

## Capítulo 9

# Transformador Monofásico Real

Como ya habra considerado el astuto lector, las condiciones ideales de trabajo estan alejadas de la realidad. Por esta razon, en este capitulo se intentaran modelar estas no-idealidades.

### 9.1. Modelo Eléctrico Equivalente

Si bien la configuración realizada en el transformador ideal de bobinar dos o más bobinas que comparten un mismo circuito de material magnético es perfectamente posible, en la realidad encontramos que los supuestos realizados sobre las propiedades electromagnéticas de los materiales no son ciertas. En efecto siempre va a suceder que:

- (a) El alambre o conductor con el cual construimos las bobinas tiene una cierta resistividad eléctrica la cual da lugar a una cierta resistencia  $R$  de la bobina que dependerá de la Sección y longitud del conductor utilizado (usualmente Cobre).
- (b) La permeabilidad magnética del hierro (núcleo) no es infinita así como la del medio circundante (en general aire o aceite) no es nula, además el material magnético siempre presenta histéresis magnética con lo cual se presentarán siempre los siguientes efectos:
  - a) Siempre existirá un flujo de fugas en el generado por cada bobina que se cierra por el medio sin circular por el núcleo.
  - b) La  $\mathfrak{R}$  del circuito magnético no es nula, por lo cual  $N1i_1 - N2i_2 = \phi\mathfrak{R} \neq 0$  entonces  $N1\bar{I}_1 \neq N2\bar{I}_2$ .
  - c) Al haber histéresis y al existir un flujo magnético impuesto en el núcleo vimos que hay pérdidas de energía por histéresis, y además también vimos que existen pérdidas por Foucault, por lo cual

siempre que se imponga un flujo en el transformador existirán pérdidas en el hierro.

Veamos como podemos tener en cuenta estos efectos reales a fin de encontrar un modelo eléctrico de un transformador que se aproxime mejor a la realidad. Con este fin consideremos los efectos anteriores uno a uno por vez.

**Conductores no ideales:** Supongamos que en el transformador ideal de dos bobinados levantamos el supuesto que los conductores son de resistencia nula. Entonces es fácil aceptar que el modelo eléctrico del transformador puede ser aproximado concentrando la resistencia del conductor de los bobinados en una resistencia  $R_i$  para cada uno de ellos permitiéndome asumir que los bobinados resultantes no presentan resistencia por lo cual constituyen un transformador ideal, resultando el modelo indicado en la figura 9.1.

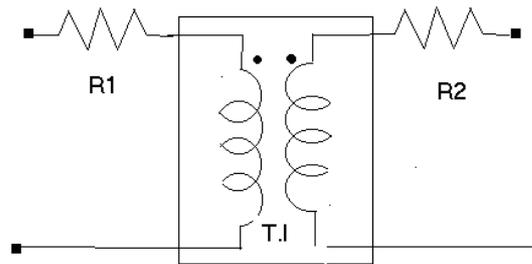


Figura 9.1: Trafo Real, Conductores con resistencia.

El valor de esta resistencia estaría dado por la conocida expresión

$$R_i = \rho(T) \frac{l_i}{S_i} \quad (9.1)$$

donde  $\rho$  es la resistividad del material conductor, la cual depende de la temperatura,  $l$  es la longitud mientras que  $s$  es la sección<sup>1</sup>. El pasaje de las corrientes primarias y secundarias por esta resistencia determinan las *pérdidas Joule* del transformador las cuales estarán dadas por:

$$R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \text{ o } (R_1 + n^2 R_2) I_1^2 \quad (9.2)$$

<sup>1</sup>A efectos prácticos, para el cálculo operativo industrial, se suele no tener en cuenta la dependencia de la resistencia con la temperatura. En el curso, salvo indicación expresa, no será tenida en cuenta.

<sup>2</sup>Existen otras pérdidas Joule llamadas *pérdidas adicionales* debidas a corrientes parásitas en la envolvente metálica del transformador. Estas pérdidas suelen no tenerse en cuenta.

**Flujos de Fugas:** Supongamos ahora que levantamos el supuesto de que no existen flujos de fugas ( $\phi_r$ ) en cada bobinado. Si hay flujo de fugas entonces el flujo total que pasa por cada bobinado será:  $\phi_T = \phi_U + \phi_r$  donde el flujo útil será aquel que pasa por todos los bobinados. El flujo residual de cada bobinado será proporcional a la corriente por los mismos por lo cual podemos escribir que:

$$\phi_{r_i} = L_i \frac{I_i}{N_i} \quad (9.3)$$

Pero sabemos que:

$$V_i = N_i \frac{d(\phi_T)}{dt} \quad (9.4)$$

Por lo que sustituyendo por las expresiones anteriores se tiene:

$$V_i = N_i \frac{d\phi_U}{dt} + jL_i \omega I_i = E_i + jX_i I_i \quad (9.5)$$

Luego, si hay fugas en cada bobinado entonces este determina una autoinductancia  $L$  en cada uno de ellos, la cual al igual que la resistencia la puedo concentrar en componente inductivo de reactancia  $X = L\omega$  en serie con cada bobinado puesto que este flujo de fugas será proporcional a la corriente que pasa por cada uno de ellos. En estas condiciones el flujo de fugas se cierra en cada inductancia quedando entonces el transformador en las hipótesis de un transformador ideal esto es sin flujo de fugas. La situación en consecuencia la puedo aproximar como indica la figura 9.2.

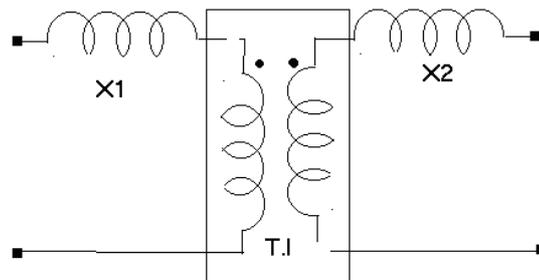


Figura 9.2: Trafo Real, Flujo de Fugas.

**Reactancia Magnetizante:** Supongamos ahora que levantamos el supuesto de que la  $\mathfrak{R}$  del circuito magnético no es nula. Tendremos entonces que con las corrientes definidas como antes

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathfrak{R} \phi = \frac{B \cdot l}{\mu} \neq 0 \quad (9.6)$$

Siendo  $l$  la longitud del circuito magnético. Definamos dos corrientes ficticias dadas por los fasores:  $I_0, I'_1$  de forma tal que verifiquen:

$$I'_1 = \frac{N_2 I_2}{N_1} \text{ e } I_0 = I_1 - I'_1 \quad (9.7)$$

con lo que se obtiene

$$I_0 = \frac{B \cdot l}{N_1 \mu} \text{ e } N_1 I'_1 = N_2 I_2 \quad (9.8)$$

Pero por otro lado sabemos que:  $V_1 = N_1 S (dB/dt)$  con lo que sale que:

$$V_1 = N_1^2 S \frac{\mu}{l} \frac{dI_0}{dt} \quad (9.9)$$

Llamemos INDUCTANCIA MAGNETIZANTE  $L_m$  a

$$L_m = \frac{N_1^2 S \mu}{l} \quad (9.10)$$

con lo cual se tiene

$$V_1 = L_m \frac{dI_0}{dt} \text{ que equivale a } V_1 = jX_m I_0 \quad (9.11)$$

llamando  $X_m$  REACTANCIA MAGNETIZANTE DEL TRANSFORMADOR REAL.

En definitiva, ¿como podemos interpretar las anteriores operaciones? Como la permeabilidad magnética no es infinita "aparece" una inductancia (la magnetizante) que virtualmente hace circular una cierta corriente  $I_0$  que no pasa por los bobinados del transformador el cual puedo ahora suponer ideal circulando por sus bobinados una corriente primaria  $I'_1$ . Por lo cual el modelo de un transformador real con permeabilidad finita será como el que se muestra en la figura 9.3.

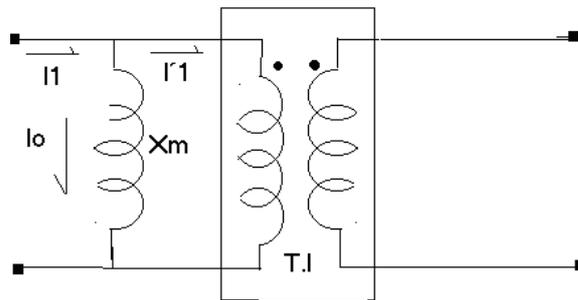


Figura 9.3: Trafo Real, Reactancia Magnetizante.

La corriente  $I_0$  se le denomina CORRIENTE MAGNETIZANTE O CORRIENTE DE VACÍO DEL TRANSFORMADOR.

**Perdidas en el Hierro:** Supongamos ahora que levantamos el supuesto que el hierro no presenta pérdidas. Por tanto existen pérdidas de histéresis y de Foucault la cual como vimos son la de la forma:

$$P_{Fe} = k_H f B_{Max}^n + k_F f^2 B_{Max}^2 \quad (9.12)$$

Suponiendo que estoy en un punto de funcionamiento constante tendré que  $f$  y  $B_{Max}$  son constante para ese punto por lo que podré escribir que:

$$P_{Fe} = k_H^* f^2 B_{Max}^2 + k_F f^2 B_{Max}^2 \quad (9.13)$$

Por otro lado sabemos que siempre se cumple que para cualquiera de las tensiones primarias o secundarias se cumple (tomando por ej. la primaria  $V_1$ ):

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ por lo que } |V_1| \propto f B_{Max} \text{ con lo cual } P_{Fe} = \frac{1}{R_m} V_1^2 \quad (9.14)$$

Por tanto si incluyo en el modelo, como indica la figura, una resistencia ficticia  $R_m$  tendré consideradas las pérdidas en el hierro<sup>3</sup>.

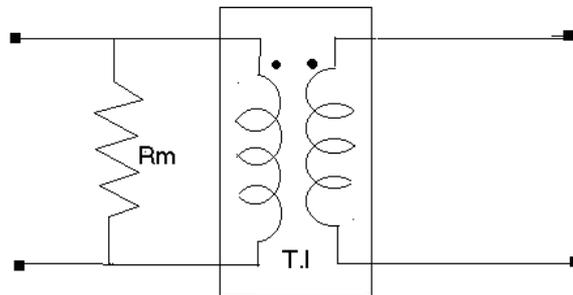


Figura 9.4: Trafo Real, Perdidas en el Hierro.

En consecuencia si ahora consideramos todas las “realidades” anteriores el modelo eléctrico del transformador real será de la forma que indica la figura 9.5.

Si pasamos la impedancia secundaria al lado primario resulta lo que se observa en la figura 9.6.

El anterior modelo representa lo que llamaríamos el “circuito equivalente exacto” del transformador operando normalmente en régimen sinusoidal estacionario y de tal manera que no hay saturación en el hierro<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>Observar que si cambia la frecuencia de la fuente la resistencia cambia de valor.

<sup>4</sup>Si se opera el transformador fuera del régimen sinusoidal estacionario este modelo es cada vez menos aproximado, la operación para estos casos escapa a los fines de este curso.

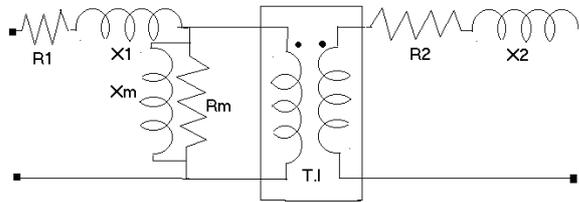


Figura 9.5: Modelo Trafo Real

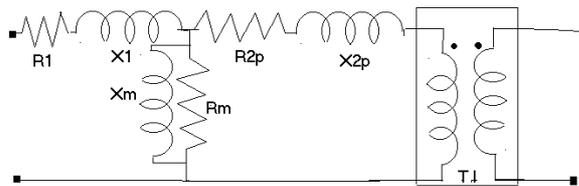


Figura 9.6: Modelo Trafo Real, Impedancias pasadas al primario.

En la práctica los valores típicos que presentan las resistencias y reactancias para los transformadores que se utilizan en las aplicaciones industriales son tales que  $R_m, X_m \gg R_1, X_1, R_2, X_2$ , por lo que a los efectos de simplificar los cálculos se suele adoptar el modelo que se muestra en la figura 9.7, llamado “circuito equivalente aproximado”.

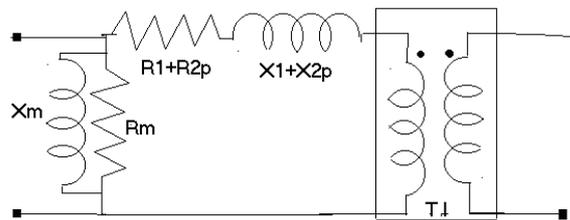


Figura 9.7: Modelo Trafo Real, Modelo final.

Cabe señalar que el modelo de la figura 9.7 ES EL CIRCUITO QUE SE UTILIZARÁ EN EL CURSO A FIN DE MODELAR EL TRANSFORMADOR Y ES EL QUE SE UTILIZA EN LA PRÁCTICA.

### 9.1.1. Algunas Definiciones

Realicemos ahora algunas definiciones elementales:

Análogamente si el hierro entra en saturación, el modelo en este caso también se altera generando además componentes de armónicos en las corrientes primarias y secundarias como se verá más adelante. A efectos prácticos en operación normal estas situaciones no son tenidas en cuenta.

**Transformador en vacío:** Se dice que un transformador está en vacío cuando sus bornes secundarios están “abiertos” es decir no existe conexión alguna entre los bornes secundarios.

**Transformador en carga** Se dice que un transformador está en carga cuando entre sus bornes secundarios se conecta una carga eléctrica (en general modelada como una impedancia).

**Transformador en cortocircuito** Se dice que un transformador está en cortocircuito cuando sus bornes secundarios se cortocircuitan.

Ha partir de las definiciones anterior se definen dos impedancias de importancia trascendente en la práctica:

$$Z_{CC} = (R_1 + n^2 R_2) + j (X_1 + n^2 X_2) \text{ Imp. de Cortocircuito} \quad (9.15)$$

$$Z_M = R_m // jX_m \text{ Imp. de vacío} \quad (9.16)$$

Resultando entonces el modelo usual de la forma donde los parámetros eléctricos representan todos fasores como se muestra en la figura 9.8.

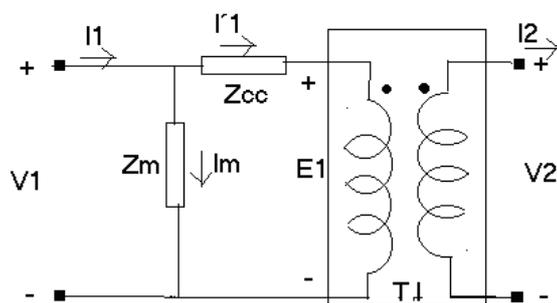


Figura 9.8: Modelo Trafo Real, Modelo final en fasores.

Obsérvese que si el transformador “se cortocircuita” entonces la fuente “verá” la  $Z_{CC}$ , mientras que si está en “vacío” la fuente “verá” la impedancia de vacío,  $Z_M$ <sup>5</sup>.

## 9.2. Valores Nominales de un Transformador

De acuerdo con la construcción básica que hemos encontrado para un transformador, el mismo se desarrolla bobinando conductores entorno a un cierto material magnético, usualmente Fe de transformador.

Resulta obvio que las diferentes espiras que componen el bobinado deben estar aisladas entre sí y a su vez estas respecto al núcleo magnético. En

<sup>5</sup>Demostrar esta afirmación.

consecuencia las tensiones a que someto a cada bobinado resultan determinantes en la magnitud de la aislante necesario a utilizar. Por tanto dado un transformador, este tendrá un valor máximo de tensión a ser aplicada en cada bobinado que dependerá del aislante utilizado. Un transformador que vaya a ser utilizado con tensiones no superiores a, por ejemplo,  $36kV$  deberá tener mejor aislación que si fuera aplicado en  $6kV$  o  $220V$ , pero no necesitará disponer de la aislación necesaria que si fuera aplicado en  $40kV$  o  $150kV$  o más.

Por otra parte la aislación necesaria resulta en una magnitud determinante del costo de un transformador. No tiene el más mínimo sentido económico utilizar un transformador con tensiones inferiores a lo que su aislación es capaz de soportar. Tampoco lo podemos utilizar con tensiones por encima de lo que su aislamiento soporta puesto que seguramente el aislamiento se perfore provocando el “quemado” del transformador.

Las mismas consideraciones son válidas para la sección de los conductores utilizados, si queremos hacer circular corrientes de cientos de Ampere deberemos utilizar secciones de conductor muy superiores a que si quisiéramos utilizar corrientes de decenas de Ampere. De lo contrario las pérdidas Joule provocarían una elevación tal de Temperatura en los conductores que los fundirían.

En consecuencia los transformadores se fabrican, se diseñan y luego, se utilizan para Tensiones y corrientes dadas. En principio los fabricantes pueden fabricar un transformador para tensiones o corrientes que se les especifique en un muy amplio rango. Sin embargo por razones económicas de standarización el “mundo” se ha puesto de acuerdo, esto es a “normalizado” valores típicos de utilización de tensiones en sus redes (IEC 60071) y formas de especificación y standart de fabricación para transformadores de potencia. (IEC 60076). Interesan entonces tener claro el siguiente concepto.

**Valor de CLASE de una magnitud eléctrica:** valor normalizado máximo que el fabricante de un equipo asegura que la magnitud puede mantenerse permanentemente a lo largo de toda la vida útil de un equipo. En general los valores de clase se definen para las TENSIONES. Así un bobinado clase  $36kV$  puede ser utilizado indefinidamente hasta una tensión de  $36kV$ , por encima de ese valor el fabricante no asegura el comportamiento del equipo, es más se debe esperar que se “queme” dependiendo del tiempo que ese superior valor de tensión haya sido aplicado. En la teoría es fácil concebir que las fuentes tengan valores constantes, pero en la realidad todas las fuentes tienen variaciones de “pocos %” en torno a su valor “normal”. Por tanto en una fuente real de valor “normal”  $36kV$  no podemos utilizar un equipo clase  $36kV$ . Por esta razón los valores “normales” de utilización deben ser inferiores a la clase. El concepto de valor “normal” de una magnitud es lo que lleva a definir el VALOR NOMINAL. Luego se entiende por valor nominal el valor que se asigna como de utilización normal de la magnitud considerada. Los valores nominales no están normalizados y son “tomados” por quién va

a utilizar un equipo de cierta clase o por el fabricante a fin de especificar la capacidad normal (nominal) del equipo que fabrica a lo largo de su vida útil. En lo que respecta a las tensiones los valores de clase normalizados internacionalmente y los valores nominales utilizados usualmente en el Uruguay se muestran en el cuadro 9.1.

Clase de Tension en kV	1	3,6	7,2	12	17,5	24	36	72,5	123	145	170	245	525
Valor Nominal en kV	0,23 0,4 0,6	3	6,3	10	15	20	31,5 30	66	110	132	150	220	500

Cuadro 9.1: Tabla de Tensiones Estándares

### 9.2.1. Datos Nominales de un Transformador

A fin de especificar las magnitudes eléctricas fundamentales en la que debe o será utilizado un transformador los fabricantes indican en los llamados “datos de chapa” los siguientes valores fundamentales:

**Valor nominal para cada bobinado:**  $V_{1n}/V_{2n}$  indica el valor nominal de la tensión del bobinado 1 y del bobinado 2 para un transformador de dos bobinados.

**Relación de Transformación:**  $V_{1n}/V_{2n}$  indica la relación de transformación  $n$ , la cual se lee como: si aplico la tensión  $V_{1n}$  del lado primario tengo, con el transformador en vacío, una tensión  $V_{2n}$  del lado secundario. Luego nos da la relación de transformación del transformador ideal del modelo del transformador real.

**Potencia nominal ( $S_n$ ) en VA:** Es la potencia aparente expresada en VA que determina la corriente nominal que circula por cada bobinado del transformador cuando este está bajo sus voltajes nominales en cada bobinado:  $S_n = V_n \cdot I_n$ .

**Corriente nominal ( $I_n$ ) de cada bobinado:** Es la corriente por los terminales del transformador correspondiente a dividir la potencia nominal entre el voltaje nominal no teniendo en cuenta la corriente por la impedancia magnetizante.  $I_n = S_n/V_n$ .

**Frecuencia nominal:** es la frecuencia en Hz para la que ha sido diseñado el transformador.

La placa característica o “chapa” de un transformador siempre debe dar por lo menos los valores antes indicados que definen como debe ser aplicado un transformador. Así entonces, a modo de ejemplo, si la chapa dice: transformador monofásico,  $50Hz$ ,  $6,3/0,23 kV$ ,  $100kVA$  se interpreta como:

- El transformador es para ser utilizado en clase  $7,2kV$  en el primario y clase  $1kV$  en el secundario.
- Su relación de transformación es:  $n = 6300/230$
- Cuando aplico  $6300V$  en el primario en el secundario en vacío tengo  $230V$ .
- Las corrientes nominales de los bobinados primarios y secundarios son:  $100000/6300$  y  $100000/230$  Ampere respectivamente.

Los datos de chapa de los grandes transformadores tienen mayor información dando: impedancia de cortocircuito, sobreelevación de temperatura, diagrama de conexión, peso, clase de aislamiento, forma de enfriamiento etc.

### 9.3. Determinación Experimental del Circuito Equivalente

El estudio que hemos realizado a determinado una topología típica del circuito equivalente de un transformador y nos ha indicado el significado físico de cada componente.

Si bien mediante el cálculo es posible estimar el valor de cada componente, un procedimiento más sencillo y también más preciso es determinar estos valores mediante ensayos de laboratorio y aún de campo.

#### 9.3.1. Medida de la relación de transformación

Impongo una tensión sinusoidal de cualquier valor menor o igual al nominal en uno de los lados y mido la tensión del otro lado, luego esta razón de tensiones será la relación de vueltas.

#### 9.3.2. Ubicación de los “puntos” de los bobinados

En la conexión de la figura 9.9 realizo el siguiente ensayo. Aplico una tensión  $V_1$  cualquiera menor o igual a la nominal, si  $V_3 = V_1 - V_2$  ambos puntos están “arriba”, mientras que si  $V_3 = V_1 + V_2$  los puntos están en el esquema en forma opuesta.

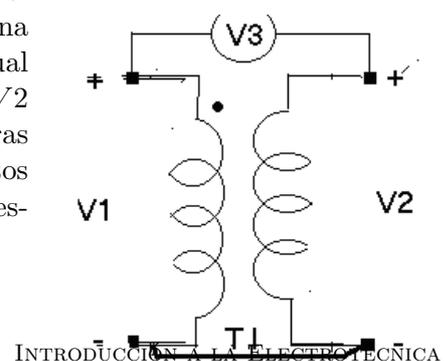


Figura 9.9: Ensayo de puntos

### 9.3.3. Ensayo de vacío. Determinación de la impedancia de vacío

Con el transformador en vacío impongo tensión en uno de los lados del transformador, tensión de magnitud y frecuencia IGUAL AL NOMINAL<sup>6</sup>. Midiendo la corriente y el factor de potencia, o la potencia activa y reactiva consumida por el transformador, o la corriente y la potencia activa se puede calcular la impedancia de vacío. Recordando el circuito equivalente aproximado, resulta obvio que se cumplirá:

$$\vec{Z}_m = \frac{V_1}{I_1} \angle \arccos(\phi); R_m = \frac{V_1^2}{P}, X_m = \frac{V_1^2}{Q}; \vec{Z}_m = \frac{V_1}{I_1} \angle \arccos\left(\frac{P}{V_1 I_1}\right) \quad (9.17)$$

### 9.3.4. Ensayo de cortocircuito. Determinación de la impedancia de cortocircuito.

Con los terminales de un lado en cortocircuito aplico del otro lado una tensión reducida a frecuencia nominal<sup>7</sup> hasta que circule una corriente igual a la nominal. Midiendo idénticas magnitudes que en el ensayo anterior en el lado que aplico la tensión se puede calcular la impedancia de corto circuito. Como la tensión es reducida, usualmente de valores no superiores al 10% o menos de la nominal, y teniendo en cuenta que  $Z_{CC} \ll Z_m$  se desprecia la corriente por la impedancia magnetizante, en estas condiciones y recordando el circuito equivalente es obvio que:

$$\vec{Z}_{CC} = \frac{V_1}{I_1} \angle \arccos(\phi); R_{CC} = \frac{P}{I_1^2}, X_{CC} = \frac{Q}{I_1^2}; \vec{Z}_{CC} = \frac{V_1}{I_1} \angle \arccos\left(\frac{P}{V_1 I_1}\right) \quad (9.18)$$

## 9.4. Rendimiento de un Transformador

La aplicación fundamental de un transformador es transformar la tensión disponible en una fuente ( $V_1$ ) para ser utilizada en otro valor de fuente ( $V_2$ ), por tanto las pérdidas en el transformador es un costo en la utilización de la transformación. Como en general lo que interesa es la potencia activa ( $P$ ) el rendimiento se define en términos de la misma de la siguiente manera tradicional:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \Rightarrow \eta = \frac{P_{entrada} - P_{perdidas}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - (P_{hierro} + P_{Joule})}{P_{entrada}} \quad (9.19)$$

<sup>6</sup>Explicar por que.

<sup>7</sup>Explique por que.

En general los transformadores se diseñan a fin de minimizar estas pérdidas superando el rendimiento el 95 % en transformadores medianos y el 97 % en grandes transformadores<sup>8</sup>.

Sin perjuicio de lo anterior el rendimiento del equipo depende además del tipo de carga a la que se utiliza esto es en que situación se está utilizando<sup>9</sup>.

En términos generales si el transformador es utilizado, lo que es lo usual, a tensiones nominales se debe observar que las pérdidas en el hierro son constante para cualquier carga mientras que las pérdidas Joule dependen del cuadrado del módulo de la corriente que circula por el transformador, siendo estas las pérdidas variables con el tipo de carga.

En la especificación de grandes transformadores las pérdidas suelen ser uno de los parámetros fundamentales para la compra del mismo.

## 9.5. Regulación de Tensión

La regulación de tensión de un transformador es simplemente la medida de la variación de la tensión respecto a la de vacío que se aplica sobre la carga cuando esta última varía. Entonces:

$$R(\%) = \frac{V_{n2} - V_2}{V_{n2}} \quad (9.20)$$

Obsérvese que la impedancia de cortocircuito resulta determinante de la regulación de tensión de los transformadores. Obsérvese además que la regulación de tensión se define a partir del módulo de las mismas.

En general interesa que una fuente presente la tensión de alimentación a una carga lo más constante posible. En el transformador la impedancia de cortocircuito hace que la tensión aplicada sobre la carga varíe cuando esta última varía. Por tal razón es usual que los transformadores dispongan de “tomas” en su bobinado a fin de poder variar la relación de vueltas y tener cierto control sobre el valor de la tensión nominal secundaria para una tensión primaria constante. La posibilidad de variar la relación de vueltas se instrumenta a través de lo que se le denomina *conmutador* el cual podrá ser con el transformador fuera de servicio (muy económico y disponible en general) o con el transformador en carga (muy costoso y solo usado en grandes transformadores)<sup>10</sup>.

<sup>8</sup>Como más adelante veremos es usual disponer en grandes transformadores de un sistema de refrigeración del mismo por lo que en estos casos se debe adicionar como pérdidas el consumo de este sistema.

<sup>9</sup>Suponga que un transformador está alimentando una carga reactiva pura, cuanto vale el rendimiento en este caso? y en vacío?

<sup>10</sup>Como ejercicio resulta de sumo interés evaluar el andamio de  $R$  con el factor de potencia de la carga, realizar el mismo para cargas cuyo factor de potencia varía entre

## 9.6. Transformadores Especiales

### 9.6.1. El AutoTransformador

El autotransformador se consigue conectando un transformador comun como se indica en la figura 9.10(a), en general estos transformadores se dibujan como se muestra en la figura 9.10(b).

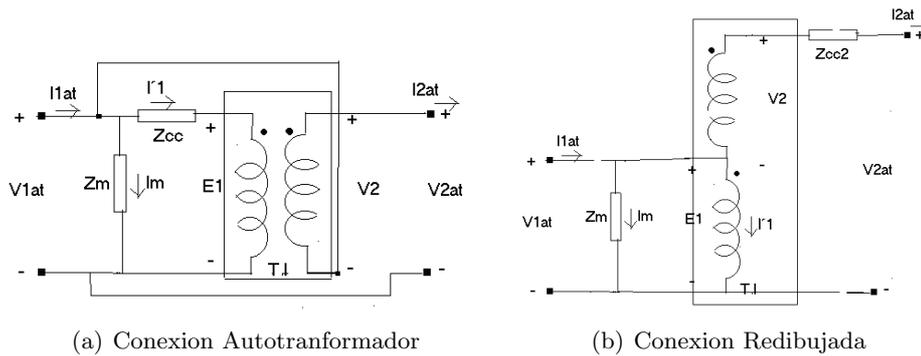


Figura 9.10: AutoTransformador

Supongamos que el transformador es ideal en consecuencia  $Z_m$  será infinita mientras que  $Z_{CC}$  será nula. Por tanto se cumplirá que:

$$\frac{V_{1at}}{V_{2at}} = \frac{E_1}{E_1 + E_2} \text{ y tambien } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (9.21)$$

Tomando en cuenta lo anterior se deduce la relación de transformación como:

$$\frac{V_{1at}}{V_{2at}} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \text{ o } n_{at} = \frac{n}{1 + n} \quad (9.22)$$

Tenemos entonces que un transformador conectado (o realizado) como autotransformador puede incrementar (decrementar) significativamente la relación de transformación del equipo.

Pero que acontece además con la capacidad de transmitir potencia del transformador. Si el equipo se conecta del modo tradicional entonces  $S_n = V_n I_n$  tanto del lado 1 como en el 2. Veamos en el caso de la conexión del autotransformador. Tendremos  $S_{at} = V_{1n} \cdot I_{at}^* = V_{1n} \cdot (I_{1n} + I_{2n})$  que si se opera resulta  $S_{nat} = (1 + n)S_n$  Por tanto la capacidad de trasmisión de potencia se incrementa sustantivamente. Presenta como defecto (en varias aplicaciones muy grave) que se pierde el aislamiento galvánico entre los circuitos del primario y secundario.

capacitivo puro, resistivo puro y reactivo puro. Haga el ejercicio se sorprenderá.

### 9.6.2. Transformador de Medida

Supongamos que en un circuito cualquiera queramos medir por ejemplo la tensión en algún punto y la corriente. Sabemos que existen instrumentos a estos efectos, el voltímetro y el amperímetro. Todos los instrumentos se realizan por razones económicas para bajos niveles de tensión y bajos niveles de corrientes. Las tensiones nominales de los instrumentos no superan pocos cientos de voltios y muy pocos cientos de ampere en el mejor de los casos.

Entonces, ¿como hago para medir tensiones del orden de kV y corrientes del orden de varios centenares de Ampere o más?

Los transformadores de medida tienen el doble propósito de reducir la tensión y la corriente medida a un nivel compatible con los valores de entrada de los instrumentos y además de proporcionar la seguridad del necesario aislamiento eléctrico para ser aplicado en tensiones superiores al kV.

El principio de operación de los transformadores de medida es idéntico al visto para los transformadores en general. Sin embargo a fin de minimizar los errores en la medida presentan algunas características que se deben destacar.

#### Transformador de Potencia (TP o TT)

Estos transformadores obviamente conectados en paralelo con el circuito al que se pretende medir la tensión tienen como fuente de error fundamental la impedancia de cortocircuito. Por tanto en el transformador de potencial la impedancia de cortocircuito del mismo debe ser minimizada. Es usual que la tensión secundaria sea normalizada siendo este valor usualmente de 100 Voltios. Los fabricantes suministran los factores de corrección para desviaciones de magnitud y de ángulo de fase basados en la carga en voltamperes del secundario. La potencia nominal de estos transformadores rara vez superan pocos cientos de VA. Resulta obvio que el defecto que destruye el equipo es un cortocircuito de sus bobinados secundarios. La norma standart de estos transformadores es la IEC 60185

#### Transformador de Corriente (TC o TI)

Estos transformadores obviamente conectados en serie con el circuito al que se pretende medir la corriente tienen como fuente de error fundamental la impedancia de vacío. Por tanto en el transformador de potencial la impedancia de vacío del mismo debe ser maximizada. Es usual que la tensión secundaria sea normalizada siendo este valor usualmente de 5 o 1 Ampere. Los fabricantes suministran los factores de corrección para desviaciones de magnitud y de ángulo de fase basados en la carga en voltamperes del secundario. La potencia nominal de estos transformadores rara vez superan pocos

cientos de VA. Resulta obvio que el defecto que destruye el equipo es un circuito abierto de sus bobinados secundarios<sup>11</sup>. La norma standart de estos transformadores es la IEC 60186.

---

<sup>11</sup>Muéstrese.