángulo** ([Figura 3-9b](#)), conectamos el final de cada bobina con el comienzo de otra. Aquí sucede al revés que en el caso anterior, tensiones de fase y de línea son iguales y la corriente de fase es menor a la de línea. Ambas conexiones protegen al sistema de los daños perjudiciales que provoca la tercera armónica.

Por último, cuando acoplamos dos transformadores en paralelo, ya sea por sus primarios, secundarios o ambos a la vez, una serie de requisitos debe ser cumplida.

- **Igualdad de desfase:** los desfases secundarios (respecto al primario) deben ser iguales.
- **Igualdad de índice horario:** el sentido de rotación de fases del primario y secundario deben ser iguales.

- Igualdad de relación de transformación: las relaciones de transformación entre las tensiones de línea deben ser iguales. Junto con la anterior, esta condición evita la circulación de corriente entre los transformadores).
- Igualdad de cortocircuito: las caídas de impedancia (tensiones de cortocircuito) deben tener los mismos valores porcentuales relativos. Para que la recarga se reparta de acuerdo a las potencias nominales de los transformadores.
- Igualdad de potencias: (o relación de potencias nominales no superior a 3:1).

3.4 – Cuba de aceite del transformador

La parte desmontable de un transformador (núcleo y devanados) está sumergida en una cuba llena de aceite, elemento que permite absorber el calor desprendido por los devanados cuando éstos son recorridos por corrientes eléctricas, refrigerando de forma natural al transformador. Las condiciones de refrigeración son más estrictas a medida que aumenta la potencia:

- Los transformadores de pequeña potencia tienen cuba lisa (simple).
- Los transformadores de distribución hasta **200 [KVA]** tienen soldadas una o dos filas de tubos de diámetro $\varnothing \approx 50$ [mm] por los que circula por convección el aceite para refrigerarse.
- Los transformadores de distribución hasta **1000 [KVA]** llevan incorporados radiadores a las paredes de la cuba para mejorar la ventilación.
- En los transformadores de mayor potencia, la cuba es lisa y el aceite circula gracias a bombas a través de radiadores con potentes ventiladores, es la llamada «refrigeración forzada».
- En las centrales hidráulicas, se suele usar el agua para refrigerar el aceite, en este caso se usa el mismo método anterior, pero con la adición del soplado de agua a la acción de los ventiladores.

3.4 – 1: Tapa de la cuba y terminales

Incorporados a la tapa de la cuba se encuentran:

- Los aisladores pasantes (pasatapas) en donde se encuentran la salida de los devanados de alta y baja tensión.
- El tanque de expansión del aceite, el cual sirve además para mantener el nivel del mismo por encima del nivel de los aisladores de salida de los devanados más grandes. Usado en máquinas de más de **100 [KVA]**.
- El tubo de escape del aceite y gases, el cual hace las veces de válvula de seguridad. Usados en transformadores de más de **1000 [KVA]**.

Los aisladores pasantes por lo general son de porcelana y huecos, con una serie de cilindros de papel aislante concéntricamente en su interior y llenos de aceite. Las dimensiones y peso de estos aisladores aumentan con el aumento de tensión. No deben llevar aire en la parte hueca y se colocan con gomas en sus bases para evitar la pérdida de aceite. Los pasatapas de AT y BT se diferencian por su altura, siendo ésta mayor cuanto mayor es la tensión.

3.4 – 2: Aceite para transformadores

Los aceites usados para la refrigeración son minerales, poseen ventajas respecto de otros pero tienen la contra de ser inflamables y en contacto con el aire son explosivos. Es por eso que en la década del '70 se empezaron a usar aceites sintéticos los cuales no son explosivos ni inflamables, pero como contrapartida eran caros y muy contaminantes, razón por la cual se prohibieron en la década del '90.

Al inicio de la década del '80 se inició un nuevo sistema de construcción de transformadores secos encapsulados en **resina epoxi**. Este tipo de transformador es el más idóneo para instalaciones que requieren gran seguridad. No propagan el fuego, son autoextinguibles, no se derrama material inflamable ni contaminante en caso de avería, como ocurre con el aceite y la silicona. No requieren mantenimiento, no tienen niveles que controlar ni foso colector de aceites y no requieren equipos contra incendios. To-

do ello hace que sea el transformador más seguro y fiable del mercado en la actualidad. Los arrollamientos de alta tensión están completamente encapsulados en una masa de resina epoxi cargada con silicato de flúor, tratada convenientemente para mejorar la adherencia y la resistencia a la humedad; el conductor es en forma de hilos esmaltados o pletinas recubiertas con papel aislante. Los devanados de baja tensión emplean conductores en forma de pletinas de cobre aisladas con papel; a partir de los 400 KVA se utiliza la técnica de bobinados en bandas, que consiste en enrollar, sobre un modelo cilíndrico, una banda de conductor junto con otra de un aislamiento flexible. Junto con el empleo de aislamientos preimpregnados, la aplicación de esta técnica permite obtener unos arrollamientos compactos, resistentes a la humedad, de fácil disipación de calor y de muy buen comportamiento a los esfuerzos dinámicos que se producen en caso de cortocircuitos.

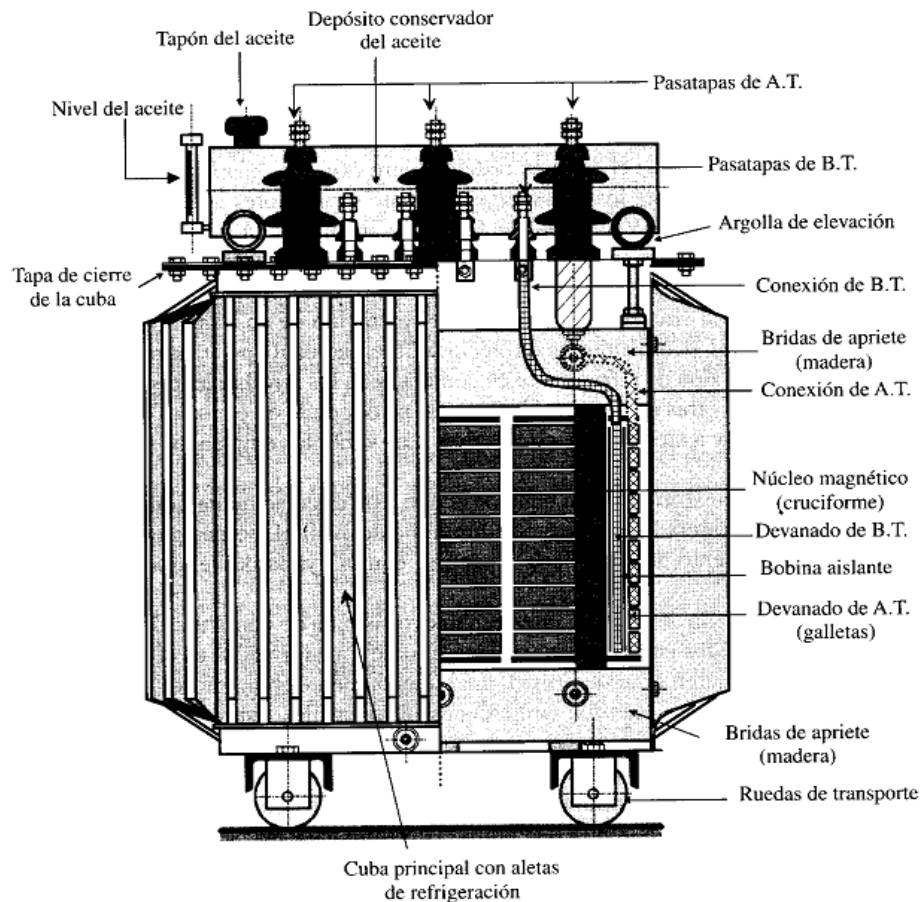


Figura 3-10: Dibujo de un transformador y algunas de sus partes.

El aceite debe ser ingresado a la cuba con una determinada temperatura y totalmente seco para evitar la humedad. Luego se lo hace circular durante un tiempo determinado dependiendo de la potencia de trabajo, y de paso se extrae la humedad que pudiese contener.

3.4 – 3: Otros elementos que hacen a la cuba

Hay otros elementos sujetos a la cuba y podemos mencionar los siguientes:

- El **conmutador de tensión**, que permite variar la misma para compensar una posible caída de tensión en las líneas de transmisión.
- El **relé Buccholtz**, puesto en el conducto que une la tapa de la cuba con el tanque de expansión, su función es alarmar y sacar de servicio al transformador cuando se forman gases en su interior.
- Un **termómetro**, colocado en la tapa y su finalidad es la misma que el relé Buccholtz, pero se activa cuando la temperatura en el interior es elevada.
- **Grifos y tapa**, para la muestra y agregado de aceite respectivamente.
- **Relé de protección**, mide las posibles fallas entre las fases y la cuba, se lo usa en transformadores de gran potencia.

4 – ENSAYOS DE TRANSFORMADORES

Los ensayos son diversas pruebas para verificar el comportamiento de la máquina. En la práctica resulta difícil la realización de ensayos reales directos por dos motivos esenciales: 1) la gran cantidad de energía a disipar en tales pruebas, 2) es prácticamente imposible disponer de cargas lo suficientemente elevadas (sobre todo cuando la potencia del transformador es grande) para hacer un ensayo en situaciones reales.

Afortunadamente, los elementos que intervienen en el circuito equivalente aproximado se pueden obtener con unos ensayos muy simples que tienen además la ventaja de requerir muy poco consumo de energía (la suficiente para suministrar únicamente las pérdidas de la máquina), de ahí que sean pruebas sin carga real. Los ensayos se dividen en dos grandes grupos: de **rutina** y de **tipo**. Los primeros se realizan sobre todas las unidades de una misma serie y los segundos sobre aquellos que peor resultados obtuvieron en los ensayos de rutina.

4.1 – Ensayos de rutina

4.1 – 1: De aislamiento

Medimos con este ensayo la resistencia óhmica de los arrollamientos de AT y BT. Se realiza entre AT y masa, entre BT y masa y entre AT y BT. Para la medición no podemos usar un tester común y corriente, ya que los valores a medir van desde los **200** a los **1000 [MΩ]**; usamos en su lugar un instrumento llamado Megher⁷, apto para esta clase de mediciones, consta de un magneto capaz de generar una tensión de **500 [V]** de continua. La medición se realiza como se indica en la [Figura 4-1](#). Uno de los motivos de la pérdida de aislación, es la penetración de aire húmedo dentro de la cuba del transformador, debido a que la silicagel⁸ se encuentra en mal estado, y como consecuencia de ello, cambia la rigidez dieléctrica del aceite provocando una pequeña continuidad.

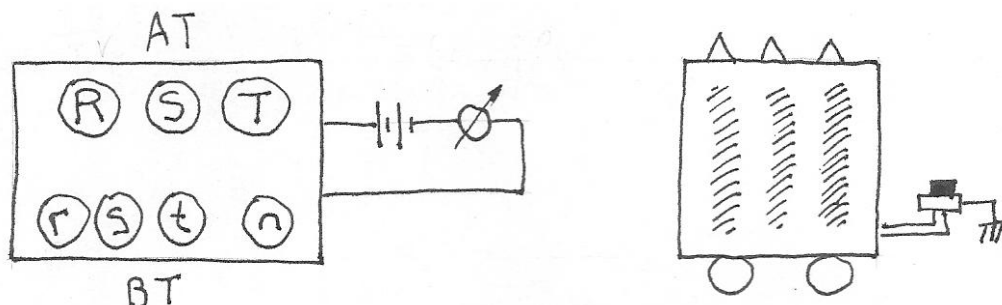


Figura 4-1: Esquema de conexión para el ensayo de aislación.

4.1 – 2: De tensión aplicada

Consiste en aplicar a uno de los arrollamientos una tensión fijada por las normas IRAM, estando los otros arrollamientos y la cuba del transformador a masa. La norma exige unir las tres fases de salida del transformador. La [Figura 4-2](#) muestra el esquema para este ensayo.

⁷ El término **megher** o **megóhmetro** hace referencia a un instrumento para la medición del aislamiento eléctrico en AT. Se conoce también como «Megger», aunque este término corresponde a la marca comercial del primer instrumento portátil medidor de aislamiento introducido en la industria eléctrica en 1889. El nombre de este instrumento, megóhmetro, deriva de que la medida del aislamiento de cables, transformadores, aisladores, etc. se expresa en megohmios (MΩ).

⁸ El **gel de sílice** o **gel de sílice** es una forma granular y porosa de dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico. A pesar del nombre, el gel de sílice es un sólido. Se suele encontrar comúnmente en la vida diaria en forma de pequeñas esferas envasadas en bolsas transpirables. En esta forma, se usa como agente desecante para controlar la humedad local y evitar el deterioro de ciertos bienes.

Supongamos que queremos ensayar un transformador trifásico de **13,2/0,4/0,23 KV** y según las normas se le debe aplicar un voltaje eficaz de **34 [KV]** en AT (lo que equivale a un voltaje pico de **48 [KV]**) y **2,5 [KV]** (voltaje pico igual a **3,52 [KV]**) para BT. El ensayo consiste en dos pasos: la calibración y el ensayo propiamente dicho, que a continuación se expliquen.

Para comenzar la **calibración**, se deben separar las esferas a **16 [mm]** y poner el cursor en la posición (2), de esta forma, no hay voltaje aplicado a las esferas. A medida que movemos el cursor hacia la posición (1), irá aumentando la tensión en el explosor hasta llegar a los **34 [KV]** de tensión eficaz. En este punto, se producirá un arco eléctrico entre las esferas (el aire se vuelve conductor debido a la ruptura del dieléctrico, en este caso el aire). Debido a este arco, se genera una elevada corriente en el primario y el interruptor termomagnético se cierra.

Una vez efectuada la calibración, se procede a realizar el **ensayo**. Para esto comenzamos separando las esferas a más de **16 [mm]** de distancia para que cuando se apliquemos (al transformador) la tensión eficaz de **34 [KV]** no se produzca el arco. Esta tensión de ensayo se la debe mantener durante aproximadamente **60 segundos**, si no se produce la chispa (arco) entonces se ha superado el ensayo.

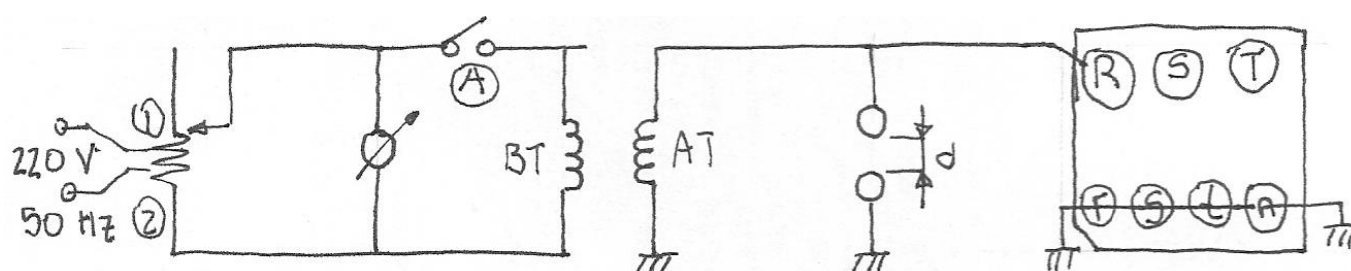


Figura 4-2: Esquema de conexión para el ensayo de tensión aplicada. Donde **A** es el interruptor electromagnético, **V** es un voltímetro graduado (para la medición de tensión entre las fases 1 y 2), **BT/AT** es un transformador (que no es el sujeto de ensayo) elevador, que va desde **0 a 150 [KV]**. Consta además de un **explosor**, que son perfectamente pulidas de 50 mm de diámetro y se pueden aproximar a voluntad, siempre y cuando respeten las normas IRAM. El aparato viene provisto de un calibrador para regular la distancia **d** y una de las esferas está conectada a masa.

4.1 – 3: De tensión inducida

Este ensayo consiste en aplicar a uno de los arrollamientos el doble de la tensión nominal, estando el otro arrollamiento a circuito abierto. Pero al hacer esto surge un problema: al aumentar la tensión aumenta la inducción **B** y a corto plazo, el transformador se quema. Para evitar este inconveniente la duración del ensayo debe ser muy breve.

La **fem** viene dada por la expresión

$$E = 4,44 \cdot B \cdot S \cdot f \cdot N \text{ [V]}$$

Y como necesitamos el doble de **E**, en vez de aumentar **B** elevamos la frecuencia **f**.

El tiempo de este ensayo varía entre los **40 y 60 segundos** y se prueba la aislación entre los arrollamientos, entre galleta y galleta, entre capa y capa, etc. En fin, se comprueba la calidad del diseño y del proceso de montaje.

4.1 – 4: De relación de transformación

Este ensayo consiste en garantizar el valor de la relación de transformación, es decir

$$r_t = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Lo más lógico sería aplicar una tensión conocida a uno de los arrollamientos y medir con un voltímetro la tensión en el otro, pero esto no es práctico. Lo que usaremos será un galvanómetro; lo conectamos al transformador como indica la **Figura 4-3** y lo ajustamos al valor esperado de **r_t**, cuando la aguja

del dispositivo marque cero en las resistencias, nos dará exactamente el valor de r_t . Este ensayo debe hacerse para todas las fases y puntos de derivación que posee el transformador.

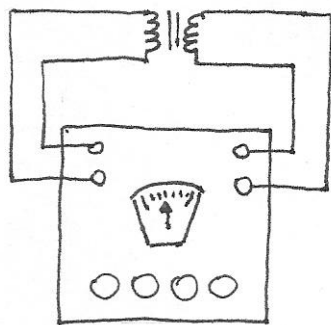


Figura 4-3: Esquema de conexión para el ensayo de relación de transformación.

4.1 – 5: De resistencia óhmica de los arrollamientos

Este ensayo se hace para determinar el aumento de la resistencia de los devanados en función de la temperatura. Se usa un puente de Wheatstone para resistencias mayores a $1\text{ [M}\Omega\text{]}$, caso contrario se utiliza un puente de Kelvin. El ensayo nos permite determinar las pérdidas por efecto Joule y por efecto pelicular, además de la temperatura de los devanados.

El ensayo consiste en medir la resistencia en frío (R_f) y en caliente (R_c) entre los devanados (ya que no es posible colocar un sensor entre ellos) y el cambio térmico ΔT debe responder a

$$\Delta T = \frac{R_c (234,5 + t_f)}{R_f} - 234,5 \quad (4 - 1)$$

La norma establece que $\Delta T \approx 65\text{ [}^\circ\text{C]}$ para el cobre en los transformadores de clase A.

4.1 – 6: De pérdidas (en el cobre y en el hierro)

Con este ensayo determinamos las pérdidas en vacío (hierro) y las pérdidas en cortocircuito (cobre).

Ensayo en vacío

El esquema de conexión es el de la Figura 4-4. Mediante este método podemos determinar la corriente de vacío I_0 (que es la medida en el amperímetro), las pérdidas en vacío P_0 y la relación de transformación r_t (que es el cociente entre V_{1n} y V_{20}).

El valor de las pérdidas será

$$P_0 = V_{1n} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

En general las pruebas en vacío se realizan alimentando el devanado de BT, pues su rango de tensión de régimen coincide con el de los dispositivos utilizados para medir, además supone un menor riesgo para el operario que realiza el ensayo.

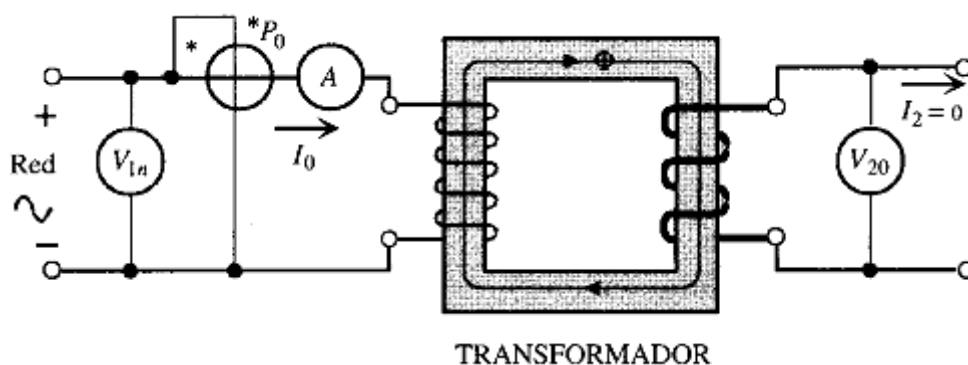


Figura 4-4: Esquema de conexión para la medición de pérdidas en el vacío.

Ensayo en cortocircuito

Este ensayo consiste en hacer lo mismo que en el ensayo anterior, solo que el otro devanado está en corto en lugar de estar abierto (Figura 4-5). Se aplica al primario una tensión que se va elevando desde cero hasta un valor tal que circula por los devanados la corriente a plena carga (o nominal).

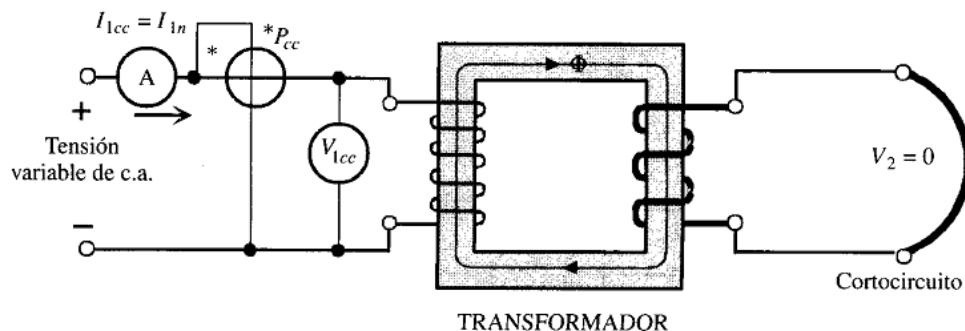


Figura 4-5: Esquema para el ensayo de pérdidas en cortocircuito.

El valor de las pérdidas será

$$P_{cc} = V_{1cc} \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

Este ensayo se realiza en la práctica alimentando el transformador por el lado de AT, de esta forma la corriente a medir en el primario será de un valor razonable. Al mismo tiempo, la tensión de alimentación sólo será una pequeña parte de la nominal, estando comprendida dentro de las escalas de los instrumentos de medida usuales.

4.1 – 7: De rigidez dieléctrica del aceite

La disminución de la rigidez dieléctrica del aceite por debajo de determinado valor pone fuera de servicio al transformador. El ensayo consiste en tomar una muestra del aceite (los primeros litros se desprecian) y colocarlo en un recipiente dentro del cual se encuentran dos electrodos planos o semi-esféricos separados a una cierta distancia y alimentados por una fuente de tensión (Figura 4-6). Por medio de un reóstato se varía la tensión que alimenta a los electrodos hasta que se rompe el dieléctrico del aceite, situación que se da a los **48 [KV]**. La prueba se realiza cinco veces más dejándolo reposar entre prueba y prueba, el promedio debe dar aproximadamente **50 [KV]** para que el aceite se considere apto como aislante. Por otro lado, también deben medirse sus otras características (acidez, punto de inflamación, viscosidad, etc.)

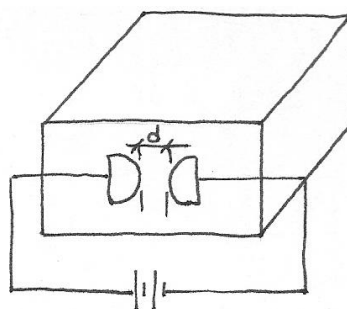


Figura 4-6: Esquema de conexión para el ensayo de rigidez dieléctrica del aceite.

4.1 – 8: De hermeticidad

Sirve para comprobar que no existan pérdidas de aceite a través de la cuba del transformador. Para realizar el ensayo aplicamos a la cuba nitrógeno a una presión de **0,5 [Kg/cm²]** y esperamos un tiempo para verificar que el nivel de aceite no haya cambiado. Las uniones de las soldaduras de la cuba son los lugares más factibles de presentar pérdidas, por lo que durante el ensayo colocamos talco en allí para detectar las pérdidas más fácilmente.

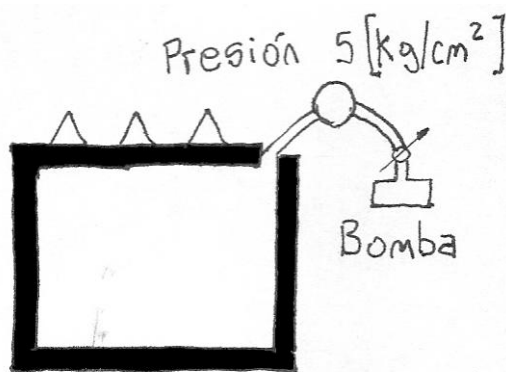


Figura 4-7: Esquema de conexión para el ensayo de hermeticidad.

4.1 – 9: De nivel de ruido

Este ensayo determina que el nivel de ruido del transformador (que aumenta cuando se afloja su armadura) no supere el valor de **58 dB**, que es el nivel de ruido admisible por el oído humano. El apunte no dice nada sobre cómo se lleva a cabo el ensayo.

4.2 – Ensayos de tipo

Para estos ensayos elegimos los que tengan mayor porcentaje de pérdidas en los ensayos de rutina.

4.2 – 1: De calentamiento

Con este ensayo determinamos si en régimen permanente el transformador mantiene la temperatura especificada por el fabricante. Realizamos la medición del aceite con un termómetro (que posee el transformador), de los arrollamientos y de las pérdidas como ya hemos visto antes.

La **temperatura del aceite** T_{aceite} la medimos con un termómetro colocado en un tubo ciego lleno de aceite en la tapa del transformador (ya que el aceite que está en la parte superior es siempre más caliente que el de la parte inferior). La diferencia entre la temperatura del aceite y la ambiente no debe superar los **60 °C** si el transformador lleva tanque de expansión, y los **55 °C** si no lo lleva.

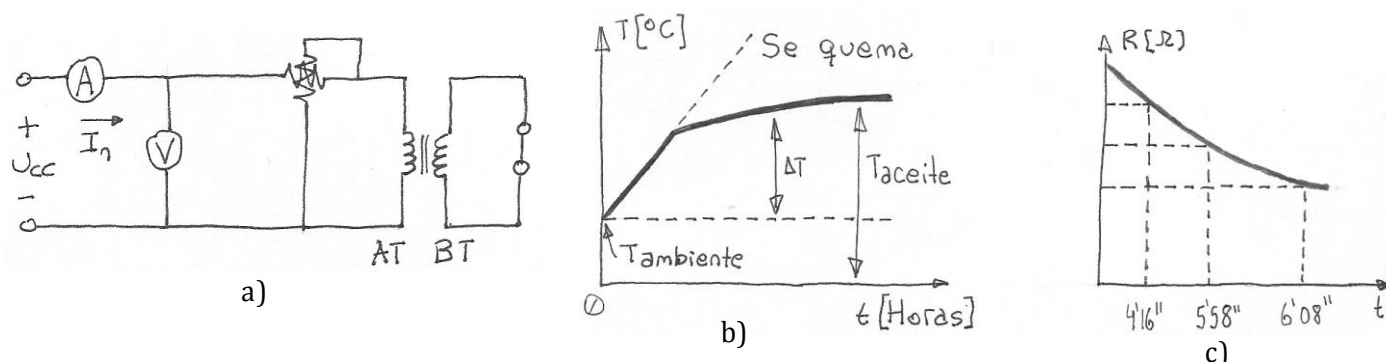


Figura 4-8: a) Esquema de conexión para el ensayo de calentamiento, b) T [°C] vs t y c) R_c [Ω] vs t .

La Figura 4-8a es un gráfico de la temperatura del aceite vs tiempo (en horas) cuando ponemos a funcionar el transformador después de haber estado el tiempo suficiente como para que el aceite esté a la misma temperatura que la del ambiente. En la Figura 4-8b vemos que a medida que transcurre el tiempo, la temperatura del aceite va en aumento hasta alcanzar un valor estable. El salto térmico del aceite debe ser menor a los **60 °C** para evitar la reducción de la vida útil del transformador. Si disminuimos **8 °C** la temperatura del aceite duplicaremos la vida útil de la máquina.

Con la fórmula (4-1) podemos hallar el salto de **temperatura de los arrollamientos** y dicho salto no debe superar los **65 °C**, que es la variación de temperatura que soporta el cobre si los arrollamientos son de clase A. El gráfico de la Figura 4-8c muestra la resistencia R_c de los arrollamientos vs el tiempo (en minutos), para confeccionarlo lo que hacemos es conectar el transformador a **500-700 [V]** durante

un tiempo y mediante un puente (según vimos en la sección 4.1 – 5: De resistencia óhmica de los arrollamientos), medimos la R_c conforme transcurre el tiempo y así confeccionamos una tabla que será la que se ve en la figura.

Para medir las **pérdidas** ponemos en cortocircuito el devanado de BT (por seguridad) y aplicamos al de AT una tensión tal que en el vatímetro se lean las pérdidas en el hierro y en el cobre, que son permanentes y fluctuantes respectivamente. Las pérdidas en el cobre deben hacerse permanentes.

4.2 – 2: De impulso

Con este ensayo verificamos la calidad del dieléctrico del aceite, sometiendo el transformador a una descarga atmosférica (rayo) simulada en un laboratorio.

El ensayo consiste en conectar el transformador según la Figura 4-9a y someterlo a una onda que cumpla con las exigencias (Figura 4-9b). La onda visualizada en el osciloscopio debe tener las dos siguientes características: **1) el frente de onda debe durar entre 1 y 12 μs** y **2) pasado el valor pico (V_p), la onda se debe estabilizar y alcanzar su valor medio (V_{med}) en aproximadamente 50 μs** . El ensayo se realiza con una onda reducida (la mitad del valor por ejemplo $V_p/2$) y dos veces una onda plena (V_p).

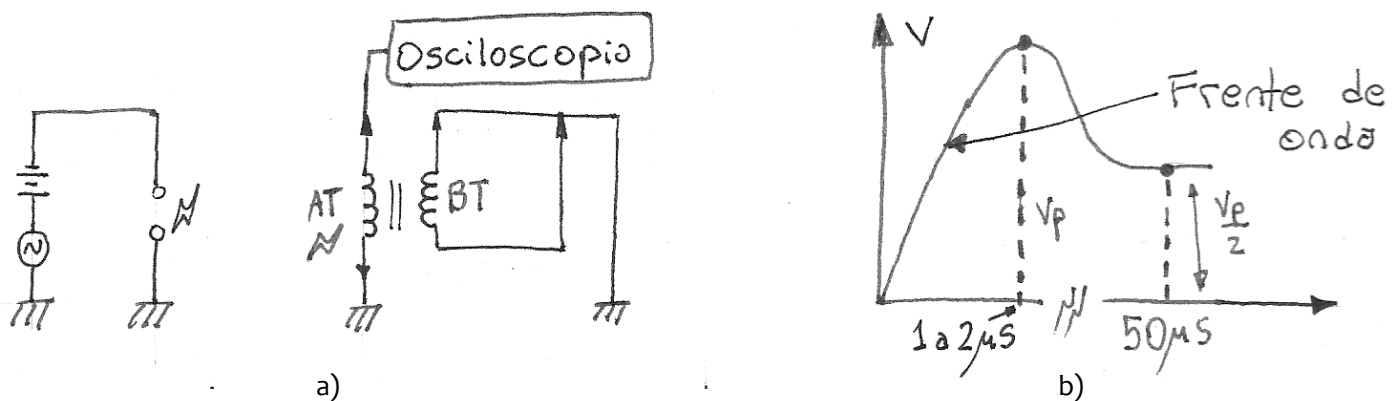


Figura 4-9: a) Esquema de conexión para el ensayo de impulso y b) onda del osciloscopio.

4.2 – 3: De cortocircuito electrodinámico

Este ensayo por lo general no se realiza en Argentina. Consiste en medir diferentes parámetros poniendo un arrollamiento en corto y el otro a la tensión nominal, buscando con esto asegurar el funcionamiento de la máquina en cortocircuito.

5 – OTROS TIPOS DE TRANSFORMADORES

5.1 – Transformadores de distribución

Se denomina transformadores de distribución, generalmente a los transformadores de potencias iguales o inferiores a **500 [KVA]** y de tensiones iguales o inferiores a **67000 [V]**, tanto monofásicos como trifásicos. Aunque la mayoría están proyectados para montaje sobre postes, algunos de los tamaños de potencia superiores, por encima de las clases de **18 [KV]**, se construyen para montaje en estaciones o en plataformas. Las aplicaciones típicas son para alimentar a granjas, residencias, edificios o almacenes públicos, talleres y centros comerciales.

5.1 – 1: Aisladores

En la Figura 5-2 podemos ver un aislador típico de alta tensión de un transformador de distribución de **13200/400/231 [V]**. La diferencia con el de baja tensión está en que tanto el diámetro como la altura

de este último, son **0,5** veces la altura y el diámetro del primero, además el aislador de baja tensión es de color blanco.

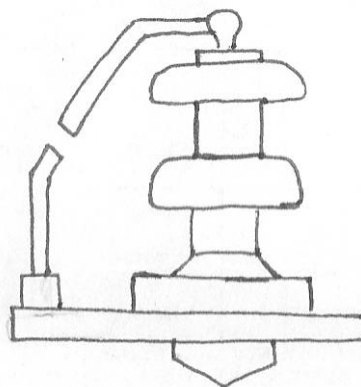


Figura 5-1: Aislador de alta tensión de un transformador de distribución de **13200/400/231 V**.

5.1 – 2: Placa característica

La placa característica es la placa en donde el fabricante coloca las características técnicas y datos más importantes de un transformador. Esta placa la tiene todo transformador, independientemente de su potencia. Algunos de estos datos son el fabricante, tipo, número de fabricación, potencial nominal, tensión e intensidad en el primario y secundario, bornes, conexiones internas, entre otros.

5.1 – 3: Componentes del transformador y su función

A la figura que está en el libro no se le pueden ver los números de referencia, así que reemplacé la figura por una aproximada (Figura 3-10).

5.2 – Autotransformadores

El autotransformador es un transformador especial formado por un devanado continuo, que se utiliza a la vez como primario y secundario, por lo que las tensiones de alimentación y salida no están aisladas entre sí (Figura 5-2). A diferencia del transformador de dos devanados, un autotransformador **transfiere energía entre los dos circuitos, en parte por acoplamiento magnético y en parte por conexión eléctrica directa**. Vendría a ser como un divisor resistivo pero con inductores.

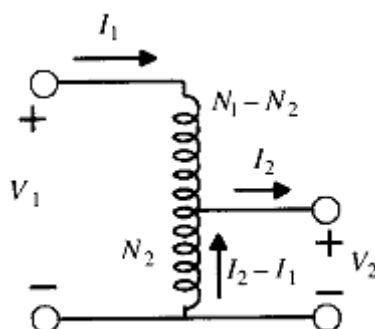


Figura 5-2: Autotransformador.

Al igual que la relación de tensiones en un divisor resistivos, en un autotransformador se verifica

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4 - 2)$$

De la figura tenemos que la potencia de paso (que vendría a ser como la potencia “de salida”) es

$$P_2 = U_2 \cdot I_2$$

Y la potencia interna o propia (que sería como la potencia en el devanado común) es

$$P_i \approx U_2 \cdot (I_2 - I_1)$$

Sabiendo de la ecuación (4-2) que $I_1/I_2 = V_2/V_1$, hacemos el cociente entre ambas potencias

$$\frac{P_i}{P_2} \approx \frac{U_2 \cdot (I_2 - I_1)}{U_2 \cdot I_2} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} = 1 - \frac{I_1}{I_2} = 1 - \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (4-3)$$

De aquí podemos deducir que la relación entre la potencia interna (P_i) y la de paso (P_2) es igual a la relación entre la diferencia de tensiones ($V_1 - V_2$) y la mayor de ellas (V_1).

Ventajas: observamos que mientras el transformador necesita N_1 espiras en el primario y N_2 espiras en el secundario; en el autotransformador en cambio, sólo se emplean N_1 espiras; en una parte de ellas, $N_1 - N_2$, circula la corriente I_1 , mientras que por la otra, que es una derivación que recoge N_2 espiras, circula una corriente $I_2 - I_1$, en el sentido indicado en la Figura 5-2. El peso en cobre en cada uno de los casos es proporcional al número de espiras y a la corriente que las recorre, lo que indica un ahorro en material para el autotransformador frente al transformador. La reducción en el número de espiras total permite también emplear circuitos magnéticos con menos «ventana», lo que supone un menor peso en hierro. El autotransformador tiene en consecuencia menos pérdidas en el cobre y en el hierro, lo que mejora el rendimiento y la caída de tensión frente al transformador.

Desventajas: sin embargo, presenta dos inconvenientes fundamentales: por una parte, debido a su menor resistencia y reactancia (al existir menos espiras), resulta un bajo valor de la caída U_{cc} , lo que supone en caso de una falla de cortocircuito, corrientes más elevadas; por otra parte, si la relación de transformación es muy elevada, por ejemplo, **10.000/220 [V]**, tiene el inconveniente de presentar un borne común a los arrollamientos de AT y BT. Debido a estos graves inconvenientes, se suele limitar el uso de los autotransformadores a los casos en que no exista mucha diferencia entre las tensiones V_1 y V_2 . En cualquier caso, se está obligado conectar a tierra el borne común de ambos devanados.

5.3 – Transformadores de medida

Este tipo de transformadores son ampliamente usados en los circuitos eléctricos de potencia y sirven para aislar dichos circuitos de los instrumentos de medida, los cuales funcionan generalmente con tensiones y corrientes reducidas. Los hay de dos tipos: **de tensión**, reducen grandes valores de tensión a **110 [V]** de corriente alterna; y **de intensidad**, que hacen lo propio a **5 [A]**.

5.3 – 1: De tensión

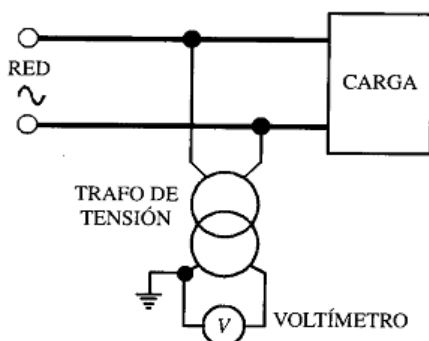


Figura 5-3: Transformador de intensidad. Forma de conexión y representación.

Su forma de funcionamiento y conexión es análoga a la de los transformadores de potencia. En la Figura 5-3 se muestra su conexión, que siempre es en **paralelo**, para el caso de transformadores mono y trifásico. A diferencia con los transformadores de potencia, debido a la alta impedancia de la carga conectada, el transformador de tensión funciona casi en vacío, y de esta forma la caída de tensión interna es muy pequeña. Además un borne de **su secundario debe conectarse a tierra** para prevenir el peligro de un contacto accidental entre primario y secundario. El transformador de tensión debe proporcionar una tensión secundaria proporcional a la tensión primaria. Las tensiones primarias de le transformado-

res de tensión están normalizadas en los valores asignados entre **110 y 396.000 [V]**. La tensión secundaria asignada está normalizada en **110 [V]**.

En los transformadores de medida de tensión se definen los siguientes tipos de errores:

- **Error de relación o de tensión:** indica la desviación porcentual de la tensión real que existe en el secundario, U_2 , con respecto a la que debería existir si el transformador fuera ideal, U_{2n} .

$$\Delta U[\%] = \frac{U_2 - U_{2n}}{U_{2n}} \cdot 100 \quad (4 - 4)$$

- **Error de fase o de ángulo:** que es la diferencia de fase existente entre los vectores U_1 y U_2 , medido en minutos. Este error tiene importancia cuando se trata de medir la energía. Al contrario que el error de relación, no puede ser compensado de ninguna forma, es decir que el margen para este error lo determina el fabricante.

5.3 – 2: De intensidad

Tienen por misión reducir la corriente de la red a valores más apropiadas a las escalas de los instrumentos de medida (**5 [A]** en general y a veces **1 [A]** a plena carga). Se conectan en serie con la línea y el secundario se conecta también en serie con los amperímetros y bobinas de los aparatos de medida que, debido a la baja impedancia de estos, los transformadores de intensidad trabajan prácticamente en cortocircuito (Figura 5-4).

El circuito primario tiene pocas espiras y está formado por una barra pasante, mientras que cada bobinado del secundario (puede tener hasta tres) se compone por un elevado número de espiras. La corriente de carga la fija el primario y no la carga misma, lo que la hace independiente de la misma.

El secundario de este transformador no debe dejarse nunca a circuito abierto. Si esto ocurriera, los ampere-vueltas del primario, generalmente elevados, al no ser contrarrestados por los del secundario, toman un carácter magnetizante haciendo crecer el flujo y las pérdidas en el hierro hasta saturar el núcleo, tornando peligrosa la tensión del secundario. Para cambiar los instrumentos en el secundario podemos hacer dos cosas: o dejamos sin energía el circuito y desconectamos el aparato de medición o cortocircuitamos el aparato antes de desconectarlo.

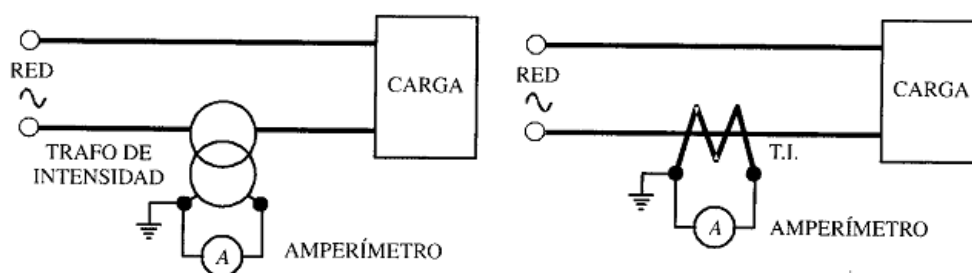


Figura 5-4: Transformador de intensidad. Forma de conexión y representación.

