

# 1. SINTESIS

En este trabajo se sigue el mismo plan general, es decir cada capítulo comienza con una introducción sobre el tema y después se desarrolla el mismo.

En el capítulo 2 se describe el objetivo de la tesis, así como la justificación, metodología y la revisión bibliográfica.

En el capítulo 3 se trata el tema de los circuitos magnéticos aquí se hace referencia a las leyes fundamentales del electromagnetismo, como son la ley de Ampere, la ley de Faraday y la ley de Lenz entre otras, también se definen los términos de flujo magnético, densidad de flujo, fuerza magnetizante, permeabilidad magnética y reluctancia magnética, se hace una comparación entre los imanes naturales y los artificiales y los métodos de fabricación de los imanes artificiales, se ven las distintas clases de materiales magnéticos incluyendo los de polvo de hierro utilizados en frecuencias de microondas. Por último se ven las pérdidas en los materiales magnéticos y se analiza el lazo de histéresis.

En el capítulo 4 se trata el tema de los transformadores, aquí se hace referencia a la conversión de energía en un transformador, las condiciones generales de servicio, condiciones especiales de servicio, clasificación de transformadores, especificaciones eléctricas, especificaciones de nivel de ruido, polaridad de transformadores, designación de terminales, relación de transformación, bancos estrella-delta, y bancos delta-delta.

Mediante las pruebas de vacío y de corto circuito se obtienen los 6 parámetros del transformador. Se ve la forma de conectar tres transformadores monofásicos para formar uno trifásico. Y por último se ven los materiales empleados en la construcción de transformadores comerciales, así como los tipos de transformadores de potencia de alumbrado etc. También se muestran fotografías del transformador tipo poste y el de pedestal entre otros.

En el capítulo 5 se estudian los motores de inducción monofásicos del tipo de rotor jaula de ardilla, aquí se ve la construcción del motor, el principio de funcionamiento, las ecuaciones matemáticas que rigen la velocidad del motor, también se hace una comparación entre los distintos tipos de arranque para estos motores auxiliándonos de las curvas par-velocidad.

En el capítulo 6 se hace referencia a los motores de inducción trifásicos y se comienza haciendo notar las ventajas que los trifásicos tienen en una comparación con los motores monofásicos, se analiza el campo magnético giratorio que se produce en estos motores, se hace referencia a las pruebas de rotor bloqueado y de vacío para obtener el circuito equivalente de parámetros de un motor trifásico. Se ven los diagramas de conexiones para motores de 3, 6, 9 y 12 terminales así como el desarrollo de un devanado trifásico imbricado.

Por último se trata acerca de una perspectiva sobre las tendencias en los motores de inducción trifásicos.

En el capítulo 7 le toca el turno a las máquinas eléctricas más antiguas usadas por el hombre, las máquinas de corriente directa. Aquí se comienza con la comparación entre los voltajes de corriente alterna y de corriente directa, se verá que las máquinas de corriente directa son de construcción más compleja que la de los motores de corriente alterna y por lo tanto requieren de un mantenimiento más continuo. Se verán también las máquinas de autoexcitadas y las excitadas por separado así como los tipos de máquinas autoexcitadas (serie, shunt y compound).

Se analizarán las curvas par-velocidad para los distintos tipos de motores y las curvas de voltaje contra corriente de carga para los distintos tipos de generadores.

Se analizará la potencia, par, velocidad y rendimiento de estas máquinas así como consideraciones técnicas de fabricante como son elevaciones de temperatura y sobrecargas.

Por último se describirá el freno Prony que es un método para probar motores eléctricos y determinar su potencia y par eléctrico.

En el capítulo 8 las máquinas sincrónicas serán vistas desde el punto de vista primeramente de generadores, luego como motores y por último como capacitores sincrónicos.

Como generadores se verán los tipos de máquinas, su construcción, la forma de onda del voltaje generado así como las ecuaciones matemáticas que rigen el funcionamiento de estas máquinas.

Como motores se verá su aplicación práctica, precauciones y métodos de arranque y la construcción del devanado amortiguador y los alcances en cuanto a mover cargas se refiere.

Y como capacitores sincrónicos se verá que es una alternativa bastante buena para la corrección de factor de potencia en la industria.

Por último se hablará sobre los motores sincrónicos de imán permanente sin escobillas y de los motores supersincrónicos.

En el capítulo 9 se hablará de los motores de corriente directa sin escobillas mejor conocidos en Inglés como los “Brushless D.C. Motor”, aquí se describirá su funcionamiento y construcción, así como los diferentes tipos de diseñarlos.

Se verá el rango de alcance en cuanto aplicaciones, voltajes y pares de trabajo para esto anexando hojas técnicas de los fabricantes de estos motores.

También se verán ejemplos de aplicaciones en la industria aeronáutica y espacial.

En el capítulo 10 se analizará uno de los motores más empleados en la actualidad por máquinas electrónicas como impresoras, copiadoras, sistemas de satélite, etc. Nos referimos al motor de pasos mejor conocido en Inglés como “Stepping Motor”. Aquí se verá la forma en que se construyen, las aplicaciones y alcance de éstas así como la manera de funcionar a base de “drivers” electrónicos.

Se verán las diferencias entre estos motores y los convencionales de corriente directa, las características más comunes, y los diferentes tipos de motores de paso.

Se incluyen también hojas técnicas del fabricante con diversos circuitos integrados que son los “drivers” que mueven a estos motores.

En el capítulo 11 se verán las tres técnicas más empleadas en el control electrónico de motores, se explicarán los conceptos de control de velocidad y regulación de velocidad que a veces se confunden por parte del estudiante, también el concepto de la retroalimentación y los dispositivos utilizados para obtener esta señal.

También se analizarán por separado los controles de velocidad para motores de corriente alterna y los controles de velocidad para los motores de corriente directa

Se describirá primero los reguladores de velocidad de corriente alterna llamados inversores. Aquí se verán los tipos, componentes, funcionamiento y aplicaciones el inversor tipo vector así como los diagramas electrónicos asociados con el mismo, diagrama de conexiones y modelos de mercado. También se analizará el método PAM y PWM así como los modernos módulos hechos a base de transistores bipolares de compuerta aislada (IGBTs).

En los reguladores de velocidad de corriente directa se verán sus componentes, funcionamiento, métodos de control, tipos de “drives” utilizados en la industria, convertidores de 1, 2 y 4 cuadrantes y las aplicaciones.

En el capítulo 12 se hacen las recomendaciones a las personas que puedan usar esta guía de estudio para la obtención de información, así como las conclusiones que el autor da de este trabajo.

## 2. INTRODUCCION

### 2.1 Objetivo

Proporcionar los conocimientos básicos que el Ingeniero en Electrónica debe de tener para poder analizar el funcionamiento de las maquinas eléctricas, así como también poder analizar y diseñar los controles electrónicos que se emplearan en las mismas.

Al finalizar el curso el alumno deberá de ser capaz de comprender y analizar los circuitos magnéticos, transformadores monofasicos y trifasicos, maquinas eléctricas de corriente alterna y de corriente directa, maquinas sincrónicas así como también tendrá las herramientas para el análisis y diseño de los dispositivos de control electrónicos para el control de voltajes, corrientes, potencias, velocidad etc. empleando las nuevas tecnologías en el área de electrónica como por ejemplo el uso de microprocesadores y de la electrónica de potencia del estado sólido.

también se dedica una parte del trabajo al estudio de los “Brushless d.c.” motor que es la novedad tecnológica ya que cuentan con conmutador electrónico e imanes permanentes.

### 2.2 Justificación

Mi experiencia en el área profesional y sobretodo en el área docente corrobora que en el tiempo de un semestre escolar, el dar tanta información al alumno sobre los distintos tipos de maquinas eléctricas, así como las herramientas en electrónicas necesarias para su control ha llegado a ser problemático, porque no existen muchos libros de texto que integren toda esa información.

Es por eso que se propone un texto con la cantidad y variedad de contenidos que se requieren dándoles la profundidad matemática necesaria que se requiera, así como también se proponen las practicas de laboratorio para la demostración de los temas.

Espero que esta propuesta resulte ser benéfica para elevar el nivel de imparticion de la clase.

### 2.3 Metodología

Para la elaboración del programa de clase y del texto de apoyo se tomara como base la experiencia del personal docente del Departamento de Eléctrica de FIME así como también la retroalimentación de ex-alumnos ahora ya gente involucrada en procesos industriales, afines al área de maquinas eléctricas.

También se desarrollaran las practicas de Laboratorio y se tomara como base el equipo con el que se cuenta proporcionando de antemano los resultados a obtener.

### 2.4 Revisión Bibliográfica

Se han escrito infinidad de libros sobre los temas de maquinas eléctricas, pero considero que ninguno de ellos abarcando toda la gama de motores que aquí se tratan y tampoco son lo suficientemente versátiles para hacer que el alumno conozca mediante fotografías la información de productos de mercado.

## 3. CIRCUITOS MAGNETICOS

### 3.1 Introducción

Hoy es difícil tener cierto interés en la electrónica sin que se esté interesado también, en una forma u otra, en el magnetismo o el electromagnetismo. Considérense, por ejemplo, las muchas aplicaciones del electromagnetismo en los receptores modernos de televisión con sus bocinas, imán de centrado, imanes de pureza y enfoque, yugo de reflexión y varios tipos de transformadores y reactores.

En otras ramas de la electrónica, como por ejemplo en el campo de las computadoras o instrumentos de navegación (por mencionar solo dos) esta bien establecida la importancia del magnetismo y del electromagnetismo. La industria electrónica es dependiente del apoyo prestado por las compañías que se especializan en la fabricación de materiales magnéticos y electromagnéticos, y de otros componentes.

### 3.2 Imanes naturales y artificiales

Los imanes naturales se encuentran en forma de depósitos de materiales conocidos como magnetitas, o con más frecuencia piedra imán. Esta forma de sustancia magnética se conoce desde el año 600 d.c. Cualquier otro tipo de imán es artificial. Los primeros imanes artificiales fueron hechos por contacto de piezas de hierro con magnetita. Incluso hoy, para aplicaciones menores, se pueden hacer ocasionalmente, imanes por medio del frotamiento suave de una pieza de hierro o acero con cualquier imán de que se disponga.

Si una pieza de hierro dulce se magnetiza por inducción a partir de una fuente magnética, pierde rápidamente la mayor parte de su magnetismo inducido después de que la fuente magnetizante se retira. Sin embargo, si una piedra de acero templado o hierro colado se magnetiza, el magnetismo inducido permanecerá durante un tiempo extremadamente largo.

Los materiales magnetizados que pierden rápidamente la mayor parte de su magnetismo inducido se llaman imanes *temporales*. Los que retienen su magnetismo se denominan imanes *permanentes*.

Los imanes permanentes se hacen de hierro forjado, acero templado o a partir de varios tipos de aleaciones de acero utilizados para imanes permanentes de altavoces y de medidores eléctricos.

En la figura 1 se muestra una variedad de imanes permanentes que se utilizan para hacer motores eléctricos y otros tipos de componentes eléctricos y electrónicos.

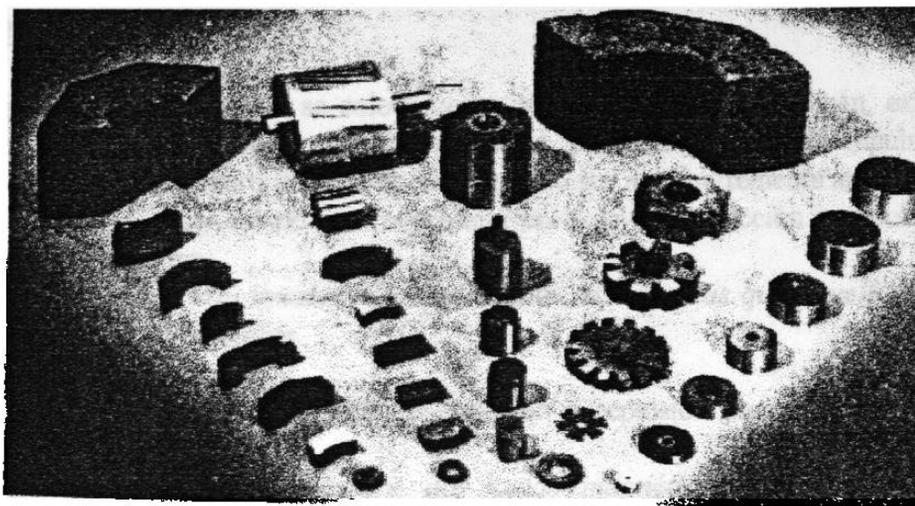


Figura 1. Dispositivos de imán permanente utilizados  
Para motores y para otras aplicaciones.

### 3.3 Materiales Magnéticos

Cuándo se habla de materiales magnéticos, normalmente la referencia es a sustancias que son fuertemente atraídas por imanes o campos magnéticos. Sustancias de este tipo se denominan *ferromagnéticas* o *ferrimagnéticas*. Las sustancias ferromagnéticas son definidas de acuerdo con los diferentes tipos de hierros y aceros, incluyendo los materiales de núcleos de polvo de hierro, que se utilizan en la fabricación de algunas bobinas de radiofrecuencia.

Las sustancias ferrimagnéticas son las ferritas y otros óxidos que se utilizan como materiales para los núcleos de bobinas que operan a la frecuencia de las microondas, en transformadores de pulsos de alta frecuencia de las microondas, en transformadores de pulsos de alta frecuencia como el transformador de salida horizontal del televisor, y en la memoria de las unidades de conmutación de las computadoras de alta velocidad.

Los materiales magnéticos se pueden clasificar como si fueran magnéticamente *blandos* o magnéticamente *duros*. Los materiales magnéticamente blandos son los utilizados en los núcleos de potencia y en los transformadores y reactores de audiofrecuencia. Los materiales magnéticamente duros se utilizan para construir imanes permanentes.

Elementos como el aluminio, cromo, manganeso y el aire, que incluso durante la aplicación de campos magnéticos intensos tienen solamente un efecto de atracción muy débil y raramente detectable, se llaman *paramagnéticos*. Otros como el bismuto, antimonio, cobre, plata y algunos mas, en los cuales la aplicación de campos magnéticos intensos tiene un efecto repulsivo difícilmente perceptible, se llaman *diamagnéticos*. La mayor parte de los *materiales* con excepción de aquellos que son ferromagnéticos o ferrimagnéticos, son comúnmente denominados no magnéticos. Los materiales *no magnéticos* si permiten que el magnetismo pase a través de ellos, pero jamás llegan a magnetizarse intensamente.

### 3.4 Polos Magnéticos

Cuando el polo norte de un imán se coloca cerca del polo norte de otro imán, existe entre ellos una fuerza de repulsión. De la misma manera, existe una fuerza de repulsión entre dos polos magnéticos sur, pero un polo norte y un polo sur son fuertemente atraídos.

Esta característica del magnetismo esta expresada en la ley de atracción y repulsión magnética, la cual establece que:

*Cuando los polos magnéticos son iguales, se repelen entre sí, mientras que aquellos que son diferentes se atraerán mutuamente.*

La ley de Coulomb define que la magnitud de atracción o repulsión puede establecerse como sigue:

*La fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los polos, y directamente proporcional al producto de las intensidades de los polos.*

### 3.5 El Polo Magnético Unitario

Para utilizar la ley de Coulomb durante el cálculo, se debe tener algún método específico para designar con precisión la intensidad particular de un polo magnético, en términos de alguna unidad. Esta unidad es el polo unitario, derivado de la ley de Coulomb y basado en el concepto de que dos polos magnéticos de igual intensidad se pueden seleccionar para que cada uno de ellos se repela con respecto al otro con la fuerza de una dina, cuando la distancia entre los polos es exactamente de un centímetro. Por ello, a partir de este concepto, se obtiene la siguiente definición de polo magnético unitario:

*El polo magnético unitario es de tal intensidad que repelerá a uno exactamente similar, con la fuerza de una dina, cuando la distancia entre los polos es de un centímetro.*

De la ley de Coulomb se puede obtener la siguiente ecuación, para calcular la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos:

$$F = \frac{M_1 * M_2}{d^2}$$

*En donde:* F = fuerza entre los polos, dinas  
 M<sub>1</sub> = intensidad del primer polo, polos unitarios  
 M<sub>2</sub> = intensidad del segundo polo, polos unitarios  
 d = distancia entre los polos, cm

### 3.6 El Campo Magnético De La Tierra

Por lo que se conoce sobre polos magnéticos, es evidente que la única razón por la cual la brújula magnética funciona, como ya se sabe, es que la misma Tierra forma un imán muy grande con uno de sus polos en el norte, y con el otro precisamente opuesto a él, en el sur. El polo magnético de la Tierra que se encuentra localizado en el Norte *geográfico*, es realmente un polo *sur magnético*.

### 3.7 Electromagnetismo

Si una brújula se acerca a un conductor de corriente continua, como se muestra en la fig.2 la aguja de la brújula en la dirección mostrada. Si la corriente a través del conductor se invierte, la aguja de la brújula girará y apuntará en la dirección opuesta.

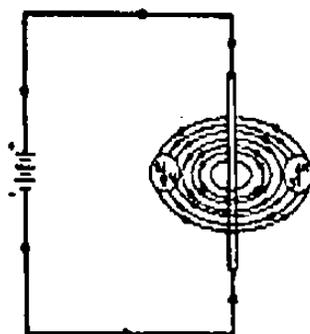


Figura 2. Campo magnético rodeando un Conductor de corriente

Por consiguiente, puede observarse que un conductor de corriente eléctrica está circundado por un campo magnético.

Se dice que el campo magnético sale del imán a través de su polo norte, y entra al imán a través de su polo sur. En realidad las líneas del campo no se mueven. En vez de ello su dirección está definida como la dirección en que un polo norte unitario se movería si se colocara en el campo. De hecho, no existe un polo norte unitario en la vida real, pero es un concepto imaginario útil para definir la dirección de los campos magnéticos.

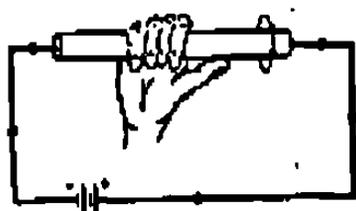
### 3.8 La Regla De La Mano Derecha En Campos Magnéticos Alrededor De Alambres.

Para determinar la dirección de un campo magnético que circunda cualquier conductor que conduce corriente se deberá utilizar la siguiente regla ilustrada en la fig. 3.

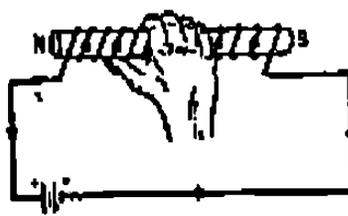
**REGLA:** *Tómese el alambre en la mano derecha y haga que el dedo pulgar apunte en la dirección convencional de la corriente (es decir, corriente de positivo a negativo) que está circulando a través del alambre. Los demás dedos, entonces, apuntarán en la dirección correspondiente al campo magnético o líneas de fuerza, que rodean al alambre.*

### 3.9 La Regla De La Mano Derecha Para Bobinas.

Cualquier bobina o solenoide por la que circule una corriente presenta efectos magnéticos, y los efectos magnéticos son siempre de naturaleza bipolar. Cualquier bobina por la que circula una corriente deberá tener siempre dos polos, el norte y el sur. Para determinar la polaridad magnética de una bobina por la que circula una corriente, se utiliza la regla de la mano derecha para bobinas ver fig. 8.



**Figura 3.** Regla de la mano derecha para determinar la dirección del campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente. (Se muestra el sentido convencional de la corriente).



**Figura 4.** Regla de la mano derecha para determinar la polaridad magnética de una bobina.

**REGLA:** *Tómese la bobina en la mano derecha y hágase que los dedos apunten en la dirección convencional de la corriente alrededor de la bobina; el dedo pulgar apuntará entonces en la dirección del polo norte de la bobina.*

### 3.10 Unidades De Medición En Magnetismo

Las unidades básicas de medición en electricidad son los amperes, los volts y los ohms. Sería muy conveniente que solamente fueran tres unidades básicas en magnetismo, pero desafortunadamente este no es el caso. Contrariamente, existen varios sistemas de medición, y no hay un sistema universal único. (Se ha sugerido que el sistema mks sea el sistema universal de medición lógico en magnetismo, pero hasta este momento la literatura de los fabricantes estadounidenses no define a sus productos en términos exclusivos del sistema mks.)

Una manera de entender la gran cantidad de unidades para mediciones magnéticas consistiría en describir todas las unidades en un sistema particular. Por ejemplo, el método para la medición del flujo, la densidad de flujo, la fuerza magnetomotriz, etc., en el sistema cgs podría describirse con cuidado, y posteriormente al finalizar la exposición, se podría incluir una tabla de conversión, para cambiar del sistema cgs a cualquier otro sistema.

Otro método consiste en describir cada uno de los términos y su unidad de medición en el sistema que describe ese término en particular de la manera más sencilla. De esta manera, se medirá la unidad de *flujo* en términos correspondientes al sistema cgs, y la unidad de la

fuerza magnetomotriz en términos correspondientes al sistema *mks*. Después se incluirá una tabla para convertir de un sistema a otro.

### 3.11 Flujo Magnético ( $\phi$ )

Los campos magnéticos existen en las líneas de fuerza, y se denomina flujo. En el sistema cgs, a cada línea individual del flujo se le denomina *maxwell*. Si hay tres líneas de flujo, se dice que la cantidad de flujo es de tres maxwell en el sistema cgs, mientras que en sistema inglés simplemente se define como tres *líneas*. Cuanto más grande sea el número de líneas de flujo, mas fuerte será el campo magnético.

Las líneas son imaginarias, y el concepto de líneas de flujo probablemente viene desde la aparición del popular experimento en el que las partículas de hierro limado tienden a aliniarse por si mismas en un grupo de líneas, como se muestra en la figura la figura 5. Estas son líneas con intensidad magnética idéntica.

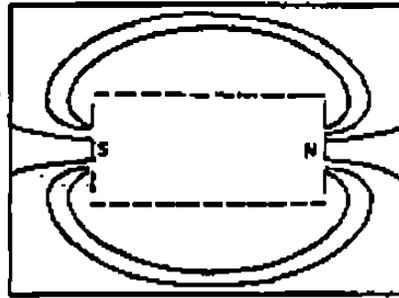
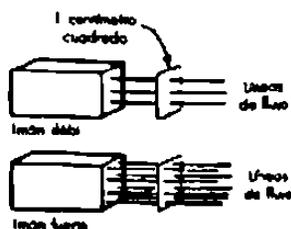


Figura 5 . Disposición de limaduras de hierro sobre una hoja de papel que cubre una barra magnética.

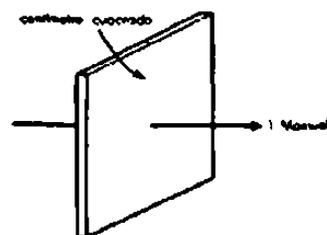
### 3.12 Densidad De Flujo (B)

Si una línea de flujo pasa perpendicularmente a través de un centímetro cuadrado de esta pagina, existirá por lo tanto cierta cantidad de fuerza del campo magnético. Si *dos* líneas de flujo pasan a través del mismo centímetro cuadrado, la fuerza del campo será por consiguiente, el doble del valor del flujo correspondiente a cuando se tenia solamente una línea. Si tres líneas de flujo pasan a través de ese mismo centímetro cuadrado, la fuerza del campo será tres veces mayor, y así sucesivamente.

Fácilmente se puede comprender que al pasar tres líneas de flujo sobre un centímetro cuadrado se producirá una concentración de campo magnético cuya fuerza será mayor que la producida por dos líneas de flujo que pasaran por el mismo centímetro cuadrado. Una forma importante para definir la fuerza de un campo magnético es, por consiguiente, en términos de numero de líneas de flujo que pasan a través de un área de un centímetro cuadrado. Es obvio que un imán muy fuerte hará que más líneas de flujo pasen a través de un centímetro cuadrado de área , que las originadas por un imán débil. Este efecto se ilustra en la figura 6.



**Figura 6.** El imán fuerte Causará más líneas de flujo Por centímetro cuadrado que el débil.



**Figura 7.** Ilustración de un gauss de densidad de flujo.

El número de líneas de flujo que pasan a través de un centímetro cuadrado de área se denomina densidad de flujo. En el sistema cgs, la unidad de la densidad de flujo es el *gauss*. Cuando un maxwell (es decir una línea de flujo) pasa a través de un área de sección transversal de un centímetro cuadrado, se dice que la densidad de flujo es igual a un gauss. En la fig. 7 se ilustra la densidad de flujo correspondiente a un gauss, que es una unidad de medición en el sistema cgs.

### 3.13 Fuerza Magnetomotriz (Fmm)

Las líneas de fuerza pueden establecerse de diferentes formas. Una de las más sencillas consiste en utilizar una corriente eléctrica. Todas las corrientes eléctricas tienen asociado un campo magnético. La fuerza que origina el establecimiento de un flujo magnético se denomina fuerza magnetomotriz. Esta puede compararse con el voltaje en electricidad, que en ocasiones se considera como la "fuerza" que produce una corriente eléctrica.

La unidad más fácil de comprender respecto a la fuerza magnetomotriz es el *amper-vuelta*. Si una corriente de un ampere circula a través de una vuelta de alambre, se dice que la fuerza magnetomotriz es de un ampere-vuelta.

La fuerza magnetomotriz siempre es igual al número de amperes de corriente multiplicado por el número de vueltas del alambre. El ampere-vuelta es una unidad de medición del sistema mks. (En el sistema cgs se utiliza el gilbert como unidad de la fmm. Un gilbert = 1.257 X ampere-vuelta).

### 3.14 Reluctancia (R)

Cuando una fuerza magnetomotriz se utiliza para establecer el flujo en un material, siempre hay una oposición al flujo. A esta oposición se le llama *reluctancia*. No hay unidades *inglesas* de medición para la reluctancia. Se ha propuesto al termino *rel*, pero no es de uso común. La reluctancia en el sistema cgs se mide *gilberts por maxwell*, pero no hay un nombre común para la unidad de la reluctancia, y no hay un nombre para ella en el sistema mks.

En circuitos magnéticos, algunas veces es más conveniente conocer la facilidad con que se establecen las líneas de flujo en un material, mas que la oposición que el material ofrece al establecimiento del flujo. La facilidad con la cual las líneas de flujo pueden establecerse en un material se denomina *permeabilidad* del material y es el reciproco de la reluctancia.

### 3.15 Comparación de Circuitos Eléctricos y Magnéticos

Existe una similitud entre las unidades eléctricas y magnéticas. En la tabla siguiente se listan los términos eléctricos más importantes y los términos magnéticos comparativos.

Comparación de términos eléctricos y magnéticos

Unidades eléctricas	Unidades magnéticas
Corriente eléctrica $I$	Flujo magnético $\phi$
Fuerza electromotriz $E$	Fuerza magnetomotriz, fmm
Resistencia $R$	Reluctancia $R$
Conductancia $G$	Permeabilidad $P$

Hay ciertos conceptos acerca de los circuitos eléctricos que son bastante diferentes de los circuitos magnéticos, lo cual deberá recordarse. En un circuito eléctrico, toda la corriente está normalmente confinada al conductor que la está conduciendo. En un circuito magnético, algunas de las líneas de flujo dejan realmente el circuito a lo largo de la ruta, de tal manera que es más difícil calcular la cantidad de flujo en cierto punto, en comparación con él calculo de corriente en un circuito eléctrico.

La resistencia de un alambre o resistor es de un valor fijo para un circuito en particular en un intervalo de corrientes para el cual se pretende utilizar. En un circuito magnético, la cantidad de reluctancia es dependiente de la cantidad de flujo presente. Cuanto mayor sea la cantidad de flujo presente en una pieza de hierro, mayor será la reluctancia que se llegue a tener, es decir, mayor será la oposición a un incremento en el flujo.

En los circuitos eléctricos hay materiales aislantes que ofrecen la gran oposición a la circulación de corriente. En los circuitos magnéticos no hay materiales que impidan el establecimiento del flujo. Para evitar la entrada del flujo de las líneas magnéticas a un área en particular, el único mecanismo que puede emplearse consiste en la utilización de una trayectoria con un valor muy bajo de reluctancia alrededor de esa área.

En estos casos, casi todas las líneas de flujo, seguirán la trayectoria de más baja reluctancia, y por ello no entrarán en la región protegida.

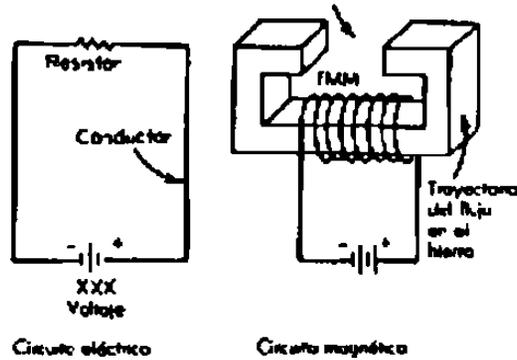


Figura 8. Comparación de un circuito eléctrico y uno magnético.

Un resistor en el circuito eléctrico ofrece una oposición a la circulación de la corriente. En el circuito magnético, el espacio de aire ofrece una oposición muy superior a la ofrecida por la trayectoria del hierro para el establecimiento del flujo. Por lo tanto, puede pensarse que el espacio o ranura de aire equivale a un resistor en el circuito magnético.

UNIDAD	CGS	MKS	INGLÉS
Flujo	Maxwell	Webers	Líneas
Fuerza magnetomotriz	Gilberts	Ampere-vueltas	Ampere-vuelta
Fuerza magnetizante	Oersteds	Ampere-vuelta por metro	Ampere-vueltas por pie
Reluctancia	Gilberts por maxwells	Ampere-vueltas por weber	Sin unidades (se ha sugerido el rel)
Densidad de flujo	Maxwells por centímetro cuadrado	Webers por metro cuadrado	Líneas por pulgada cuadrada

### FACTORES DE CONVERSION

Pulgadas = centímetros x 2.54

Maxwells x  $10^8$  = webers

Gilberts x  $10/4\pi$  = ampere-vuelta

Oersteds x  $10^3/\pi$  = ampere-vuelta

Gauss (maxwells por centímetro cuadrado) x  $10^{-4}$  = webers por metro cuadrado

1 gamma =  $10^{-5}$  gauss

Tabla 1. Conversión de unidades magnéticas en distintos sistemas

### 3.16 Fuerza Magnetizante (H=Intensidad De Campo Magnético)

La circulación de un ampere de corriente a través de una vuelta de alambre proporcionará una fuerza magnetomotriz de un ampere-vuelta (La fmm en ampere-vuelta = número de amperes por el número de vueltas de alambre). De igual forma, la circulación de una ampere de corriente a través de diez vueltas de alambre proporcionará una fuerza magnetomotriz de diez ampere-vuelta. Supóngase ahora que se devanan muy justamente las diez vueltas, de tal forma que cada una de las vueltas está muy apretada contra las vueltas adyacentes. En el sistema mks, la *fuerza magnetizante* se mide en ampere-vuelta por metro. En el sistema cgs se utiliza el oersted. Un gilbert por centímetro proporciona una fuerza magnetizante de un oersted.

### 3.17 Permeabilidad Magnética ( $\mu$ )

La permeabilidad relativa, que muy frecuente y sencillamente se llama permeabilidad, es la relación de la densidad de flujo en un material para una fuerza magnetizante determinada con respecto a la densidad de flujo que se producirá en el vacío para la misma cantidad de fuerza magnetizante. Matemáticamente, la permeabilidad relativa en el sistema cgs se expresa por la siguiente ecuación :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$\mu$  = permeabilidad relativa del material  
 $B$  = densidad de flujo  
 $H$  = intensidad de campo magnético

La permeabilidad relativa no tiene unidades. La permeabilidad relativa depende del tipo de material. En otras palabras, diferentes tipos de material tendrán un valor diferente de permeabilidad relativa. Por ejemplo, la permeabilidad relativa del aire, al igual que la del vacío es uno. Para todos los materiales paramagneticos, la permeabilidad relativa es ligeramente mayor a uno. La permeabilidad relativa de los materiales diamagneticos es menor que uno, mientras que la permeabilidad relativa de materiales ferromagneticos es mucho mayor que uno (y también mucho mayor que la permeabilidad relativa de los materiales paramagneticos).

Una permeabilidad relativa mayor que uno significa simplemente que es más fácil y accesible para establecer líneas de flujo en ese material, en comparación con el establecimiento de las líneas de flujo en el vacío. Un material que tiene una permeabilidad relativa menor que uno, significa que es más difícil establecer líneas de flujo en ese material que establecerlas en el vacío.

### 3.18 Ley De Rowland

La ley de Rowland expresa la relación entre la fuerza magnetomotriz, el flujo y reluctancia. Algunas veces se denomina *ley de Ohm para circuitos magnéticos*.

Las tres cantidades fundamentales, el maxwell  $\phi$  el gilbert ( $F$ ) y la unidad de reluctancia ( $R$ ) se utilizan en la ley de Rowland como se indica a continuación:

$$F_{mm} = \phi R$$

donde:  $F_{mm}$  = fuerza magnetomotriz, Gb

$\phi$  = flujo, Mx

$R$  = reluctancia, Gb/Mx

Debido al hecho de que la reluctancia en un circuito magnético no es lineal, la ley de Rowland no es tan flexible como la ley de Ohm para circuitos eléctricos. La reluctancia del circuito es solo un valor dado cuando esta presente cierta cantidad de flujo. Si se cambia el flujo, se cambia la reluctancia.

Para resumir, los circuitos magnéticos no son lineales. No se puede aplicar una ecuación lineal, como por ejemplo  $I = E/R$  o  $\phi = f_{mm}/R$ , a circuitos no lineales, para cualquier condición posible en el circuito.

### 3.19 Reluctancias en Serie

Para determinar la reluctancia total de cualquier número de reluctancias en serie, simplemente se suman precisamente de la misma forma que se sumarían las resistencias para determinar la resistencia total de un número de resistores en serie.

### 3.20 Reluctancias en Paralelo

La permeancia de cualquier circuito magnético es igual a 1 dividido por la reluctancia total del circuito, o

$$P = \frac{1}{\text{Reluctancia}} = \frac{1}{R}$$

La permeancia en circuitos magnéticos puede asemejarse a la conductancia en circuitos eléctricos, y se utiliza para calcular la reluctancia combinada de varias reluctancias en paralelo, precisamente de la misma manera que la conductancia se utiliza para calcular resistencias en paralelo. Para determinar la reluctancia combinada de cierto número de reluctancias en paralelo, se considera el recíproco de la suma de las permeancias de las trayectorias separadas.

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

en donde  $R$  = reluctancia combinada y  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  = reluctancias de las trayectorias separadas.

### 3.21 Curva de Imanación

Debido a que la reluctancia de una sustancia magnética no es constante, sino que varía con los cambios en la densidad de flujo, la permeabilidad de una sustancia magnética también variará con cualquier cambio en la densidad de flujo. La razón de esto es que la reluctancia de un material magnético varía con cualquier cambio en el flujo. Por supuesto, la reluctancia de un cubo de solo 1 cm de ese material, también variará al mismo tiempo. La reluctancia de un cubo de 1 cm de cualquier material es su reluctividad, y la permeabilidad es igual a uno dividido por la *reluctividad*. De esto se obtiene, que la permeabilidad de un material magnético también variará con cualquier cambio en el flujo.

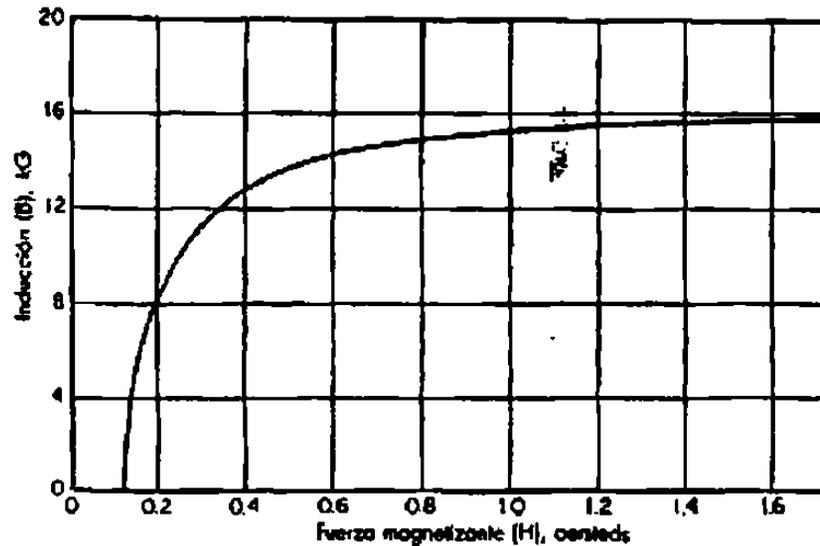
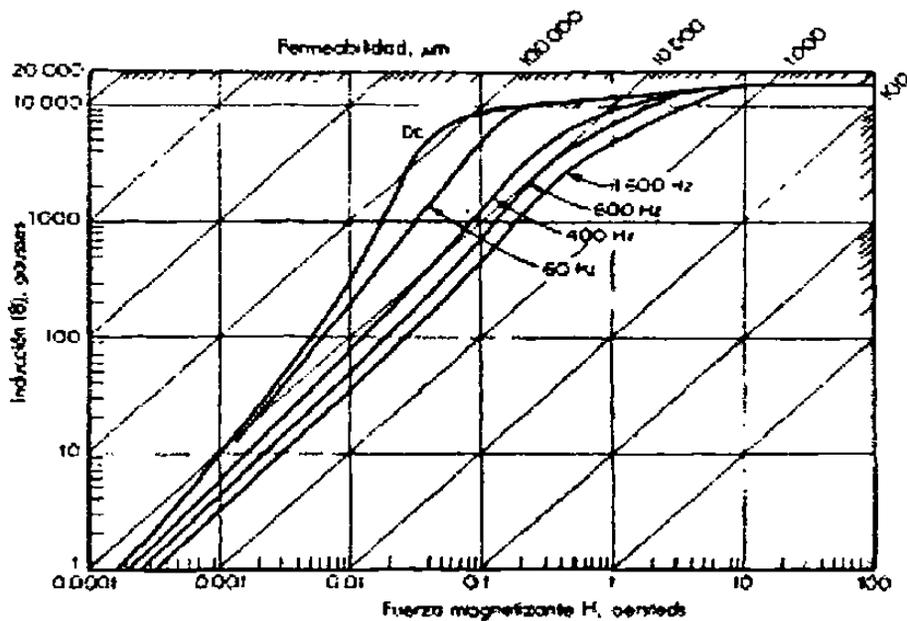


Figura 9. Curva típica de magnetización de cc, de un núcleo de Silectron de 12 mils sin corte y sin impregnar.

Debido a que el cambio en la reluctancia no será directamente proporcional al cambio en el flujo, el cambio en la permeabilidad tampoco será directamente proporcional a cambios en el flujo. Estos hechos deberán ser siempre tomados en consideración cuando se realicen los cálculos de circuitos magnéticos.

Las curvas y las tablas de magnetización que muestran la relación entre  $B$  y  $H$  o entre  $B, H$  y  $\mu$ , en varias etapas de magnetización para diferentes grados de acero y hierro, y varios otros tipos de materiales magnéticos se ponen a la disposición del usuario por parte de los fabricantes de transformadores de acero y otros materiales de núcleo.

Las curvas de magnetización pueden tomar diferentes formas. Algunas pueden ser detalladas en papel lineal común para gráficas, mientras que otras deben ser realizadas en papel logarítmico o semilogarítmico. El empleo de las curvas de magnetización simplifica grandemente la solución de problemas sobre circuitos magnéticos. Las curvas de magnetización típicas se muestran en la figura 9.



**Figura 10.** Curvas de magnetización para 0.014 con una inducción y permeabilidad de 4750 contra la fuerza magnetizante: tipo AL 4750, calibre 0.014 in, maestreado de anillos 1.9 por 2.5 in.

### 3.22 Cálculos con Circuitos Magnéticos

La resistencia de un conductor eléctrico es igual a la resistencia específica o resistividad del conductor, multiplicada por su longitud y dividida por su área de sección transversal. De la misma manera la reluctancia de un material magnético (o conductor de flujo o líneas de fuerza) es igual a la reluctancia específica, o reluctividad del material magnético multiplicado por la longitud del material y dividido entre su área de sección transversal. En otras palabras, cuando la longitud de un circuito magnético aumenta la reluctancia aumenta proporcionalmente; pero cuando el área de sección transversal aumenta, disminuye proporcionalmente. Por lo tanto, la reluctancia de un circuito magnético es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal. y la ecuación para determinar la reluctancia puede escribirse en la forma siguiente:

$$R = \frac{(1/\mu) * L}{A}$$

en donde: R = reluctancia en unidades  
 $\mu$  = permeabilidad  
 L = longitud del circuito magnético  
 A = área de sección transversal del  
 Circuito magnético

Si  $L$  esta dada en metros.  $A$  estará en metros cuadrados, pero si  $L$  esta dada en centímetros,  $A$  estará en centímetros cuadrados. La división de 1 entre la permeabilidad de una sustancia magnética para obtener su reluctividad es un procedimiento similar al utilizado para obtener la resistividad, o resistencia especifica de un conductor eléctrico al considerar el reciproco de su conductividad.

La ecuación básica fundamental, para determinar el flujo total puede ahora reescribirse como:

$$\phi = \frac{Fmm}{R} = \frac{Fmm}{(L/\mu A)}$$

en donde: Fmm= Fuerza magnetomotriz en ampere-vueltas  
 $\mu$  = permeabilidad  
 A = area de sección transversal  
 L = longitud

### 3.23 Electroimanes

La potencia de arrastre o fuerza de tracción de un electroimán puede calcularse a partir de una ecuación derivada de la definición fundamental de un polo magnético unitario. Un polo magnético unitario es un polo con una fuerza tal que repelería un polo similar con exactamente la fuerza de una dina cuando la distancia entre los polos es de un centímetro.

La ecuación fundamental del cálculo del electroimán es

$$T = \frac{AB^2}{72134000}$$

en donde: T = arrastre, libras  
 A = área de sección transversal de  
 De las caras del polo in<sup>2</sup>  
 B = densidad de flujo, lineas/in<sup>2</sup>

### 3.24 Saturación

Se dice que cualquier material magnético está saturado, cuando un mayor aumento en la fuerza magnetizante, o en la intensidad del campo, no puede ya ocasionar un aumento en la densidad de flujo del material. El valor de la densidad de flujo en el material del núcleo de cualquier circuito electromagnético es de considerable importancia; este valor dependerá del uso del material magnético.

Si el núcleo de un transformador en el circuito de placa de la salida de potencia de una válvula llega a saturarse magnéticamente, dará como resultado una distorsión intensa y una transferencia de energía escasa del primario al secundario. Si la corriente de polarización en la cabeza reproductora de una grabadora de cinta es bastante alta o bastante baja, cualquier información reproducida se distorsionará en gran medida. Por otra parte, algunos dispositivos electromagnéticos operarán sólo de manera muy baja, o nula, si la densidad de flujo inicial en el material del núcleo no está a su valor máximo. El punto de saturación de cualquier hierro o acero magnético puede determinarse muy fácilmente a partir de su curva de magnetización  $B-H$ .

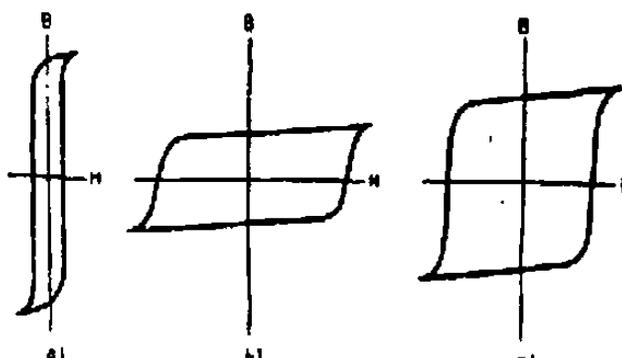
### 3.25 Retentividad

Una medida de la retentividad es la cantidad de magnetismo, o valor de  $B$ , que permanece en un material magnético después de que la fuerza magnetizante se ha elevado a un valor más que suficiente para saturar al material y después reducirse a cero; el valor de  $B$  que permanece en el material se llama magnetismo residual o remanente. Si dos imanes permanentes del mismo tamaño, de materiales distintos, son magnetizados hasta saturarlos, el que tenga una característica permanente más fuerte, tendrá por lo tanto, una retentividad más alta. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el imán más fuerte será el más difícil de desmagnetizar, ya que esto depende de otros factores además del de retentividad.

### 3.26 Coercitividad o Fuerza Coercitiva

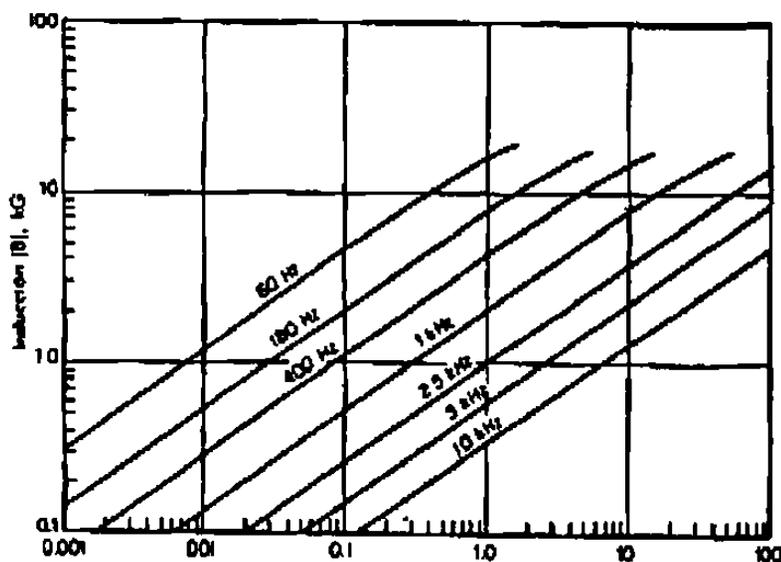
La coercitividad es el valor de la fuerza magnetizante que se opone y que es necesaria para reducir el magnetismo residual o remanente, en una sustancia magnética, hasta un valor de cero. Un concepto claro de coercitividad puede obtenerse si se estudia la figura 11. Supóngase que el núcleo de hierro de la bobina no está magnetizado, y que el ajuste del potenciómetro está en el punto medio, o cero. Cuando el ajuste del potenciómetro se mueve hacia el punto  $a$ , el material del núcleo llegará a magnetizarse hasta la saturación, a lo largo de la curva de magnetización  $A-B$ . Si después el ajuste del potenciómetro se regresa hacia el centro, o a la posición cero, la densidad de flujo  $B$  en el núcleo no regresará a cero por la línea  $A-B$  de la curva, sino que lo hará a través de la línea  $B-C-D$ , y cuando el ajuste del potenciómetro se encuentre nuevamente en cero, la densidad de flujo todavía estará en el punto  $c$ . Este será el magnetismo residual, o remanencia, indicado por el símbolo  $B_r$ . Para reducir la remanencia a cero, es necesario mover el ajuste del potenciómetro hacia el punto  $b$  para producir una fuerza de magnetización opuesta al campo residual en el núcleo. Esto





**Figura 12.** Lazos típicos de histéresis a) Material típico de núcleo magnético; se requiere una pequeña fuerza coercitiva  $H_c$ , para eliminar grandes magnetismos residuales  $B_r$ , b) Clase típica de materiales de imanes permanentes; se requiere una gran fuerza coercitiva para eliminar el pequeño magnetismo residual c) Otra clase típica de material de imán permanente; se requiere gran fuerza coercitiva para eliminar el gran magnetismo residual  $B_r$ .

La información correspondiente a las pérdidas en el núcleo se puede obtener en forma tabulada o gráfica de los fabricantes de los materiales del núcleo utilizados en un transformador. Un ejemplo de la información en forma gráfica de las pérdidas en un núcleo se muestra en la figura 24, que proporciona la pérdida total en el núcleo (la pérdida por histéresis mas la pérdida por corriente parásita), a diferentes frecuencias que van hasta los 10kHz y diferentes valores de inducción que van hasta 18Kgauss.



**Figura 13.** Las curvas de diseño muestran el máximo de las pérdidas en el núcleo para los núcleos C de Silatron de 4 mils, tipo AH. La garantía de pérdidas en el núcleo es de 10 W/libra máximo para 400 Hz, 15 Kg.

### 3.28 Corrientes Parásitas

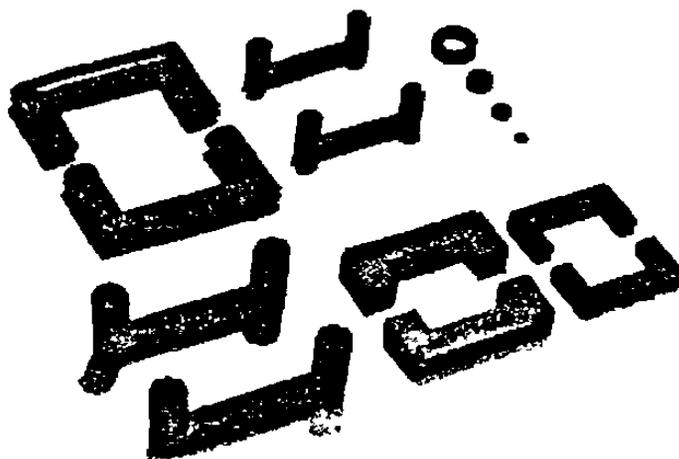
Las corrientes establecidas en los materiales de núcleos magnéticos, debido a los voltajes inducidos originados por la variación de los campos magnéticos, se conocen como corrientes parásitas. La energía perdida en forma de calor, como resultado de la circulación de la corriente parásita en el material del núcleo, se define como la pérdida de la corriente parásita. Ya que esta es proporcional al cuadrado de la frecuencia inducida, llega a ser de una magnitud bastante apreciable cuando se incrementa la frecuencia.

Las corrientes parásitas se pueden reducir al apilar laminaciones en el núcleo, de tal forma que estén en paralelo con el flujo. La oxidación natural de las superficies laminadas también ayuda en gran parte en la reducción de estas corrientes, las laminaciones pueden recubrirse también con una capa delgada de barniz aislante. Pero aún con los núcleos laminados, existe todavía alguna circulación de estas corrientes en las laminaciones individuales. Por lo tanto, a radiofrecuencias, se utilizan ampliamente los materiales de núcleos de polvo de hierro. Cuando la frecuencia sigue aumentando, incluso los núcleos de polvo de hierro no logran ser lo suficiente eficaces para reducir estas pérdidas a un valor apropiado. Entonces se deberán utilizar los núcleos de materiales de ferrita. Las ferritas, a diferencia del hierro o del acero, no son conductores eléctricos.

### 3.29 Núcleos de Polvo de Hierro

Los núcleos de polvo de hierro para bobinas de radio aparecieron por primera vez en el mercado hacia 1930, cuando se utilizaron en transformadores del f-i. Desde ese tiempo hasta la fecha se ha incrementado la demanda de núcleos de polvo de hierro, y también se ha notado una gran mejoría en las técnicas de producción.

Los núcleos de polvo de hierro se encuentran hoy disponibles para amplia variedad de ampliaciones, y para utilizarse en frecuencias tan altas como 250 MHz. Los receptores de televisión contienen varias bobinas con núcleos de polvo de hierro Fig. 15. Algunos de estos pueden ser de sintonía fija, pero otros pueden ser de sintonía de núcleo móvil, como las bobinas de control de frecuencia horizontal y control de ancho horizontal.



**Figura 15.** Núcleos de polvo de hierro (ferrita) para transformadores de salida horizontal de televisión, y algunos núcleos angulares para bobinas.

El polvo de hierro, utilizado para estos núcleos , se somete primero a un proceso químico que cubre cada una de las diminutas partículas de hierro con una capa aislante. Después se utiliza un aglutinante para agrupar todas las partículas de hierro sumadas a una capa de aislante adicional, sobre la capa de aislante formada por el proceso químico. De esta manera, en el terminado del núcleo las diminutas partículas individuales de hierro son eficazmente aisladas unas de otras, como resultado de esto, la corriente parásitas no puede circular en el núcleo. Todavía habrá una pérdida por esta corriente, pero las partículas individuales de hierro son conductores eléctricos y no aisladores y las corrientes parásitas todavía pueden circular en el interior de cada una de las partículas individuales.

La finura de las partículas individuales de hierro, y la cantidad de aglutinante utilizado en proporción con la cantidad de polvo de hierro, serán distintos para diferentes aplicaciones y escalas de frecuencia. El polvo de hierro puede también estar constituido por dos o tres grados diferentes de hierro, mezclado en varias proporciones.

## 4. TRANSFORMADORES

### 4.1 Introducción

Una maquina eléctrica es básicamente un convertidor de potencia que funciona transformando energía de campo magnético en energía de campo eléctrico y viceversa. Las maquinas rotatorias son convertidores dinámicos de potencia (es decir, entra también en juego la energía mecánica). Las maquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica se denominan Generadores, las que convierten energía eléctrica en energía mecánica se denominan Motores, y hay maquinas que convierten energía eléctrica en energía eléctrica, como los Convertidores Rotatorios o los Transformadores.

### 4.2 Transformadores

Las maquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad con el fin de convertir potencia siguen el esquema elemental:

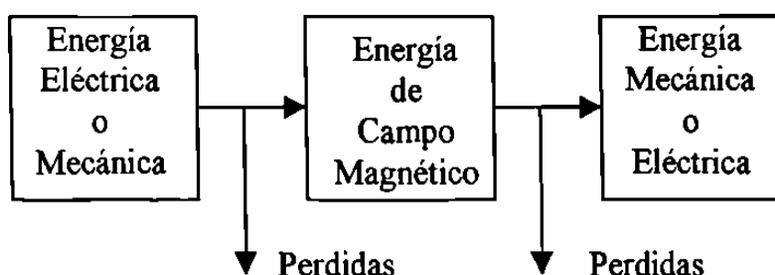


Figura 16. Diagrama a bloques del esquema elemental de las Maquinas Eléctricas.

Existen maquinas que transforman directamente la energía mecánica en energía eléctrica, como la maquina electrostática de Whimshurst o el generador de Van der Graaf. Su principio de funcionamiento se comprende fácilmente del hecho de que al frotar dos materiales entre si, se desprenderán cargas eléctricas de signo opuestos, las cuales pueden ser recogidas por colectores y acumuladas en condensadores. Estas maquinas son impracticables para funcionar como convertidores de potencia (poca eficiencia, gran volumen, etc.) y su aplicación principal esta en la investigación científica.

El estudio del transformador constituye una base para el estudio de las maquinas eléctricas de corriente alterna, ya que se demostrara mas adelante que la mayoría de las maquinas de corriente alterna pueden considerarse como consistentes únicamente en dos circuitos eléctricos acoplados magnéticamente, cuya base es, entonces, el transformador monofasico.

El Instituto Americano de Ingenieros Electricistas da la siguiente definición para un transformador: " Un transformador es un dispositivo eléctrico, sin partes en movimiento continuamente, que por inducción electromagnética transforma la energía eléctrica de uno a mas circuitos a la misma frecuencia, generalmente con valores cambiados de tensión y corriente ".

Su función es cambiar las magnitudes de voltaje y corriente de lado primario al lado secundario

Se enfocara este estudio al transformador de potencia de baja frecuencia, ya que las maquinas eléctricas de corriente alterna, se construyen generalmente para bajas frecuencias. La siguiente figura ilustra la función principal de un transformador.

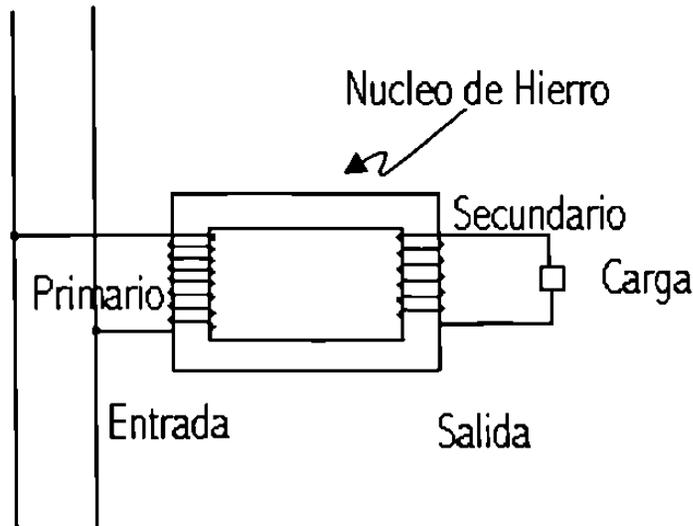


Figura 17. Conexión Básica de un Transformador

#### Eficiencia.

Su principal característica es que su eficiencia es muy alta y es casi la unidad

$$\eta = \text{eficiencia} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}$$

$$\eta = P_{\text{sec}} / P_{\text{primario}}$$

$$\eta > 98\%$$

Dada la alta eficiencia que manifiestan los transformadores, en términos prácticos la potencia que entra al dispositivo es aproximadamente igual a la que sale. Siendo la potencia eléctrica igual al producto del voltaje (diferencia de potencial) por la corriente, entonces un transformador eleva (o disminuye) el voltaje en la misma proporción que disminuye (o eleva) la corriente. Cuando se desea transmitir potencia eléctrica a grandes distancias se trata de manejar siempre voltajes muy altos (del orden de 400,000 V) para disminuir la magnitud de la corriente y, por ende, las pérdidas por efecto Joule ( $P = I^2 R$ ) a través de una línea de transmisión dada.

#### Transformador de distribución.

Es aquel transformador que tiene una capacidad hasta de 500 KVA; hasta 67,000 volts en alta tensión y hasta 15,000 volts en baja tensión.

La presente norma se aplica a transformador de distribución. También se aplica a los autotransformadores incluidos en los límites de capacidad y tensiones aplicadas en el inciso 1, pero considerando su capacidad equivalente como transformador.

### 4.3 Condiciones Generales De Servicio

#### Frecuencia.

La frecuencia de operación debe de ser de 60 Hertz.

#### Temperatura ambiente.

Los transformadores sujetos a estas normas, deben ser apropiados para operar a su capacidad nominal, siempre que a temperatura del ambiente no exceda de 40°C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas no exceda de 30°C (se recomienda que la temperatura promedio del aire refrigerante se calcule promediando las lecturas obtenidas durante 24 horas, ejecutando estas lecturas cada hora. Cuando el ambiente sea el medio refrigerante, se puede usar el promedio de la temperatura máxima y mínima durante el día, por lo general, el valor obtenido en esta forma es ligeramente mayor que el promedio real diario, pero no más de 25°C).

#### Altitud de operación.

Los transformadores de distribución, deben de estar diseñados para una altitud mínima de 1000 metros sobre el nivel del mar.

#### Efecto de la altitud en la elevación de la temperatura.

El aumento de la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez incrementa la elevación de la temperatura en los transformadores que dependen del aire para su disipación del calor.

#### Efecto de la altitud en la rigidez dialéctica del aire.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez disminuye la tensión del flameo. La rigidez dialéctica de algunas partes de un transformador, que depende total o parcialmente del aire para su aislamiento, disminuye conforme la altitud, aumenta. Para una clase de aislamiento, dada la rigidez dialéctica a 100 metros de altitud, debe multiplicarse por el factor de corrección apropiado para la nueva altitud a fin de obtener la nueva rigidez dialéctica a la altitud especificada.

La altitud de 4500 metros es considerada la máxima para transformadores normales.

#### Operaciones a tensiones superiores a la nominal

Los transformadores deben ser capaces de operar:

- Con 5% arriba de la tensión nominal del secundario a capacidad nominal en KVA, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura. Este requisito se aplica cuando el factor de potencia de la carga es de 80% o mayor.
- Con 10% arriba de la tensión nominal del secundario en vacío, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura.
- Para cualquier derivación se aplican los mismos requisitos anteriores.

#### Rigidez dialéctica del líquido aislante.

La rigidez dialéctica del líquido aislante nuevo no debe ser menor de 28 KV.

### Condiciones especiales de servicio.

Condiciones de servicio fuera de las indicadas en los párrafos anteriores se deben especificar previamente al fabricante. Ejemplo de algunas de estas condiciones son las siguientes:

- Vapores o atmósferas dañinas, exceso de polvo, polvo abrasivo, mezclas explosivas de polvo o gases, vapor de agua, ambiente salino, humedad excesiva, etc.
- Vibraciones anormales, golpes o cambios de posición.
- Temperatura ambiente excesivamente bajas o altas.
- Condiciones de transporte o almacenaje poco usuales.
- Limitaciones de espacio.
- Otras condiciones de operación, dificultades de mantenimiento, tensión desbalanceada, forma de onda deficiente, necesidades especiales de aislamiento, etc.

### 4.4 Clasificación.

Los transformadores se clasifican por su condición de servicio en:

- Para uso interior.
- Para uso exterior.

Los transformadores se clasifican por su sistema de disipación de calor como sigue:

- a) Transformadores secos, enfriados por aire.
  - Auto-enfriado (Clase AA).
  - Enfriados por aire forzado (Clase AFA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase AA/FA).
- b) Transformadores sumergidos en líquidos aislantes enfriados por aire.
  - Auto-enfriados (Clase OA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase OA/FA).

Los transformadores se clasifican por su lugar de instalación como sigue:

- Para instalarse en postes, (Tipo Poste).
- Para instalarse en subestaciones (Tipo Subestacion).

### 4.5 Especificaciones Eléctricas.

#### Capacidad nominal en KVA.

La capacidad nominal de un transformador es la capacidad que el devanado secundario del mismo debe suministrar en un tiempo especificado (continuo o limitado) a su tensión y frecuencias nominales, sin exceder los límites de temperatura correspondencia dentro de las condiciones establecidas en esta forma.

#### Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Transformadores Monofasicos

5, 10, 15, 25, 37.5, 50,75, 100, 167, 250, 333, 500

#### Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Tansformadores Trifasicos

15, 20, 45, 75, 112.5, 150, 225, 300, 500

### Especificaciones de nivel de ruido.

Los transformadores deben de estar contruidos para que el promedio del nivel de ruido no exceda los decibeles especificados en la siguiente tabla cuando el transformador sea excitado a tensión nominal, sin carga y sea medido en las condiciones indicadas en el método de prueba.

Los valores en decibeles indicados en la tabla corresponden a los KVA nominales equivalentes a un transformador de dos devanados con la elevación de temperatura permitida por esta norma, para cualquier frecuencia hasta 60 Hertz.

Equivalentes a dos devanados, KVA	Nivel de ruidos en decibeles			
	Tipo			
	AA	AFA	OA	FA
Hasta 300 -----	66	70	56	60
301 a 500 -----	68	71	58	61

Tabla 2. Valores de nivel de ruido de transformadores

### Polaridad de los transformadores monofasicos.

Todos los transformadores monofasicos son de polaridad substractiva.

### Desplazamiento angular de transformadores trifasicos.

El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Delta-Delta o Estrella-Estrella, es de  $0^\circ$  como se muestra en los diagramas (a) y (b) de la figura 18. El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Estrella-Delta o Delta-Estrella, es de  $30^\circ$  con la baja tensión atrasada respecto a la alta tensión, como se muestra en los diagramas (c) y (d), de la figura.

La secuencia de fases es el orden 1, 2, 3 y con el sentido indicado de la figura.

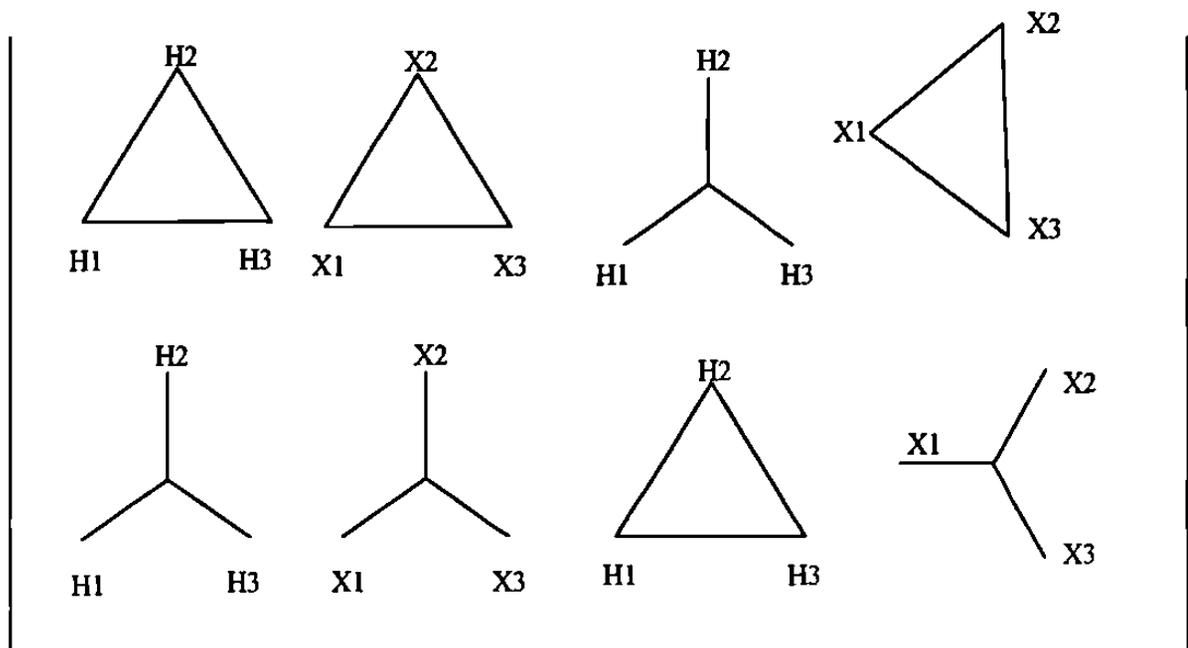
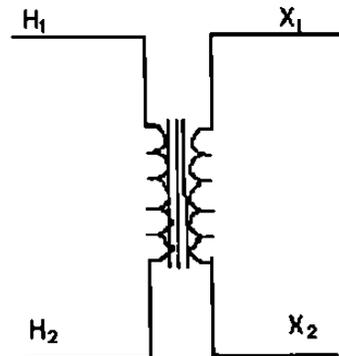


Figura 18 Desplazamiento angular entre alta y baja tensión en transformadores

## 4.6 Designación De Terminales

Los devanados de un transformador se distinguen uno del otro como sigue:  
En los transformadores de dos devanados, el de alta tensión se designa con la letra H y el de baja y tensión con la letra X.

Terminales de Alto y bajo Voltaje



H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub> = terminales de alto voltaje  
X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> = terminales de bajo voltaje

Figura 19. Terminales de "Alta" y de "Baja" de un transformador

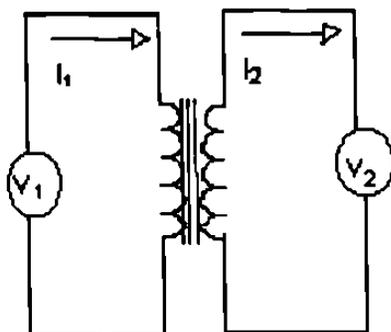
En los transformadores de dos de mas devanados, estos se designan con las letras H, X, Y, Z. La secuencia de esta designación se determina como sigue:

El devanado de tensión mas alta se designa con la letra H y los demás devanados con las letras X, Y Z en orden decreciente de las tensiones.

En el caso de que dos o más devanados tengan la misma tensión pero diferente capacidad en Kva, se asignan las letras en orden decreciente según la capacidad.

## 4.7 Relación de transformación

Es la capacidad que presenta el transformador en variar el voltaje y la corriente del primario al secundario.



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

$a$  = relación de transformación

$N_1$  = numero de vueltas de la bobina del primario

$N_2$  = numero de vueltas de la bobina del secundario

$I_1$  = corriente del primario

$I_2$  = corriente del secundario

Figura 20. Relación de transformación

## 4.8 Bancos Estrella-Delta

Si el neutro del lado de alta tensión del banco de transformador se conecta al neutro del sistema, el banco puede quemarse por las siguientes razones:

- Se producirán corrientes circulantes en Delta que tratan de equilibrar cualquier carga desequilibrada conectada a la línea de primario.
- Actuara como un banco de puesta a tierra y suministra corriente de cortocircuito a cualquier cortocircuito en el sistema en el cual esta conectado.
- El devanado en Delta forma un circuito cerrado por el que circularan las corrientes de la tercera armónica.
- Puede sobrecargarse si se quema un fusible en caso de cortocircuitos a tierra, dejando el banco con la capacidad de un banco conectado en Estrella abierta Delta abierta.

El resultado de todos estos efectos es que el banco se ve forzado a conducir corrientes adicionales a su corriente normal de carga. La suma de las corrientes es, en muchas ocasiones, suficientes para quemar el banco.

Cuando se utilizan conexiones en Estrella-Delta y el neutro del lado de alta tensión del transformador no se conecta al neutro del circuito, un conductor desconectado en el circuito, del primer trefilar convierte el banco en un conjunto con entrada y salida monofasicas. Si el banco alimenta circuitos de motores, se producirán sobrecorrientes peligrosas en cada uno de los circuitos de, motores trifasicos. La corriente que pasa por los dos de los conductores del circuito alimentador de motores será de igual magnitud, mientras que la del tercer conductor será igual a la suma de dichas corrientes.

## 4.9 Bancos Delta-Delta

Para poder tener cargas equilibradas en los transformadores, todas las unidades deben:

- Estar conectadas en la misma posición de las derivaciones.
- Tener la misma relación de tensión.
- Tener la misma impedancia.

Un banco de tres transformadores puede hacerse funcionar a potencia reducida con una pequeña carga desequilibrada, si dos de las unidades tienen la misma impedancia y la tercera unidad tiene una impedancia comprendida entre  $\pm 25\%$  de las unidades iguales. En la tabla siguiente se indica la distribución de la carga según la relación de desequilibrio ( $Z_1$  = impedancia de la unidad distinta, y  $Z_2$  = impedancia de las unidades iguales ).

Relación $Z_1 / Z_2$	Porcentaje de carga* en	
	Unidad distinta	Unidades Iguales
0.75	109.0	96.0
0.8	107.0	96.5
0.85	105.2	97.3
0.9	103.3	98.3
1.1	96.7	102.0
1.15	95.2	102.2
1.2	93.8	103.1
1.25	92.3	103.9

**Tabla 3.** Porcentajes de carga en un transformador dependiendo de la relación  $Z_1$  en  $Z_2$

Con cargas desequilibradas, debe compararse que ningún transformador quede sobrecargado.

#### 4.10 Protección De Motores.

Referente bancos conectados en Estrella-Delta-Estrella, con neutro aislado. Por lo general, la protección contra sobrecargas utilizada en los circuitos de alimentación de motores, consiste en un dispositivo de protección en solo dos de los tres conductores. Si se desconecta un conductor del circuito de alimentación del primario, pueden producirse tensiones anormalmente elevadas, lo cual puede desequilibrar notablemente la corriente en el circuito del motor. Si ocurriera que la corriente mas alta de las tres es la que pasa por el conductor sin proteger, las posibilidades de que el motor se quemara aumentarían considerablemente. El instalar un tercer dispositivo de protección contra sobrecargas en cada uno de los conductores de alimentación de motores, elimina la posibilidad de averías del motor por esta razón. El hecho de utilizar tres dispositivos de protección se justifica por la posibilidad existente de que se abra una línea del primario del transformador. Tal posibilidad queda afectada por el tipo y disposición de los dispositivos de protección y de maniobra utilizados en esa parte del sistema.

#### Sobrecargas momentáneas

Las siguientes recomendaciones de carga, pueden utilizarse para estos transformadores provistos de modernos sistemas de aislamiento térmico.

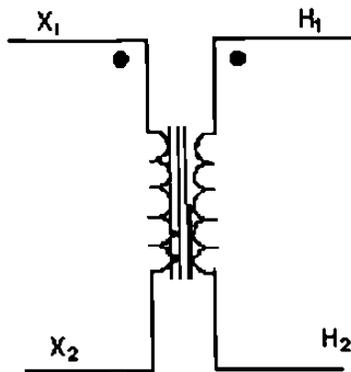
Transformadores en baño de aceite, enfriados por ventilación natural, temperatura del aire ambiente 30°C (según las normas ASA, suplemento C57 9206 200).

Duración	Veces la corriente nominal
2 segundos	25.0
10 segundos	11.3
30 segundos	6.7
60 segundos	4.75
5 minutos	3.0
30 minutos	2.0

**Tabla 4.** Tiempos de sobrecargas permitidos en transformadores

### 4.11 Análisis De Los Transformadores

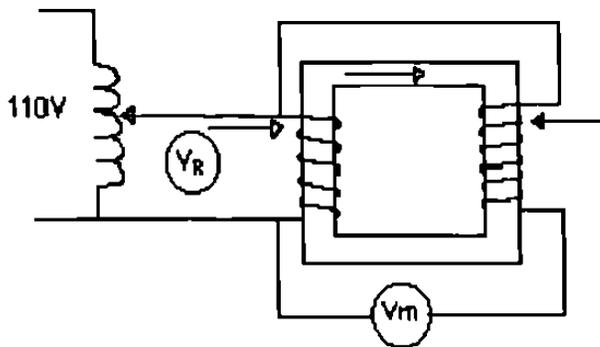
#### Polaridad de el transformador



Los subíndices indican la Polaridad de las maquinas y como se deberá conectar en paralelo  
 Los puntos indican que la corriente entra en el lado X<sub>1</sub> y sale en el lado H<sub>1</sub>

Figura 21. Terminales indicando la polaridad de un transformador

#### Prueba de polaridad a un transformador



Se puentea una terminal de alta y otra de baja

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

$$V_m > V_R$$

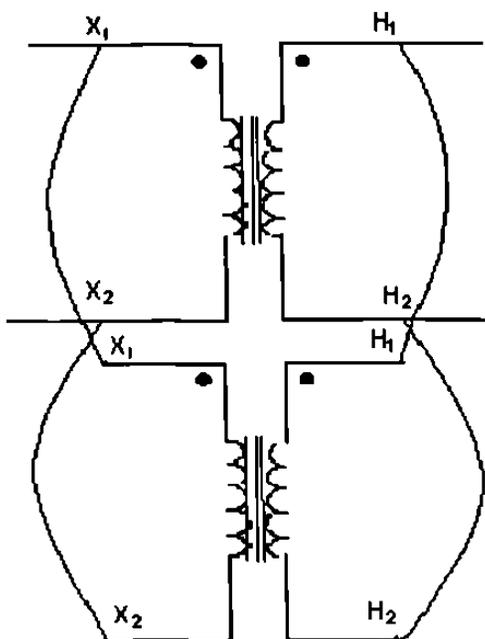
X y H tienen diferente polaridad

$$V_m < V_R$$

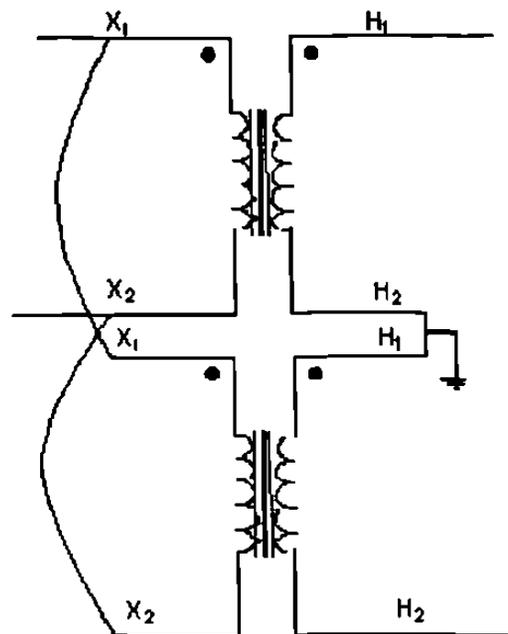
H y X tiene la misma polaridad

Figura 22. Prueba de polaridad de un transformador

#### Conexiones serie y paralelo



Paralelo // paralelo



Paralelo // serie

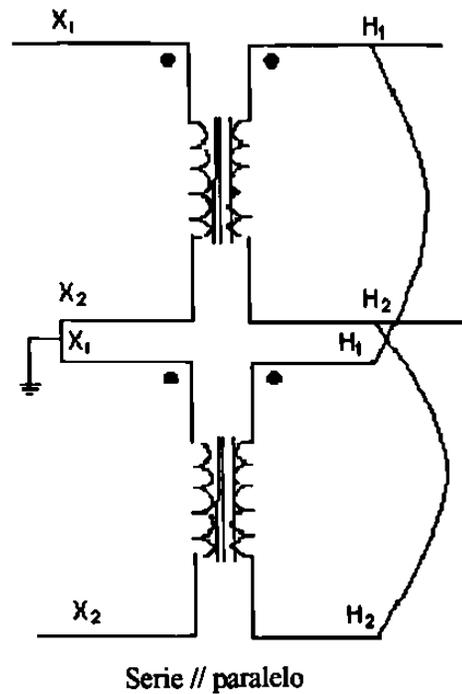


Figura 23 Conexiones serie – paralelo de un transformador

### Métodos para el análisis de un transformador

- ✓ Mediante pruebas de laboratorio
- ✓ Analizarlo mediante el método de circuito equivalente de parámetros.

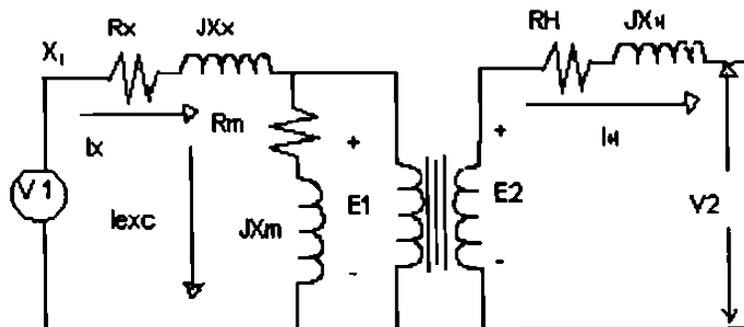


Figura 24. Modelo de 6 parámetros, el lado de baja tensión como primario.

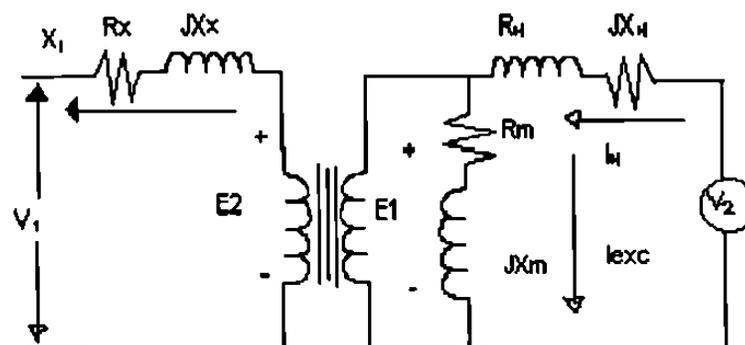
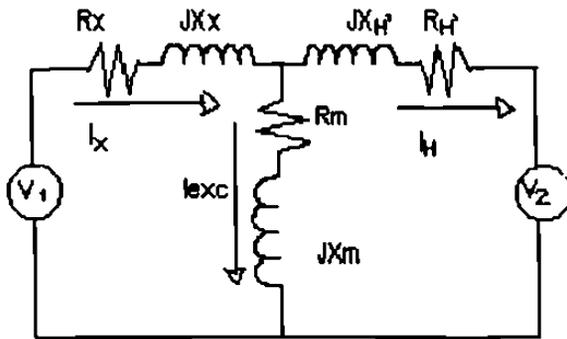


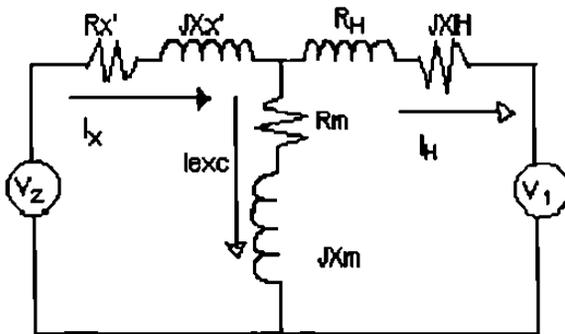
Figura 25. Modelo de 6 parámetros tomando el lado de alta tensión como primario.

Parámetros

$E_1$ y $E_2$	Voltaje Inducidos Internos
$V_1$ y $V_2$	Voltaje en terminales (externos)
$R_m + jX_m$	Rama de excitación (solo en los lados primarios)
$R_x$	resistencia del devanado de baja tensión
$R_H$	resistencia del devanado de alta tensión
$jX_x$	Reactancia de disipación del devanado de baja tensión
$jX_h$	Reactancia de disipación del devanado de alta tensión.
$I_x$	Corriente de baja.
$I_H$	Corriente de alta.
$I_{exc}$	corriente de excitación.



Circuito Reflejado al lado de baja tensión



Circuito Reflejado al lado de alta tensión

Figura 26. Reflexión de impedancias en un transformador

4.12 Obtención de los 6 parámetros del transformador realizando 2 pruebas.

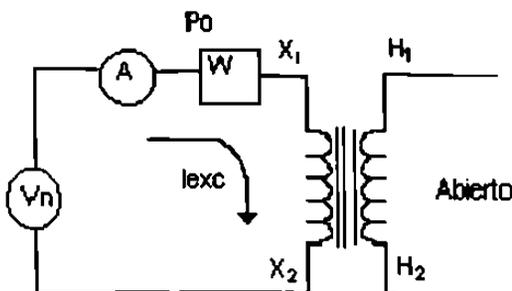
- a) Prueba de Vacío (para determinar  $R_m$  y  $X_m$ )
- b) Prueba de Corto circuito (para determinar  $R_x$ ,  $X_x$ ,  $R_H$  y  $X_H$ )

Prueba de vacío

Se recomienda que se alimente el lado de baja tensión.

Condiciones de la prueba.

1. aplicar el voltaje nominal
2. el secundario abierto (sin carga).



$P_o$  = Potencia de vacío  
 $I_{exc}$  = Corriente de Excitación  
 $V_n$  = Voltaje Nominal

$$R_m = (P_o/I_{exc}^2) - R_x$$

$$X_m = X_T - X_x$$

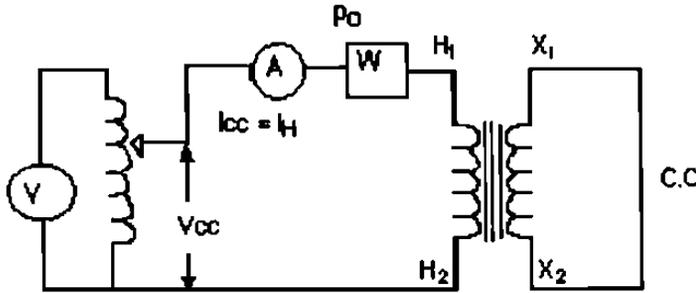
$$X_T = \sqrt{(V_m/I_{exc})^2 - (R_x + R_m)^2}$$

**Prueba de Cortocircuito.**

Se recomienda que se alimente el lado de alta tensión.

Condiciones de la prueba.

1. Cortocircuito en el secundario.
2. Aplicar un voltaje bajo al lado que se alimenta para que el transformador tome la corriente nominal de ese lado.



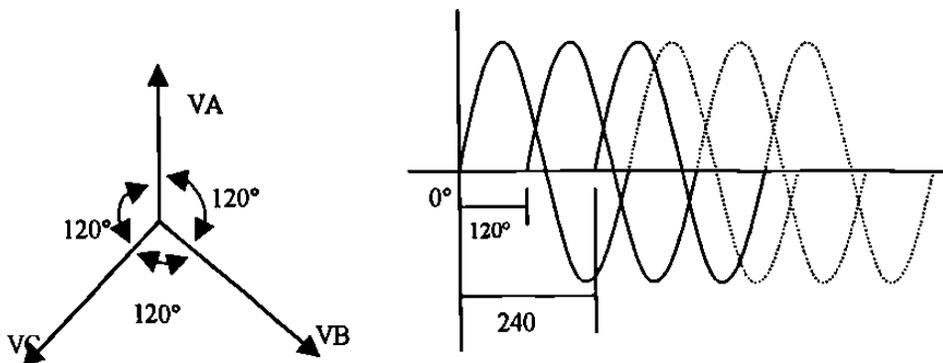
Vcc = Voltaje de CC  
 Pcc = Potencia de CC  
 Icc = Corriente de CC = I nominal.

$$R_H = R_{X'} \quad R_H + R_{X'} = P_{cc}/I_{cc}^2$$

$$X_T = X_H + X_{X'} \quad X_H = X_{X'}$$

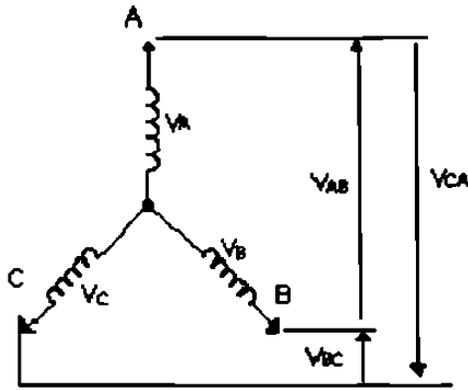
$$X_T = \sqrt{(V_{cc}/I_{cc})^2 - (R_H + R_{X'})^2}$$

**4.13 Transformadores Trifasicos.**



**Figura 27.** Forma de onda del voltaje trifasico

Conexiones de los transformadores.



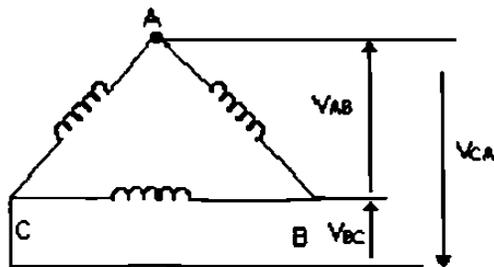
$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}$  = Voltaje de línea

$V_A, V_B, V_C$  = Voltaje de fase

$$V_L = \sqrt{3} V_f$$

$$I_L = I_f$$

a) Estrella



$$V_A = V_B = V_C = V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$$

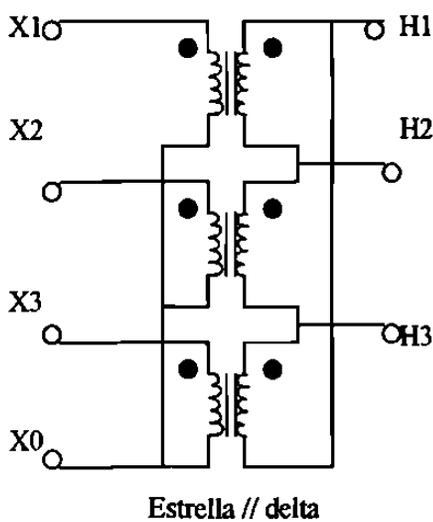
$$I_L = \sqrt{3} I_f$$

$$V_L = V_f$$

b) Delta.

Figura 28. Conexiones delta-estrella de un transformador

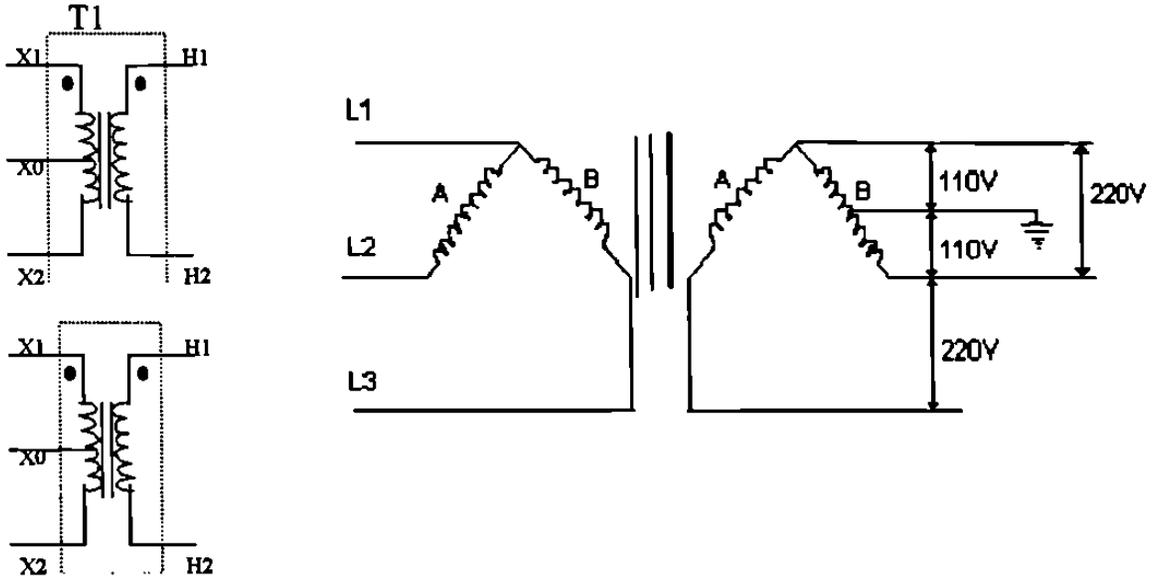
4.14 Conexiones entre transformadores monofasicos para formar transformadores trifasicos.



Baja	Alta
▽	▽
▽	Y
Y	Y
Y	▽

Figura 29 Conexión de tres transformadores monofasicos para formar uno trifasico.

### Transformador de Distribución (delta abierto) comercial



T2 Figura 30 Transformador de distribución comercial delta-abierto

### 4.15 Regulación de Voltaje

La regulación de voltaje significa que tanto cae el voltaje desde el vacío a la plena carga.

$$\text{Regulación} = \% \text{Reg}$$

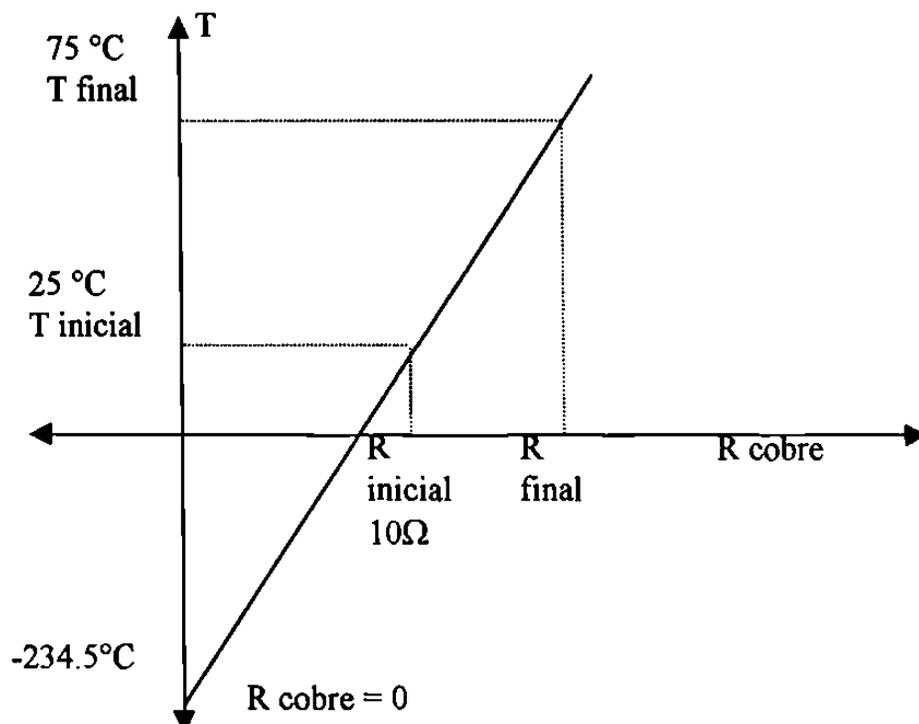
$$\% \text{Reg} = (V_o - V_n / V_n) \times 100$$

$V_o$  = Voltaje de Vacío     $V_n$  = Voltaje bajo Carga.

### 4.16 Corrección de Resistencia por Temperatura.

Ejemplo:  $R = 10 \Omega$  a  $25^\circ$

$R = ?$  a  $75^\circ$



$$\frac{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{inicial}}} = \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{final}}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) R_{\text{inicial}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{75^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}}{25^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) 10 \Omega$$

$$R_{\text{final}} = 11.92 \Omega$$

#### 4.17 Fabricación De Transformadores Comerciales

Los transformadores TUSA son producidos en un amplio parque industrial, equipado con la maquinaria mas avanzada e instrumentos de extrema precisión. Por eso, desde la fabricación los ensayos y el riguroso control de calidad en la recepción de los materiales hasta las pruebas finales, dan garantías de productos eficientes con calidad a la altura del nombre Siemens.

##### Transformadores normalizados

Son transformadores para instalación en redes aéreas de distribución de energía eléctrica, con niveles de aislamiento de clase tensión 15 y 25 kv., en aceite mineral aislante, refrigerados naturalmente, adecuados para montaje en poste.

##### Características básicas

Norma genérica

NOM-J-116-1989

##### Ejecución

Tanque sellado

##### Potencias normalizadas Kva

30,45,75,112.5,150,225

##### Frecuencia (Hz)

60

##### Grupo de conexiones

$\Delta$ -Y con neutro fuera del tanque

##### Tensiones primarias(V)

15kV:13860/13530/13200/12870/12540

25kV:24150/23575/23000/22425/21850

## Conmutaciones con el transformador desenergizado

Por conmutador interno accionado a través del registro de mano localizado en la tapa del transformador hasta 150 KVA y accionamiento externo para 225 kVA.

Tensión secundaria (V)  
440/254 ó 220/127

## Núcleo

Construido con lamina de acero al silicio rolada en frío, tipo grano orientado.

## Devanados

Primario: construido con conductores de sección circular, aislados con esmalte reforzado, clase térmica B (130°C).

## Material del tanque

Fabricado con lamina de acero SAE 1010/1020, con los siguientes espesores:

Tapa: 2.65mm.  
Cuerpo: 2.65mm.  
Fondo: 3.0mm.

## Radiadores

Los disipadores de calor son radiadores de tubo de acero con espesor de 1.6mm, soldados al tanque.

## Hermeticidad de las soldaduras

Es probada con cada unidad con liquido penetrante regente a rayos ultravioleta.

## Pintura del tanque

Interna: después de la limpieza mecánica y con solventes de las superficies, se aplica una mano de pintura epoxi-poliamida con pigmentos de oxido de hierro con 30 micras de espesor.

Externa: la superficie son limpiadas con chorros abrasivos al estándar SA 2 ½ de la norma SIS 055900. Como fondo se aplican dos manos de pintura eposi-poliamida, tipo alto espesor con pigmentos de oxido de hierro aplicadas por procesos flooding, con un espesor total de 100 micras. La terminación es hecha con una mano de pintura de poliuretano alifatico, gris claro, pigmento de dióxido de titanio y un espesor de 40 micras.

## Indicación del nivel de aceite

Por medio de una marca indeleble en la pared interna del tanque para transformadores hasta 150 kVA e indicador magnético para los de 225 kVA.

## Registro de mano

Destinado para la inspección visual de la parte superior del transformador, para accionar el conmutador de tensiones y para verificar el nivel de aceite. Esta localizada en la tapa del tanque con empaques y resaltos para evitar la penetración de la humedad.

### Boquillas terminales

#### Alta Tensión

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla, para un diámetro de entrada de 13 $\phi$ mm; fijados internamente en la tapa.

#### Baja Tensión

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla para cable de acuerdo a lo indicado de los dibujos de dimensiones, fijado internamente en el tanque.

### Placa de datos

Confeccionada en placa de aluminio adonizado de 100 x 1300 mm con los datos de identificación del transformador y del esquema de conexiones de devanados y derivaciones.

### Garantía de calidad

Todos los productos TUSA-Siemens son elaborados dentro del sistema Garantía de Calidad, desacuerdo con los parámetros fijados por la Norma ISO 9000.

### Pruebas de rutina

Todos los transformadores fabricados son sometidos a las siguientes pruebas:

- Resistencia óhmica de los devanados
- Relación de transformación
- Resistencia del aislamiento
- Desplazamiento angular
- Secuencia de fases
- Pérdidas de excitación
- Pérdidas en carga
- Corriente de excitación (IO)
- Tensión de otro circuito (Z)
- Tensión aplicada al dieléctico
- Tensión inducida

### Pruebas tipo

Son efectuadas periódicamente, por criterio de muestras para mantener el control total de los procesos productivos, las siguientes pruebas:

- Tensiones de impulso
- Elevación de temperatura
- Factor de potencia de aislamiento
- Ruido
- Radio interferencia

### Pruebas especiales

Son efectuadas pruebas de resistencia dinámica al corto circuito en los transformadores fabricados como prototipos de nuevas series de productos.

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

en donde  $R$  = reluctancia combinada y  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  = reluctancias de las trayectorias separadas.

### 3.21 Curva de Imanación

Debido a que la reluctancia de una sustancia magnética no es constante, sino que varía con los cambios en la densidad de flujo, la permeabilidad de una sustancia magnética también variará con cualquier cambio en la densidad de flujo. La razón de esto es que la reluctancia de un material magnético varía con cualquier cambio en el flujo. Por supuesto, la reluctancia de un cubo de solo 1 cm de ese material, también variará al mismo tiempo. La reluctancia de un cubo de 1 cm de cualquier material es su reluctividad, y la permeabilidad es igual a uno dividido por la *reluctividad*. De esto se obtiene, que la permeabilidad de un material magnético también variará con cualquier cambio en el flujo.

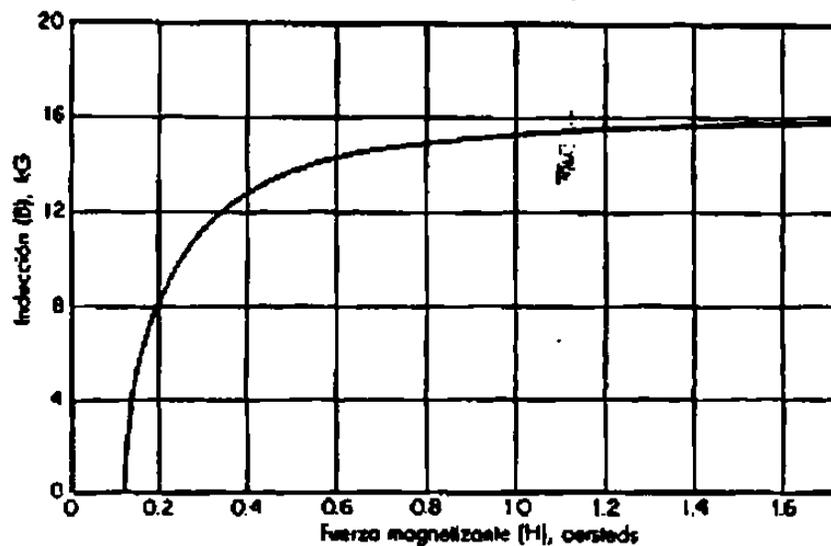


Figura 9. Curva típica de magnetización de cc, de un núcleo de Silectron de 12 mils sin corte y sin impregnar.

Debido a que el cambio en la reluctancia no será directamente proporcional al cambio en el flujo, el cambio en la permeabilidad tampoco será directamente proporcional a cambios en el flujo. Estos hechos deberán ser siempre tomados en consideración cuando se realicen los cálculos de circuitos magnéticos.

Las curvas y las tablas de magnetización que muestran la relación entre  $B$  y  $H$  o entre  $B/H$  y  $\mu$ , en varias etapas de magnetización para diferentes grados de acero y hierro, y varios otros tipos de materiales magnéticos se ponen a la disposición del usuario por parte de los fabricantes de transformadores de acero y otros materiales de núcleo.

Las curvas de magnetización pueden tomar diferentes formas. Algunas pueden ser detalladas en papel lineal común para gráficas, mientras que otras deben ser realizadas en papel logarítmico o semilogarítmico. El empleo de las curvas de magnetización simplifica grandemente la solución de problemas sobre circuitos magnéticos. Las curvas de magnetización típicas se muestran en la figura 9.

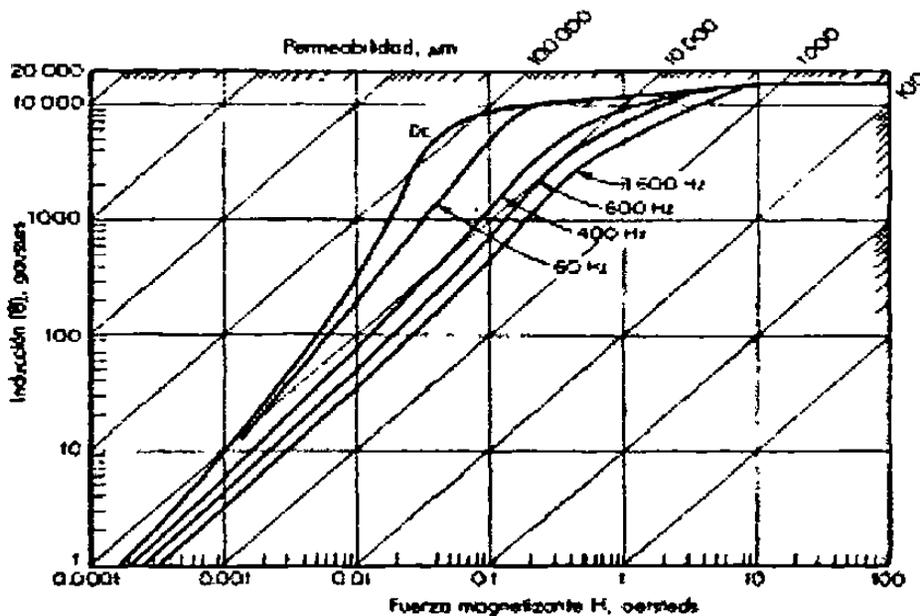


Figura 10. Curvas de magnetización para 0.014 con una inducción y permeabilidad de 4750 contra la fuerza magnetizante: tipo AL 4750, calibre 0.014 in, maestreado de anillos 1.9 por 2.5 in.

### 3.22 Cálculos con Circuitos Magnéticos

La resistencia de un conductor eléctrico es igual a la resistencia específica o resistividad del conductor, multiplicada por su longitud y dividida por su área de sección transversal. De la misma manera la reluctancia de un material magnético (o conductor de flujo o líneas de fuerza) es igual a la reluctancia específica, o reluctividad del material magnético multiplicado por la longitud del material y dividido entre su área de sección transversal. En otras palabras, cuando la longitud de un circuito magnético aumenta la reluctancia aumenta proporcionalmente; pero cuando el área de sección transversal aumenta, disminuye proporcionalmente. Por lo tanto, la reluctancia de un circuito magnético es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal. y la ecuación para determinar la reluctancia puede escribirse en la forma siguiente:

$$R = \frac{(1/\mu) * L}{A}$$

en donde:  $R$  = reluctancia en unidades  
 $\mu$  = permeabilidad  
 $L$  = longitud del circuito magnético  
 $A$  = área de sección transversal del  
 Circuito magnético

Si  $L$  esta dada en metros.  $A$  estará en metros cuadrados, pero si  $L$  esta dada en centímetros,  $A$  estará en centímetros cuadrados. La división de 1 entre la permeabilidad de una sustancia magnética para obtener su reluctividad es un procedimiento similar al utilizado para obtener la resistividad, o resistencia especifica de un conductor eléctrico al considerar el reciproco de su conductividad.

La ecuación básica fundamental, para determinar el flujo total puede ahora reescribirse como:

$$\phi = \frac{F_{mm}}{R} = \frac{F_{mm}}{(L/\mu A)}$$

en donde:  $F_{mm}$  = Fuerza magnetomotriz en ampere-vueltas  
 $\mu$  = permeabilidad  
 $A$  = area de sección transversal  
 $L$  = longitud

### 3.23 Electroimanes

La potencia de arrastre o fuerza de tracción de un electroimán puede calcularse a partir de una ecuación derivada de la definición fundamental de un polo magnético unitario. Un polo magnético unitario es un polo con una fuerza tal que repelería un polo similar con exactamente la fuerza de una dina cuando la distancia entre los polos es de un centímetro.

La ecuación fundamental del cálculo del electroimán es

$$T = \frac{AB^2}{72134000}$$

en donde:  $T$  = arrastre, libras  
 $A$  = área de sección transversal de  
 De las caras del polo in<sup>2</sup>  
 $B$  = densidad de flujo, lineas/in<sup>2</sup>

### 3.24 Saturación

Se dice que cualquier material magnético está saturado, cuando un mayor aumento en la fuerza magnetizante, o en la intensidad del campo, no puede ya ocasionar un aumento en la densidad de flujo del material. El valor de la densidad de flujo en el material del núcleo de cualquier circuito electromagnético es de considerable importancia; este valor dependerá del uso del material magnético.

Si el núcleo de un transformador en el circuito de placa de la salida de potencia de una válvula llega a saturarse magnéticamente, dará como resultado una distorsión intensa y una transferencia de energía escasa del primario al secundario. Si la corriente de polarización en la cabeza reproductora de una grabadora de cinta es bastante alta o bastante baja, cualquier información reproducida se distorsionará en gran medida. Por otra parte, algunos dispositivos electromagnéticos operarán sólo de manera muy baja, o nula, si la densidad de flujo inicial en el material del núcleo no está a su valor máximo. El punto de saturación de cualquier hierro o acero magnético puede determinarse muy fácilmente a partir de su curva de magnetización  $B-H$ .

### 3.25 Retentividad

Una medida de la retentividad es la cantidad de magnetismo, o valor de  $B$ , que permanece en un material magnético después de que la fuerza magnetizante se ha elevado a un valor más que suficiente para saturar al material y después reducirse a cero; el valor de  $B$  que permanece en el material se llama magnetismo residual o remanente. Si dos imanes permanentes del mismo tamaño, de materiales distintos, son magnetizados hasta saturarlos, el que tenga una característica permanente más fuerte, tendrá por lo tanto, una retentividad más alta. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el imán más fuerte será el más difícil de desmagnetizar, ya que esto depende de otros factores además del de retentividad.

### 3.26 Coercitividad o Fuerza Coercitiva

La coercitividad es el valor de la fuerza magnetizante que se opone y que es necesaria para reducir el magnetismo residual o remanente, en una sustancia magnética, hasta un valor de cero. Un concepto claro de coercitividad puede obtenerse si se estudia la figura 11. Supóngase que el núcleo de hierro de la bobina no está magnetizado, y que el ajuste del potenciómetro está en el punto medio, o cero. Cuando el ajuste del potenciómetro se mueve hacia el punto  $a$ , el material del núcleo llegará a magnetizarse hasta la saturación, a lo largo de la curva de magnetización  $A-B$ . Si después el ajuste del potenciómetro se regresa hacia el centro, o a la posición cero, la densidad de flujo  $B$  en el núcleo no regresará a cero por la línea  $A-B$  de la curva, si no que lo hará a través de la línea  $B-C-D$ , y cuando el ajuste del potenciómetro se encuentre nuevamente en cero, la densidad de flujo todavía estará en el punto  $c$ . Este será el magnetismo residual, o remanencia, indicado por el símbolo  $B_r$ . Para reducir la remanencia a cero, es necesario mover el ajuste del potenciómetro hacia el punto  $b$  para producir una fuerza de magnetización opuesta al campo residual en el núcleo. Esto

ocasionará que el campo residual regrese a cero a lo largo de la línea desde  $C$  a  $D$ . El valor negativo de  $H$  necesario para reducir el magnetismo residual en el núcleo a un valor de cero es la coercitividad del material del núcleo. La coercitividad se representa por el símbolo  $H_c$ .

Si el ajuste del potenciómetro se mueve todavía más hacia la izquierda, de nuevo se magnetizará el núcleo, pero la magnetización será ahora en una dirección negativa.

(Esto se basa en la suposición de que la dirección original era positiva.) Enseguida ocurrirá la saturación en el punto  $E$  de la curva de magnetización. Si el valor negativo de  $H$  es ahora reducido a cero y después incrementado nuevamente a su valor positivo más alto, al mover el ajuste del potenciómetro hacia la derecha, la densidad de flujo en el núcleo, seguirá una nueva línea desde  $E$  hasta  $F$ , o cero, y después subirá de regreso al punto  $B$ .

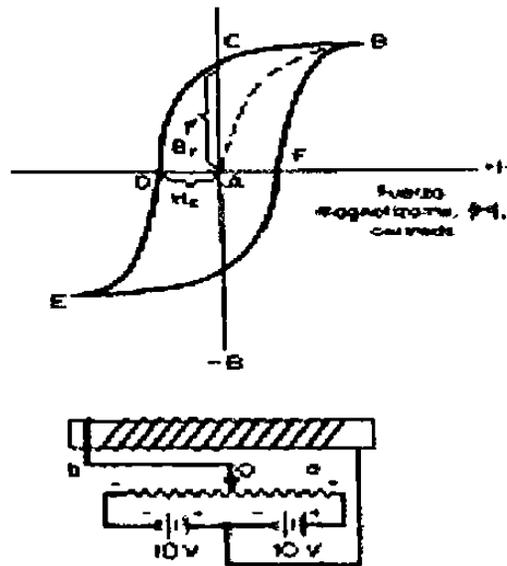
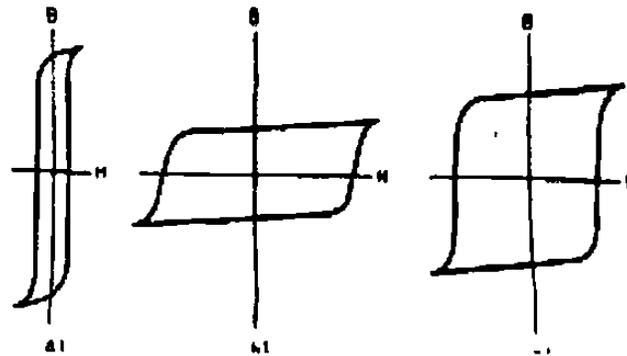


Figura 11. Ilustración de la coercitividad fuerza coercitiva  $H_c$  y magnetismo residualo remanencia  $B_r$ .

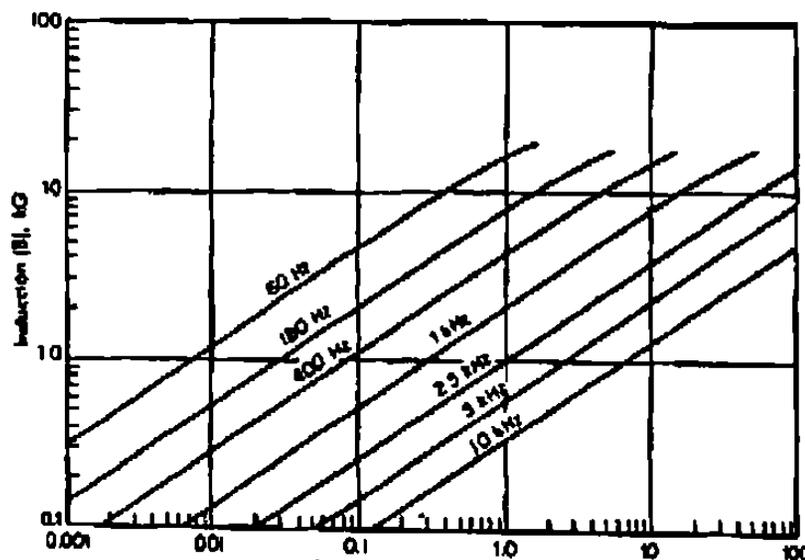
### 3.27 Histéresis

La trayectoria cerrada por las curvas de la figura 12 se conoce como lazo de histéresis, y el área que encierra este lazo es una medida de la energía utilizada en revertir las moléculas magnéticas del núcleo. A la energía que se pierde se le llama pérdida por histéresis. La pérdida por histéresis es de importancia sólo cuando el material del núcleo está sujeto a campos por pulsos de cc o de ca. Ya que el lazo de histéresis se repite una y otra vez para cada ciclo, las pérdidas del núcleo llegan a ser mayores cuando la frecuencia aumenta. Por esta razón, los materiales utilizados para el núcleo de transformadores deberán tener un lazo de histéresis muy estrecho. En la fig. 12 se muestran algunos lazos comunes de histéresis.



**Figura 12.** Lazos típicos de histéresis *a)* Material típico de núcleo magnético; se requiere una pequeña fuerza coercitiva  $H_c$ , para eliminar grandes magnetismos residuales  $B_r$  *b)* Clase típica de materiales de imanes permanentes; se requiere una gran fuerza coercitiva para eliminar el pequeño magnetismo residual *c)* Otra clase típica de material de imán permanente; se requiere gran fuerza coercitiva para eliminar el gran magnetismo residual  $B_r$ .

La información correspondiente a las pérdidas en el núcleo se puede obtener en forma tabulada o gráfica de los fabricantes de los materiales del núcleo utilizados en un transformador. Un ejemplo de la información en forma gráfica de las pérdidas en un núcleo se muestra en la figura 24, que proporciona la pérdida total en el núcleo (la pérdida por histéresis mas la pérdida por corriente parásita), a diferentes frecuencias que van hasta los 10kHz y diferentes valores de inducción que van hasta 18Kgauss.



**Figura 13.** Las curvas de diseño muestran el máximo de las pérdidas en el núcleo para los núcleos C de Silectron de 4 mils, tipo AH. La garantía de pérdidas en el núcleo es de 10 W/libra máximo para 400 Hz, 15 Kg.

### 3.28 Corrientes Parásitas

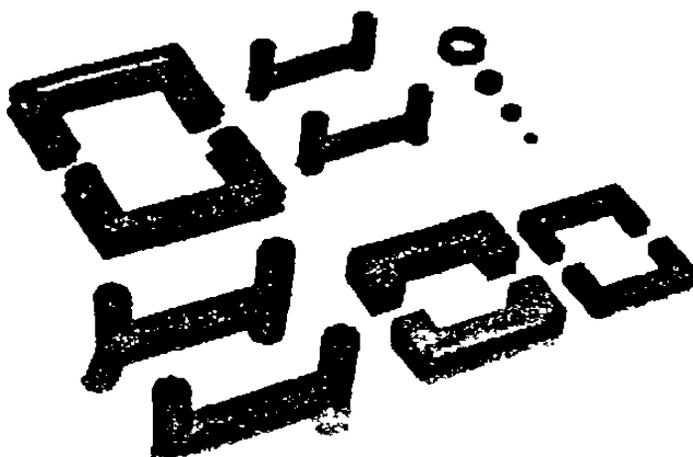
Las corrientes establecidas en los materiales de núcleos magnéticos, debido a los voltajes inducidos originados por la variación de los campos magnéticos, se conocen como corrientes parásitas. La energía perdida en forma de calor, como resultado de la circulación de la corriente parásita en el material del núcleo, se define como la pérdida de la corriente parásita. Ya que esta es proporcional al cuadrado de la frecuencia inducida, llega a ser de una magnitud bastante apreciable cuando se incrementa la frecuencia.

Las corrientes parásitas se pueden reducir al apilar laminaciones en el núcleo, de tal forma que estén en paralelo con el flujo. La oxidación natural de las superficies laminadas también ayuda en gran parte en la reducción de estas corrientes, las laminaciones pueden recubrirse también con una capa delgada de barniz aislante. Pero aún con los núcleos laminados, existe todavía alguna circulación de estas corrientes en las laminaciones individuales. Por lo tanto, a radiofrecuencias, se utilizan ampliamente los materiales de núcleos de polvo de hierro. Cuando la frecuencia sigue aumentando, incluso los núcleos de polvo de hierro no logran ser lo suficiente eficaces para reducir estas pérdidas a un valor apropiado. Entonces se deberán utilizar los núcleos de materiales de ferrita. Las ferritas, a diferencia del hierro o del acero, no son conductores eléctricos.

### 3.29 Núcleos de Polvo de Hierro

Los núcleos de polvo de hierro para bobinas de radio aparecieron por primera vez en el mercado hacia 1930, cuando se utilizaron en transformadores del f-i. Desde ese tiempo hasta la fecha se ha incrementado la demanda de núcleos de polvo de hierro, y también se ha notado una gran mejoría en las técnicas de producción.

Los núcleos de polvo de hierro se encuentran hoy disponibles para amplia variedad de ampliaciones, y para utilizarse en frecuencias tan altas como 250 MHz. Los receptores de televisión contienen varias bobinas con núcleos de polvo de hierro Fig. 15. Algunos de estos pueden ser de sintonía fija, pero otros pueden ser de sintonía de núcleo móvil, como las bobinas de control de frecuencia horizontal y control de ancho horizontal.



**Figura 15.** Núcleos de polvo de hierro (ferrita) para transformadores de salida horizontal de televisión, y algunos núcleos angulares para bobinas.

El polvo de hierro, utilizado para estos núcleos , se somete primero a un proceso químico que cubre cada una de las diminutas partículas de hierro con una capa aislante. Después se utiliza un aglutinante para agrupar todas las partículas de hierro sumadas a una capa de aislante adicional, sobre la capa de aislante formada por el proceso químico. De esta manera, en el terminado del núcleo las diminutas partículas individuales de hierro son eficazmente aisladas unas de otras, como resultado de esto, la corriente parásitas no puede circular en el núcleo. Todavía habrá una perdida por esta corriente, pero las partículas individuales de hierro son conductores eléctricos y no aisladores y las corrientes parásitas todavía pueden circular en el interior de cada una de las partículas individuales.

La finura de las partículas individuales de hierro, y la cantidad de aglutinante utilizado en proporción con la cantidad de polvo de hierro, serán distintos para diferentes aplicaciones y escalas de frecuencia. El polvo de hierro puede también estar constituido por dos o tres grados diferentes de hierro, mezclado en varias proporciones.

## 4. TRANSFORMADORES

### 4.1 Introducción

Una maquina eléctrica es básicamente un convertidor de potencia que funciona transformando energía de campo magnético en energía de campo eléctrico y viceversa. Las maquinas rotatorias son convertidores dinámicos de potencia (es decir, entra también en juego la energía mecánica). Las maquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica se denominan Generadores, las que convierten energía eléctrica en energía mecánica se denominan Motores, y hay maquinas que convierten energía eléctrica en energía eléctrica, como los Convertidores Rotatorios o los Transformadores.

### 4.2 Transformadores

Las maquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad con el fin de convertir potencia siguen el esquema elemental:

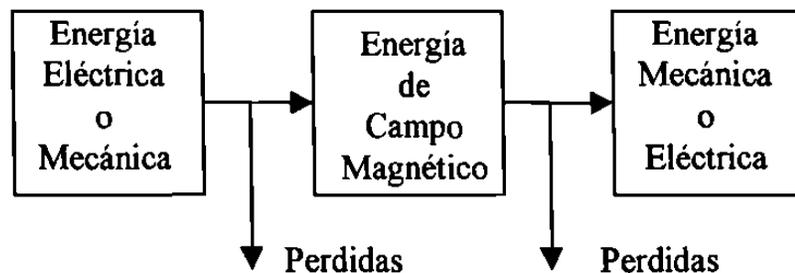


Figura 16. Diagrama a bloques del esquema elemental de las Maquinas Eléctricas.

Existen maquinas que transforman directamente la energía mecánica en energía eléctrica, como la maquina electrostática de Whimshurst o el generador de Van der Graaf. Su principio de funcionamiento se comprende fácilmente del hecho de que al frotar dos materiales entre si, se desprenderán cargas eléctricas de signo opuestos, las cuales pueden ser recogidas por colectores y acumuladas en condensadores. Estas maquinas son impracticables para funcionar como convertidores de potencia (poca eficiencia, gran volumen, etc. ) y su aplicación principal esta en la investigación científica.

El estudio del transformador constituye una base para el estudio de las maquinas eléctricas de corriente alterna, ya que se demostrara mas adelante que la mayoría de las maquinas de corriente alterna pueden considerarse como consistentes únicamente en dos circuitos eléctricos acoplados magnéticamente, cuya base es, entonces, el transformador monofasico.

El Instituto Americano de Ingenieros Electricistas da la siguiente definición para un transformador: “ Un transformador es un dispositivo eléctrico, sin partes en movimiento continuamente, que por inducción electromagnética transforma la energía eléctrica de uno a mas circuitos a la misma frecuencia, generalmente con valores cambiados de tensión y corriente “.

Su función es cambiar las magnitudes de voltaje y corriente de lado primario al lado secundario

Se enfocara este estudio al transformador de potencia de baja frecuencia, ya que las maquinas eléctricas de corriente alterna, se construyen generalmente para bajas frecuencias. La siguiente figura ilustra la función principal de un transformador.

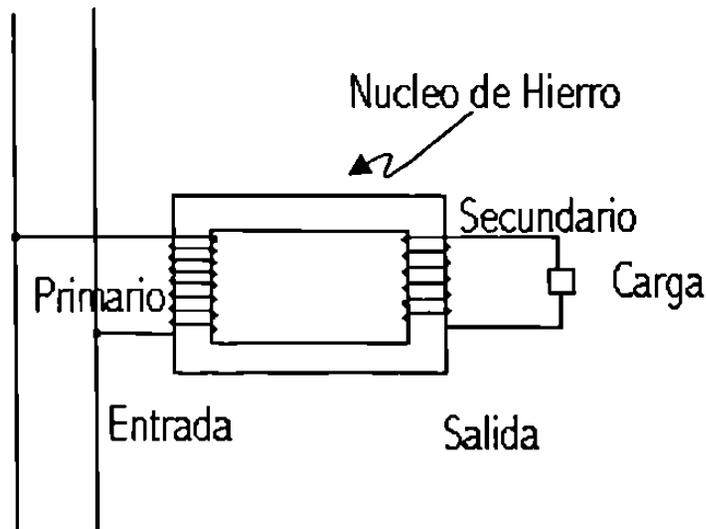


Figura 17. Conexión Básica de un Transformador

#### Eficiencia.

Su principal característica es que su eficiencia es muy alta y es casi la unidad

$$\eta = \text{eficiencia} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}$$

$$\eta = P_{\text{sec}} / P_{\text{primario}}$$

$$\eta > 98\%$$

Dada la alta eficiencia que manifiestan los transformadores, en términos prácticos la potencia que entra al dispositivo es aproximadamente igual a la que sale. Siendo la potencia eléctrica igual al producto del voltaje (diferencia de potencial) por la corriente, entonces un transformador eleva (o disminuye) el voltaje en la misma proporción que disminuye (o eleva) la corriente. Cuando se desea transmitir potencia eléctrica a grandes distancias se trata de manejar siempre voltajes muy altos (del orden de 400,000 V) para disminuir la magnitud de la corriente y, por ende, las pérdidas por efecto Joule ( $P = I^2 R$ ) a través de una línea de transmisión dada.

#### Transformador de distribución.

Es aquel transformador que tiene una capacidad hasta de 500 KVA; hasta 67,000 volts en alta tensión y hasta 15,000 volts en baja tensión.

La presente norma se aplica a transformador de distribución. También se aplica a los autotransformadores incluidos en los límites de capacidad y tensiones aplicadas en el inciso 1, pero considerando su capacidad equivalente como transformador.

### 4.3 Condiciones Generales De Servicio

#### Frecuencia.

La frecuencia de operación debe de ser de 60 Hertz.

#### Temperatura ambiente.

Los transformadores sujetos a estas normas, deben ser apropiados para operar a su capacidad nominal, siempre que a temperatura del ambiente no exceda de 40°C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas no exceda de 30°C (se recomienda que la temperatura promedio del aire refrigerante se calcule promediando las lecturas obtenidas durante 24 horas, ejecutando estas lecturas cada hora. Cuando el ambiente sea el medio refrigerante, se puede usar el promedio de la temperatura máxima y mínima durante el día, por lo general, el valor obtenido en esta forma es ligeramente mayor que el promedio real diario, pero no más de 25°C).

#### Altitud de operación.

Los transformadores de distribución, deben de estar diseñados para una altitud mínima de 1000 metros sobre el nivel del mar.

#### Efecto de la altitud en la elevación de la temperatura.

El aumento de la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez incrementa la elevación de la temperatura en los transformadores que dependen del aire para su disipación del calor.

#### Efecto de la altitud en la rigidez dialéctica del aire.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez disminuye la tensión del flameo. La rigidez dialéctica de algunas partes de un transformador, que depende total o parcialmente del aire para su aislamiento, disminuye conforme la altitud, aumenta. Para una clase de aislamiento, dada la rigidez dialéctica a 100 metros de altitud, debe multiplicarse por el factor de corrección apropiado para la nueva altitud a fin de obtener la nueva rigidez dialéctica a la altitud especificada.

La altitud de 4500 metros es considerada la máxima para transformadores normales.

#### Operaciones a tensiones superiores a la nominal

Los transformadores deben ser capaces de operar:

- Con 5% arriba de la tensión nominal del secundario a capacidad nominal en KVA, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura. Este requisito se aplica cuando el factor de potencia de la carga es de 80% o mayor.
- Con 10% arriba de la tensión nominal del secundario en vacío, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura.
- Para cualquier derivación se aplican los mismos requisitos anteriores.

#### Rigidez dialéctica del líquido aislante.

La rigidez dialéctica del líquido aislante nuevo no debe ser menor de 28 KV.

### Condiciones especiales de servicio.

Condiciones de servicio fuera de las indicadas en los párrafos anteriores se deben especificar previamente al fabricante. Ejemplo de algunas de estas condiciones son las siguientes:

- Vapores o atmósferas dañinas, exceso de polvo, polvo abrasivo, mezclas explosivas de polvo o gases, vapor de agua, ambiente salino, humedad excesiva, etc.
- Vibraciones anormales, golpes o cambios de posición.
- Temperatura ambiente excesivamente bajas o altas.
- Condiciones de transporte o almacenaje poco usuales.
- Limitaciones de espacio.
- Otras condiciones de operación, dificultades de mantenimiento, tensión desbalanceada, forma de onda deficiente, necesidades especiales de aislamiento, etc.

### 4.4 Clasificación.

Los transformadores se clasifican por su condición de servicio en:

- Para uso interior.
- Para uso exterior.

Los transformadores se clasifican por su sistema de disipación de calor como sigue:

- a) Transformadores secos, enfriados por aire.
  - Auto-enfriado (Clase AA).
  - Enfriados por aire forzado (Clase AFA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase AA/FA).
- b) Transformadores sumergidos en líquidos aislantes enfriados por aire.
  - Auto-enfriados (Clase OA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase OA/FA).

Los transformadores se clasifican por su lugar de instalación como sigue:

- Para instalarse en postes, (Tipo Poste).
- Para instalarse en subestaciones (Tipo Subestacion).

### 4.5 Especificaciones Eléctricas.

#### Capacidad nominal en KVA.

La capacidad nominal de un transformador es la capacidad que el devanado secundario del mismo debe suministrar en un tiempo especificado (continuo o limitado) a su tensión y frecuencias nominales, sin exceder los límites de temperatura correspondencia dentro de las condiciones establecidas en esta forma.

Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Transformadores Monofasicos  
5, 10, 15, 25, 37.5, 50,75, 100, 167, 250, 333, 500

Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Tansformadores Trifasicos  
15, 20, 45, 75, 112.5, 150, 225, 300, 500

### Especificaciones de nivel de ruido.

Los transformadores deben de estar contruidos para que el promedio del nivel de ruido no exceda los decibeles especificados en la siguiente tabla cuando el transformador sea excitado a tensión nominal, sin carga y sea medido en las condiciones indicadas en el método de prueba.

Los valores en decibeles indicados en la tabla corresponden a los KVA nominales equivalentes a un transformador de dos devanados con la elevación de temperatura permitida por esta norma, para cualquier frecuencia hasta 60 Hertz.

Equivalentes a dos devanados, KVA	Nivel de ruidos en decibeles			
	Tipo			
	AA	AFA	OA	FA
Hasta 300 -----	66	70	56	60
301 a 500 -----	68	71	58	61

Tabla 2. Valores de nivel de ruido de transformadores

### Polaridad de los transformadores monofasicos.

Todos los transformadores monofasicos son de polaridad substractiva.

### Desplazamiento angular de transformadores trifasicos.

El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Delta-Delta o Estrella-Estrella, es de  $0^\circ$  como se muestra en los diagramas (a) y (b) de la figura 18. El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Estrella-Delta o Delta-Estrella, es de  $30^\circ$  con la baja tensión atrasada respecto a la alta tensión, como se muestra en los diagramas (c) y (d), de la figura.

La secuencia de fases es el orden 1, 2, 3 y con el sentido indicado de la figura.

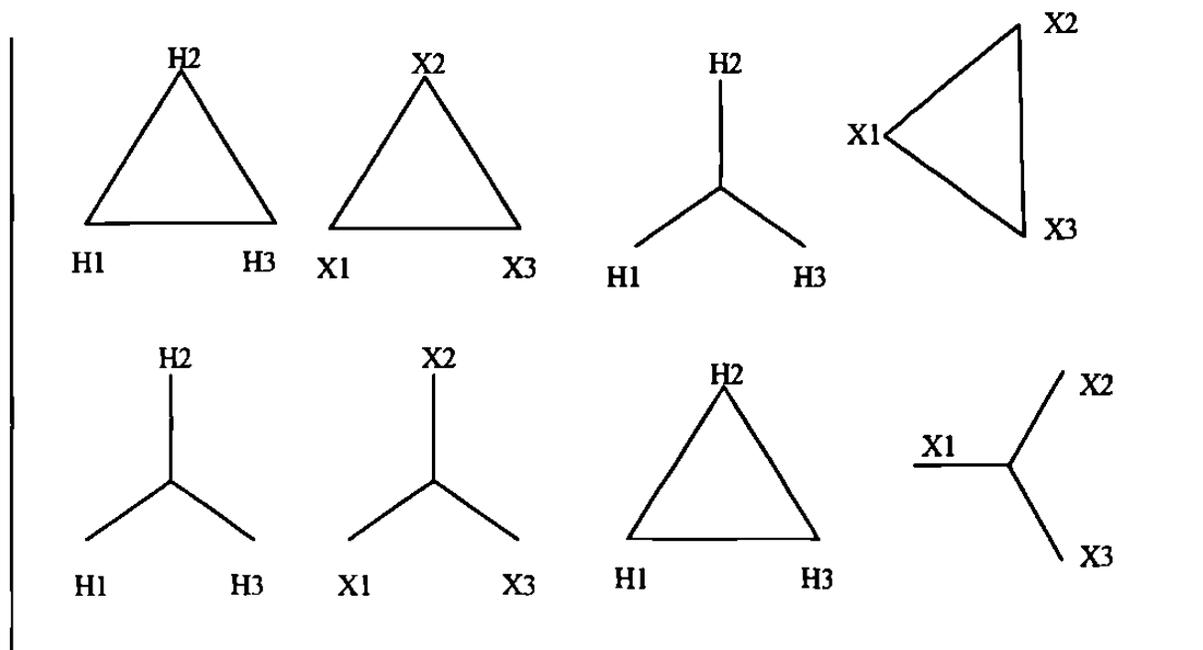
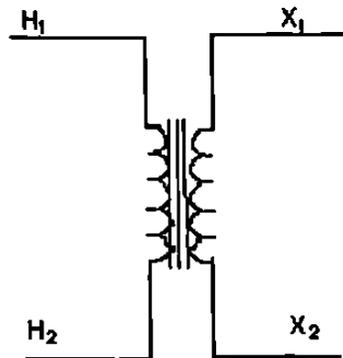


Figura 18 Desplazamiento angular entre alta y baja tensión en transformadores

## 4.6 Designación De Terminales

Los devanados de un transformador se distinguen uno del otro como sigue:  
En los transformadores de dos devanados, el de alta tensión se designa con la letra H y el de baja y tensión con la letra X.

Terminales de Alto y bajo Voltaje



H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub> = terminales de alto voltaje  
X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> = terminales de bajo voltaje

Figura 19. Terminales de "Alta" y de "Baja" de un transformador

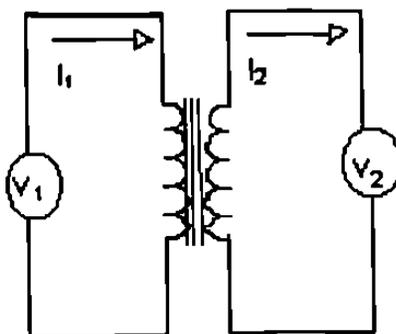
En los transformadores de dos de mas devanados, estos se designan con las letras H, X, Y, Z. La secuencia de esta designación se determina como sigue:

El devanado de tensión mas alta se designa con la letra H y los demás devanados con las letras X, Y Z en orden decreciente de las tensiones.

En el caso de que dos o más devanados tengan la misma tensión pero diferente capacidad en Kva, se asignan las letras en orden decreciente según la capacidad.

## 4.7 Relación de transformación

Es la capacidad que presenta el transformador en variar el voltaje y la corriente del primario al secundario.



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

$a$  = relación de transformación

$N_1$  = numero de vueltas de la bobina del primario

$N_2$  = numero de vueltas de la bobina del secundario

$I_1$  = corriente del primario

$I_2$  = corriente del secundario

Figura 20. Relación de transformación

## 4.8 Bancos Estrella-Delta

Si el neutro del lado de alta tensión del banco de transformador se conecta al neutro del sistema, el banco puede quemarse por las siguientes razones:

- Se producirán corrientes circulantes en Delta que tratan de equilibrar cualquier carga desequilibrada conectada a la línea de primario.
- Actuara como un banco de puesta a tierra y suministra corriente de cortocircuito a cualquier cortocircuito en el sistema en el cual esta conectado.
- El devanado en Delta forma un circuito cerrado por el que circularan las corrientes de la tercera armónica.
- Puede sobrecargarse si se quema un fusible en caso de cortocircuitos a tierra, dejando el banco con la capacidad de un banco conectado en Estrella abierta Delta abierta.

El resultado de todos estos efectos es que el banco se ve forzado a conducir corrientes adicionales a su corriente normal de carga. La suma de las corrientes es, en muchas ocasiones, suficientes para quemar el banco.

Cuando se utilizan conexiones en Estrella-Delta y el neutro del lado de alta tensión del transformador no se conecta al neutro del circuito, un conductor desconectado en el circuito, del primer trefilar convierte el banco en un conjunto con entrada y salida monofasicas. Si el banco alimenta circuitos de motores, se producirán sobrecorrientes peligrosas en cada uno de los circuitos de, motores trifasicos. La corriente que pasa por los dos de los conductores del circuito alimentador de motores será de igual magnitud, mientras que la del tercer conductor será igual a la suma de dichas corrientes.

## 4.9 Bancos Delta-Delta

Para poder tener cargas equilibradas en los transformadores, todas las unidades deben:

- Estar conectadas en la misma posición de las derivaciones.
- Tener la misma relación de tensión.
- Tener la misma impedancia.

Un banco de tres transformadores puede hacerse funcionar a potencia reducida con una pequeña carga desequilibrada, si dos de las unidades tienen la misma impedancia y la tercera unidad tiene una impedancia comprendida entre  $\pm 25\%$  de las unidades iguales. En la tabla siguiente se indica la distribución de la carga según la relación de desequilibrio (  $Z_1$  = impedancia de la unidad distinta, y  $Z_2$  = impedancia de las unidades iguales ).

Relación $Z_1 / Z_2$	Porcentaje de carga* en	
	Unidad distinta	Unidades Iguales
0.75	109.0	96.0
0.8	107.0	96.5
0.85	105.2	97.3
0.9	103.3	98.3
1.1	96.7	102.0
1.15	95.2	102.2
1.2	93.8	103.1
1.25	92.3	103.9

**Tabla 3.** Porcentajes de carga en un transformador dependiendo de la relación  $Z_1$  en  $Z_2$

Con cargas desequilibradas, debe compararse que ningún transformador quede sobrecargado.

#### 4.10 Protección De Motores.

Referente bancos conectados en Estrella-Delta-Estrella, con neutro aislado. Por lo general, la protección contra sobrecargas utilizada en los circuitos de alimentación de motores, consiste en un dispositivo de protección en solo dos de los tres conductores. Si se desconecta un conductor del circuito de alimentación del primario, pueden producirse tensiones anormalmente elevadas, lo cual puede desequilibrar notablemente la corriente en el circuito del motor. Si ocurriera que la corriente mas alta de las tres es la que pasa por el conductor sin proteger, las posibilidades de que el motor se quemara aumentarían considerablemente. El instalar un tercer dispositivo de protección contra sobrecargas en cada uno de los conductores de alimentación de motores, elimina la posibilidad de averías del motor por esta razón. El hecho de utilizar tres dispositivos de protección se justifica por la posibilidad existente de que se abra una línea del primario del transformador. Tal posibilidad queda afectada por el tipo y disposición de los dispositivos de protección y de maniobra utilizados en esa parte del sistema.

#### Sobrecargas momentáneas

Las siguientes recomendaciones de carga, pueden utilizarse para estos transformadores provistos de modernos sistemas de aislamiento térmico.

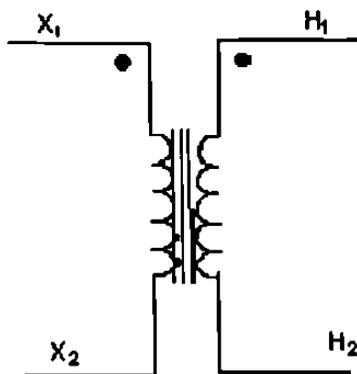
Transformadores en baño de aceite, enfriados por ventilación natural, temperatura del aire ambiente 30°C (según las normas ASA, suplemento C57 9206 200).

Duración	Veces la corriente nominal
2 segundos	25.0
10 segundos	11.3
30 segundos	6.7
60 segundos	4.75
5 minutos	3.0
30 minutos	2.0

**Tabla 4.** Tiempos de sobrecargas permitidos en transformadores

## 4.11 Análisis De Los Transformadores

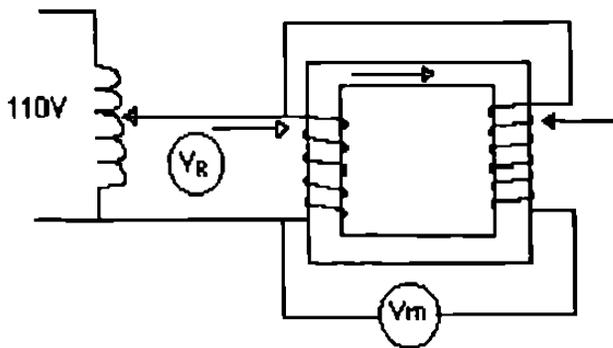
### Polaridad de el transformador



Los subíndices indican la Polaridad de las maquinas y como se deberá conectar en paralelo  
 Los puntos indican que la corriente entra en el lado X<sub>1</sub> y sale en el lado H<sub>1</sub>

Figura 21. Terminales indicando la polaridad de un transformador

### Prueba de polaridad a un transformador



Se puentea una terminal de alta y otra de baja

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

$$V_m > V_R$$

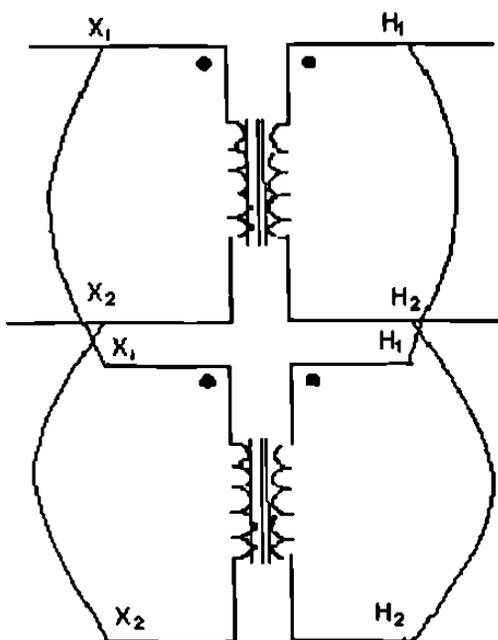
X y H tienen diferente polaridad

$$V_m < V_R$$

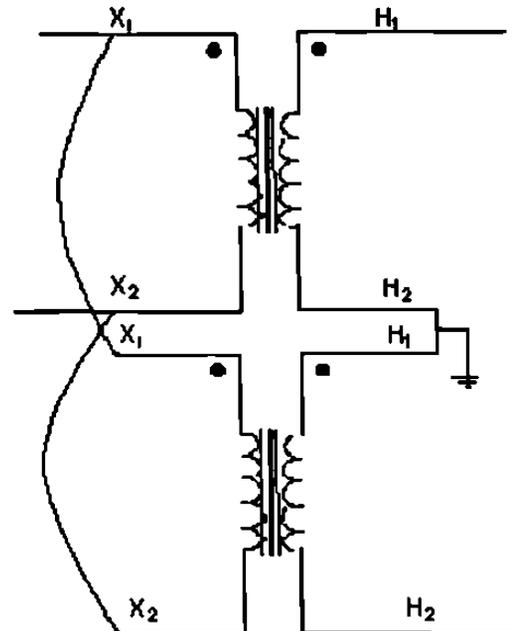
H y X tiene la misma polaridad

Figura 22. Prueba de polaridad de un transformador

### Conexiones serie y paralelo



Paralelo // paralelo



Paralelo // serie

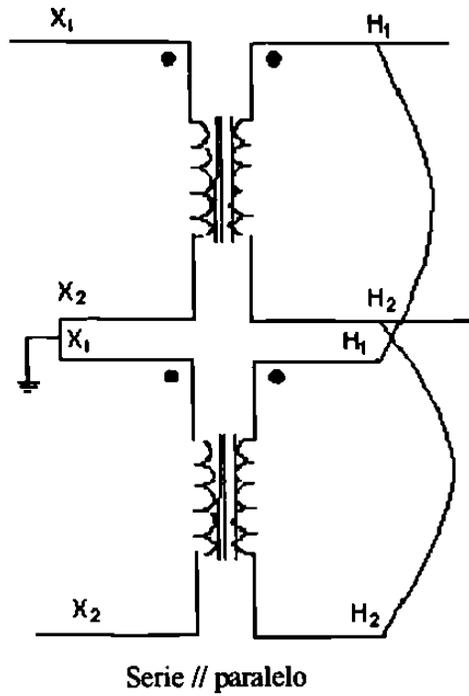


Figura 23 Conexiones serie – paralelo de un transformador

Métodos para el análisis de un transformador

- ✓ Mediante pruebas de laboratorio
- ✓ Analizarlo mediante el método de circuito equivalente de parámetros.

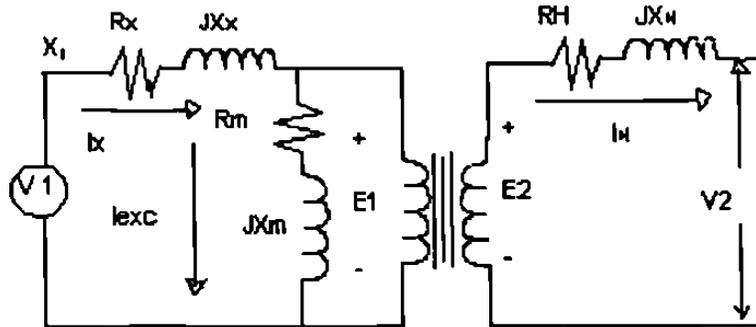


Figura 24. Modelo de 6 parámetros, el lado de baja tensión como primario.

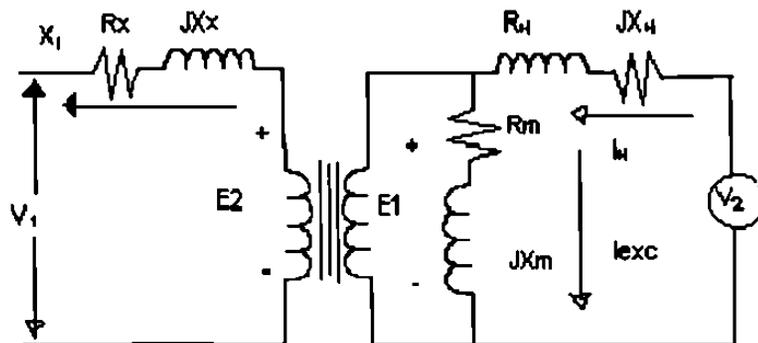
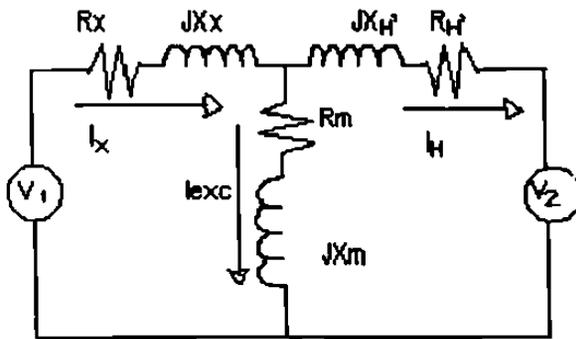


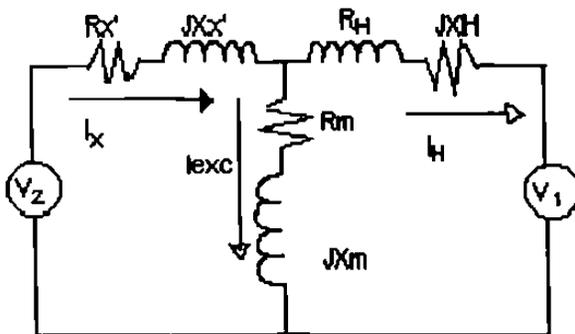
Figura 25. Modelo de 6 parámetros tomando el lado de alta tensión como primario.

## Parámetros

$E_1$ y $E_2$	Voltaje Inducidos Internos
$V_1$ y $V_2$	Voltaje en terminales (externos)
$R_m + jX_m$	Rama de excitación (solo en los lados primarios)
$R_X$	resistencia del devanado de baja tensión
$R_H$	resistencia del devanado de alta tensión
$jX_X$	Reactancia de disipación del devanado de baja tensión
$jX_H$	Reactancia de disipación del devanado de alta tensión.
$I_X$	Corriente de baja.
$I_H$	Corriente de alta.
$I_{exc}$	corriente de excitación.



Circuito Reflejado al lado de baja tensión



Circuito Reflejado al lado de alta tensión

Figura 26. Reflexión de impedancias en un transformador

## 4.12 Obtención de los 6 parámetros del transformador realizando 2 pruebas.

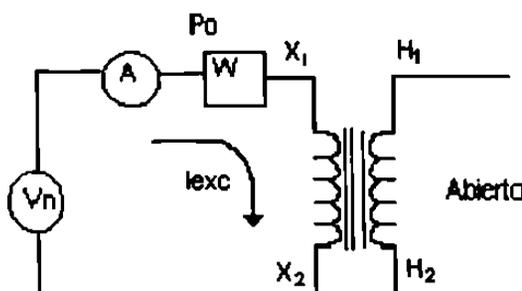
- Prueba de Vacío (para determinar  $R_m$  y  $X_m$ )
- Prueba de Corto circuito (para determinar  $R_X$ ,  $X_X$ ,  $R_H$  y  $X_H$ )

## Prueba de vacío

Se recomienda que se alimente el lado de baja tensión.

Condiciones de la prueba.

- aplicar el voltaje nominal
- el secundario abierto (sin carga).



$P_o$  = Potencia de vacío  
 $I_{exc}$  = Corriente de Excitación  
 $V_n$  = Voltaje Nominal

$$R_m = (P_o / I_{exc}^2) - R_x$$

$$X_m = X_T - X_x$$

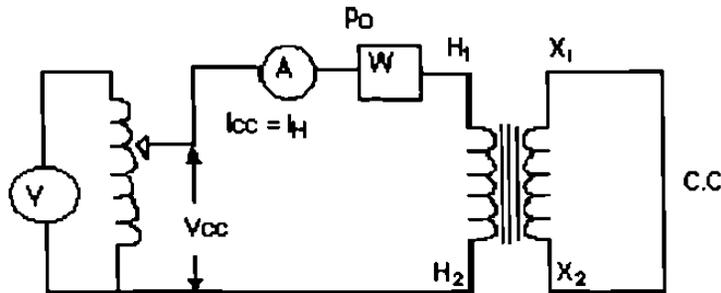
$$X_T = \sqrt{(V_m / I_{exc})^2 - (R_x + R_m)^2}$$

Prueba de Cortocircuito.

Se recomienda que se alimente el lado de alta tensión.

Condiciones de la prueba.

1. Cortocircuito en el secundario.
2. Aplicar un voltaje bajo al lado que se alimenta para que el transformador tome la corriente nominal de ese lado.



V<sub>cc</sub> = Voltaje de CC  
 P<sub>cc</sub> = Potencia de CC  
 I<sub>cc</sub> = Corriente de CC = I nominal.

$$R_H = R_{X'} \quad R_H + R_{X'} = P_{cc} / I_{cc}^2$$

$$X_T = X_H + X_{X'} \quad X_H = X_{X'}$$

$$X_T = \sqrt{(V_{cc} / I_{cc})^2 - (R_H + R_{X'})^2}$$

#### 4.13 Transformadores Trifasicos.

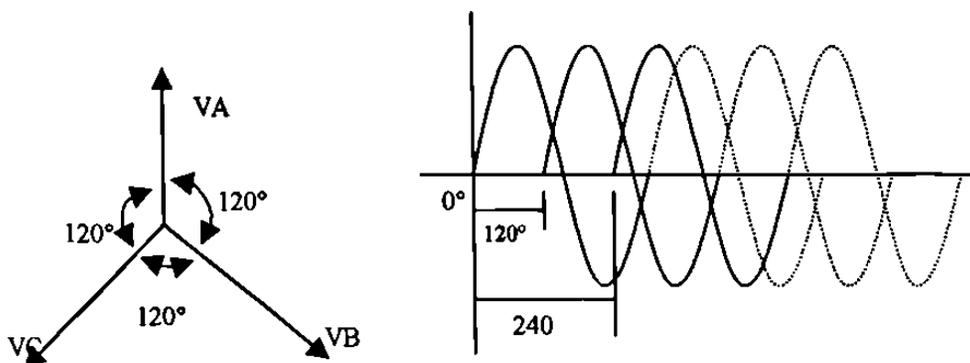
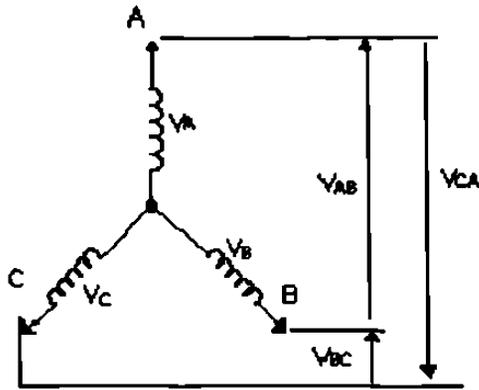


Figura 27. Forma de onda del voltaje trifasico

Conexiones de los transformadores.

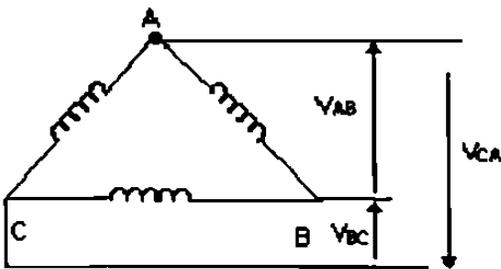


$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} =$  Voltaje de línea  
 $V_A, V_B, V_C =$  Voltaje de fase

$$V_L = \sqrt{3} V_f$$

$$I_L = I_f$$

a) Estrella



$$V_A = V_B = V_C = V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$$

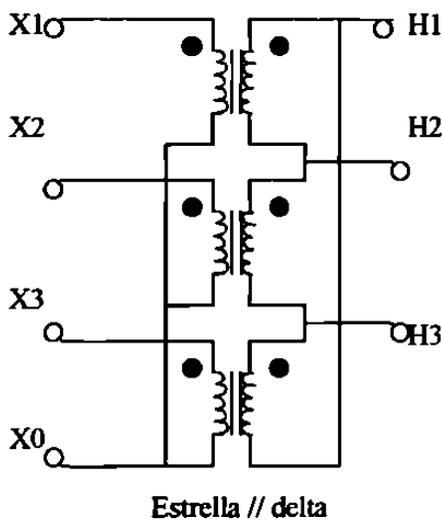
$$I_L = \sqrt{3} I_f$$

$$V_L = V_f$$

b) Delta.

Figura 28. Conexiones delta-estrella de un transformador

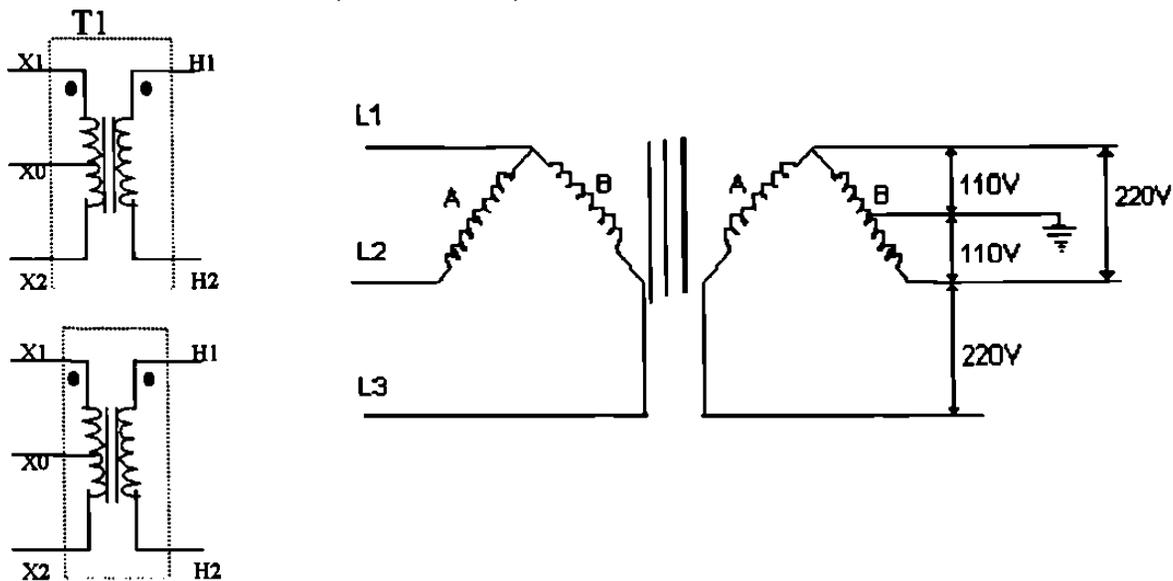
4.14 Conexiones entre transformadores monofasicos para formar transformadores trifasicos.



Baja	Alta
▽	▽
▽	Y
Y	Y
Y	▽

Figura 29 Conexión de tres transformadores monofasicos para formar uno trifasico.

**Transformador de Distribución (delta abierto) comercial**



T2 **Figura 30** Transformador de distribución comercial delta-abierto

**4.15 Regulación de Voltaje**

La regulación de voltaje significa que tanto cae el voltaje desde el vacío a la plena carga.

$$\text{Regulación} = \% \text{Reg}$$

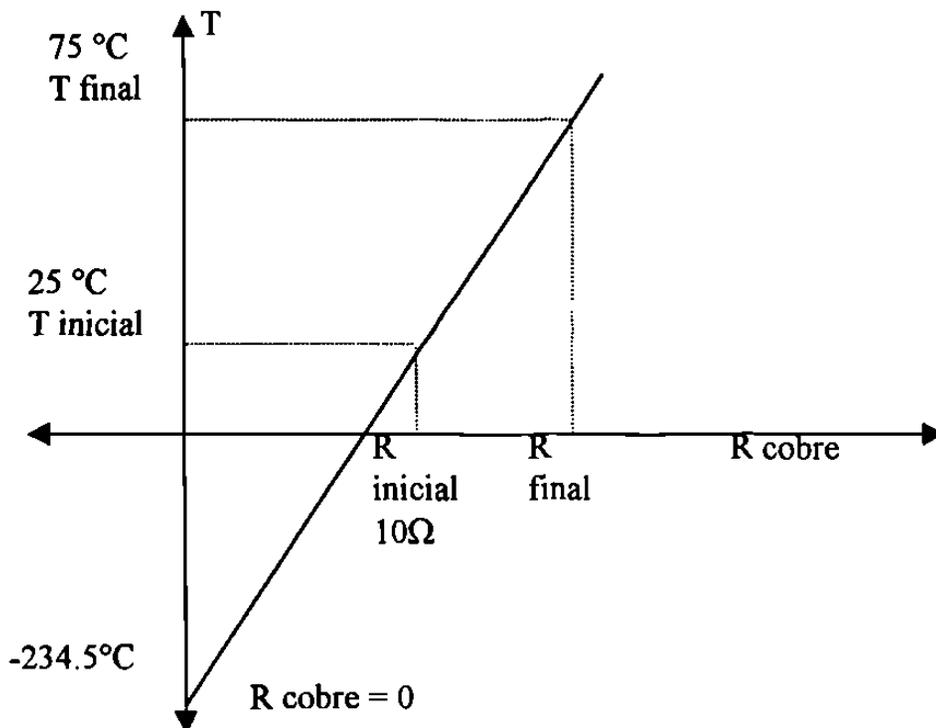
$$\% \text{Reg} = (V_o - V_n / V_n) \times 100$$

$V_o$  = Voltaje de Vacío     $V_n$  = Voltaje bajo Carga.

**4.16 Corrección de Resistencia por Temperatura.**

Ejemplo:  $R = 10 \Omega$  a  $25^\circ$

$R = ?$  a  $75^\circ$



$$\frac{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{inicial}}} = \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{final}}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) R_{\text{inicial}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{75^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}}{25^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) 10 \Omega$$

$$R_{\text{final}} = 11.92 \Omega$$

#### 4.17 Fabricación De Transformadores Comerciales

Los transformadores TUSA son producidos en un amplio parque industrial, equipado con la maquinaria mas avanzada e instrumentos de extrema precisión.

Por eso, desde la fabricación los ensayos y el riguroso control de calidad en la recepción de los materiales hasta las pruebas finales, dan garantías de productos eficientes con calidad a la altura del nombre Siemens.

##### Transformadores normalizados

Son transformadores para instalación en redes aéreas de distribución de energía eléctrica, con niveles de aislamiento de clase tensión 15 y 25 kv., en aceite mineral aislante, refrigerados naturalmente, adecuados para montaje en poste.

##### Características básicas

Norma genérica

NOM-J-116-1989

##### Ejecución

Tanque sellado

##### Potencias normalizadas Kva

30,45,75,112.5,150,225

##### Frecuencia (Hz)

60

##### Grupo de conexiones

$\Delta$ -Y con neutro fuera del tanque

##### Tensiones primarias(V)

15kV:13860/13530/13200/12870/12540

25kV:24150/23575/23000/22425/21850

## Conmutaciones con el transformador desenergizado

Por conmutador interno accionado a través del registro de mano localizado en la tapa del transformador hasta 150 KVA y accionamiento externo para 225 kVA.

Tensión secundaria (V)  
440/254 ó 220/127

### Núcleo

Construido con lamina de acero al silicio rolada en frío, tipo grano orientado.

### Devanados

Primario: construido con conductores de sección circular, aislados con esmalte reforzado, clase térmica B (130°C).

### Material del tanque

Fabricado con lamina de acero SAE 1010/1020, con los siguientes espesores:

Tapa: 2.65mm.  
Cuerpo: 2.65mm.  
Fondo: 3.0mm.

### Radiadores

Los disipadores de calor son radiadores de tubo de acero con espesor de 1.6mm, soldados al tanque.

### Hermeticidad de las soldaduras

Es probada con cada unidad con liquido penetrante regente a rayos ultravioleta.

### Pintura del tanque

Interna: después de la limpieza mecánica y con solventes de las superficies, se aplica una mano de pintura epoxi-poliamida con pigmentos de oxido de hierro con 30 micras de espesor.

Externa: la superficie son limpiadas con chorros abrasivos al estándar SA 2 ½ de la norma SIS 055900. Como fondo se aplican dos manos de pintura eposi-poliamida, tipo alto espesor con pigmentos de oxido de hierro aplicadas por procesos flooding, con un espesor total de 100 micras. La terminación es hecha con una mano de pintura de poliuretano alifático, gris claro, pigmento de dióxido de titanio y un espesor de 40 micras.

### Indicación del nivel de aceite

Por medio de una marca indeleble en la pared interna del tanque para transformadores hasta 150 kVA e indicador magnético para los de 225 kVA.

### Registro de mano

Destinado para la inspección visual de la parte superior del transformador, para accionar el conmutador de tensiones y para verificar el nivel de aceite. Esta localizada en la tapa del tanque con empaques y resaltos para evitar la penetración de la humedad.

### **Boquillas terminales**

#### **Alta Tensión**

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla, para un diámetro de entrada de 13 $\phi$ mm; fijados internamente en la tapa.

#### **Baja Tensión**

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla para cable de acuerdo a lo indicado de los dibujos de dimensiones, fijado internamente en el tanque.

### **Placa de datos**

Confeccionada en placa de aluminio adonizado de 100 x 1300 mm con los datos de identificación del transformador y del esquema de conexiones de devanados y derivaciones.

### **Garantía de calidad**

Todos los productos TUSA-Siemens son elaborados dentro del sistema Garantía de Calidad, desacuerdo con los parámetros fijados por la Norma ISO 9000.

### **Pruebas de rutina**

Todos los transformadores fabricados son sometidos a las siguientes pruebas:

- Resistencia óhmica de los devanados
- Relación de transformación
- Resistencia del aislamiento
- Desplazamiento angular
- Secuencia de fases
- Pérdidas de excitación
- Pérdidas en carga
- Corriente de excitación (IO)
- Tensión de otro circuito (Z)
- Tensión aplicada al dieléctico
- Tensión inducida

### **Pruebas tipo**

Son efectuadas periódicamente, por criterio de muestras para mantener el control total de los procesos productivos, las siguientes pruebas:

- Tensiones de impulso
- Elevación de temperatura
- Factor de potencia de aislamiento
- Ruido
- Radio interferencia

### **Pruebas especiales**

Son efectuadas pruebas de resistencia dinámica al corto circuito en los transformadores fabricados como prototipos de nuevas series de productos.

## Dimensiones

Potencia	Dimensiones (mm)					
(kVA)	Largo C		Ancho L		Alto A	
	15kV	24.2kV	15kV	24.2kV	15kV	24.2kV
15	730	735	520	450	825	1075
30	870	795	520	545	865	11115
45	910	965	540	555	900	1140
75	1095	1145	650	640	955	1175
112.5	1260	1300	725	745	1005	1225
150	1300	1335	740	755	1055	1315
	Aceite		Total			
	15kV	24.2kV	15kV	24.2kV		
	25	45	155	190		
	30	55	200	260		
	40	65	225	320		
	50	85	345	430		
	70	105	470	550		
	85	135	570	685		

Potencia	Dimensiones (mm)					
(kVA)	Largo C		Ancho L		Alto A	
	15 kV	25 kV	15 kV	25 kV	15 kV	25 kV
225	1350	1400	750	775	1465	1600
Potencia	Masa (Kg)					
(kVA)	Aceite		Total			
	15 kV	25 kV	15 kV	25 kV		
225	200	240	900	945		

Tabla 5 Dimensiones de transformadores según su potencia

## 4.18 Principales materiales y componentes de nuestros transformadores

## Bobinas

La construcción de nuestras bobinas es procesada con cobre electrolítico de muy alta conductividad, en todos los devanados con forro apropiado para alta temperatura, garantizado así menores pérdidas.