

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS COMPONENTES PASIVOS III: TRANSFORMADORES.

Transformadores.

Los transformadores son redes multi-puerto formadas por dos o mas circuitos inductivos acoplados magnéticamente a través de un núcleo magnético común a todos.

Los transformadores son un caso particular de los circuitos inductivos, por lo que todas las consideraciones generales desarrolladas para las inductancias se les aplican directamente, además de las consideraciones específicas que resultan de su condición de circuitos acoplados magnéticamente.

Los transformadores son componentes imprescindibles en la electrónica de potencia en las que cumplen múltiples funciones entre las cuales se pueden destacar:

- 1.- Cambiar niveles de tensión en circuitos AC.
- 2.- Proporcionar aislamiento galvánico entre sistemas de potencia para reducir interferencias y/o cumplir requisitos de seguridad eléctrica.
- 3.- Realizar cambios de fase en sistemas polifásicos.
- 4.- Almacenar energía temporalmente en sistemas de alta frecuencia.
- 5.- Permitir el acople entre circuitos de disparo y dispositivos conmutadores electrónicos de potencia que tienen diferentes sistemas de referencia de tierra.

6.- Proporcionar información sobre los niveles de tensión y corriente en esquemas de realimentación y control

Tipos de transformadores por su frecuencia de operación.

Aunque los principios de operación son los mismos, en general se puede considerar que la frecuencia de operación divide a los transformadores de potencia en dos grandes categorías:

- 1.- Transformadores de línea, diseñados para trabajar en régimen sinusoidal permanente, alimentados con una forma de onda de voltaje idealmente mono-frecuencial (una senoide ideal) de baja frecuencia, 50 Hz o 60Hz (en aplicaciones especiales se puede llegar a 400Hz).

El núcleo magnético es de ferro-silicio.

2.-Transformadores de "alta frecuencia" o de "onda cuadrada", diseñados para operar alimentados por un sistema electrónico de potencia que genera trenes de pulsos cuadrados de dos o mas niveles, cuyo espectro armónico es multi-frecuencial y cuya frecuencia fundamental es elevada (mas de un kHz).

En estos casos el núcleo magnético es de ferrita o de algún otro material de altas prestaciones.

Aunque los principios generales de operación son comunes a los dos tipos que comparten un mismo modelo circuital ideal, las consideraciones y el proceso de diseño del modelo real son diferentes.

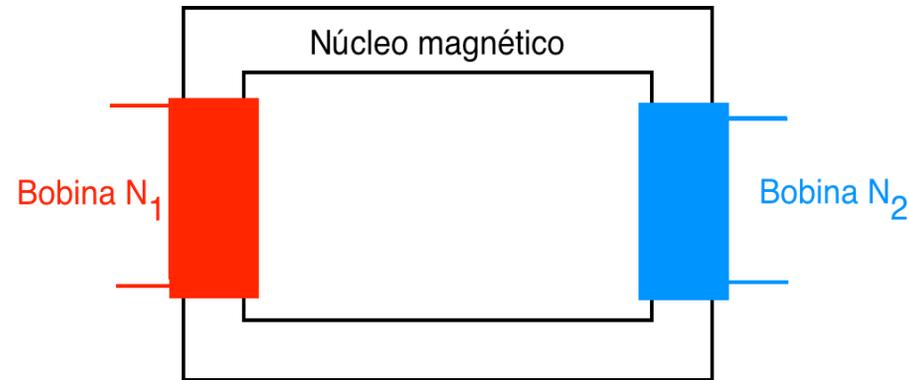
Cálculos básicos del modelo ideal:

Un transformador esta formado por los siguientes elementos:

A.- El núcleo magnético, que forma un circuito magnético usualmente cerrado en el cual se confinan los campos magnéticos generados por los bobinados.

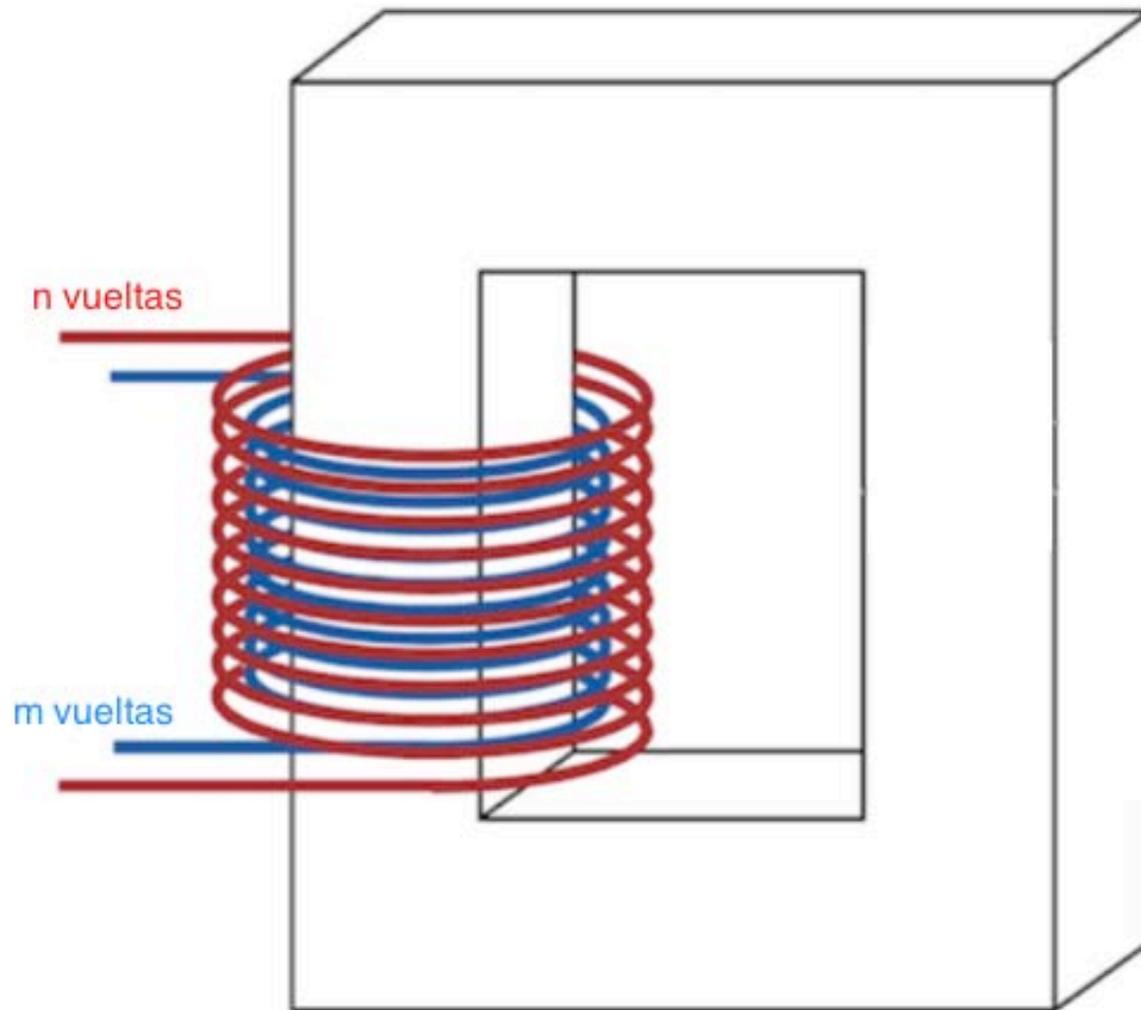
B.- Los bobinados: son los arreglos de bobinas, usualmente formadas con alambre de cobre, que conducen las corrientes que interaccionan en el transformador.

En general un transformador puede tener un número arbitrario de bobinas.



Transformador monofásico básico.

En los transformadores monofásicos "de línea" que operan a baja frecuencia (50-60Hz), es usual que los bobinados ocupen segmentos opuestos del núcleo, pero en los transformadores de alta frecuencia los bobinados se superponen en el mismo segmento, para minimizar la inductancia de dispersión.



Posición de los bobinados en un transformador de alta frecuencia

El acople entre cada par de bobinas en un transformador esta definido por su inductancia mutua; en general la inductancia mutua M_{nm} , indica el nivel de acople entre la bobina n y la bobina m, mientras que la inductancia mutua M_{mn} indica el nivel de acople entre la bobina m y la n.

Si el medio es isotrópico, como es lo normal en los transformadores con núcleo de material ferromagnético, el acople es simétrico, $M_{nm}=M_{mn}$.

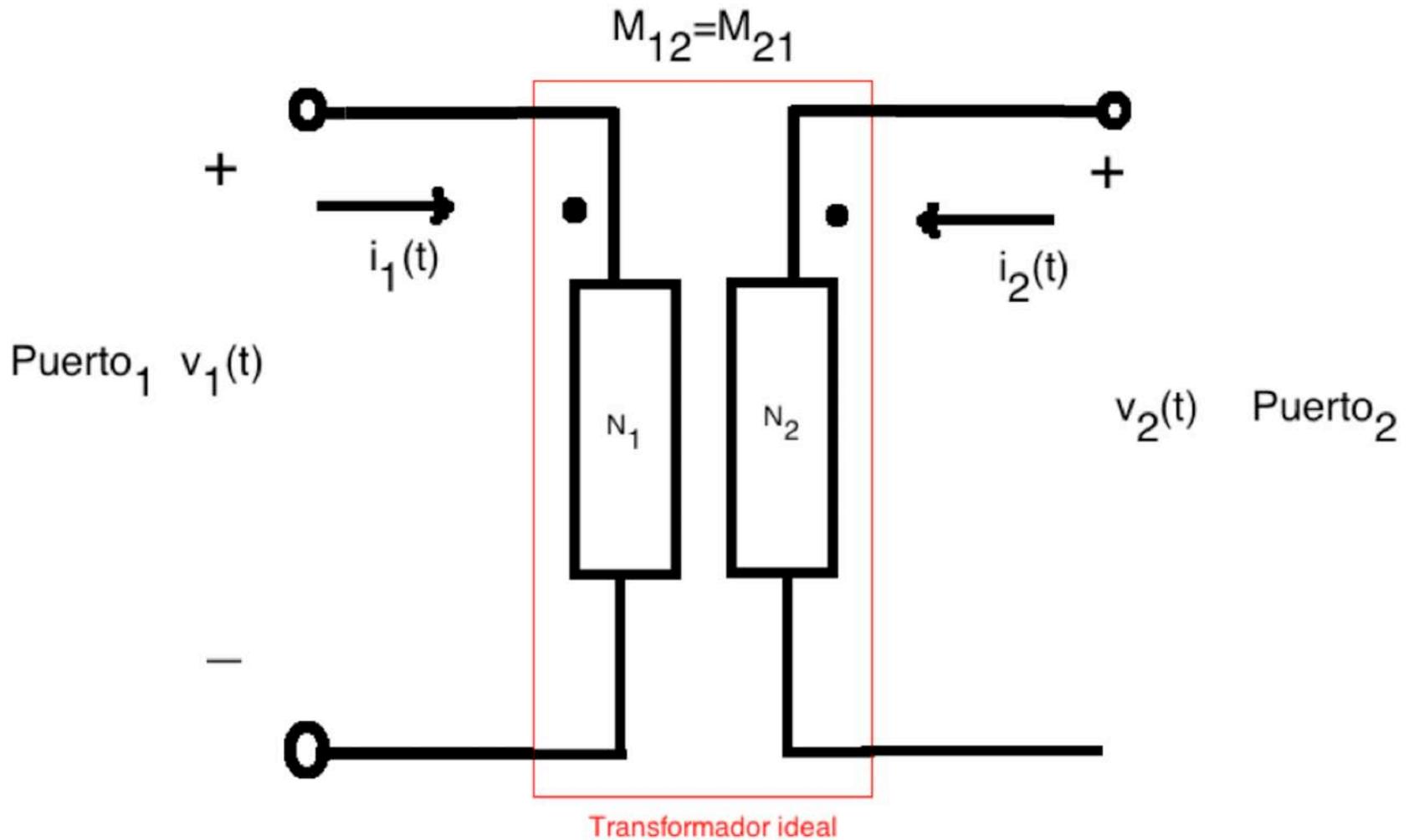
En general la inductancia mutua es la misma entre todos los pares de bobinas en un transformador práctico, por lo que hay que asumir que la inductancia mutua en un transformador es un valor único a no ser que se indique específicamente lo contrario.

El factor de acople, k_{nm} , define el nivel de acople entre las bobinas L_n y L_m :

$$k_{nm} = \frac{M_{nm}}{\sqrt{L_n L_m}}$$

Cuando $k=1$ se dice que el acople es perfecto.

La forma mas simple del transformador es el transformador monofásico, que es una red de dos puertos con dos bobinados acoplados magnéticamente; el transformador es completamente bidireccional, aunque usualmente para propósitos de análisis se defina uno de los puertos como el primario (o puerto de entrada) y el otro como “secundario” (o puerto de salida).



Estructura del transformador monofásico básico con inductancias ideales.

Además de las ecuaciones desarrolladas para los circuitos inductivos en general, para definir el comportamiento del transformador es necesario emplear la Ley de Faraday:

$$\oint_C E dt = - \frac{d\phi}{dt}$$

Esta Ley indica que el voltaje inducido en un alambre conductor es proporcional a la razón de cambio del flujo magnético que corta el alambre con respecto al tiempo.

Si en vez de un alambre único se considera un arreglo de N conductores (una bobina), se cumple:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$$

En el transformador se cumple:

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M_{21} \frac{di_2(t)}{dt}$$

$$v_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M_{12} \frac{di_1(t)}{dt}$$

$$M_{12} = M_{21} = M$$

Si el acople es perfecto el transformador es ideal.

En el transformador ideal, debido al acople perfecto entre los bobinados, se cumple que todo el flujo inducido en uno de ellos se acopla con los demás, por lo que solo existen las inductancias mutuas.

Desarrollo del modelo circuital del transformador ideal:

Dado el arreglo de dos bobinas ideales se cumple:

$$v_1(t) = -N_1 \frac{d\phi_1}{dt}$$

$$v_2(t) = -N_2 \frac{d\phi_2}{dt}$$

Si además el acople es perfecto, se cumple:

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{d\phi_1}{dt}$$

Lo que implica:

$$\frac{v_1(t)}{N_1} = \frac{v_2(t)}{N_2} \Rightarrow \frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow v_2(t) = v_1(t) \frac{N_2}{N_1}$$

Si además se asume idealidad sin pérdidas:

$$P_1 = P_2$$

$$P_1 = v_1(t)i_1(t)$$

$$P_2 = v_2(t)i_2(t)$$

$$v_1(t)i_1(t) = v_2(t)i_2(t)$$

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{i_2(t)}{i_1(t)} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow i_2(t) = i_1(t) \frac{N_1}{N_2}$$

Y también se cumple:

$$Z_1 = \frac{v_1(t)}{i_1(t)}$$

$$Z_2 = \frac{v_2(t)}{i_2(t)}$$

$$v_2(t) = v_1(t) \frac{N_2}{N_1}$$

$$i_2(t) = i_1(t) \frac{N_1}{N_2}$$

$$Z_2 = \frac{v_1(t) \frac{N_2}{N_1}}{i_1(t) \frac{N_1}{N_2}} = Z_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Por convención se marca un punto de referencia en cada bobinado como se muestra en la figura; la convención de signos es considerar que la corriente del primario es "positiva" si entra por el punto, lo que hace que la correspondiente "corriente positiva" en el secundario salga por el punto.



Sentido convencional de circulación de las corrientes en un transformador

Efecto del acople imperfecto.

1.- Permeabilidad finita.

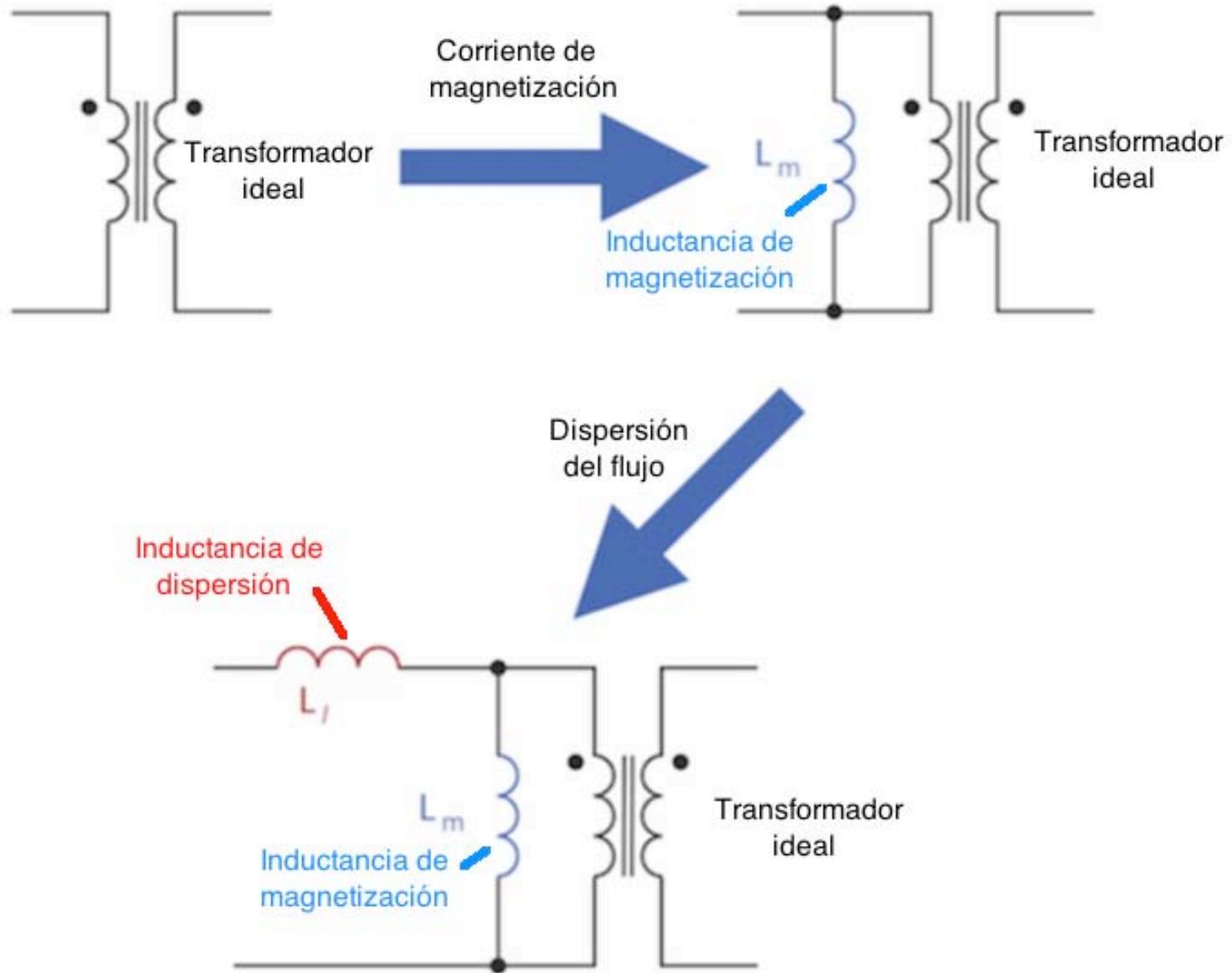
Dado que la permeabilidad del material magnético del núcleo no es infinita, se requiere que por uno de los pares de terminales del transformador circule una corriente de magnetización para mantener el flujo, aunque el otro bobinado esté abierto.

Este fenómeno se reproduce en el circuito equivalente del transformador incluyendo una bobina de magnetización del valor necesario, L_m , en paralelo con el transformador ideal.

2.- Acople no ideal por dispersión del flujo.

En la práctica resulta básicamente imposible lograr que todo el flujo inducido por un bobinado se acople completamente con el otro; inevitablemente una parte del flujo generado en cada bobinado se "dispersa" y no se acopla con el otro bobinado.

En general el efecto de la dispersión del campo se reproduce en el circuito equivalente del transformador incluyendo dos inductancias de dispersión, L_d , una en cada lado del transformador, cuyo valor al ser excitadas por las respectivas corrientes producen los correspondientes flujos de dispersión.

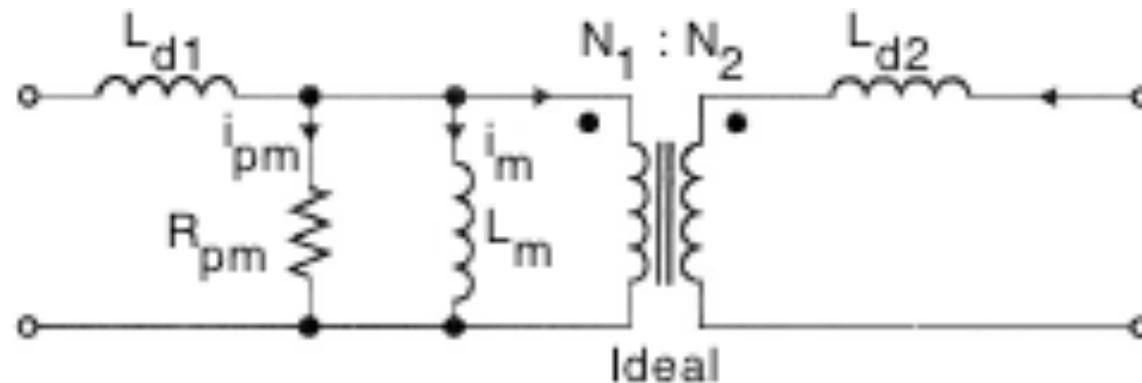


Inclusión de los elementos magnéticos no ideales en el modelo del transformador.

3.- Pérdidas en el núcleo (pérdidas de magnetización).

Las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes de Foucault son inevitables en todo núcleo magnético en el cual exista un flujo variable, como es el caso del transformador energizado (aunque el otro terminal esté abierto).

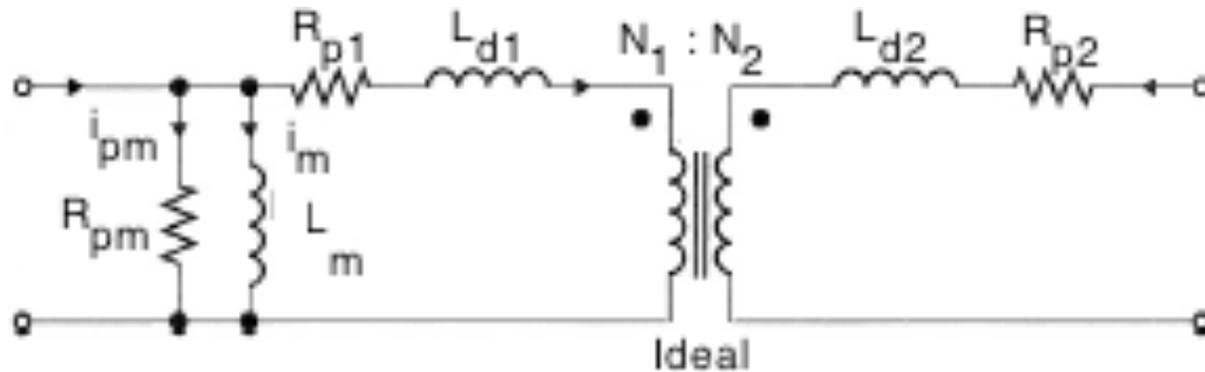
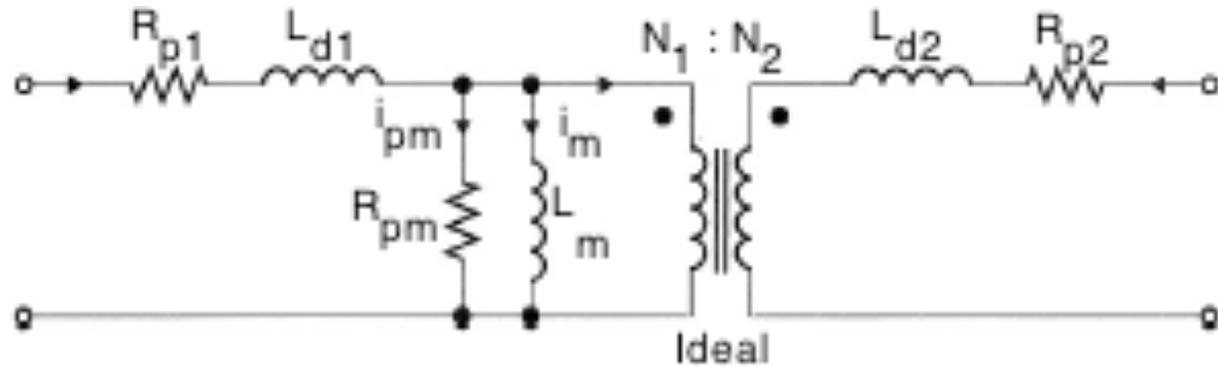
Este fenómeno se reproduce en el circuito equivalente del transformador incluyendo a la resistencia de pérdidas de magnetización, R_{pm} , en paralelo con la inductancia de magnetización.



La corriente de magnetización y la corriente de pérdidas de magnetización se sustraen de la corriente del puerto de entrada antes de que esta pase por el transformador ideal de acople, por lo que en un transformador real la corriente de salida del secundario no es exactamente la corriente entrante en el primario multiplicada por el coeficiente de transferencia (el cociente de los números de vueltas).

4.- Pérdidas en los alambres de las bobinas.

Todo conductor real tiene resistencia, y la circulación de corriente por el mismo produce pérdidas, fenómeno se reproduce en el circuito equivalente del transformador incluyendo sendas resistencias, R_{p1} y R_{p2} , del valor requerido en serie con las inductancias de dispersión.



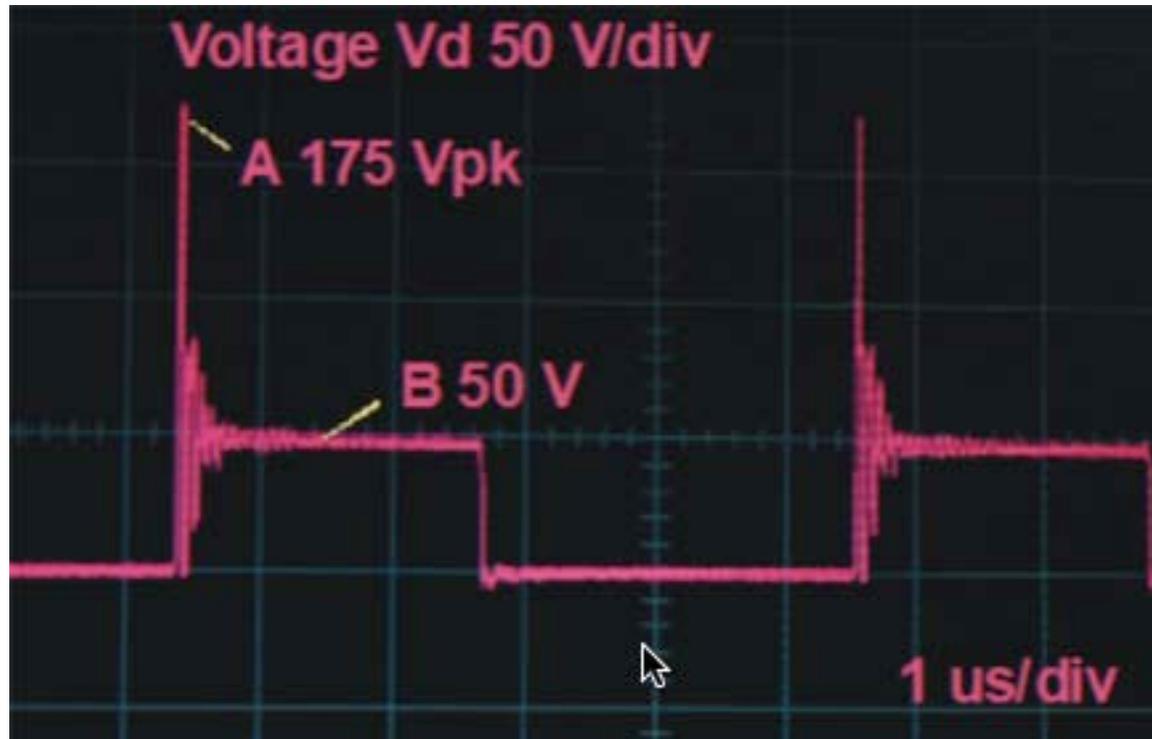
Para simplificar los cálculos, algunos autores proponen que la resistencia de magnetización y la inductancia de magnetización se coloquen directamente en paralelo con la entrada del primario, de forma que las respectivas corrientes de magnetización y de pérdidas en el núcleo

no circulen por la inductancia de dispersión y no contribuyan a las pérdidas en el cobre; usualmente a continuación de esta simplificación se procede a desprestigiar la corriente de magnetización y la de pérdidas en el núcleo.

Efecto de las inductancias de dispersión.

La existencia de las inductancias de dispersión particularmente significativa en los circuitos de alta frecuencia, en los cuales las formas de onda aplicadas al transformador son en general ondas cuadradas que tienen un di/dt elevado.

En estas condiciones la interacción de las ondas cuadradas con las inductancias producen sobre picos de voltaje muy altos, lo que puede causar problemas en el equipo.



Oscilograma con un ejemplo de sobre tensiones producidas por la interacción entre una onda cuadrada y la inductancia de dispersión de un transformador.

Cálculo de las inductancias de dispersión, transformador para alta frecuencia:

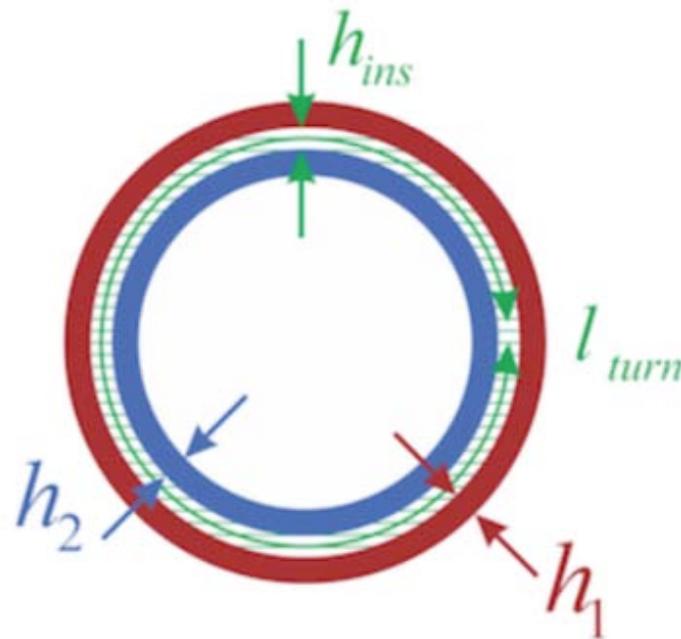
Calcular desde primeros principios el valor de las inductancias de dispersión en cualquier circuito magnético con bobinados acoplados no es un problema trivial; en primera aproximación, para un transformador donde las bobinas están superpuestas, se puede simplificar el problema asumiendo que todo el campo de dispersión está fuera del núcleo magnético, concentrado en el espacio ente las dos bobinas.

En estas condiciones el campo de dispersión resulta ser similar al campo producido en una bobina con núcleo de aire, para la cual se cumple que su inductancia, L , es:

Donde n es el número de vueltas de la bobina, A es su sección transversal y l es la longitud de la misma.

$$L = \frac{\mu_0 n^2 A}{l}$$

En el caso del transformador el problema se complica porque existen dos bobinas concéntricas y el campo está en primera aproximación confinado al espacio entre las dos bobinas.



Distribución del campo de dispersión visto desde un extremo de las bobinas

En la figura se tiene que h_1 es el espesor de la bobina externa, h_2 el espesor de la bobina interna, h_{ins} es el espesor del espacio entre las dos bobinas, generalmente ocupado por el aislante del cableado, y l_{turn} es la longitud promedio del espacio libre entre las bobinas.

En estas condiciones, el área A de la zona ocupada por el campo de dispersión se puede aproximar a:

$$A = l_{turn} \left(\frac{1}{3} h_1 + \frac{1}{3} h_2 + h_{ins} \right)$$

Para minimizar la inductancia de dispersión se debe:

a.- Bobinar los dos arrollados en forma concéntrica, llegando incluso a intercalar las capas de bobinado en caso de bobinas multicapas.

- b.- Buscar como objetivo de diseño que el número de vueltas, el espesor de los arrollados y el grosor del aislante de los alambres sean los mínimos posibles.
- c.- Preferir bobinas "largas" (maximizar l) a bobinas "gruesas" (minimizar las h_i).

Saturación del núcleo.

Las consideraciones relativas a la saturación del núcleo presentadas al tratar las inductancias se aplican también a los transformadores, ya que los materiales magnéticos empleados en ambos tipos de componentes son básicamente los mismos.

Un transformador saturado deja de operar, y en sus puertos se pueden producir sobre-corrientes destructivas.

En general se acepta que para asegurar que el núcleo del transformador no sature se debe cumplir la siguiente relación:

$$\frac{V_s}{N} \leq 2\pi B_{sat} Af$$

Donde la alimentación es la senoide $v_s(t) = V_s \text{sen}(2\pi ft)$, B_{sat} es el flujo que causa saturación en el núcleo, A es la sección transversal del núcleo, N el número de vueltas y f es la frecuencia de operación.

Si V_s es el valor máximo de tensión que debe soportar el transformador, la mínima frecuencia de operación que asegura que el transformador no sature es:

$$f_{\text{min}} = \frac{V_s}{2\pi N A B_{\text{sat}}}$$

Dado que en general el transformador esta pensado para trabajar exclusivamente en AC, en principio debe evitarse las configuraciones circuitales que fuercen la circulación de corriente DC por cualquiera de los bobinados del transformador.

¿Diseño o selección del transformador de línea:

Idealmente es posible que cada equipo puede ser optimizado si el transformador de línea se diseña específicamente, pero salvo cuando se está considerando la fabricación en serie de un número considerable de equipos del mismo tipo, o se trata de transformadores de muy alta potencia, es más económico en tiempo, esfuerzo de diseño e incluso precio, ajustar el diseño para emplear uno de los transformadores estándar ofrecidos por múltiples fabricantes.

Normalmente los catálogos de transformadores de baja potencia ofrecen versiones con la tensión de entrada normalizadas a los valores estándar de 120Vrms o 220Vrms, en configuraciones de uno o dos primarios y uno o varios secundarios con una serie de tensiones también estandarizadas para aplicaciones que requieren tensiones AC que permiten obtener tensiones rectificadas del orden de los 5V, 12V, 15V, 24V ó 48V DC que son de uso común en los diseños electrónicos.

Cuando es necesario diseñar el transformador, el conjunto de ecuaciones básicas de diseño es el siguiente (las ecuaciones consideran magnitudes en el sistema CGS de unidades, donde 10.000 Gauss=1 Tesla):

$$E = \frac{2\pi f N a B}{\sqrt{2}} 10^{-9}$$

Donde: E es la tensión RMS del voltaje de entrada (V).

f es la frecuencia en Hz

N es el número de vueltas del bobinado.

a es el área de la sección transversal del núcleo (cm²)

B es el valor pico de la densidad de flujo deseada en el diseño en Gauss

$$N = \frac{E10^8}{4.44 fBa}$$

$$B = \frac{E10^8}{4.44 fNa}$$

$$a = \frac{E10^8}{4.44 fBN}$$

Adicionalmente:

$$P = \frac{\sqrt{2}}{2} JfWaB$$

Donde P es la potencia aparente en Volt-amperes (VA)

W es el área de la ventana de arrollado

J es la densidad de corriente.

Tabla de las características magnéticas de aceros al silicio.

Material	Type See Note (1)	Nominal Silicon %	Approx. Permeability μ (3)	Max. Recommended Operating Flux Density B	Usage
M-4, M-5, M-6	CRGO	2.8-3.5	15,000	17 kilogauss but magnetizing current rises rapidly over 15 kilogauss	Highest efficiency power transformers
M-7, M-8	CRGO	2.8-3.5	10,000	17 kilogauss but magnetizing current rises rapidly over 15 kilogauss	Large generators and power transformers
M-14	CRNO	4.0-5.0	8,500	14 kilogauss	Power and distribution transformers, high eff. rotating machines
M-15	CRNO	2.8-5.0	8,000	13 to 14 kilogauss	Transformers requiring low core loss and excellent permeability
M-19	CRNO	2.5-3.8	7,500	12 to 13 kilogauss	Communication transformers and reactors
M-22	CRNO	2.5-3.5	7,500	12 kilogauss	Cores of high reactance, intermittent duty transformers
M-27	CRNO	1.7-3.0	7,000	10 to 11 kilogauss	Small transformers operating at moderate induction
M-36	CRNO	1.4-2.2	<7,000	10 kilogauss	Used extensively for rotating machines
M-43	CRNO	0.6-1.3	<7,000	10 kilogauss	Fractional HP motors and relays
M-45	CRNO	0.0-0.6	<7,000	10 kilogauss	Fractional HP motors and relays
M-50	CRNO	0.0-0.6	<7,000	10 kilogauss	Intermittent operating apparatus and pole pieces

- Note 1: CRGO = Cold rolled, grain oriented, and CRNO = cold rolled, non oriented.

En primera aproximación, una vez definido el tamaño del transformador con las ecuaciones anteriores, hay que proceder a definir la relación de transformación trabajando con el modelo del transformador ideal: en base al cociente entre la tensión deseada en la carga (tensión de salida del secundario) y la tensión de alimentación primaria, se calcula el valor de la relación ideal de transformación, N_1/N_2 lo que usualmente requiere un proceso de aproximaciones sucesivas con varias iteraciones y, dada la corriente de entrada que requiere el circuito que va a ser alimentado, que será la corriente del secundario del transformador, I_2 , se calcula la corriente en el primario y la potencia nominal del transformador que se desea, datos iniciales a emplear en el diseño detallado del mismo.

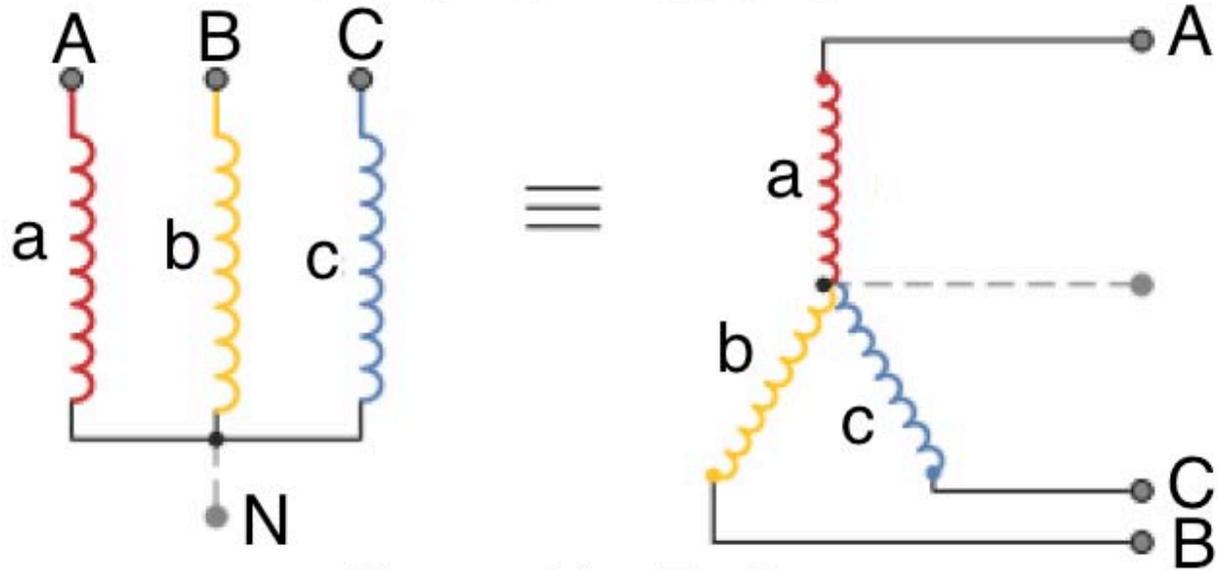
Transformadores trifásicos.

En el estado actual de la tecnología el sistema de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica es mono-frecuencial a 60Hz, y trifásico.

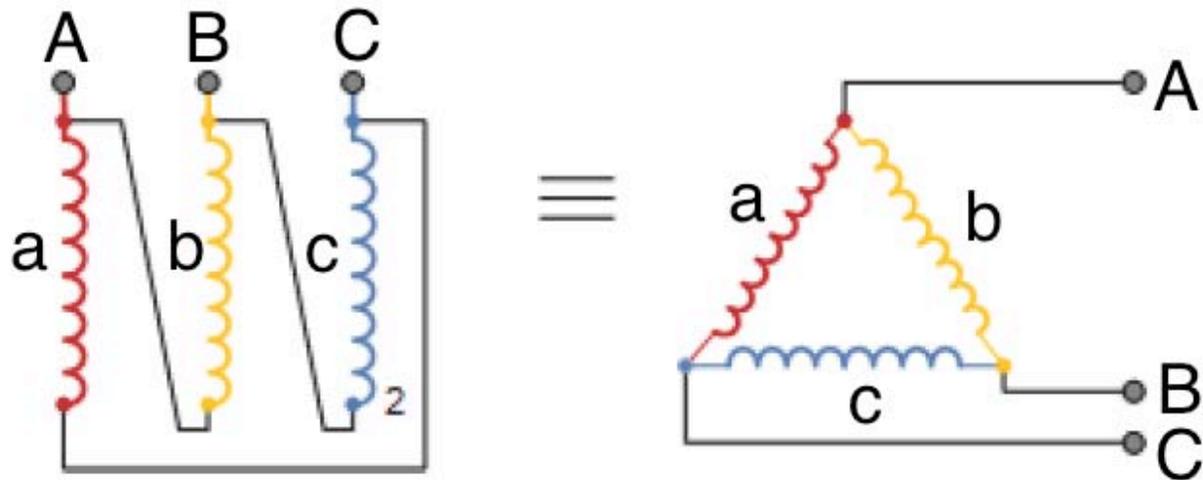
Las formas básicas de conexión de las líneas tanto al primario como al secundario de los transformadores trifásicos son dos: conexión en estrella (también llamada en "Y") o conexión en delta.

En la conexión en estrella el punto central, o "neutro" del sistema puede dejarse "flotando", esto es sin conexión adicional, o puede conectarse a un conductor adicional. el conductor de neutro, dando origen a un sistema con cuatro conductores.

Conexión Estrella



Conexión Delta



La selección de una de las dos conexiones posibles en el primario no presupone cual es la selección en el secundario, así que existen cuatro configuraciones básicas posibles:

Configuración del primario		Configuración del secundario	
Delta		Delta	
Delta		Estrella	
Estrella		Delta	
Estrella		Estrella	

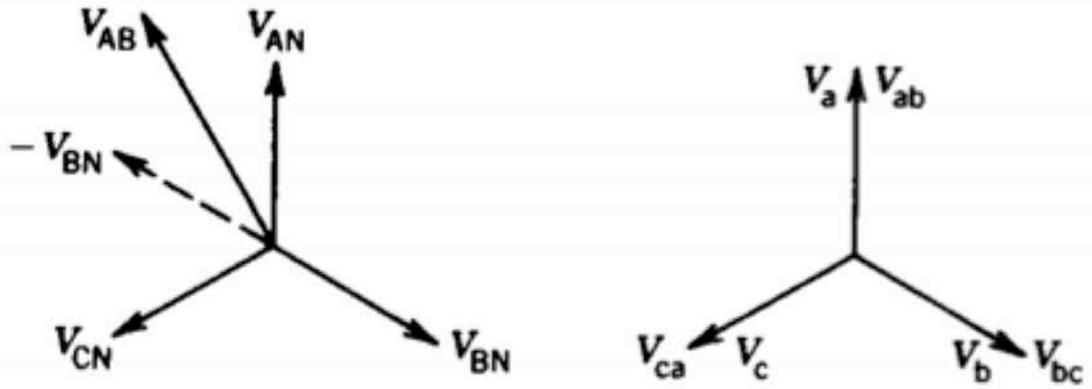
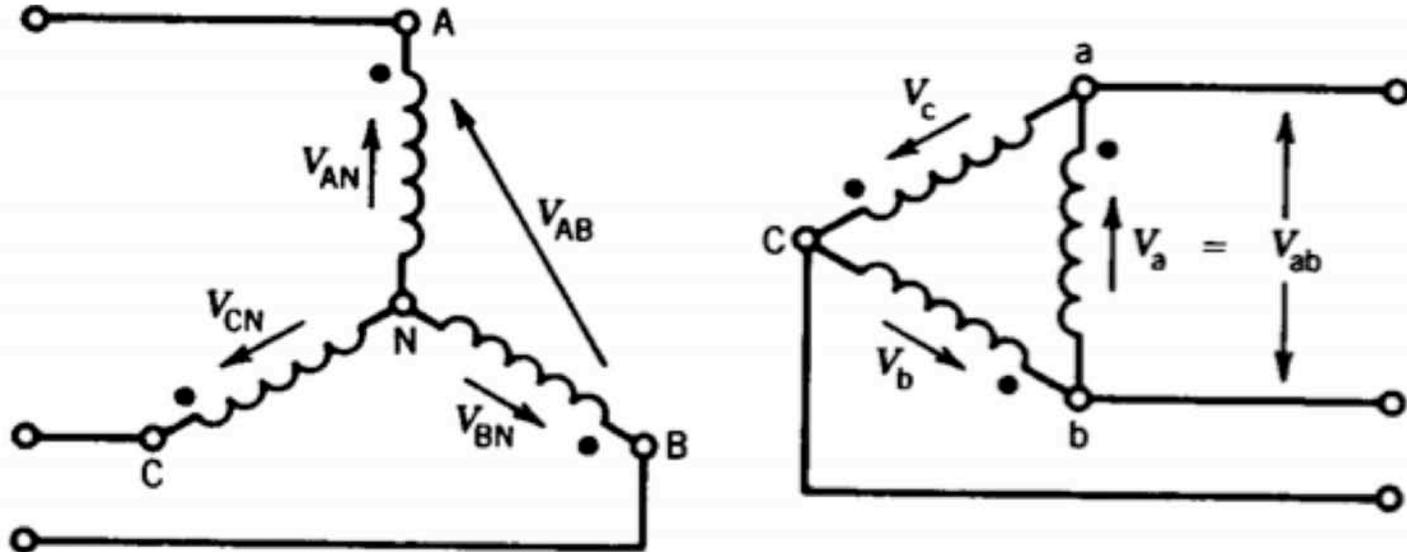
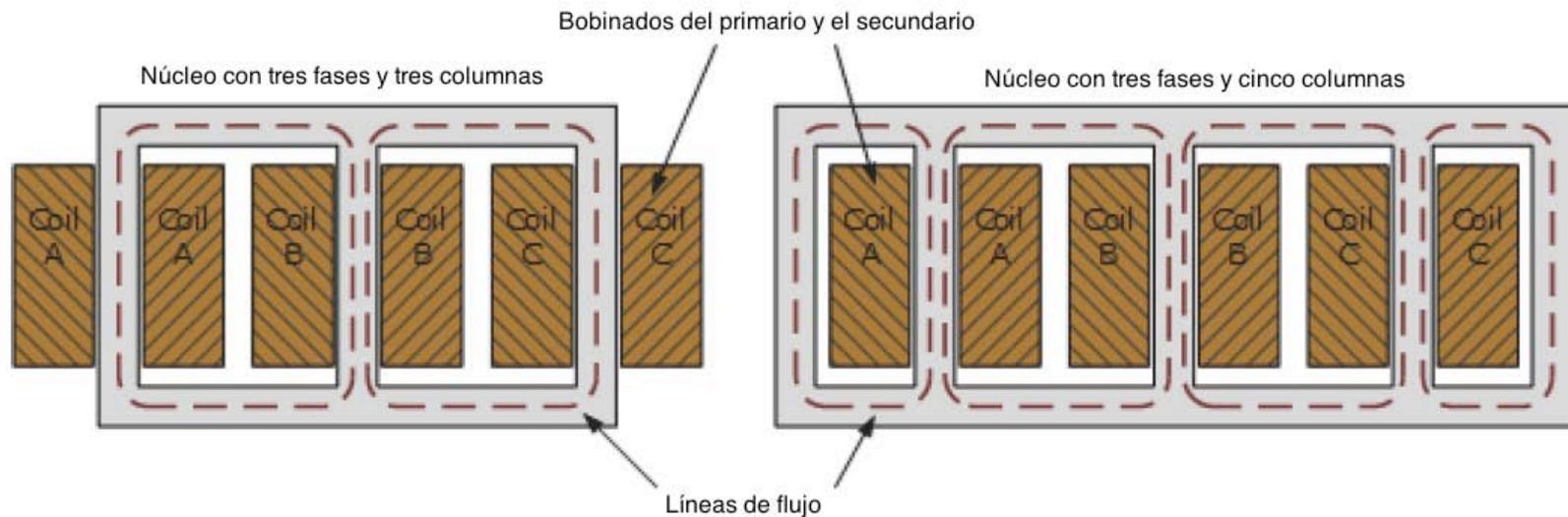


Diagrama fasorial de las relaciones entre primario y secundario en un transformador trifásico Y-Δ



Posibles arreglos para implementar un transformador trifásico en un solo núcleo.

El transformador trifásico se puede implementar con tres transformadores monofásicos interconectados, pero lo normal en la industria es emplear un solo núcleo con una de las dos posibles configuraciones mostradas en la figura.

en ambos casos las bobinas del primario y el secundario de cada fase están bobinadas en forma concéntrica.