

Máquinas Eléctricas – Tecnólogo

- **Parte A.**
- **Transformadores:**
- **Transformador ideal: concepto de transformador ideal. Deducción de las ecuaciones. Conservación de potencia activa y reactiva. Pasaje de impedancias.**
- Transformador real: Impedancia magnetizante. Pérdidas por histéresis. Pérdidas por Foucault. Pérdidas Joule en los bobinados y pérdidas adicionales. Inductancia de fugas.
- Tipos de transformadores: transformadores de potencia. Transformadores de medida. Transformadores especiales. Autotransformadores.
- Transformadores trifásicos: banco de transformadores monofásicos. Transformadores trifásicos. Conexión estrella y triángulo.
- Valores nominales: tensión, corriente, potencia, relación y frecuencia nominal.
- Elementos constructivos del transformador: núcleo, bobinados, cuba, aislamiento, conmutadores, etc.
- Ensayos: Ensayo de relación, vacío, cortocircuito y corrección de valores obtenidos.
- Información para encargar un transformador: elementos a especificar para encargar un transformador.
- Aceite aislante: funciones del aceite. Funcionamiento dentro del transformador.
- Mantenimiento: mantenimiento a realizar. Aspectos a tener en cuenta.
- Protecciones del transformador: funciones e importancia. Nivel de aceite, termómetro, fusibles, imagen térmica, buchholz, relés secundarios de sobrecorriente y diferenciales.
- Aplicaciones: Puesta en paralelo. Cargabilidad. Rendimiento.

Electro II – Tecnólogo

Bibliografía:

Máquinas eléctricas. Stephen J. Chapman

Tratado de electricidad de corriente alterna. Chester L. Dawes.

Tratado de electricidad de corriente continua. Chester L. Dawes.

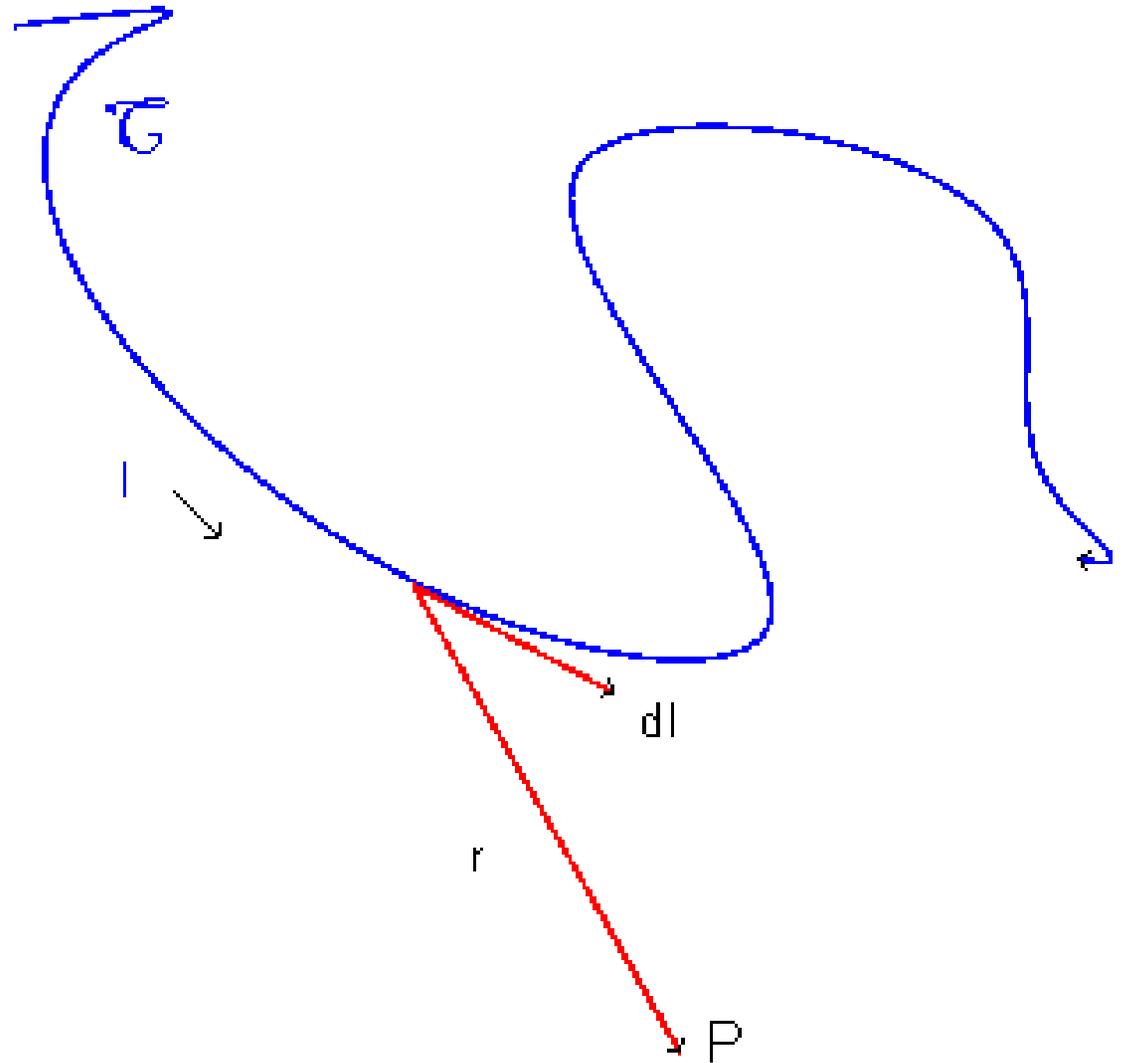
Máquinas eléctricas de corriente alterna. M. Liwschitz y C. Whipple.

Máquinas eléctricas de corriente continua. M. Liwschitz y C. Whipple.

Transformadores - Introducción

Ley de Biot - Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I d\vec{l} \wedge \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$



Transformadores - Introducción

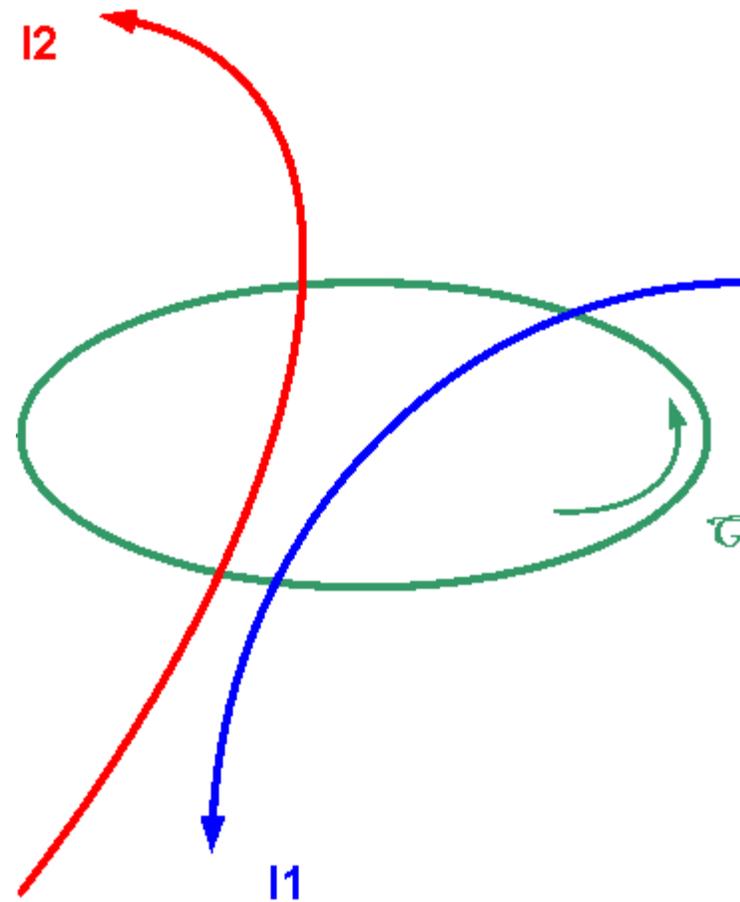
Ley de Ampere:

$$I_1 < 0$$

$$I_2 > 0$$

La expresión integral de la Ley de Ampere:

$$\oint_C \mathbf{H} \times d\mathbf{l} = I_{neta}$$



Transformadores - Introducción

H es la intensidad de campo magnético producido por la corriente I_{net}

La relación que vincula H y B en un medio de permeabilidad magnética μ

$$B = \mu H$$

A menudo μ se expresa en forma relativa a la permeabilidad del aire, μ_0

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hy} / \text{m}$$

Transformadores - Introducción

Flujo magnético:

El flujo magnético se define como el flujo del vector B en una superficie dA .

$$\Phi = \int_A B \times dA$$

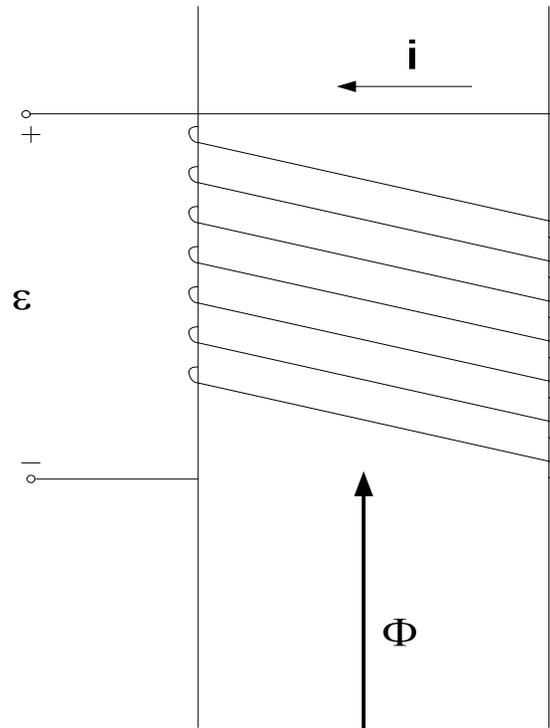
En el caso particular que el vector B sea constante y perpendicular a la superficie dA , y la misma sea plana se cumplirá:

$$\Phi = BA$$

Transformadores - Introducción

Ley de Faraday :

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$



Transformadores - Introducción

Ley de Faraday :

Suponiendo régimen sinusoidal:

$$\Phi = \Phi_m \text{sen } \omega t$$

$$\varepsilon = n\omega\Phi_m \text{cos } \omega t$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{n\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} fn\Phi_m = 4.44 fnSB_m$$

Transformadores

Transformador Ideal:

Hipótesis de trabajo:

1. Material ferromagnético sin pérdidas (Foucoult).
2. No hay pérdidas de flujo concatenado ($\mu \rightarrow \infty$).
3. No hay pérdidas por histéresis.
4. Conductores de los bobinados son ideales.

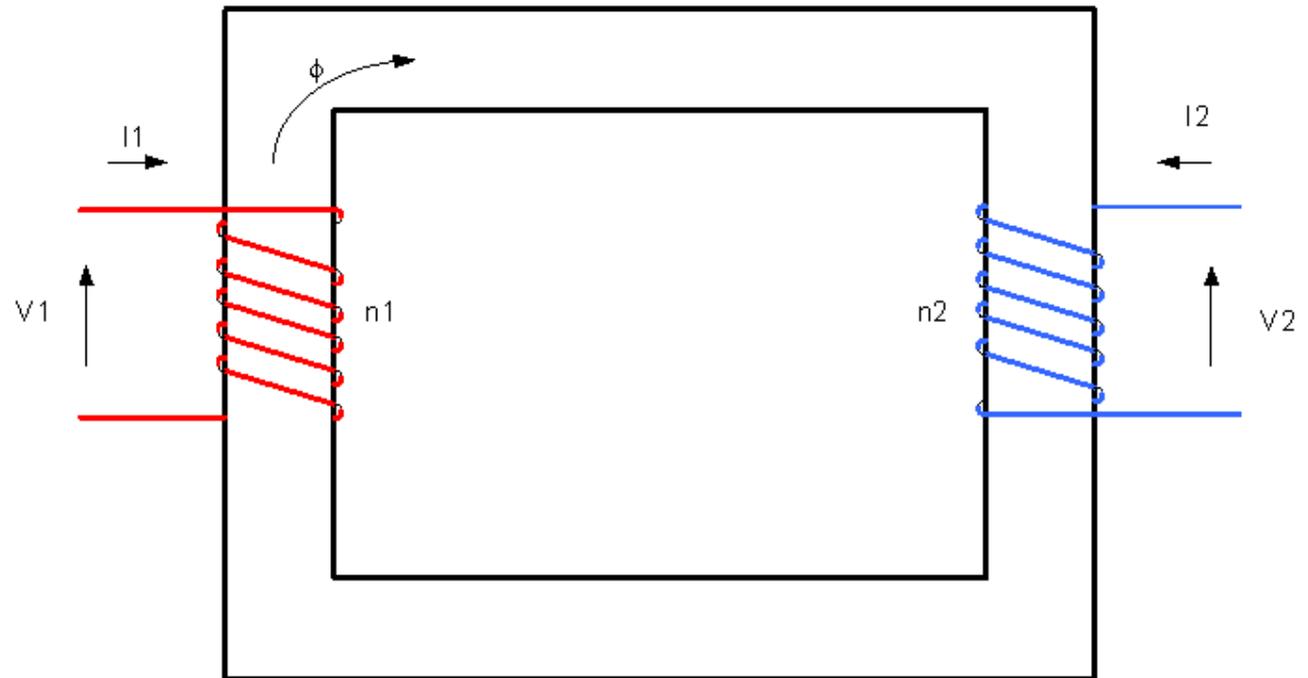
Transformadores

Transformador Ideal:

$$V_1 = \varepsilon_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

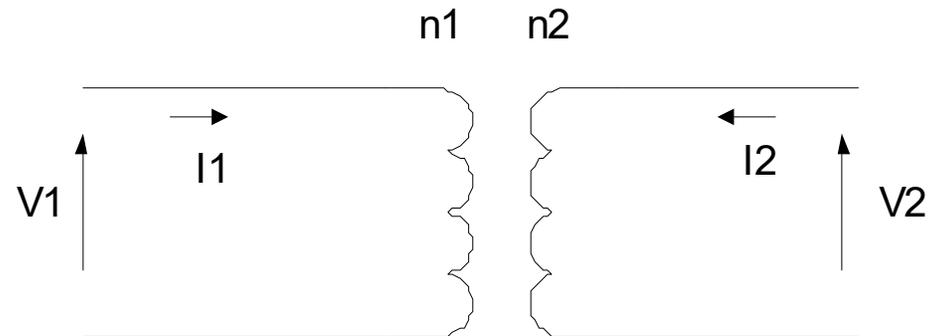
$$V_2 = \varepsilon_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = n$$



Transformadores

Transformador Ideal:



Como suponemos que no existen pérdidas de potencia, la potencia eléctrica entrante debe coincidir con la saliente

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$
$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Transformadores

Transformador Ideal:

Aplicando la Ley de Ampere al circuito magnético

$$n_1 I_1 + n_2 I_2 = \oint H dl = \oint \frac{B}{\mu} dl = \frac{B}{\mu} l$$

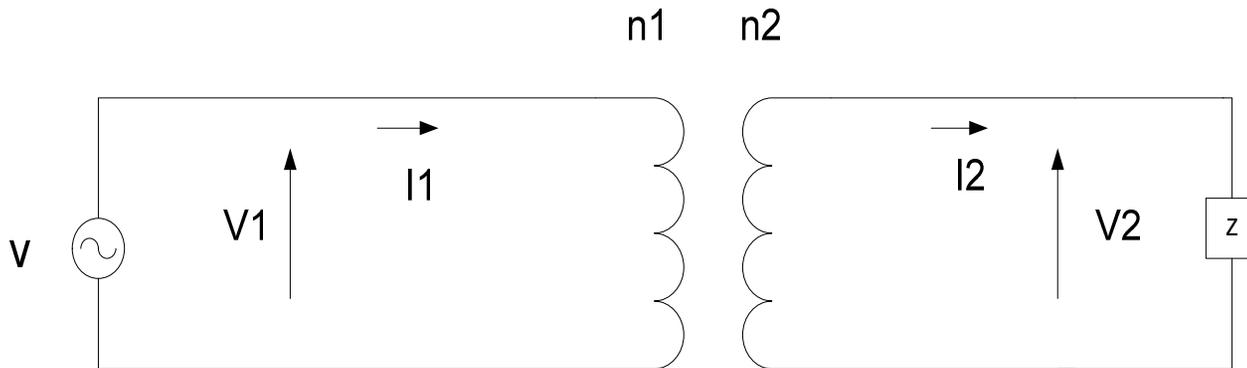
$$n_1 I_1 + n_2 I_2 = 0$$

$$n_1 I_1 + n_2 I_2 = \frac{B}{\mu} l$$

Transformadores

Transformador Ideal:

Si conectamos una carga al secundario de nuestro transformador ideal



$$V = V_1 = \mathcal{E}_1$$

$$V_2 = \mathcal{E}_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$V_2 = Z I_2$$

Transformadores

Transformador Ideal:

Impedancia vista desde el secundario

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{\left(V_2 \frac{n_1}{n_2} \right)}{I_2 \frac{n_2}{n_1}} = \frac{V_2}{I_2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 Z$$

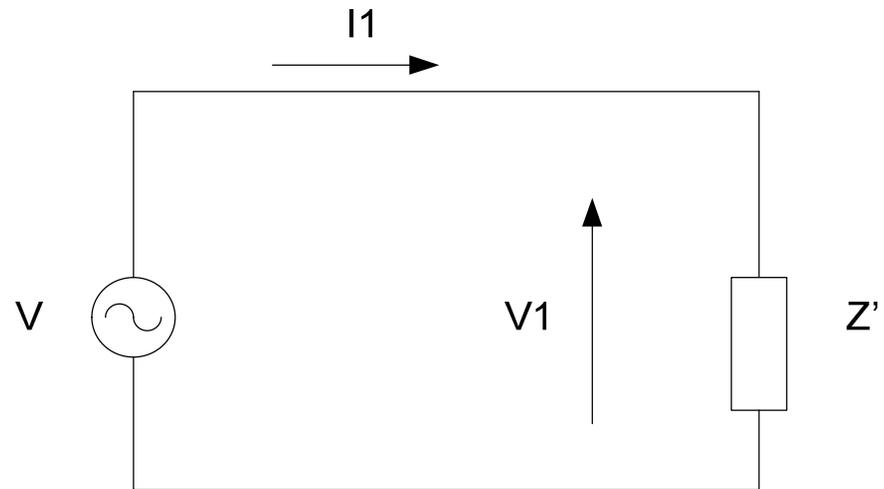
$$\frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 Z$$

Transformadores

Transformador Ideal:

El circuito que representa esas ecuaciones sería

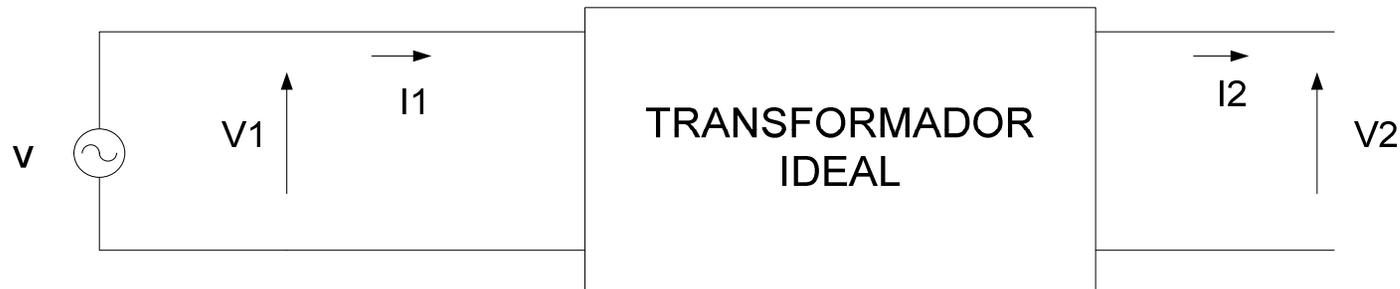
$$Z' = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 Z$$



Transformadores

Transformador Ideal:

Veamos que pasa con la potencia



$$P_{ent} = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$P_{sal} = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

Transformadores

Transformador Ideal:

Donde:

$$P_{ent} = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$P_{sal} = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

φ_1 es el desfase entre V_1 y I_1

φ_2 es el desfase entre V_2 y I_2

en un transformador ideal no se modifica el desfase entre el voltaje y la corriente

$$\Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$$

Transformadores

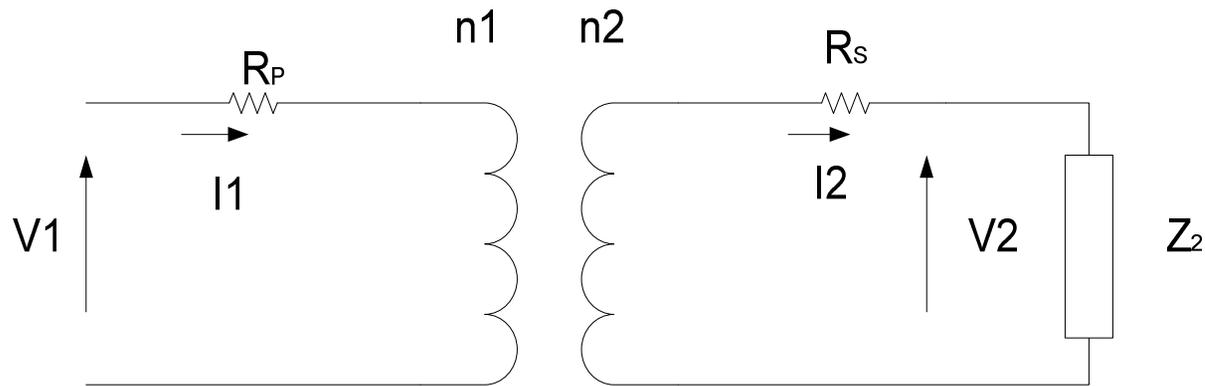
Transformador Ideal:

$$\Rightarrow \frac{P_{ent}}{P_{sal}} = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi}{V_2 I_2 \cos \varphi} = \frac{V_1 I_1}{V_2 I_2} = \frac{n_1}{n_2} \frac{n_2}{n_1} = 1$$

Por lo que la potencia activa se mantiene, igualmente se puede realizar la misma demostración para la potencia reactiva sustituyendo coseno por seno.

Transformadores

Transformador Ideal - Resumen:



$$\left| \frac{V_1}{V_2} \right| = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\left| \frac{I_1}{I_2} \right| = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

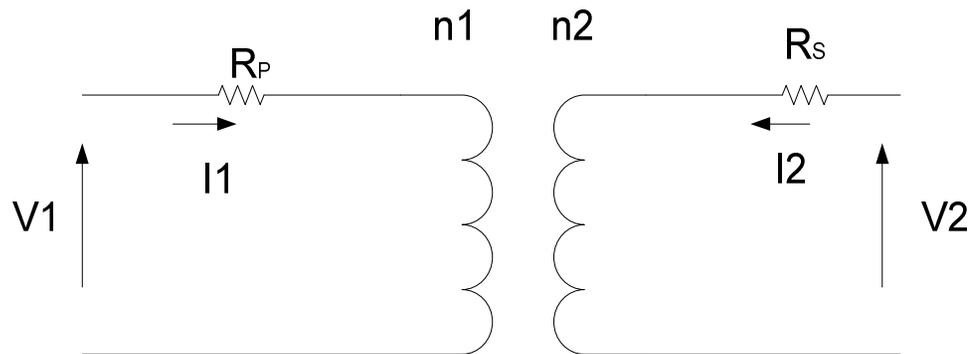
$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$W_1 = W_2$$

Transformadores

Transformador Real:

Conductores de los bobinados reales



Transformadores

Transformador Real:

En realidad el flujo concatenado por los bobinados primario y secundario no es el mismo

$$\mu \neq \infty$$

Pero igualmente tiene un valor muy alto

$$\mu < 10^4 \mu_0$$

Transformadores

Transformador Real:

Aparecerán líneas de campo que se cierran por el aire o incluso por la cuba del transformador.

Esto introducirá un flujo magnético de pérdidas, que reflejaremos en las siguientes ecuaciones de mallas.

$$V_1 = n_1 \frac{d\Phi_n}{dt} + R_P I_1 + n_1' \frac{d\Phi_{f1}}{dt}$$
$$V_2 = n_2 \frac{d\Phi_n}{dt} + R_S I_2 + n_2' \frac{d\Phi_{f2}}{dt}$$

Transformadores

Transformador Real:

Los flujos de fugas dependen fuertemente de la longitud del camino en el aire y poco del camino en el núcleo del transformador.

$$n_1' \Phi_{f1} = I_1 L_{f1}$$

$$n_2' \Phi_{f2} = I_2 L_{f2}$$

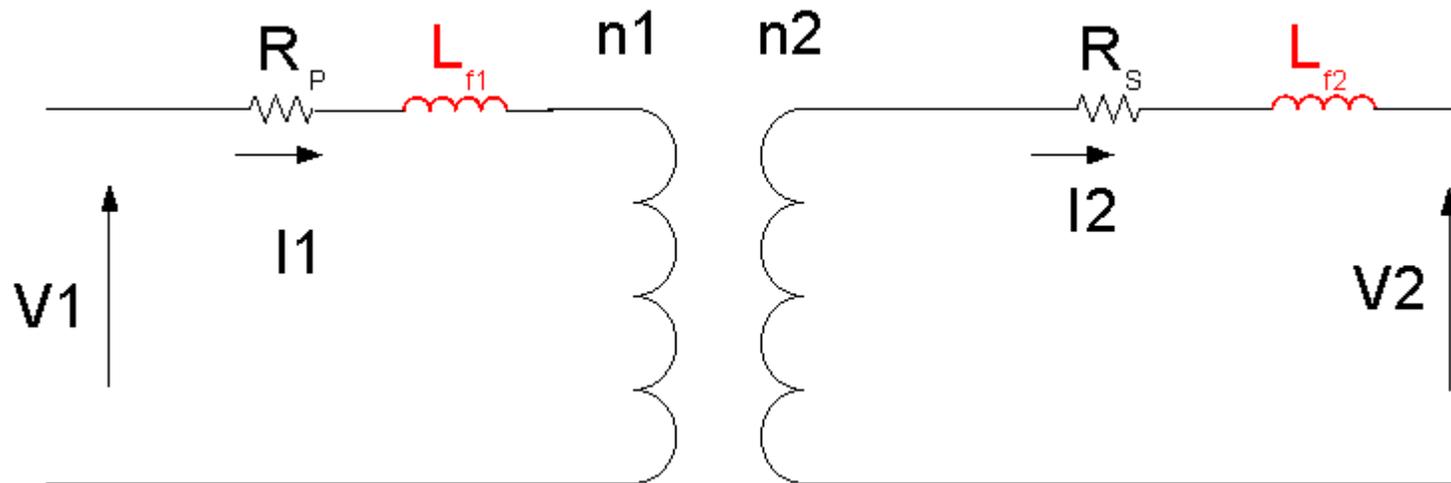
$$V_1 = n_1 \frac{d\Phi_n}{dt} + R_P I_1 + L_{f1} \frac{dI_1}{dt}$$

$$V_2 = n_2 \frac{d\Phi_n}{dt} + R_S I_2 + L_{f2} \frac{dI_2}{dt}$$

Transformadores

Transformador Real:

De acuerdo a las dos últimas ecuaciones se deberá agregar al modelo de transformador que estamos construyendo bobinas en serie con las resistencias de los bobinados, justificadas por las ecuaciones desarrolladas.



Transformadores

Transformador Real:

Si ahora consideramos que la permeabilidad magnética del material que conforma el núcleo no es infinita

$$n_1 I_1 + n_2 I_2 = \oint H dl = Hl = \frac{Bl}{\mu}$$

$$n_1 I_1 + n_2 I_2 = NI \neq 0$$

Con el transformador en vacío: $I_2 = 0$

$$n_1 I_1 = n_1 I_{01} \neq 0$$

Transformadores

Transformador Real:

Con el transformador en vacío, considerando un régimen sinusoidal de tensión, aplicamos la Ley de Faraday

$$E_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} = n_1 S \frac{dB}{dt}$$

$$B(t) = \hat{B} \cos \omega t$$

$$\frac{dB(t)}{dt} = -\hat{B} \omega \sin \omega t \Rightarrow E_1 = -\hat{B} n_1 S \omega \sin \omega t$$

$$\hat{E}_1 = \hat{B} n_1 S \omega$$

Transformadores

Transformador Real:

Si admitimos que $E_1 \approx V_1$ (en la realidad la diferencia es de aproximadamente de un 5% a plena carga), entonces el flujo es prácticamente independiente de la corriente, por lo que el flujo variará con E_1 y en la misma proporción.

$$n_1 I_1 + n_2 I_2 = nI$$

Con el transformador en vacío $I_2 = 0$

$$n_1 I_1 = nI = \frac{Bl}{\mu}$$

Transformadores

Transformador Real:

Existirá entonces una pequeña corriente que circulará con el transformador en vacío $I_1 = I_{01}$

$$I_{01} = \frac{Bl}{n\mu}$$

$$B = \frac{\hat{E}_1 \cos \omega t}{\mu n_1}$$

$$I_{01} = \frac{\hat{E}_1}{n_1^2 \mu S \omega} l \cos \omega t$$

El valor eficaz de la corriente

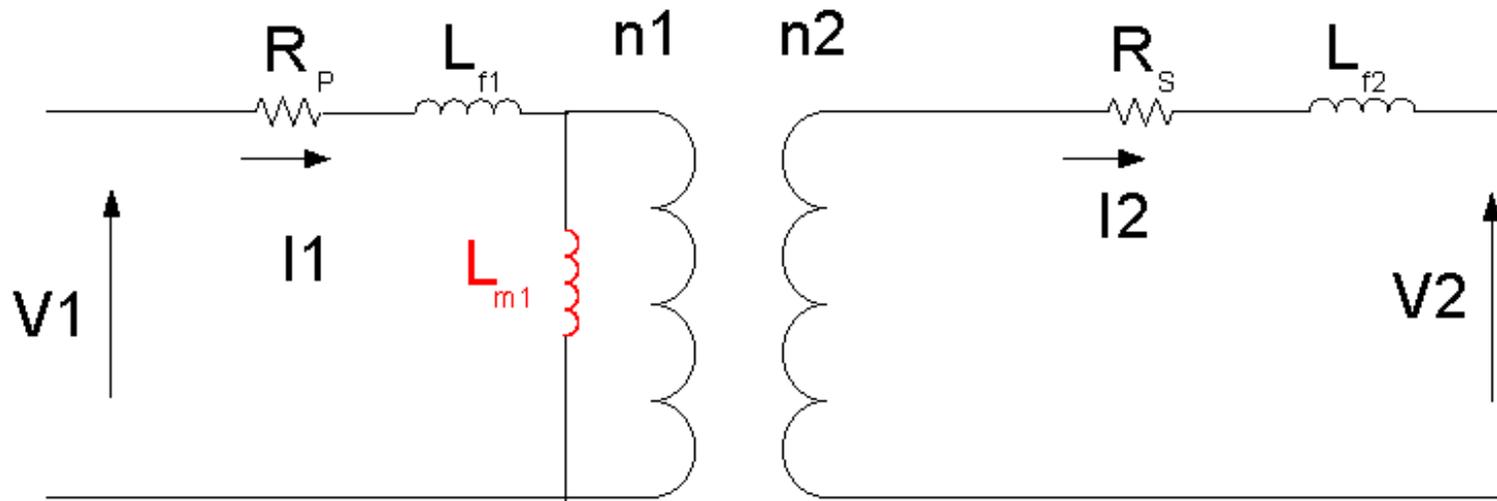
$$I_{01rms} = \frac{\hat{E}_1}{\sqrt{2} n_1^2 \mu S \omega} l = \frac{\hat{E}_1}{\omega L_{m1}}$$

$$L_{m1} = \frac{n_1^2 \mu S}{l}$$

Transformadores

Transformador Real:

de acuerdo a esto deberemos agregar a nuestro transformador ideal una derivación de la corriente, ya que en el transformador ideal no existe corriente de vacío. Nótese que solamente se debe agregar una self de magnetización (en el primario o en el secundario del modelo considerado).



Transformadores

Transformador Real:

Al considerar que el material ferromagnético del núcleo no es ideal, deberemos considerar dos fenómenos que están asociados a pérdida de energía.

Saturación, Histéresis y corrientes de Foucault.

Transformadores

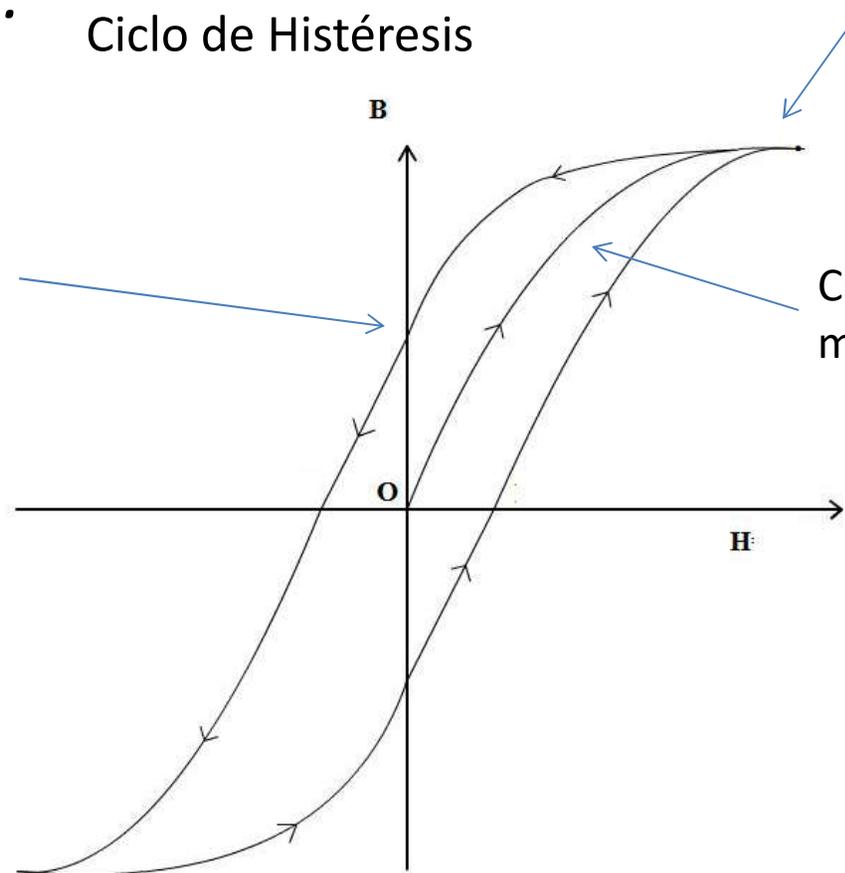
Transformador Real:

Ciclo de Histéresis

Zona de saturación

Campo remanente

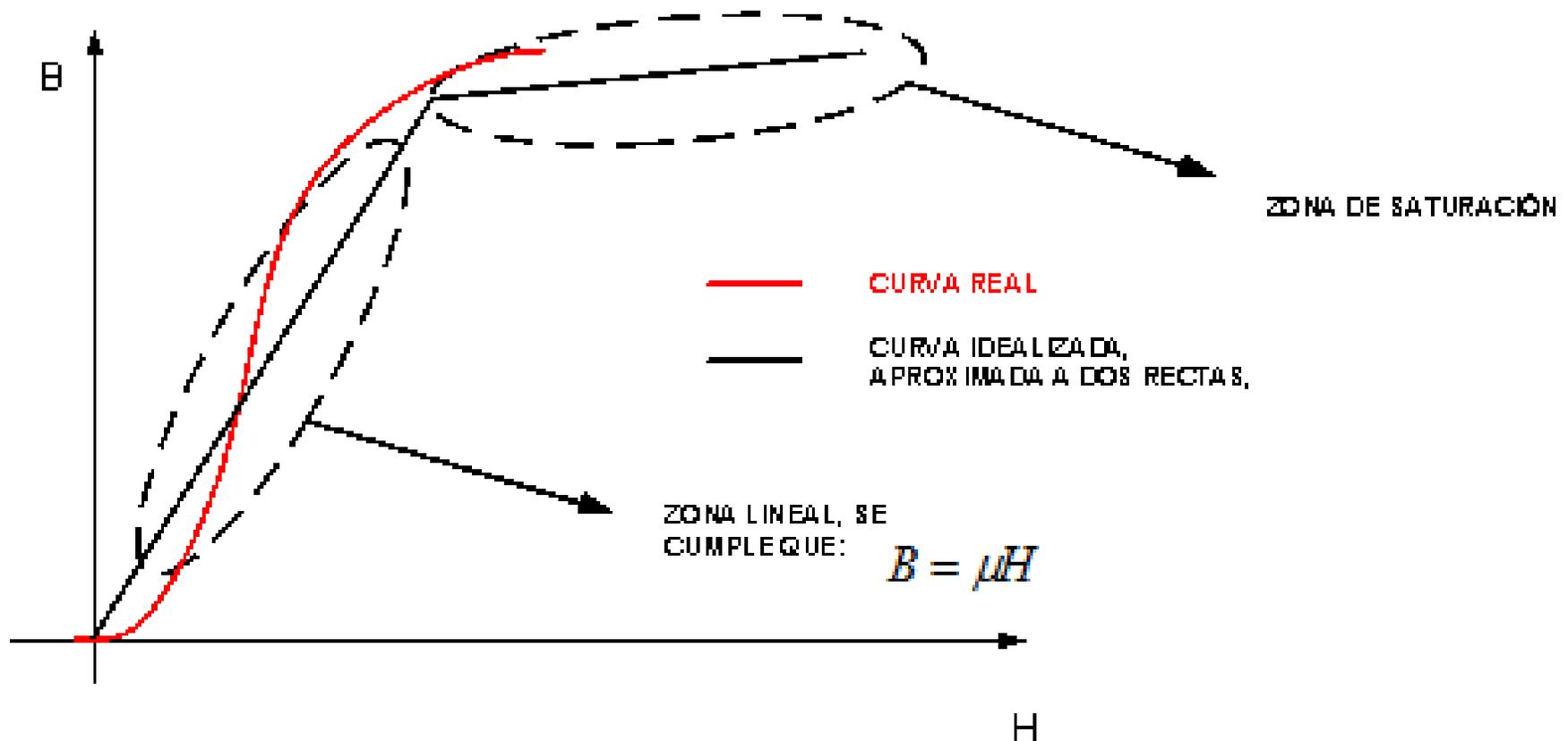
Curva de magnetización



El área del ciclo de Histéresis representa la potencia disipada

Transformadores

Transformador Real: SATURACIÓN e HISTÉRESIS .- Los fenómenos de Saturación e Histéresis explican el comportamiento alinear de los materiales ferromagnéticos



Transformadores

Transformador Real:

Saturación

Gráfico de la derecha: B vs H

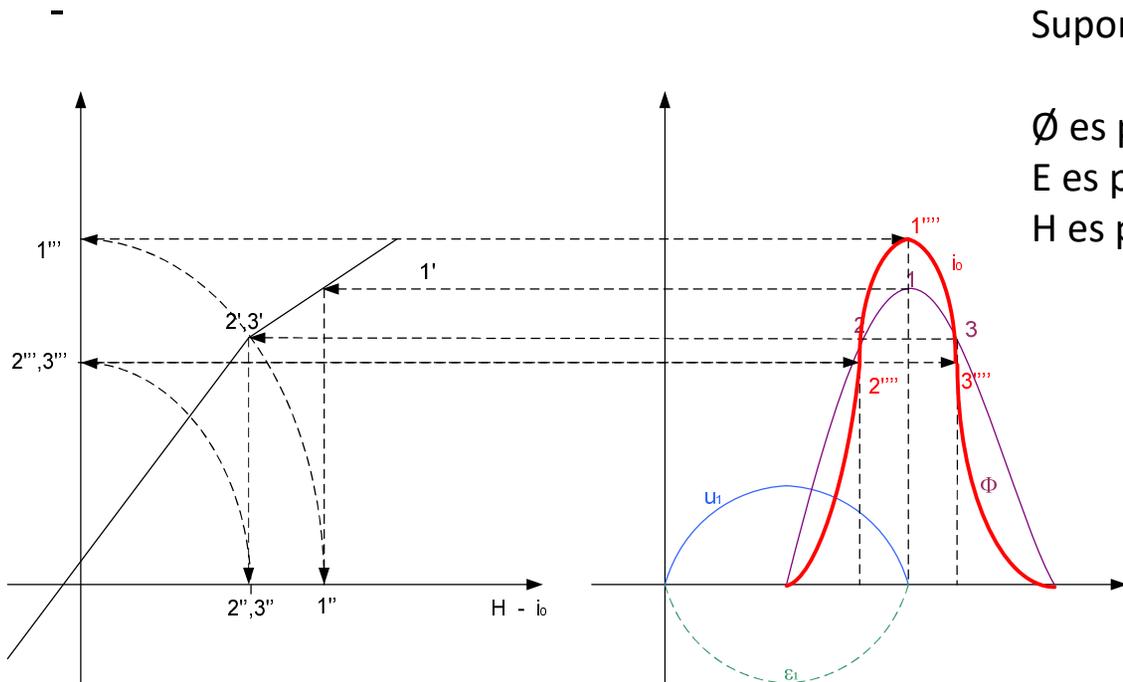
Gráfico de la izquierda: I vs t

Suponemos regimen sinusoidal, se cumplirá:

Φ es proporcional a B, por definición de flujo

E es proporcional a $\dot{\Phi}$, por Ley de Faraday

H es proporcional a I, por Ley de Ampere

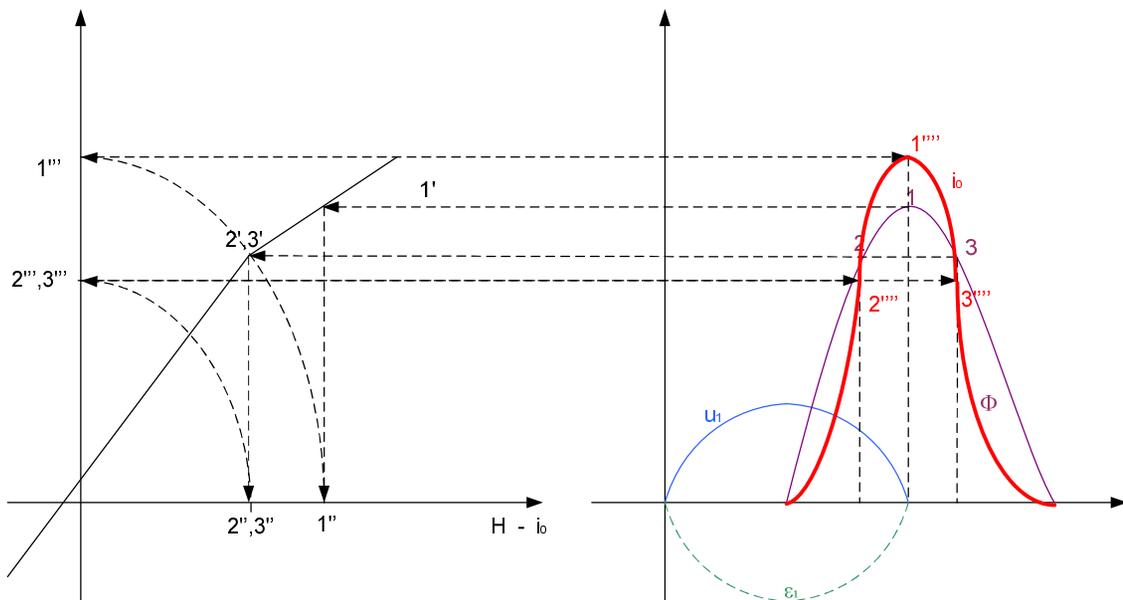


Transformadores

Transformador Real:

La curva roja será la curva de corriente de vacío, en base a esta construcción se ve como toma una forma de “Campana”.

Esta forma de onda tiene un importante componente de 3er armónico



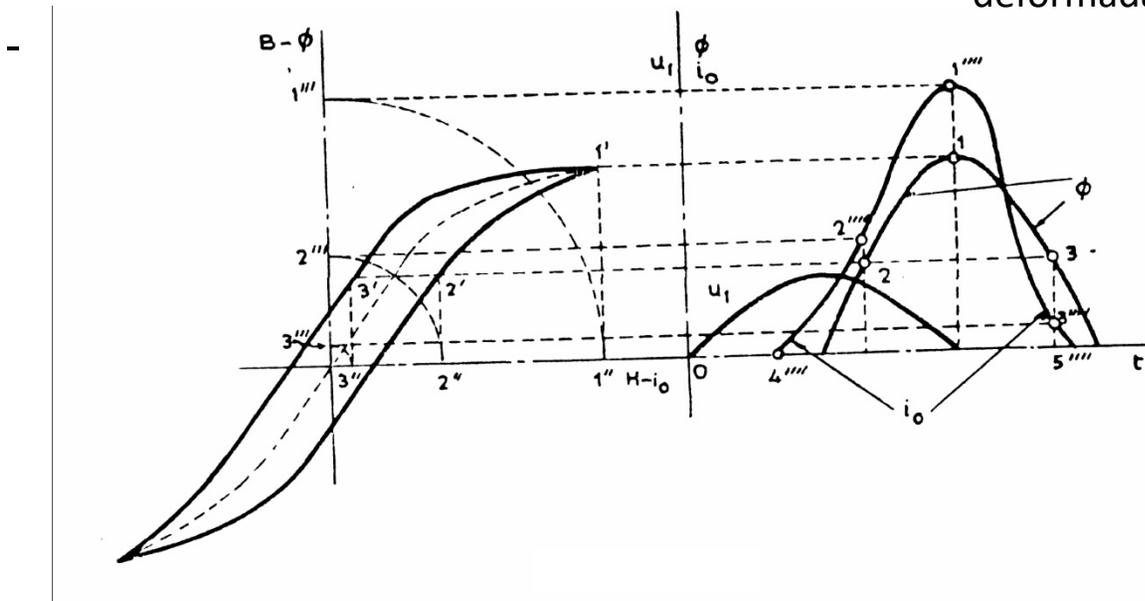
Transformadores

Transformador Real:

Este gráfico se construiría de igual forma que el anterior.

Saturación e Histéresis:

El resultado es una semionda asimétrica y deformada



Transformadores

Transformador Real: Se puede calcular el área del ciclo de Histéresis obteniendo la siguiente expresión:

$$W = \eta f V B_{\max}^n$$

η .- constante del material

f.- frecuencia de la red

V.- volumen del material

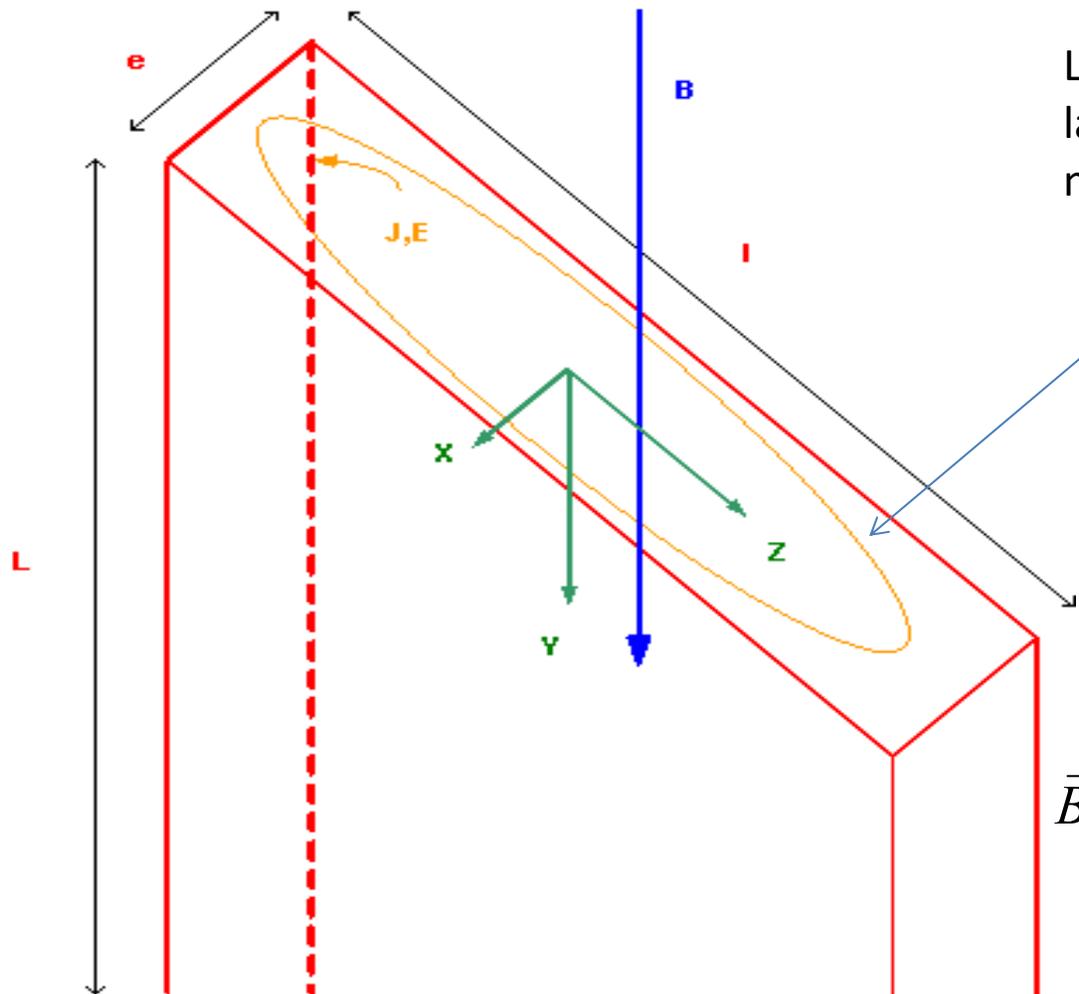
n.- toma el valor de 2 para los valores usuales de inducción magnética.

Transformadores

Transformador Real:

Pérdidas por corrientes de Foucault
(Eddy's currents)

La figura representa una de las chapas que componen el núcleo de un transformador



Corrientes de Foucault

$$l \gg e$$

$$L \gg e$$

es según el vector Y del sistema de coordenadas (incide perpendicularmente a la cara de la chapa), es uniforme y sinusoidal.

Transformadores

Transformador Real:

Pérdidas por corrientes de Foucault
(Eddy's currents)

Con las consideraciones anteriores se puede determinar la potencia de pérdidas asociadas al fenómeno de Foucault

$$W_{total} = \frac{1}{24} \sigma \omega^2 e^2 \hat{B}^2$$

σ Conductividad del material ferromagnético

$$\omega = 2\pi f$$

Transformadores

Transformador Real: Pérdidas asociadas al material ferromagnético que conforma el núcleo de un transformador

$$P_{Fe} = k_1 f \hat{B}^2 + k_2 f^2 \hat{B}^2$$

Se puede apreciar de la expresión anterior que las pérdidas en el hierro tienen una dependencia fuerte con la frecuencia de la red.

$$\frac{P_{Fe}(50\text{Hz})}{P_{Fe}(60\text{Hz})} = 0.708$$

Transformadores

Transformador Real: Pérdidas asociadas al material ferromagnético que conforma el núcleo de un transformador

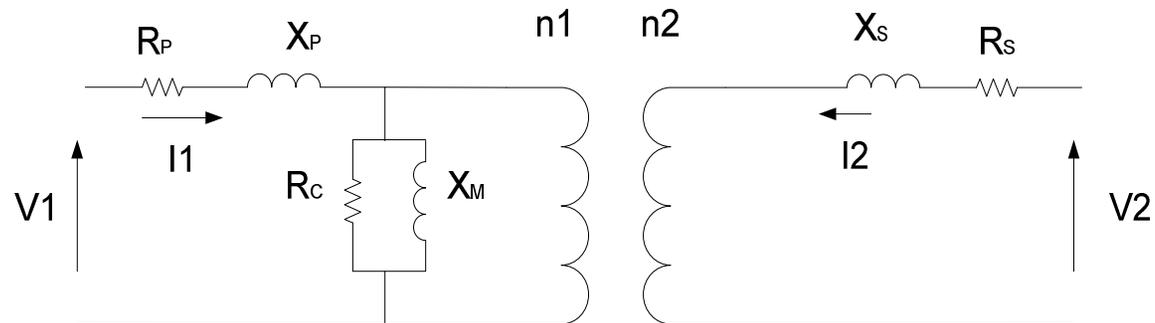
$$P_{Fe} = kf^{1.45} \hat{B}^2$$

Esta sería una expresión empírica que se cumple para las chapas de grano orientado

Transformadores

Transformador Real:

Modelo final de un transformador real



Transformadores

Transformador Real:

Magnitudes nominales de un transformador:

Voltaje nominal.- Es el voltaje asignado al bobinado para ser aplicado entre sus terminales. Transformadores trifásicos tensión entre fases.

Potencia aparente nominal.- Se expresa en VA, es la potencia aparente máxima que puede entregar el secundario de un transformador en régimen.

Corriente nominal.- Surge de los dos anteriores. Es la corriente máxima que puede circular ininterrumpidamente por un transformador (primario o secundario)

Transformadores

Transformador Real:

La corriente de vacío de un transformador tendrá dos componentes, uno activo y otro reactivo.

A la componente activa podemos asociarle las pérdidas de energía en el material ferromagnético

$$I_0 = 0,6 - 8\% I_{1N}$$

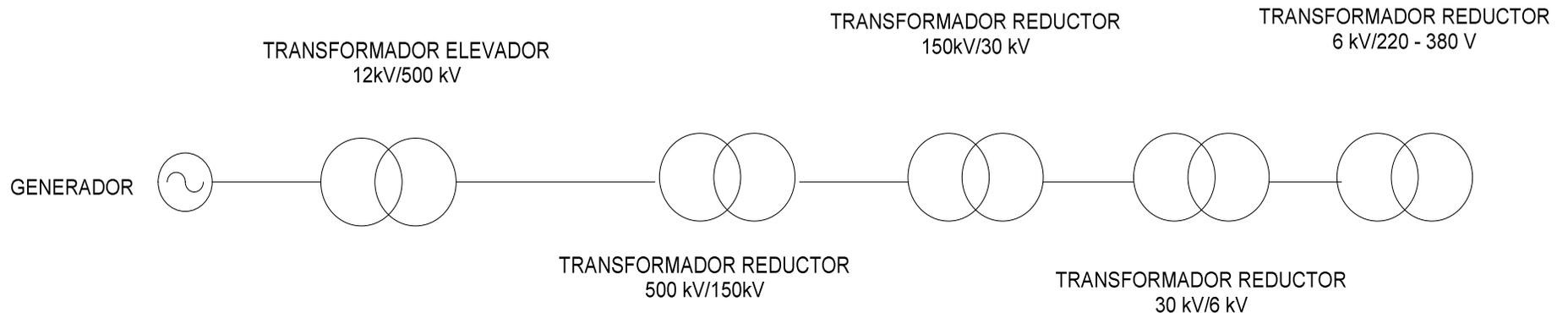
$$I_a = I_{Fe} = 1 - 15\% I_0$$

$$I_r = I_\mu \approx I_0$$

Transformadores

Tipos de transformadores:

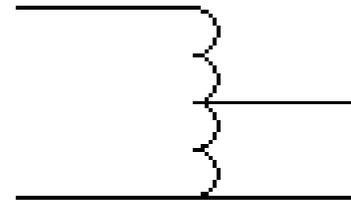
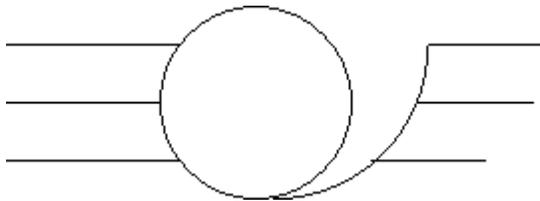
1) Transformadores de potencia: generación, transmisión y distribución de energía eléctrica



Transformadores

Tipos de transformadores:

2) Autotransformadores



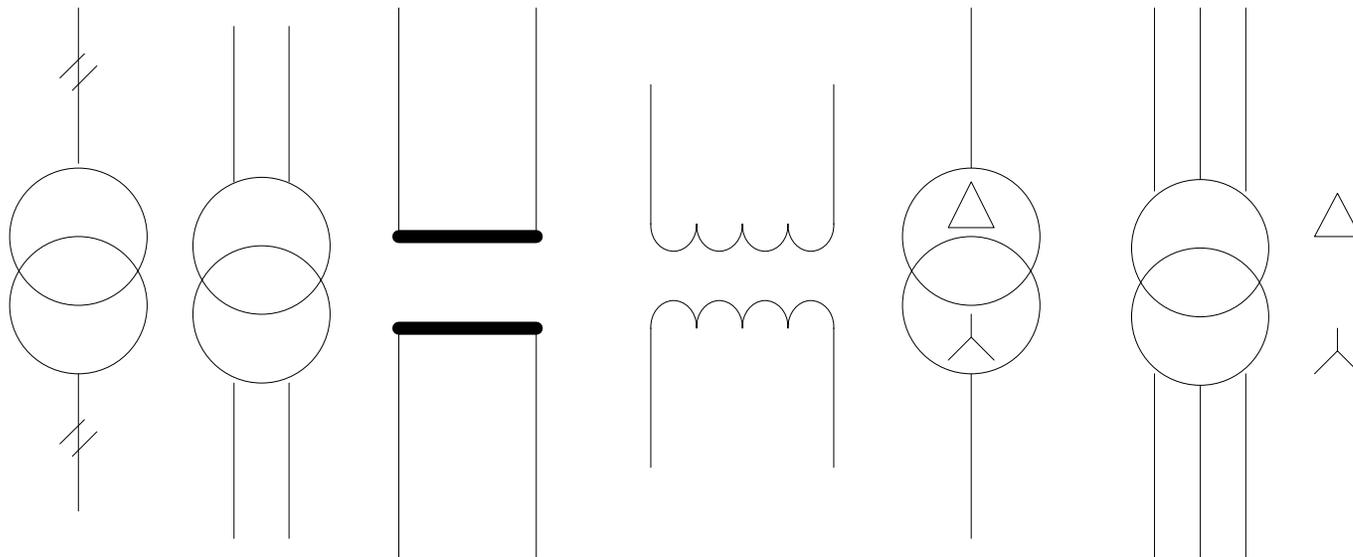
Transformadores

Tipos de transformadores:

- 3) Transformadores para alimentar fuentes de corriente continua.
- 4) Transformadores para ensayos de Alta Tensión y Extra Alta Tensión.
- 5) Transformadores especiales (hornos, soldaduras, etc.).
- 6) Transformadores de medida. Facilitan la conexión adecuada a los aparatos de medida.
- 7) Transformadores adaptadores de impedancia.
- 8) Transformadores para aislamiento galvánica.

Transformadores

Simbología:



Transformadores

Elementos constructivos de un transformador: NÚCLEO

Está compuesto por chapas de acero aleado a base de silicio, de grano orientado y laminada en frío.

Reduce las pérdidas por histéresis, el contenido de silicio hace que aumente su resistividad reduciendo las pérdidas por corrientes de Foucault.

En cuanto al aislamiento entre chapas, se puede utilizar papel, barniz o un tratamiento termoquímico denominado "CARLITE

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador: NÚCLEO

Como referencia:

Chapa de hierro silicio común (laminada en caliente). Las pérdidas resultan ser del orden de 0,8 a 1,3 W/kg (para una inducción magnética de 1 Tesla).

Chapa de hierro silicio de grano orientado (laminada en frío). Las pérdidas resultan ser del orden de 0,4 a 0,5 W/kg (para una inducción magnética de 1 Tesla).

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador: NÚCLEO - COLUMNAS

Esquinas:

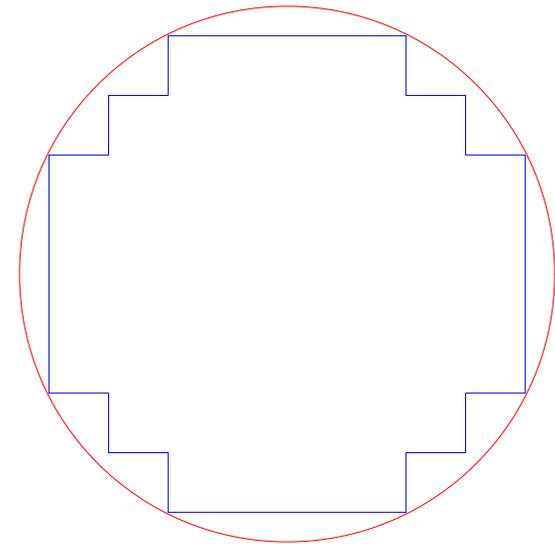
a tope
solapadas
cortes a 45º

Ductos de circulación de aceite para refrigeración

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador: NÚCLEO - COLUMNAS

Columnas con formato circular
Las bobinas se confeccionan con ese mismo formato, así soportan mejor los esfuerzos dinámicos a los que están sometidas. Los esfuerzos dinámicos son de repulsión, debido a ellos tienden a tomar esa forma.

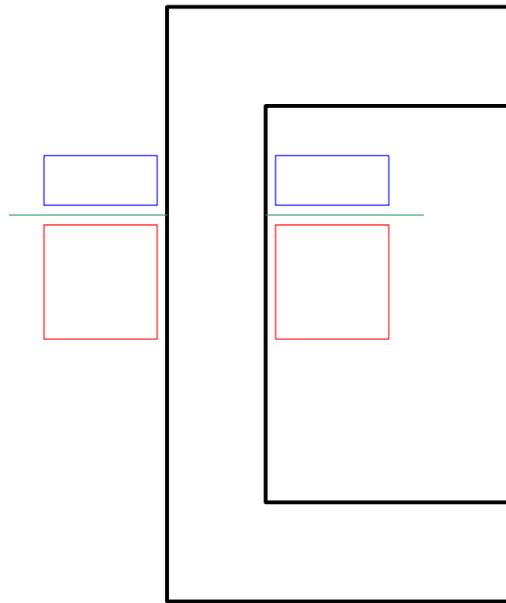


Transformadores

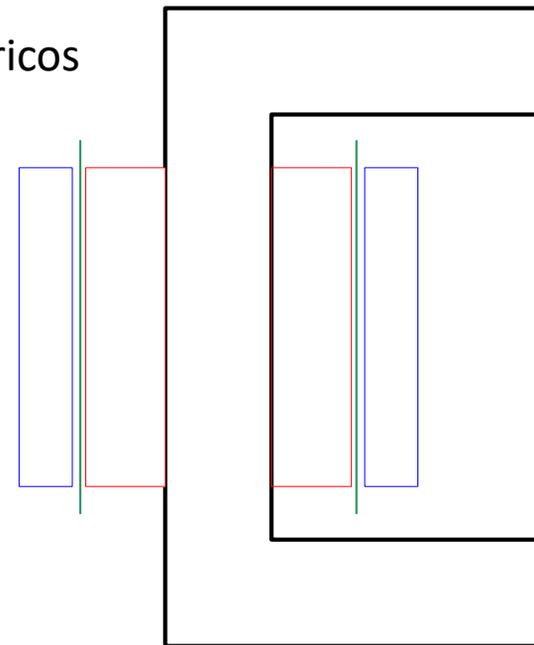
Elementos constructivos de un transformador: NÚCLEO - BOBINADOS

Tipos de arrollamientos

Alternados



Concéntricos



Transformadores

Elementos constructivos de un transformador: REFRIGERANTE - AISLANTE

El objetivo de la refrigeración es la de limitar el calentamiento de la máquina, los métodos más comúnmente utilizados son:

aire

aceite mineral

líquidos incombustibles, Askarel

Los dos últimos tienen mayor rigidez dieléctrica que el aire y tienen mayor conductividad térmica. También presentan un mayor calor específico y peso específico, lo que provoca un mayor almacenamiento térmico.

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador:

CUBA

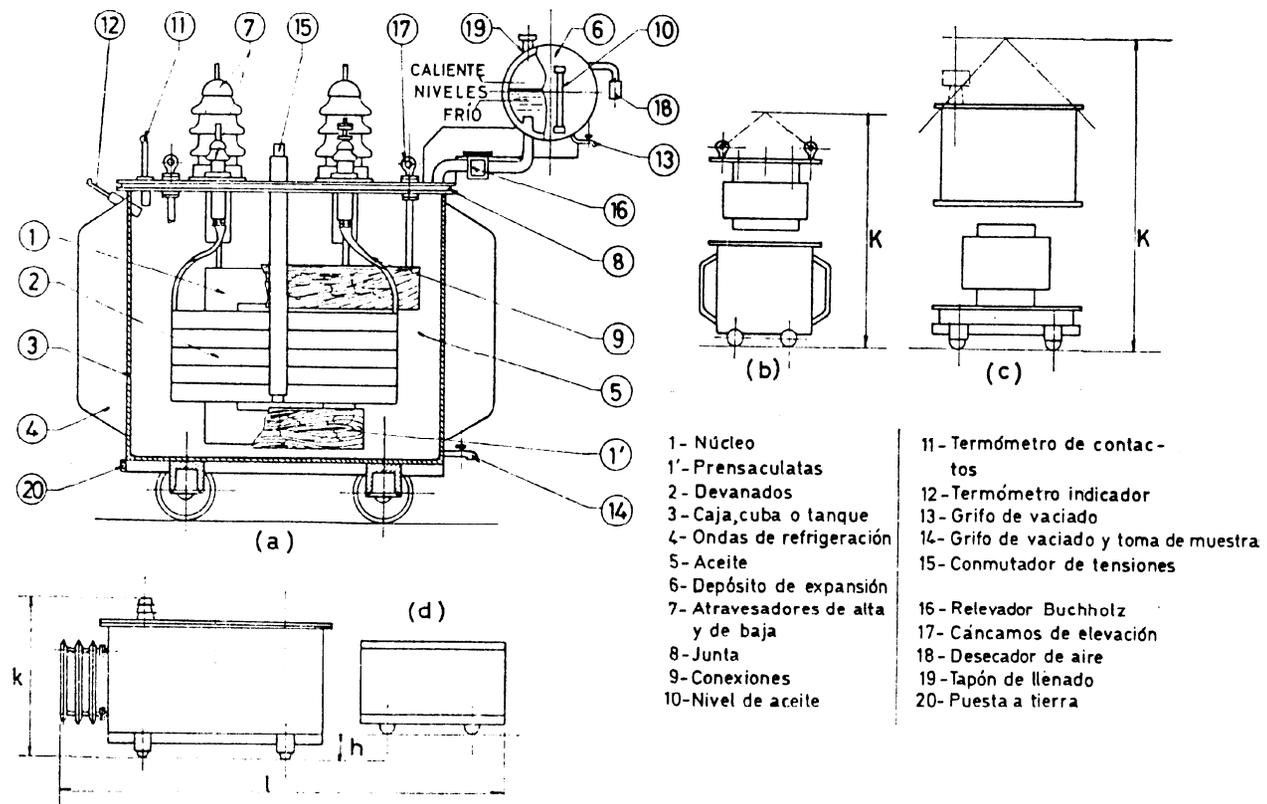


Fig. I-4,5

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador:

REFRIGERANTE

Bifenilos policlorados (PCB):

- Se comenzaron a utilizar desde el 1920 hasta los '70s.
- Esta permitido su uso hasta el 2025 en equipos ya existentes (de acuerdo al Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, COP).

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador:

Bifenilos policlorados (PCB)

VENTAJAS:

- Constante dieléctrica baja
- Baja volatilidad
- Resistentes al fuego
- Baja solubilidad en agua
- Alta solubilidad en solventes orgánicos
- Alta resistencia al envejecimiento

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador:

Bifenilos policlorados (PCB)

EFFECTOS EN SERES HUMANOS:

- Pueden causar insuficiencia renal y de otros órganos humanos
- Si son inhalados pueden producir dolor de cabeza, mareos, etc.
- Si se absorben por la piel pueden causar cloracne.

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador:

Bifenilos policlorados (PCB)

NORMATIVA DE SEGURIDAD:

- Es difícil identificar, existen kits para determinar su existencia (pueden estar contaminando elementos de reciente fabricación)
- Utilizar los elementos de seguridad personal
- Contactar al organismo rector para tomar y actualizar su manejo y deposición final con el menor riesgo posible

Transformadores

Elementos constructivos de un transformador:

Bifenilos policlorados (PCB)

DESVENTAJAS:

- No son biodegradables
- Son persistentes en el medio ambiente
- Pueden acumularse en tejidos adiposos del cuerpo
- Son posibles carcinógenos

Transformadores

Transformadores secos

Historia:

- Fueron los primeros en usarse hasta fines del S XIX
- Fueron desplazados primero por los refrigerados, primero por aceites minerales y luego con PCB
- 1960, se descubre el peligro de los PCB
- Nuevos avances en trafos secos

Transformadores

Transformadores secos

Problemas que presentan:

- Tensiones < a 15 kV
- Bajas potencias
- Bajas resistencias a ensayos de impulso
- Elevado nivel de ruido
- Problemas con el enresinado

Transformadores

Transformadores secos

Avances que permiten su reaparición:

- Mejora en aislaciones se pueden usar hasta 52 kV
- Mejoras en procesos de enresinado
- Se reduce el ruido utilizando técnicas de amortiguación
- Mejora sustancial a ensayos impulsivos a 170 kV y sin descargas parciales
- Potencia hasta 30 MVA
- Utilización de Aluminio para los bobinados:
 - Reducción de costos
 - El coeficiente de dilatación del Al y la resina son parecidos

Transformadores

Transformadores secos

Ventajas:

- Con el colado de la resina se reduce el ingreso de humedad
- Menor tamaño y peso
- Mayor robustez
- Reduce problemas de incendio

Ventajas comparativas:

- Para sobrecargas cortas (30'). Son mejores los trafos secos
- Para sobrecargas largas. Son mejores los refrigerados con aceite

Transformadores

Datos a suministrar para solicitar un transformador:

- 1) *Norma de fabricación (ejemplo IEC 76).*
- 2) *Tipo. Transformador o autotransformador.*
- 3) *Monofásico o trifásico.*
- 4) *Frecuencia de trabajo.*
- 5) *Tipo de aislación, aceite o seco.*
- 6) *Uso, interior o intemperie.*
- 7) *Tipo de refrigeración.*
- 8) *Voltaje y potencia nominal.*
- 9) *Tipo de conmutador y relación de taps.*
- 10) *Máxima tensión de trabajo.*
- 11) *Niveles de aislación*
- 12) *Grupo de conexión.*
- 13) *Neutro.*

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

- Ensayo de relación.
- Ensayo en vacío
- Ensayo en cortocircuito

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO DE RELACIÓN:

Se realiza con el transformador en vacío. Se conecta el primario a una fuente de tensión midiendo los voltajes de ambos bobinados. El cociente de ambas medidas será la relación de transformación

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN VACÍO:

Con el bobinado secundario en vacío y el primario conectado a una fuente de tensión (igual a la nominal del transformador), se mide:

Potencia consumida

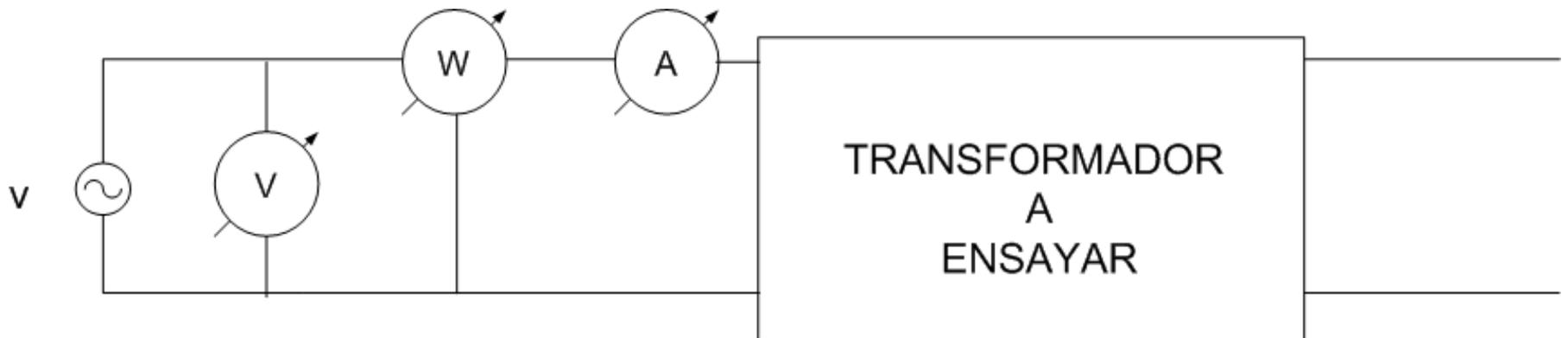
Tensión en bobinado primario

Corriente en bobinado primario

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN VACÍO:



Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN VACÍO:

Se obtendrá las pérdidas de vacío que coinciden con las pérdidas en el hierro.

En el ensayo de vacío, las pérdidas por efecto Joule son despreciables, frente a la pérdidas en el hierro.

Las pérdidas Joule en el secundario no existen ya que la corriente del secundario es cero (transformador en vacío).

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN VACÍO:

Para tener una idea de magnitud, procederemos a ver un caso real:

Pérdidas totales en carga	2%
Pérdidas en el cobre a plena carga	1.6%
Pérdidas en el hierro	0.4%
Corriente de vacío	$I_0 = 0.01I_{1N}$
Pérdidas en el cobre con el transformador en vacío	$R_1 I_0^2 = R_1 I_{1N}^2 (0.01)^2 = 0.00016\%$

Por lo que podríamos decir que en el ensayo en vacío, el vatímetro no mide prácticamente más que las pérdidas en el hierro. **Para resumir en el ensayo de vacío se miden las pérdidas en el hierro.**

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

Con el bobinado secundario en cortocircuito, el primario se conecta a una fuente de tensión variable. Se comienza a aumentar la tensión de alimentación del primario hasta alcanzar una corriente cercana a la nominal. En ésta condición se mide:

Potencia consumida

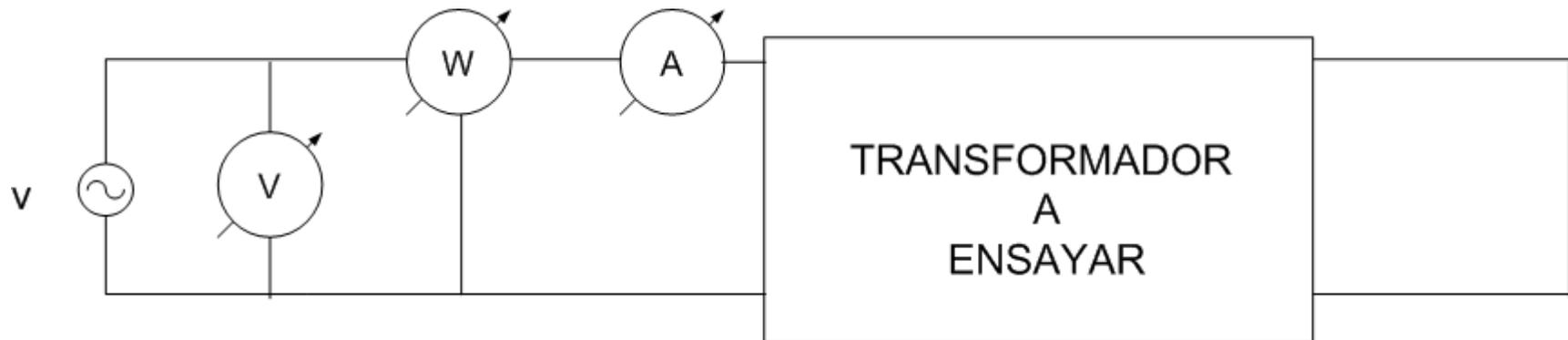
Tensión en bobinado primario

Corriente en bobinado primario

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:



Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

Si la corriente que circula fuera la nominal, las pérdidas mediadas coinciden con las pérdidas en el cobre.

Se mide la tensión de la fuente U_{CC} tensión de cortocircuito es del orden de 5 % de la nominal.

Se desprecian las pérdidas en el hierro – justificar.

$$U_{CC} = R_{CC}I_{1N} + jX_{CC}I_{1N}$$

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

Para los valores antes vistos:

Pérdidas totales en carga	2%
Pérdidas en el cobre a plena carga	1.6%
Pérdidas en el hierro	0.4%
Corriente de vacío a tensión nominal	$I_0 = 0.01I_{1N}$
Corriente de vacío a tensión de cc	$I_{0cc} = 0.05I_0 = 0.05I_{1N} \cdot 0.01 = 0.0005I_{1N}$

Por lo que podríamos decir que en el ensayo en cortocircuito, el vatímetro mide las pérdidas en el cobre (a plena carga).

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

Se cumple que:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} I_{1N}}$$

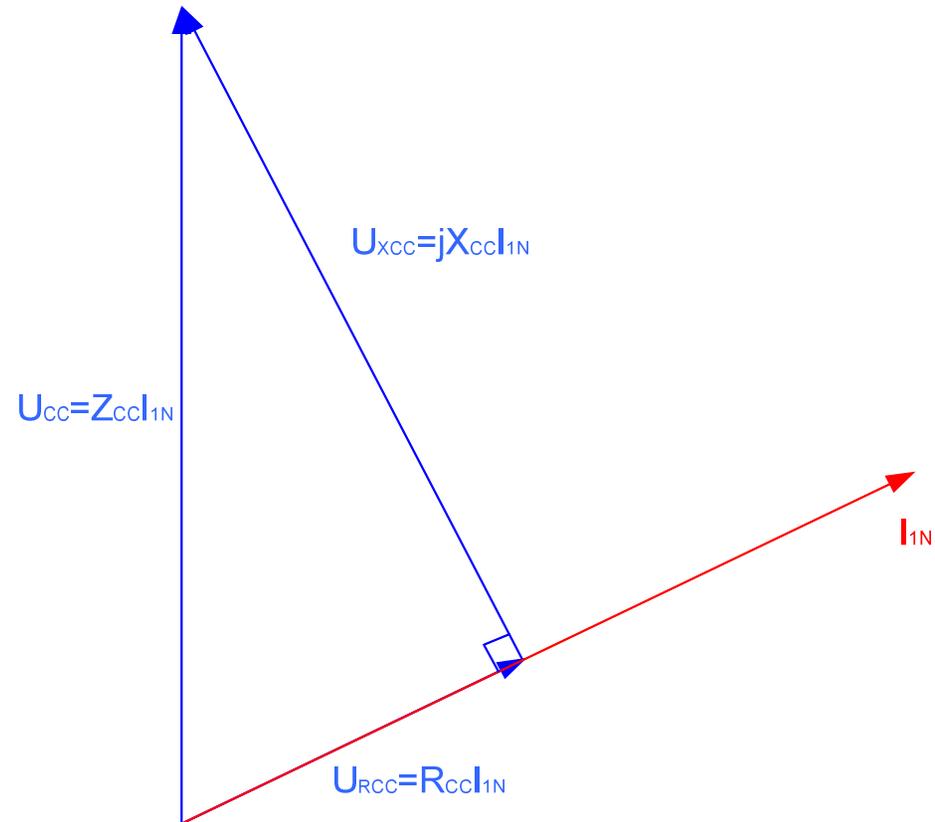
$$U_{R_{cc}} = U_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$U_{X_{cc}} = U_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc}$$

Transformadores

Modelo y ensayos en transformadores:

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:



Transformadores

Sistemas en por unidad o porcentaje:

$$Cantidad \text{ _ por _ unidad} = \frac{Cantidad}{Valor \text{ _ base _ cantidad}}$$

Normalmente se establece como base el voltaje y los Volt Ampere (potencia aparente).

Para sistemas trifásicos

$$V_{base(línea)} = \sqrt{3}V_{línea-neutro}$$

$$Z_{base-conex.triángulo} = 3Z_{base-conex.estrella}$$

Transformadores

Sistemas en por unidad o por ciento:

Los datos del ensayo de cortocircuito no suelen darse en valor absoluto, sino en forma relativa:

$$\varepsilon_{CC} = \frac{U_{CC}}{U_{1N}} 100 = \frac{Z_{CC} I_{1N}}{U_{1N}} 100 = \frac{Z_{CC}}{U_{1N} / I_{1N}} 100 = Z_{CC} (\%)$$

$$\varepsilon_{RCC} = \frac{U_{RCC}}{U_{1N}} 100 = \frac{R_{CC} I_{1N}}{U_{1N}} 100$$

$$\varepsilon_{XCC} = \frac{U_{XCC}}{U_{1N}} 100 = \frac{X_{CC} I_{1N}}{U_{1N}} 100$$

Transformadores

Sistemas en por unidad o por ciento:

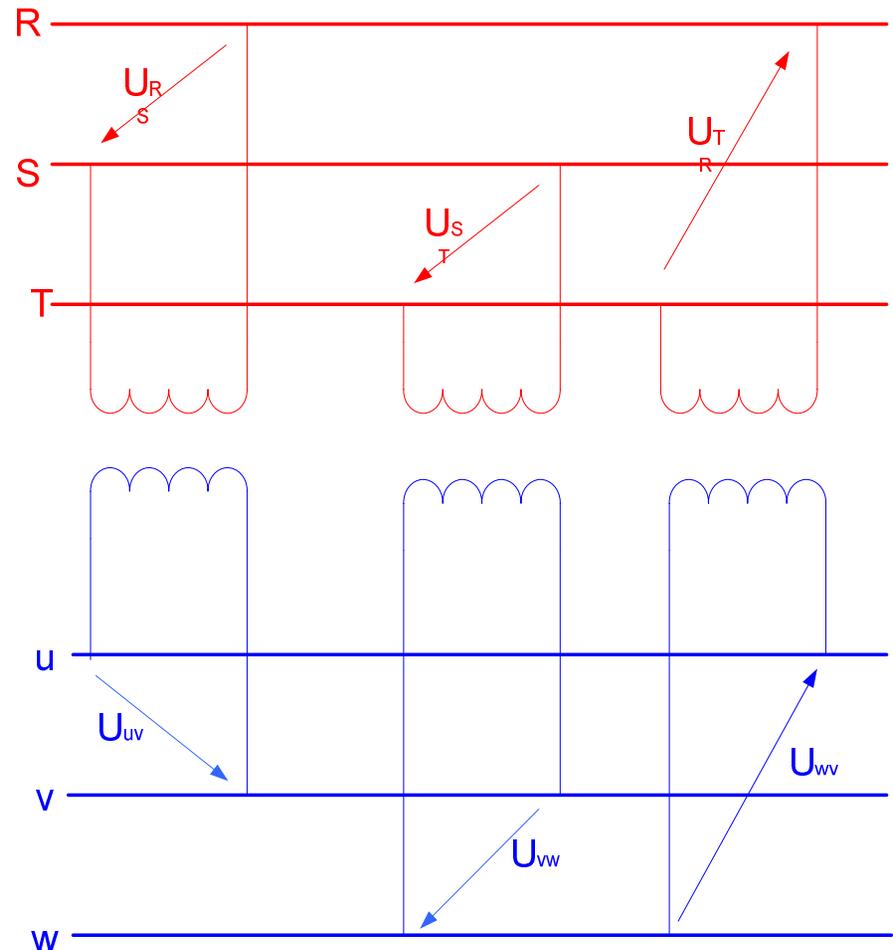
Las impedancias expresadas en por ciento son más significativas que en valores absolutos . Indican el tanto por ciento de caída de tensión, referida a la nominal, cuando por el elemento afectado circula la corriente nominal.

Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

Transformación trifásica: Es cuando ambos circuitos (primario y secundario), son trifásicos y equilibrados.

Consideremos dos redes trifásicas de conectadas mediante tres transformadores monofásicos



Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

El banco anterior tiene un conexionado triángulo – triángulo.

Podrán existir diferentes combinaciones:

- triángulo – triángulo
- triángulo – estrella
- estrella – triángulo
- estrella – estrella

Existen otras conexiones como la zig-zag que no estudiaremos en éste curso.

Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

Relaciones en un sistema trifásico

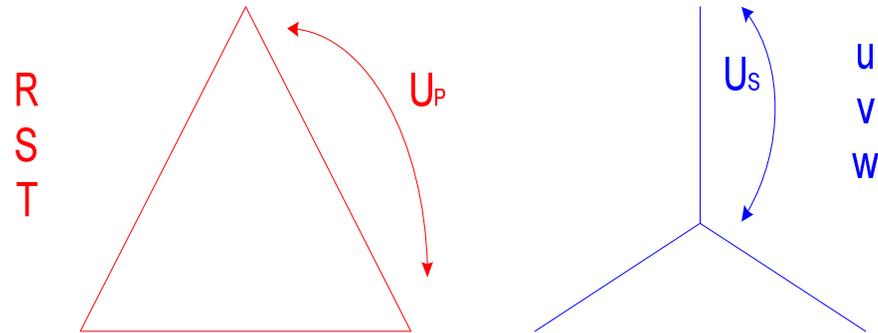
$$V_{FASE-FASE} = \sqrt{3}V_{FASE-NEUTRO}$$

$$I_{LINEA} = \sqrt{3}I_{FASE-FASE}$$

$$S_N = \sqrt{3}V_N I_N$$

$$S_N = 3V_{FASE-FASE} I_{FASE-FASE}$$

$$S_N = 3V_{FASE-NEUTRO} I_{LINEA}$$



Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

Para un transformador se cumple:

$$U_{PRIMARIO} = \frac{n_1}{n_2} U_{SECUNDARIO}$$

$$U_{RS} = U_{PRIMARIO}$$

$$U_{uv} = \sqrt{3} U_{SECUNDARIO}$$

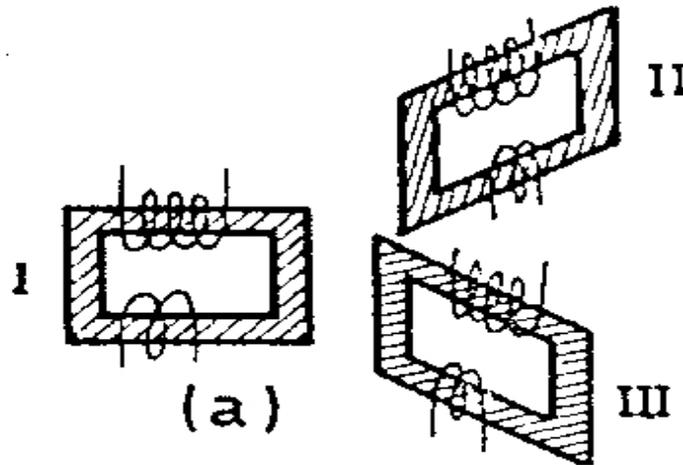
$$U_{RS} = \frac{n_1}{n_2} \frac{1}{\sqrt{3}} U_{uv}$$

$$\frac{U_{RS}}{U_{uv}} = \frac{n_1}{n_2 \sqrt{3}}$$

Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

Transformador de tres columnas: Banco de transformadores monofásicos .

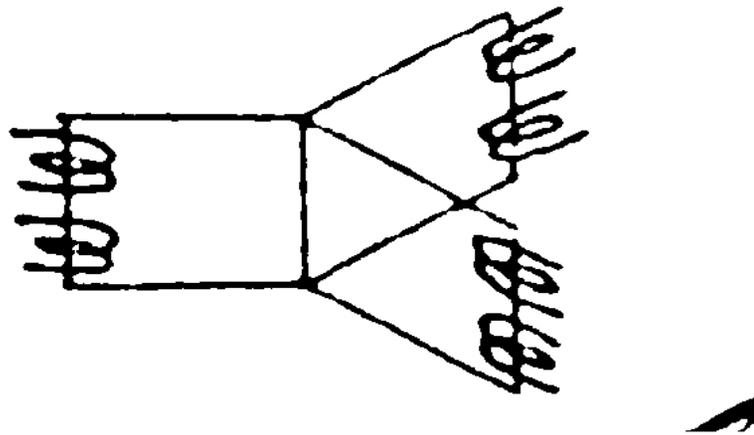


Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

Transformador de tres columnas:

los unimos de tal forma de conformar un mismo circuito magnético, siguiendo la siguiente secuencia de formación



Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos

Transformador de tres columnas:

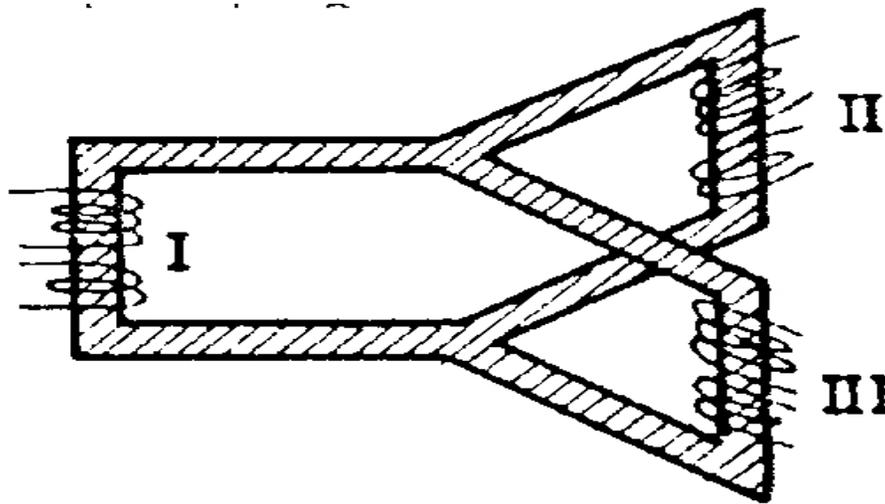
Como consecuencia de esta maniobra, los transformadores ahora tendrán los flujos magnéticos ligados de tal forma que la suma de ellos es cero.

La suma de los flujos pasaría por la columna que los vincula, por ello si quitamos esa columna nos ahorraríamos todo el hierro de la misma (con la consecuente reducción de las pérdidas producidas por la misma). Lo que obtendríamos aparece en la siguiente figura:

Transformadores

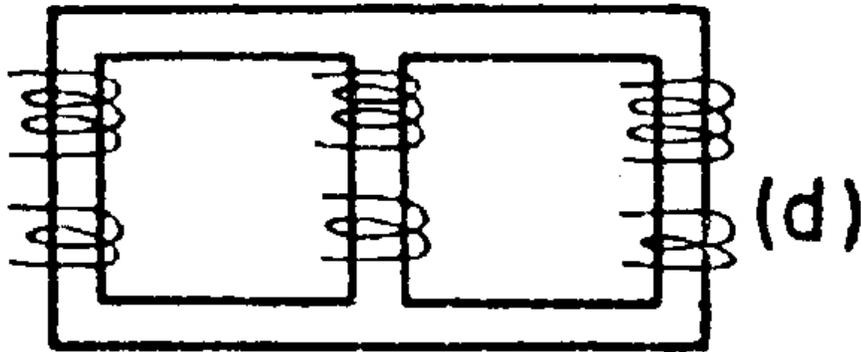
Transformación en sistemas trifásicos

Transformador de tres columnas: éste tipo de construcción complicaría la fabricación del núcleo del transformador. Al bobinado III, se le reducen las culatas hasta lograr una dimensión nula conformándose así el siguiente transformador



Transformadores

Transformación en sistemas trifásicos



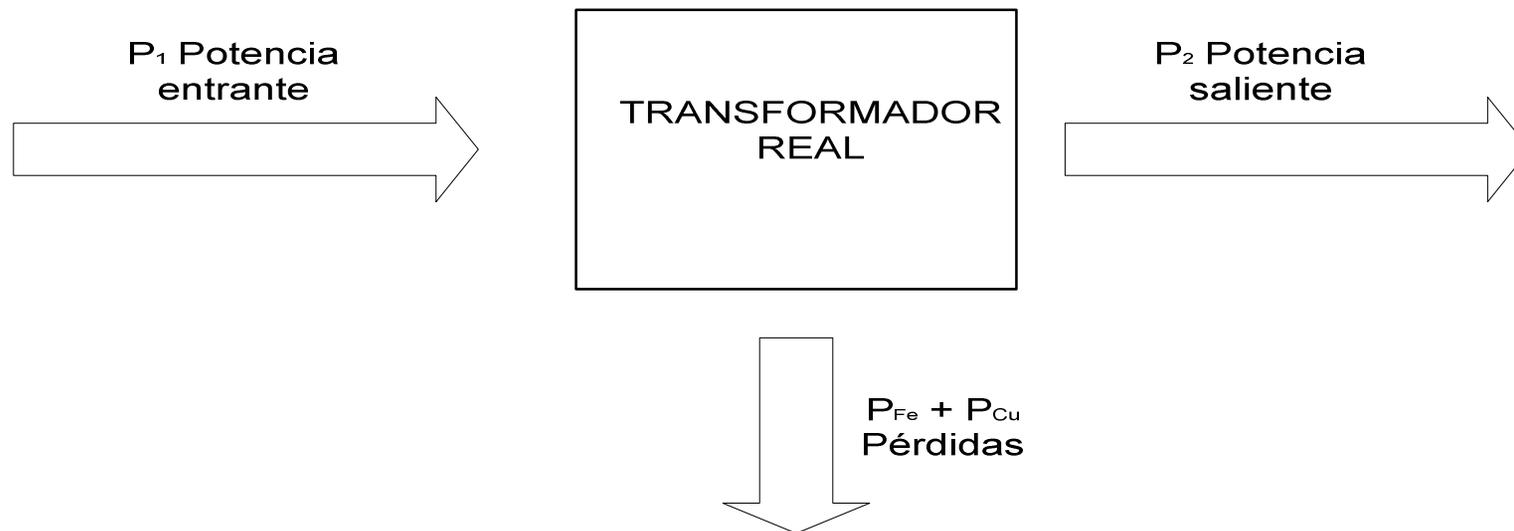
Transformador de tres columnas:

- núcleo asimétrico magnéticamente.
- columna central no posee culatas.

Esta asimetría es poco perceptible en carga con la utilización de chapas de grano orientado donde se requieren bajas corrientes de excitación

Transformadores

Rendimiento de un transformador



Transformadores

Rendimiento de un transformador

De acuerdo a la definición tradicional de rendimiento tenemos:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} * 100$$

$$P_{\text{P\u00e9rdidas}} = P_{Cu} + P_{Fe} \Rightarrow \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} * 100 = \left(1 - \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \right) * 100$$

Transformadores

Rendimiento de un transformador

Las pérdidas en el cobre dependen del estado de carga del transformador

$$P_2 = K_{c \text{ arg } a} P_n \cos \varphi_2$$

$$K_{c \text{ arg } a} = \frac{I_1}{I_{1N}}$$

Indice de carga

P_n

Potencia nominal.

φ_2

Desfasaje de la carga en el secundario.

Transformadores

Rendimiento de un transformador

Las pérdidas en el cobre dependen del estado de carga del transformador

Las pérdidas en el hierro son independientes del estado de carga del transformador y dependen de la tensión de trabajo.

$$P_{Cu} = K^2_{carga} P_{CC}$$

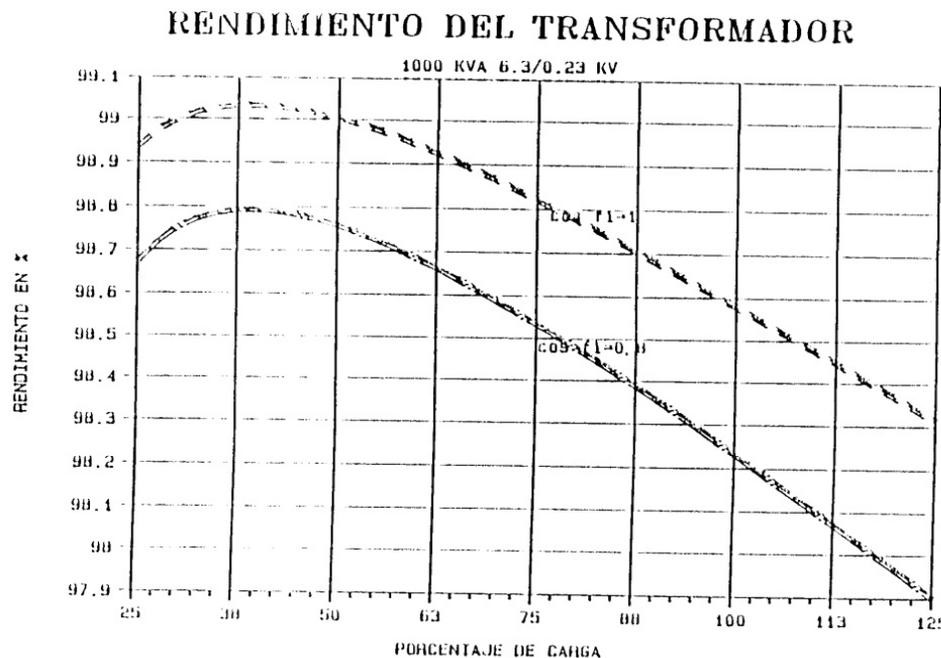
$$\eta = \left(1 - \frac{P_{Fe} + K^2_{carga} P_{CC}}{K_{carga} P_n \cos \varphi_2 + P_{Fe} + K^2_{carga} P_{CC}} \right) \times 100$$

Transformadores

Rendimiento de un transformador

Esta función (rendimiento en función del índice de carga), presenta un máximo para:

$$P_{Fe} = K_{carga}^2 P_{CC}$$



El rendimiento máximo ocurrirá cuando las pérdidas fijas se igualan a las variables.

Transformadores

Preguntas:

Transformadores

Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

Si tenemos un transformador alimentado a tensión nominal, y el secundario está en vacío tendremos una tensión U_{2N} , con el secundario a plena carga dicha tensión cambiará a un valor U_{2C}
Cumpliéndose:

$$\Delta U_2 = U_{2N} - U_{2C}$$

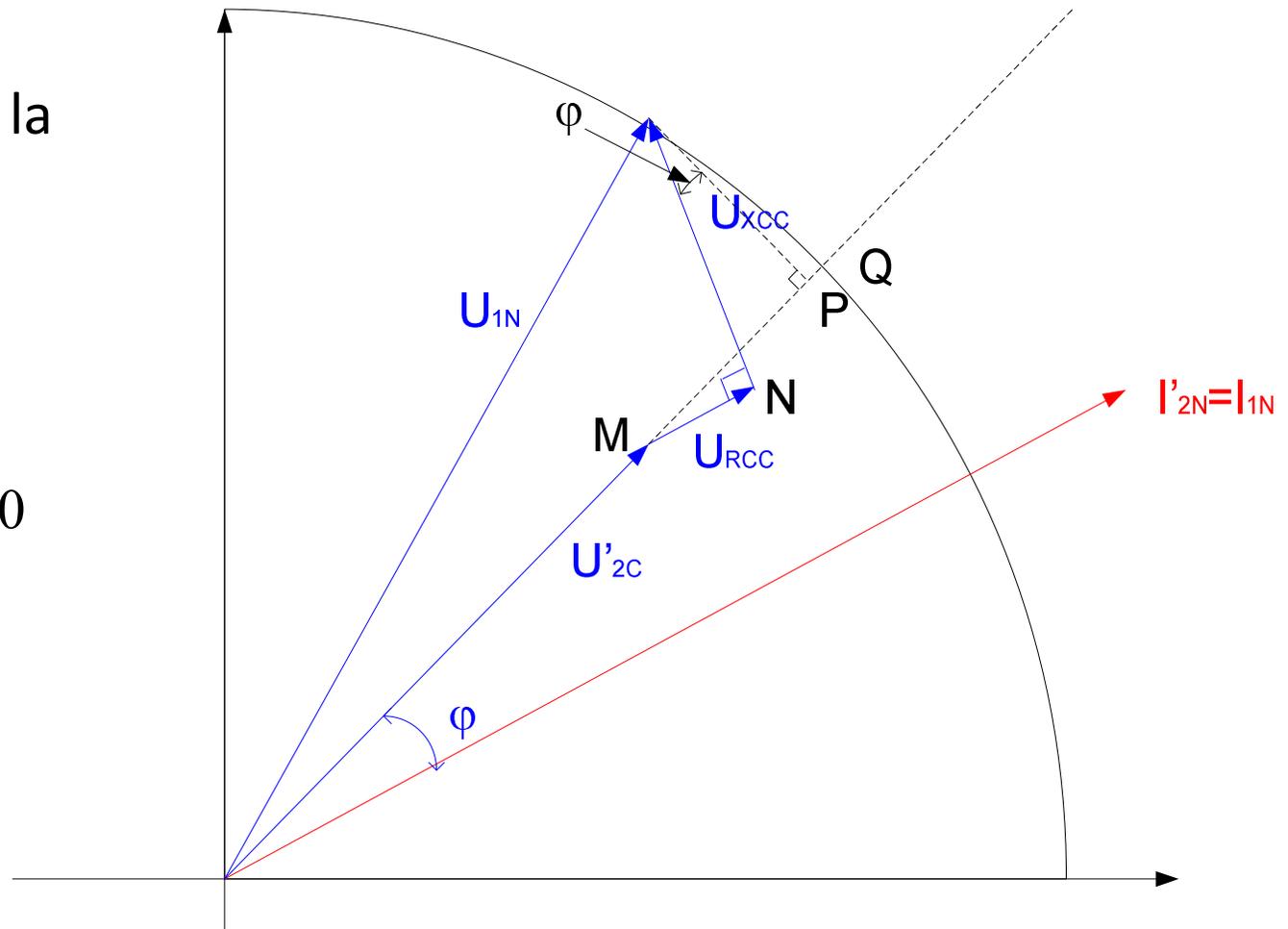
$$\varepsilon_C = \frac{U_{2N} - U_{2C}}{U_{2N}} 100 \quad \text{Regulación}$$

Transformadores

Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

Multiplicando por la relación de transformación

$$\varepsilon_C = \frac{U_{1N} - U'_{2C}}{U_{1N}} 100$$



Transformadores

Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

Calcularemos las caídas para cualquier valor de $\cos \varphi$.

Supondremos para el cálculo que la intensidad en el secundario es la nominal. Sabemos que se cumple:

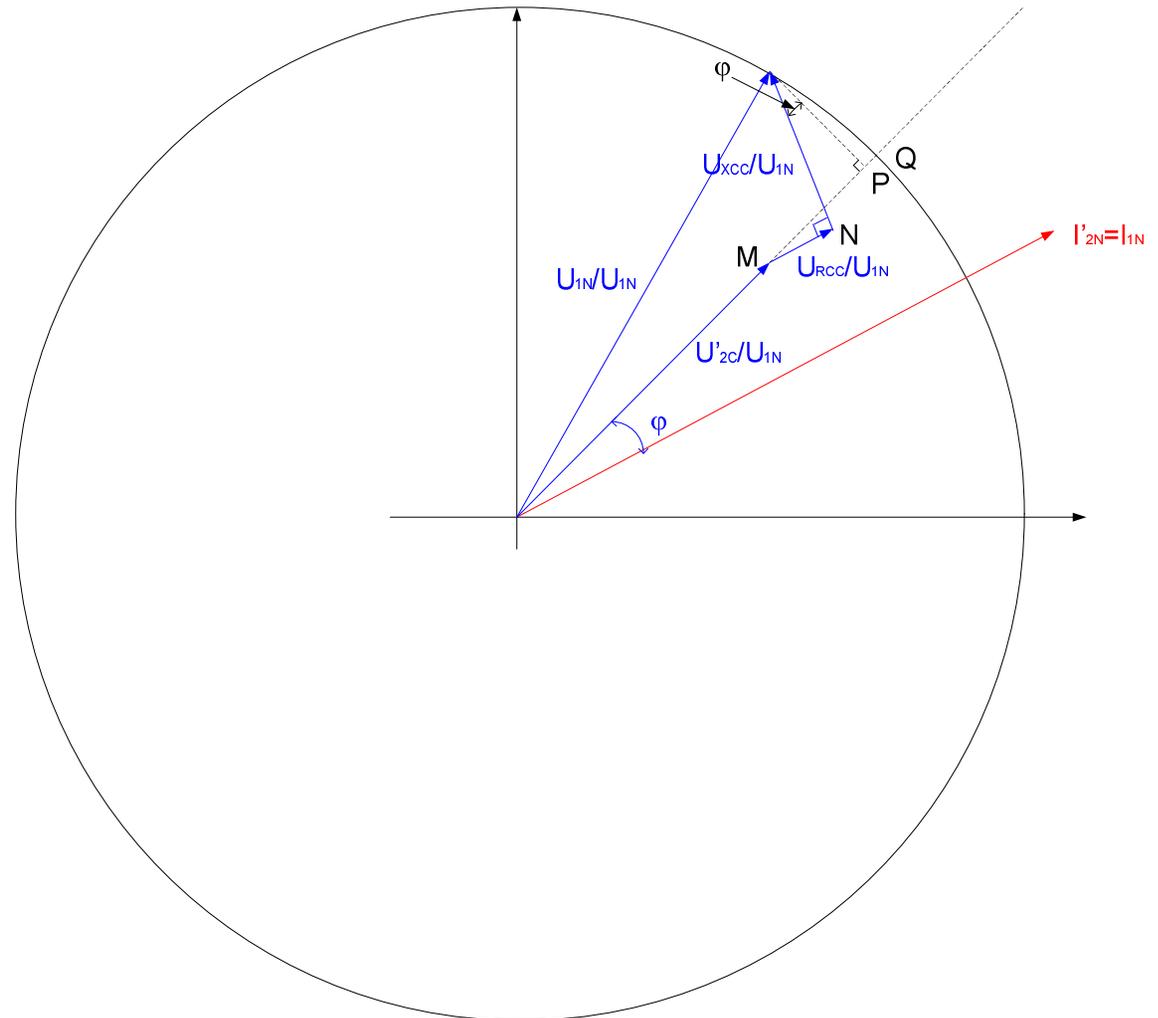
$$\varepsilon_{R_{cc}} = \frac{U_{R_{cc}}}{U_{1n}} 100$$

$$\varepsilon_{X_{cc}} = \frac{U_{X_{cc}}}{U_{1n}} 100$$

Transformadores

Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

Si tomamos los valores de los versores relativos al valor del voltaje nominal primario.



Transformadores

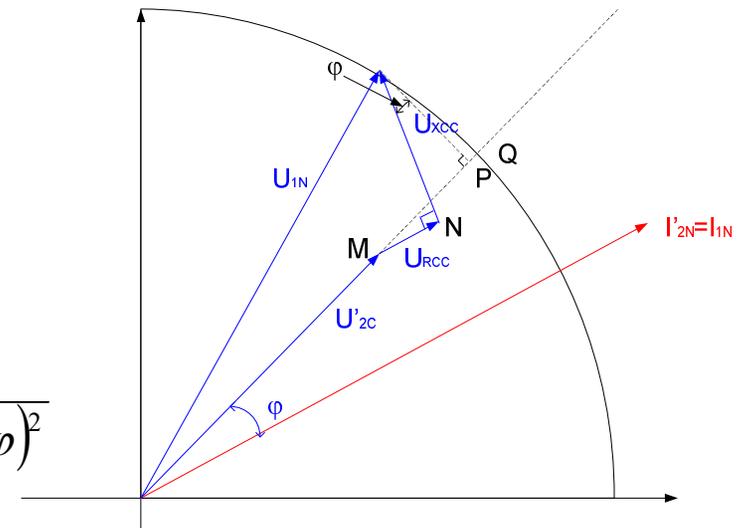
Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

De acuerdo al diagrama anterior, la expresión de la caída de tensión buscada está representada por el segmento \overline{MQ} :

$$\overline{MQ} = \frac{U_{1N} - U'_{2C}}{U_{1N}} 100 = \varepsilon_C (\%)$$

$$\varepsilon_C (\%) = \overline{MQ} = \overline{MN} + \overline{NP} + \overline{PQ}$$

$$= \varepsilon_{R_{CC}} \cos \varphi + \varepsilon_{X_{CC}} \operatorname{sen} \varphi + 100 - \sqrt{100^2 - (\varepsilon_{X_{CC}} \cos \varphi - \varepsilon_{R_{CC}} \operatorname{sen} \varphi)^2}$$



Transformadores

Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

Ejemplo: Un transformador de 250 kVA
con las siguientes características
30000/380 V

$$\varepsilon_{CC} = 6\%$$

$$P_{Fe} = 650W$$

$$P_{Cu} = 3900W$$

Se desea conocer las caídas de tensión, a plena carga y a media carga, con $\cos \varphi = 1$ y $\cos \varphi = 0.8$

Transformadores

Caída de tensión en un transformador – Efecto Ferranti

Ejemplo:

$$\varepsilon_{R_{CC}} = \frac{P_{Cu}}{P_N} 100 = \frac{3900}{250000} 100 = 1.56\%$$
$$\varepsilon_{X_{CC}} = \sqrt{6^2 - 1.56^2} = 5.8\%$$

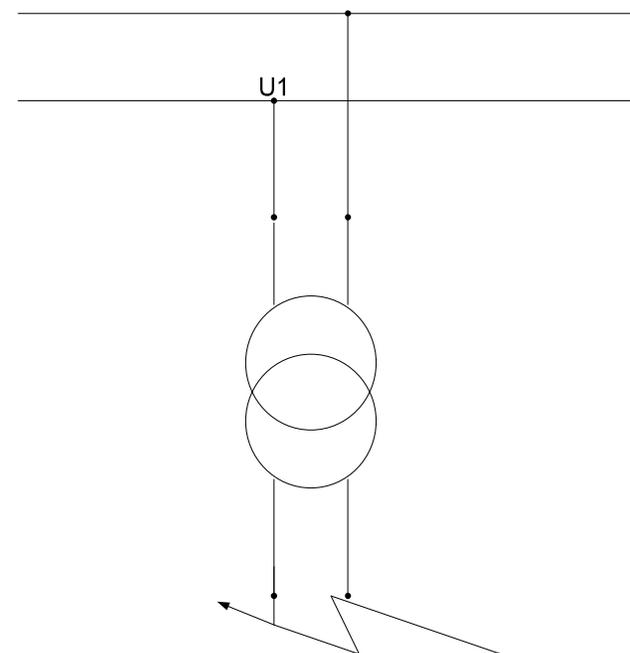
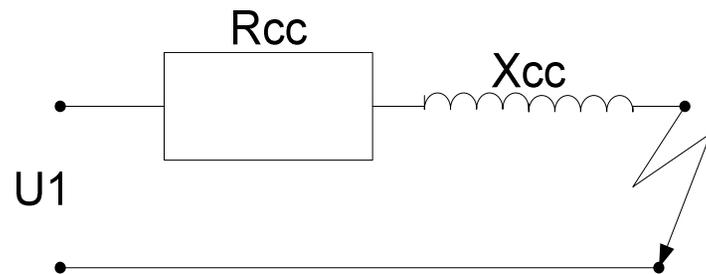
	I_{2N}	$I_{2N} / 2$
$\cos \varphi = 1$	1.56	0.78
$\cos \varphi = 0.8$	4.72	2.36

Transformadores

Corriente de cortocircuito

Calcularemos la corriente de cortocircuito en un transformador.

Supondremos que la red de alimentación dispone de potencia infinita



Transformadores

Corriente de cortocircuito

$$Z_{CC} = \frac{U_{CC}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{I_{CC}}$$

$$I_{CC} = \frac{U_{1N}}{U_{CC}} I_{1N}$$

$$\varepsilon_{CC} = \frac{U_{CC}}{U_{1N}} 100$$

$$I_{CC} = \frac{100}{\varepsilon_{CC}} I_{1N}$$

Transformadores

Corriente de cortocircuito

Ejemplos:

- 1) Transformador 100 kVA, 10000/500 V,
 $\varepsilon_{CC} = 4\%$

$$\begin{aligned}I_{1N} &= 10 \text{ A} \\I_{1CC} &= \frac{100}{4} 10 = 250 \text{ A} \\I_{2CC} &= 5000 \text{ A}\end{aligned}$$

- 2) Transformador 10000 kVA, 30000/6000 V,
 $\varepsilon_{CC} = 5\%$

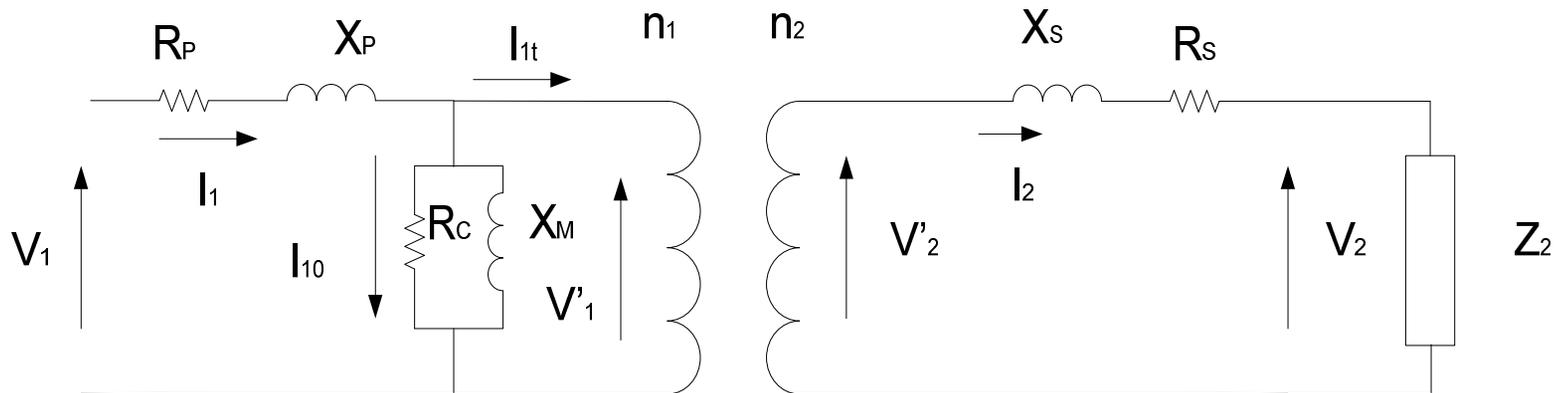
$$\begin{aligned}I_{1N} &= 333.3 \text{ A} \\I_{1CC} &= \frac{100}{5} 333.3 = 6666 \text{ A} \\I_{2CC} &= 33333 \text{ A}\end{aligned}$$

- 3) Transformador 10000 kVA, 30000/6000 V
 $\varepsilon_{CC} = 10\%$

$$\begin{aligned}I_{1N} &= 333.3 \text{ A} \\I_{1CC} &= \frac{100}{10} 333.3 = 3333 \text{ A} \\I_{2CC} &= 16666 \text{ A}\end{aligned}$$

Transformadores

Modelo de un transformador trifásico, tensiones fase- neutro o el de uno monofásico



Transformadores

Modelo de un transformador trifásico, tensiones fase- neutro o el de uno monofásico

$$\vec{V}'_2 = \vec{V}_2 + r_2 \vec{I}_2 + jL_2 \omega \vec{I}_2$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}'_1 + r_1 \vec{I}_1 + jL_1 \omega \vec{I}_1$$

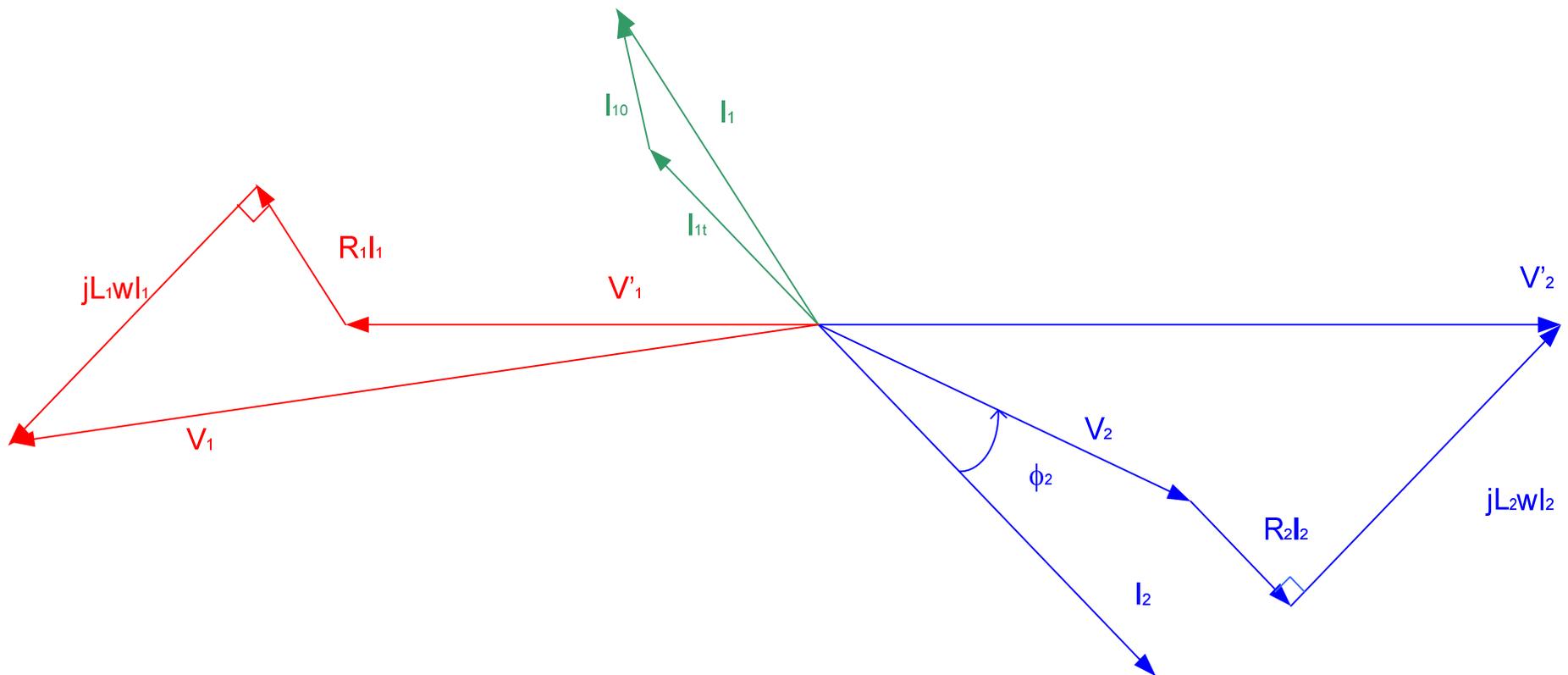
$$\vec{V}'_1 = -\frac{n_1}{n_2} \vec{V}'_2$$

$$\vec{I}_{1t} = -\frac{n_2}{n_1} \vec{I}_2$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{1t} + \vec{I}_{10}$$

Transformadores

Modelo de un transformador trifásico, tensiones fase- neutro o el de uno monofásico



Transformadores

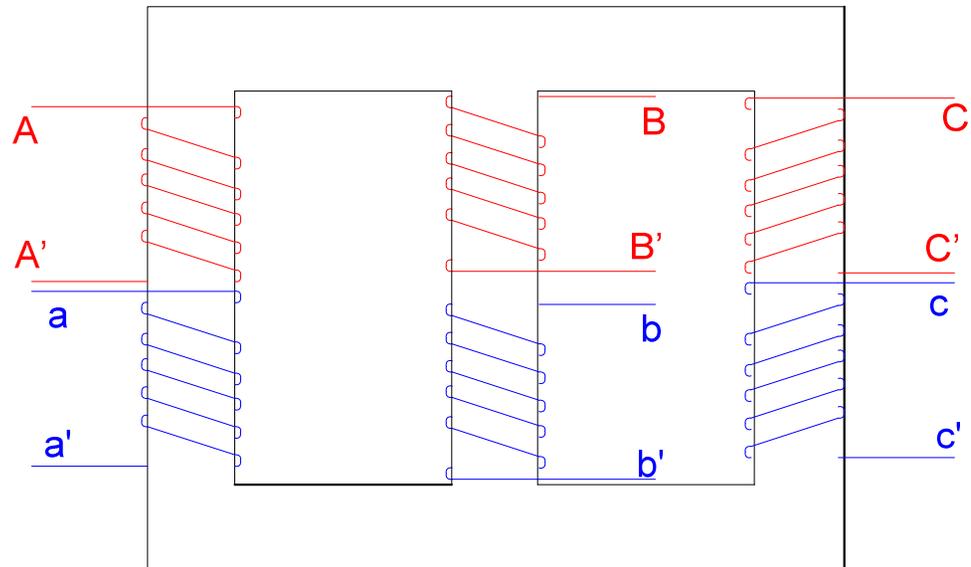
Indice horario

Designaciones de polos y bornes

Diremos que dos bobinados tienen la misma polaridad si se cumple que ambos poseen potenciales positivos (o negativos) simultáneamente.

- bornes con mayúsculas extremos de un bobinado de alta
- bornes con minúsculas extremos bobinado de baja
- bornes sin tilde - con igual polaridad.

A los bornes de alta y baja con la misma letra se los denominará homólogos.

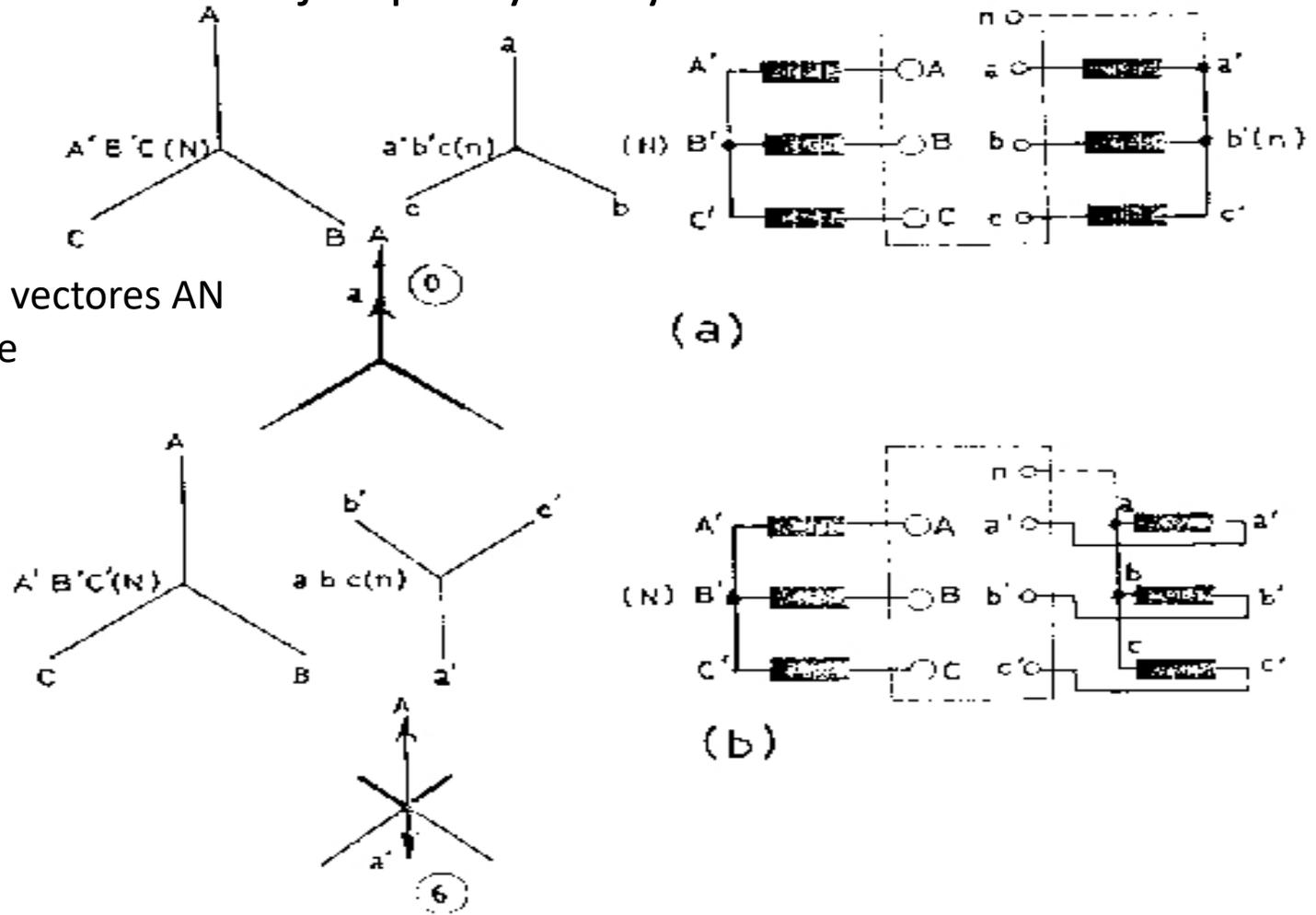


Transformadores

Indice horario

Ejemplo Yy0 e Yy6:

Observar que los vectores AN y an están en fase



Transformadores

131

§ III-7.8

CUADRO
DE
GRUPOS DE CONEXIONES USUALES SEGUN VDE 0532/8.64 § 9. (1)

Indice de desfase (horario)	SIMBOLO DE ACOPLAMIENTO O DE CONEXIONES	Esquema vectorial		Esquema de conexiones	Relación de transformación (2)
		mayor tensión	menor tensión		
0 (0°)	D d 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	(3) Y y 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 0				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	(3) D y 5				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 5				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 5				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
6 (180°)	D d 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Y y 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 6				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
11 (330°) (-30°)	D y 11				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 11				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 11				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

1 Adaptadas a las denominaciones y designaciones usuales en esta obra (CEI y UNESA).

2 La relación de transformación se entiende en vacío y entre tensiones simples (reales o ficticias), o entre tensiones compuestas.

3 En nuevas instalaciones se dará preferencia a los grupos recuadrados.

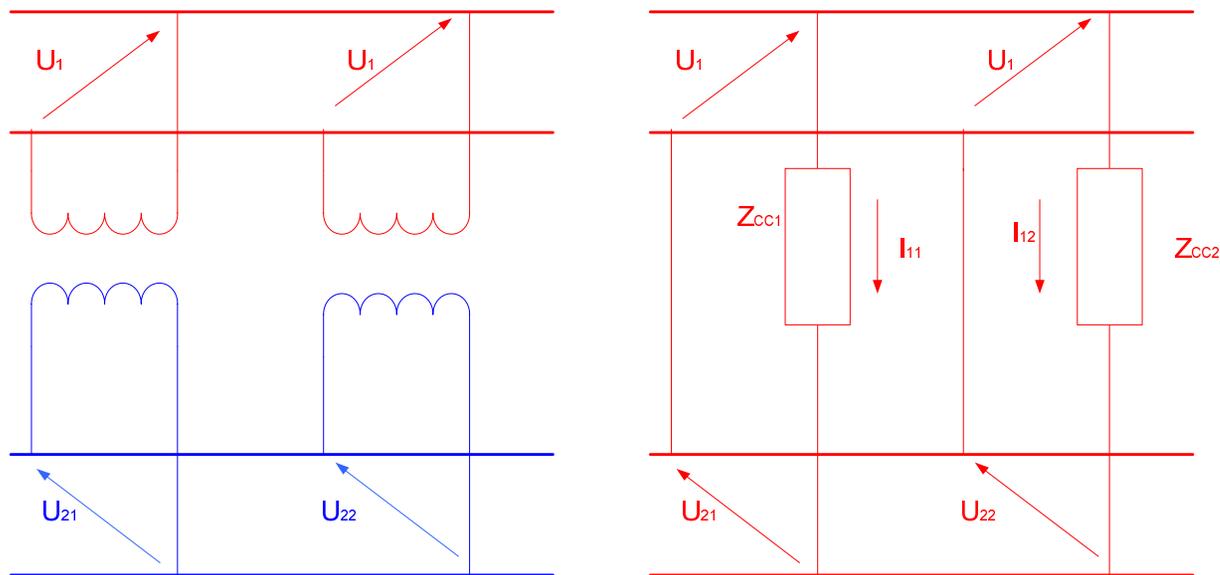
Transformadores

Transformadores en paralelo - condiciones

- 1.- Deben tener una relación de transformación parecidas
- 2.- Deben poseer tensiones de cortocircuito parecidas
- 3.- En el caso de transformadores trifásicos deben poseer igual índice horario

Transformadores

Transformadores en paralelo - condiciones



Supongamos dos transformadores monofásicos en paralelo y veamos que sucede si tienen diferente tensión de cortocircuito

Transformadores

Transformadores en paralelo - condiciones

Podemos observar que si los transformadores no tienen igual ε_{CC} , el más cargado será el de menor ε_{CC} .

$$I_{11}Z_{CC1} = I_{12}Z_{CC2}$$

$$\frac{I_{11}}{I_{1N}} \frac{Z_{CC1} I_{1N}}{U_{1N}} 100 = \frac{I_{12}}{I_{2N}} \frac{Z_{CC2} I_{2N}}{U_{1N}} 100$$

$$K_{1C \arg a} \varepsilon_{CC1} = K_{2C \arg a} \varepsilon_{CC2}$$

$$\frac{K_{1C \arg a}}{K_{2C \arg a}} = \frac{\varepsilon_{CC2}}{\varepsilon_{CC1}}$$

Transformadores

Transformadores en paralelo - condiciones

En el caso de que los \mathcal{E}_{CC} no coincidieran, el transformador más cargado será el de menor tensión de cortocircuito.

Se puede colocar una inductancia de un valor adecuado para igualarlas

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos:

Conexión triángulo: se unen sucesivamente los extremos de polaridad opuesta de cada dos devanados hasta cerrar el circuito.

Conexión estrella: se unen en un mismo punto los tres extremos de los devanados que poseen la misma polaridad.

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos: Conexión Y y

Desventajas:

- Carga desbalanceada los voltajes en bornes del transformador se desbalancean si la carga está desbalanceada.
- Problemas con terceros armónicos de voltaje.

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos: Conexión Y y

Solución 1.- conectar los neutros a tierra.

Solución 2.- agregar un arrollamiento conectado en triángulo

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos: Conexión Y- Δ

- Se utiliza usualmente como transformador reductor.
- No presenta problemas con los armónicos de tensión y tiene buen comportamiento con cargas desequilibradas (el triángulo redistribuye posibles desequilibrios)

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos: Conexión Y- Δ

Este tipo de conexión al poseer un arrollamiento en triángulo no tiene problemas con las componentes de tercer armónico de voltaje.

Este tipo de conexión, desplaza los voltajes del secundario 30° en relación a los respectivos voltajes del primario.

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos: Conexión Δ - y

- Usualmente se los utiliza como transformadores elevadores.
- Es también requerido para transformadores de distribución colocando la estrella del lado de baja tensión. Esto permite alimentar cargas trifásicas y monofásicas (entre fase y neutro).

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos: Conexión Δ - y

Este tipo de conexión al poseer un arrollamiento en triángulo no tiene problemas con las componentes de tercer armónico de voltaje.

Este tipo de conexión, desplaza los voltajes del secundario 30° en relación a los respectivos voltajes del primario.

Transformadores

Evaluación de los distintos tipos de conexión de transformadores trifásicos:

Conexión Δ - Δ

- Es utilizado en transformadores de BT.
- Este tipo de conexión no presenta ninguno de los problemas planteados anteriormente

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Fallas comunes

1) Defectos externos:

Eléctricas:

En terminales.

En cables de conexión, seccionador o interruptor.

Mecánicas:

Avería en cuba.

Fallas del sistema de refrigeración (ej. aire forzado).

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Fallas comunes

2) Condiciones anormales de funcionamiento:

Sobrecargas:

Defectos externos (defecto externo mantenido y no despejado)

Aumento de carga.

Sobretensiones de régimen permanente:

Pérdida de carga o rechazo de carga.

Configuración del sistema.

Con respecto a éste último caso, por norma IEC, un transformador de potencia puede soportar un cortocircuito durante 1.5 segundos. En el caso de sobretensiones transitorias se utilizan descargadores de estado sólido.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Fallas comunes

3) Defectos internos:

Cortocircuitos en los arrollamientos:

Entre fases.

Entre espiras.

A masa.

En el núcleo:

Recalentamientos locales, las pérdidas de aislamiento entre chapas provoca un aumento de las pérdidas en el hierro.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Mecanismos de actuación de las protecciones

- Formación de gases, relés Buchholz.
- Temperatura, termómetros que miden la temperatura del aceite y del bobinado.
- Variación de magnitudes eléctricas y temperatura, relés de imagen térmica.
- Variación de magnitudes eléctricas, relés diferenciales.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Relé Buchholz:

- se intercala entre el tanque de expansión y la cuba del transformador,
- actúa frente a la formación de gases, las pérdidas de aceite o la acumulación de aire, por lo que además vigila el nivel de aceite.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Termómetro:

La máxima temperatura del aceite y en régimen normal permite conocer la temperatura de los devanados.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Relé de imagen térmica:

- Se intercala uno para cada arrollamiento.
- La carga máxima en un transformador, está determinada por la temperatura del punto más caliente del devanado
- Su conocimiento permite la utilización de toda la capacidad térmica del transformador
- Este dispositivo permite calcular las sobrecargas y el estado térmico generando las correspondientes alarmas.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Protección diferencial:

Es un relé que verifica que la corriente entrante sea igual a la saliente.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Protección de cuba:

Esta protección supone que se aísla la cuba del transformador respecto a tierra.

La puesta a tierra lleva un transformador de corriente que se conecta al relé, al producirse una falta de puesta a tierra, la corriente de defecto circula por el transformador de corriente y el relé de protección actúa.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Protección contra saturación:

La protección contra saturación debe impedir un recalentamiento debido a una inducción magnética demasiado elevada.

Este dispositivo de protección contra saturación vigila el flujo magnético, midiendo la relación tensión/frecuencia.

Transformadores

Protecciones en transformadores de potencia:

Protección contra incendios de transformadores:

El aceite mineral que se encuentra dentro de la cuba de un transformador de potencia es inflamable,

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

a) Ensayos eléctricos.

a-1) Ensayos con corriente continua:

- Resistencia de aislación (megohmetro).
- Resistencia de aislación a dos valores de tensión.
- Ensayo de aislación con potencial elevado.
- Resistencia óhmica de los bobinados.
- Descargas parciales. Se varía la tensión de cero a la tensión nominal retornando luego a cero.

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b-1) Ensayos con corriente alterna:

Relación de transformación.

Factor de potencia de aislación. Modelo de aislante, resistencia en paralelo o en serie con condensador. Se mide $tg\delta$ a distintas tensiones y se ve la variación.

$$D = tg\delta = \frac{X_P}{R_R} = \frac{1}{\omega C_S R_S}$$

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b-1) Ensayos con corriente alterna:

Corriente de excitación.

El calor excesivo provoca una reducción de la vida útil de la máquina considerada:

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b-1) Ensayos con corriente alterna:

Temperatura de la aislación (°C)	Vida útil en años
60	20
70	10
80	6
90	2.5
100	1.25
110	7 meses

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Ensayo de acidez. Este ensayo permite verificar la existencia de productos ácidos. Se expresa mediante un índice de neutralización. La IEC 422 recomiendan un valor inferior a 0.5 mg KOH/g, sin embargo en la práctica en empresas eléctricas aconsejan valores menores de acuerdo al voltaje del equipo, llegando a 0.15 mg KOH/g para equipos de más de 500 kV.

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Ensayo de rigidez dieléctrica. Sirve para determinar la capacidad del aceite para sop'ortar altos campos eléctricos y la cantidad relativa de elementos contaminantes (agua libre, suciedad o partículas conductoras) existentes en la muestra. Este ensayo da una idea de la humedad y limpieza del aceite.

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Tangente delta. Mide la cantidad de productos polares, incluido los ácidos. En general se realiza a 90 °C. Hay productos que se disuelven a ésta temperatura e influyen en el resultado.

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Tensión interfasial. Da una idea de la concentración de dipolos en el aceite. Se explica la utilidad de éste ensayo ya que todos los elementos contaminantes en el aceite tienden a bajar la tensión interfasial. Sin embargo no se puede discernir con este ensayo cuales son los elementos contaminantes. Antes en buen estado, tienen valores de tensión interfasial del orden de 40 mN/m (aceites envejecidos pueden llegar a valores de 15 mN/m). Norma ISO 6295.

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Gases disueltos. Se realiza mediante un ensayo cromatográfico. Los gases disueltos en el aceite se pueden clasificar según la siguiente tabla

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Elemento causante	Gases característicos
Degradación térmica	C_2H_4, CH_4, H_2
Arco eléctrico	$C_2H_4, CH_4, H_2, C_2H_2, C_2H_6$
Descargas parciales	H_2

Transformadores

Ensayos a realizar en un transformador de potencia:

b) Ensayos sobre el aceite:

Contenido de agua.