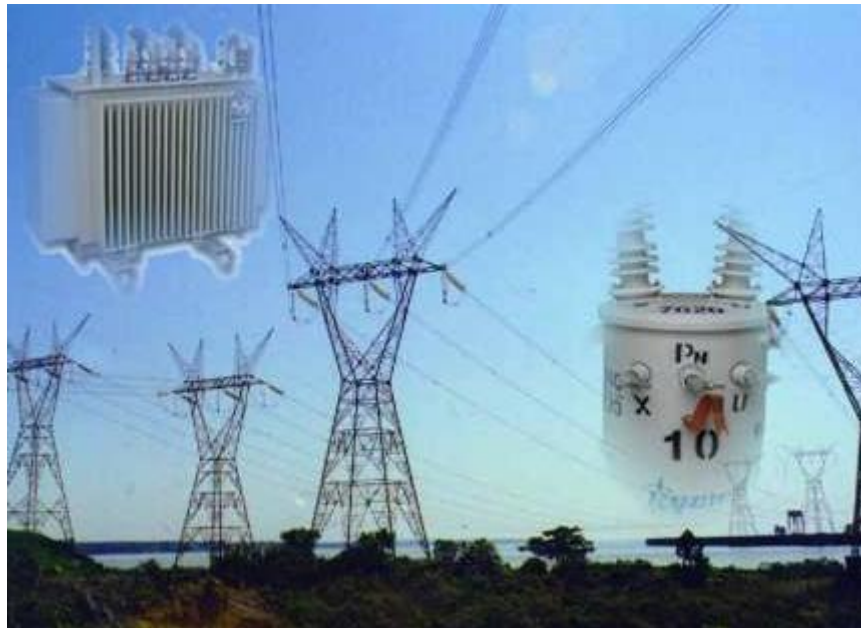




TRANSFORMADORES



INDICE

- ORIENTACIONES METODOLOGICAS. (Pag. 4)
- OBJETIVOS. (Pag. 5)
- CONTENIDOS. (Pag. 6)
- CRITERIOS DE EVALUACION. (Pag. 7)

TRANSFORMADORES

- 1.- INTRODUCCIÓN. (Pag. 9)
- 2.- CONSTITUCION DE UN TRANSFORMADOR. (Pag. 12)
- 3.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. (Pag. 18)
 - 3.1.- TRANSFORMADOR IDEAL. (Pag. 19)
 - 3.1.1.- TRANSFORMADOR IDEAL FUNCIONANDO EN VACIO. (Pag. 19)
 - 3.1.2.- TRANSFORMADOR IDEAL FUNCIONANDO EN CARGA. (Pag. 21)
 - 3.2.- TRANSFORMADOR REAL. (Pag. 23)
 - 3.2.1.- TRANSFORMADOR REAL FUNCIONANDO EN VACIO. (Pag. 24)
 - 3.2.1.1.- ENSAYO DE VACÍO. (Pag. 26)
 - 3.2.2.- TRANSFORMADOR REAL FUNCIONANDO EN CARGA. (Pag. 30)
- 4.- CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR. (Pag. 35)
 - 4.1.- REDUCCIÓN DEL SECUNDARIA AL PRIMARIO. (Pag. 35)
 - 4.2.- REDUCCIÓN DEL PRIMARIO AL SECUNDARIO. (Pag. 40)
- 5.- ESTUDIO DEL TRANSFORMADOR EN CORTOCIRCUITO. (Pag. 42)
 - 5.1.- ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. (Pag. 43)
 - 5.2 REALIZACIÓN PRÁCTICA DEL ENSAYO DE CORTOCIRCUITO. (Pag. 44)
 - 5.2.1.- DETERMINACION DE LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE. (Pag. 45)
 - 5.3 CORTOCIRCUITO ACCIDENTAL. (Pag. 46)
- 6.- CAIDE DE TENSION EN UN TRANSFORMADOR. (Pag. 47)
 - 6.1.- DIAGRAMA DE KAPP. (Pag. 49)
 - 6.2 CARACTERISTICA EXTERIOR. (Pag. 50)
- 7.- RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR. (Pag. 50)
- 8.- TRANSFORMADORES TRIFASICOS. (Pag. 53)
 - 8.1.- TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN VACÍO. (Pag. 56)
 - 8.1.1.- ENSAYO EN VACIO. (Pag. 56)
 - 8.2.- TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN CARGA. (Pag. 56)
 - 8.3.- TRANSFORMADOR TRIFASICO EN CORTOCIRCUITO. (Pag. 57)
 - 8.3.1.- ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. (Pag. 57)
 - 8.4.- CIRCUITO EQUIVALENTE. (Pag. 58)

- 8.5.- CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. (Pag. 58)
 - 8.5.1.- CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA. (Pag. 58)
 - 8.5.2.- CONEXIÓN ESTRELLA-TRIÁNGULO. (Pag. 60)
 - 8.5.3.- CONEXIÓN ESTRELLA-ZIGZAG. (Pag. 61)
 - 8.5.4.- CONEXIÓN TRIÁNGULO-TRIÁNGULO. (Pag. 65)
 - 8.5.5.- CONEXIÓN TRIANGULO-ESTRELLA. (Pag. 66)
- 9.- ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES. (Pag. 67)
 - 9.1- ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS. (Pag. 70)
 - 9.1.1.- IGUALDAD EN LAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN. (Pag. 71)
 - 9.1.2.- IGUALDAD EN LAS TENSIONES DE CORTOCIRCUITO. (Pag. 71)
 - 9.1.3 CONEXIÓN CORRECTA DE TERMINALES HOMÓLOGOS. (Pag. 72)
 - 9.1.4.- RELACIÓN DE POTENCIAS EN LOS TRANSFORMADORES ACOPLADOS EN PARALELO. (Pag. 73)
 - 9.2- ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFASICOS. (Pag. 73)
 - 9.2.1.- DESFASES DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. (Pag. 74)
 - 9.2.2.- CONEXIONES POSIBLES EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. (Pag. 75)
 - 9.2.2.1.- FORMAS DE CONEXIÓN EN ESTRELLA. (Pag. 75)
 - 9.2.2.2.- FORMAS DE CONEXIÓN EN TRIÁNGULO. (Pag. 76)
 - 9.2.2.3.- FORMAS DE CONEXIÓN ZIGZAG. (Pag. 76)
 - 9.3.- INDICE DE CONEXIÓN EN LA EXPRESIÓN HORARIA. SÍMBOLO DE GRUPO. (Pag. 77)
 - 9.3.1.- GRUPOS DE CONEXIÓN. (Pag. 78)
 - 9.3.2.- GRUPOS DE CONEXIÓN C.E.I. Y UNE. (Pag. 79)
 - 9.4.- POSIBILIDAD DE ACOPLAMIENTO EN PARALELO. (Pag. 81)
 - 9.5.- ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE TERMINALES HOMÓLOGOS EN EL ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. (Pag. 81)
- 10.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES. (Pag. 84)
- 11.- PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES. (Pag. 91)
- 12.- EFICIENCIA ENERGETICA DE LOS TRANSFORMADORES. (Pag. 97)
 - 12.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA. (Pag. 98)
 - 12.2.- PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES. (Pag. 99)
 - 12.3.- MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL USO DE TRANSFORMADORES. (Pag. 109)

ELECTROTECNIA

ORIENTACIONES METODOLÓGICAS

La Electrotecnia debe introducir al alumno o alumna en la comprensión de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos así como en sus aplicaciones, tomando como punto de partida la integración de conocimientos e instrumentos adquiridos en materias como Física y química, Tecnología y Matemáticas.

De acuerdo con los objetivos y finalidades de las materias de modalidad la Electrotecnia proporcionará una formación de carácter específico, y en consonancia con su papel integrador utilizará una metodología basada en los modelos explicativos y en el método científico, propios de la Física, y el empleo de métodos de análisis, cálculo y representación gráfica propios de las Matemáticas. Se pretende, en definitiva, dar una formación científico-práctica proporcionando al alumnado aprendizajes relevantes que le capaciten para acometer estudios posteriores y le doten de un cierto grado de polivalencia que permita su adaptación a los continuos cambios tecnológicos.

Los principios metodológicos que deben guiar el proceso de enseñanza-aprendizaje son los siguientes:

La metodología ha de ser activa y participativa motivando al alumno o alumna con ejemplos prácticos y reales sobre los contenidos desarrollados, de modo que se fomente la participación mediante cuestiones y debates sobre dichos ejemplos. En todo el proceso se trabajarán los contenidos con la intención de lograr los objetivos, expresados éstos en forma de capacidades a desarrollar, haciendo partícipe al alumnado de su propio aprendizaje. Se propondrán actividades que permitan al alumnado aplicar los conocimientos adquiridos y relacionarlos para tomar decisiones conducentes a la solución de cuestiones propuestas. En los cálculos realizados y los resultados numéricos obtenidos, se prestará especial atención a su significado e interpretación coherente, llevando a la utilización de unos determinados componentes en circuitos y máquinas eléctricas, con características que el alumnado debe ser capaz de localizar en catálogos e informaciones técnicas para su selección.

En resumen, se busca la incorporación del saber hacer de modo que los contenidos den lugar a un aprendizaje significativo, para ello el saber hacer necesita de un soporte conceptual que imprima al alumno o alumna un rigor en el estudio de lo básico y no cambiante de la Electrotecnia como ciencia.

Se fomentará la capacidad del alumnado para aprender por sí mismo. Tomando como punto de partida sus conocimientos previos podrán plantearse actividades sobre nuevos contenidos. El papel del profesor o profesora será de guía y mediador o mediadora, ayudando a relacionar las ideas previas del alumnado con los nuevos contenidos, garantizando así la funcionalidad de los aprendizajes.

Debe promoverse la utilización racional de las tecnologías de la información y comunicación. Mediante el uso de programas informáticos específicos y el acceso a internet se permitirá a los alumnos y alumnas obtener aprendizajes más significativos, la búsqueda de información sobre características técnicas de materiales, equipos e instalaciones y la actualización permanente de estas informaciones. También ayuda a intercambiar monográficos y artículos de opinión sobre los contenidos objeto de estudio.

La consolidación del hábito de lectura y la capacidad de expresión en público mediante la interpretación de artículos técnicos, la utilización de técnicas de resumen y sinopsis y su presentación al grupo. En las lecturas a proponer se trabajarán aspectos

relacionados con la educación en valores, tales como, las repercusiones ambientales de componentes y procesos; la repercusión de los desarrollos en el campo de la Electrotecnia en el consumo y en el ocio y su contribución al respeto de los derechos humanos.

El trabajo en equipo asentando hábitos de convivencia democráticos, tolerancia, respeto y cooperación, como elementos enriquecedores del proceso de enseñanza-aprendizaje promoverá métodos de investigación en la realización de las actividades. Se facilitará la realización, por parte del alumnado, de trabajos de investigación monográficos, interdisciplinarios u otros de naturaleza análoga que impliquen a uno o varios departamentos de coordinación didáctica.

La evaluación del proceso será continua, deberá estar integrada en los elementos curriculares, con un carácter formativo, tomando como referencia los objetivos y los criterios de evaluación, actuando como elemento regulador y orientador del proceso educativo facilitando al profesorado la adecuación de sus intervenciones y la atención a la diversidad de intereses y motivaciones.

Las actividades sobre las que se articulará la consecución de objetivos y el consiguiente desarrollo de capacidades por parte del alumnado podrán ser de: exploración y presentación de los contenidos, motivación, comprensión y memorización, investigación, demostración, aplicación de los conocimientos adquiridos, análisis y síntesis y evaluación. En todas ellas deberá guiarse el proceso:

De lo sencillo a lo complejo.

De lo práctico a lo teórico.

De lo experimental a lo conceptual.

De lo conocido a lo desconocido.

De lo próximo a lo lejano.

De lo concreto a lo abstracto.

A lo largo del desarrollo de cualquiera de las actividades mencionadas el profesor o profesora debe motivar al alumnado en actitudes positivas hacia el orden, hacia la precisión y exactitud en el manejo de equipos, en el montaje y conexionado de circuitos y en la realización de medidas electrotécnicas en general. En todo ello deberá desarrollarse el hábito de respeto a los protocolos de seguridad establecidos, tanto para equipos como para las personas fomentando la igualdad entre sexos, la convivencia pacífica, y el respeto a los derechos humanos en las decisiones tomadas.

OBJETIVOS

La enseñanza de la Electrotecnia en el Bachillerato tendrá como finalidad el desarrollo de las siguientes capacidades:

1.- Comprender el comportamiento de dispositivos eléctricos y electromagnéticos sencillos y los principios y leyes físicas que los fundamentan.

2.- Entender el funcionamiento y utilizar los componentes de un circuito eléctrico que responda a una finalidad determinada.

3.- Obtener el valor de las principales magnitudes de un circuito eléctrico compuesto por elementos discretos en régimen permanente por medio de la medida o el cálculo.

4.- Describir los elementos de las máquinas eléctricas y su principio de funcionamiento, relacionándolos con la función que desempeñan en el conjunto y con las características fundamentales de la máquina.

5.- Calcular y analizar el valor de las magnitudes electrotécnicas fundamentales de las máquinas eléctricas.

6.- Analizar e interpretar esquemas y planos de instalaciones y equipos eléctricos característicos, comprendiendo la función de un elemento o grupo funcional de elementos en el conjunto.

7.- Seleccionar e interpretar información adecuada para plantear y valorar posibles soluciones, en el ámbito de la electrotecnia, a cuestiones y problemas técnicos comunes.

8.- Conocer el funcionamiento y utilizar adecuadamente los aparatos de medida de magnitudes eléctricas, estimando su orden de magnitud y valorando su grado de precisión.

9.- Proponer soluciones a problemas en el campo de la electrotecnia con un nivel de precisión coherente con el de las diversas magnitudes que intervienen en ellos.

10.- Comprender descripciones y características de los dispositivos eléctricos y electromagnéticos, y transmitir con precisión conocimientos e ideas sobre ellos utilizando vocabulario, símbolos y formas de expresión apropiadas.

11.- Actuar con autonomía, confianza y seguridad al inspeccionar, manipular e intervenir en circuitos y máquinas eléctricas para comprender su funcionamiento.

CONTENIDOS

1. Contenidos comunes

- Utilización de métodos propios de la actividad científica y técnica, como el planteamiento de problemas, valoración de su interés y la conveniencia o no de su estudio, formulación de hipótesis, realización de diseños experimentales, desarrollo de estrategias para su resolución y análisis de los resultados y de su fiabilidad.

- Búsqueda de información técnica, científica y normativa en fuentes diversas, bibliográficas o a través de las tecnologías de la información y la comunicación.

- Interpretación y comunicación de datos e informaciones de carácter científico y técnico de forma oral y escrita empleando la terminología precisa y la notación científica.

- Aplicación de las normas de seguridad en las instalaciones eléctricas y utilización de dispositivos de protección.

- Trabajo en equipo en forma cooperativa e igualitaria, valorando las aportaciones individuales y manifestando actitudes democráticas de tolerancia y respeto.

- Aplicación de medidas para la protección del medio ambiente, reduciendo el consumo de energía eléctrica y reciclando materiales y componentes eléctricos y electrónicos.

5. Máquinas eléctricas

- Transformadores. Constitución. Funcionamiento. Tipos. Conexión. Características y magnitudes: potencias e intensidades. Pérdidas. Rendimiento.

- Manejo y análisis de catálogos, placas de características y documentación técnica de las distintas máquinas eléctricas, donde se identifiquen sus principales características y esquemas de conexión, arranque y regulación, diferenciando los elementos de protección, maniobra, control y regulación.

- Análisis y cálculo de las principales características y magnitudes de las máquinas eléctricas, y su aplicación a la elección de la más adecuada a un determinado supuesto, utilizando la documentación técnica de los fabricantes.

- Eficiencia energética de los dispositivos electrónicos de control y regulación en la utilización de la energía eléctrica.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Explicar cualitativamente el funcionamiento de circuitos simples destinados a producir luz, fuerza motriz o calor y señalar las relaciones e interacciones entre los fenómenos que tienen lugar.

Con este criterio se comprobará el conocimiento de los efectos de la corriente eléctrica y sus aplicaciones más importantes; la evaluación que los estudiantes hacen de las necesidades energéticas que la sociedad tiene en la actualidad, en especial la asturiana, y la valoración cuantitativa de las posibles alternativas para obtener en cada una de las aplicaciones una mayor eficiencia energética y con ello una mayor reducción del consumo de energía, disminuyendo con ello el impacto medioambiental.

2. Seleccionar elementos o componentes de valor adecuado y conectarlos correctamente para formar un circuito, característico y sencillo.

Se trata de evaluar la capacidad de realizar con autonomía creciente circuitos eléctricos desarrollados de forma esquemática y de utilizar y dimensionar, apoyándose en los cálculos y en los catálogos técnicos de los fabricantes, los elementos necesarios para su realización. Se comprobará si se comprende su funcionamiento en su conjunto y el de cada uno de los elementos que lo compone.

3. Explicar cualitativamente los fenómenos derivados de una alteración en un elemento de un circuito eléctrico sencillo y describir las variaciones que se espera que tomen los valores de tensión, corriente y potencia.

Con este criterio de evaluación se pretende comprobar la capacidad de calcular con antelación las variaciones de las magnitudes presentes en un circuito cuando en éste se produce la variación de alguno de sus parámetros y si se conocen aquellos casos en los que estas variaciones pueden producir situaciones peligrosas para las instalaciones y para los usuarios de las mismas, desde el punto de vista de la seguridad eléctrica.

4. Calcular y representar vectorialmente las magnitudes básicas de un circuito mixto simple, compuesto por cargas resistivas y reactivas, y alimentado por un generador senoidal monofásico o trifásico.

Através de este criterio se comprobará si se conoce la metodología necesaria para calcular un circuito conectado a la red de distribución eléctrica y la capacidad de utilizar las herramientas de cálculo necesarias para cuantificar y analizar las distintas magnitudes eléctricas presentes en cada uno de los elementos de un circuito mixto.

5. Explicar la constitución, el principio de funcionamiento, la tipología y las características de las máquinas eléctricas.

Se pretende evaluar la capacidad del alumno o alumna para explicar cualitativamente el funcionamiento de las distintas máquinas eléctricas y analizar su comportamiento cuando varían los diversos parámetros de la red eléctrica que les suministra energía, los de la carga que soportan o cualquier otro que pueda modificar el usuario.

6. Analizar planos de circuitos, instalaciones y equipos eléctricos de uso común e identificar la función de un elemento discreto o de un bloque funcional en el conjunto.

Con este criterio se evalúa la capacidad de analizar y desarrollar planos de instalaciones eléctricas habituales, de realizar dichos planos, utilizando simbología normalizada, en función del fin que tenga la instalación, y de valorar la importancia que para otro tipo de profesionales tiene la adecuada realización de los mismos.

7. Representar gráficamente en un esquema de conexiones o en un diagrama de bloques funcionales la composición y el funcionamiento de una instalación o equipo eléctrico sencillo y de uso común.

En este criterio se evaluará si se identifican, mediante los sistemas gráficos de representación, los elementos que componen un sistema y si se conoce cuál es el uso común de cada uno de ellos, su razón de ser dentro del conjunto del sistema y la adecuación o no a la aplicación en la que se encuentra incluido, desde el punto de vista técnico y económico.

8. Interpretar las especificaciones técnicas de un elemento o dispositivo eléctrico y determinar las magnitudes principales de su comportamiento en condiciones nominales.

El objetivo de este criterio es comprobar el conocimiento de las especificaciones básicas de un componente de un sistema eléctrico, la capacidad para seleccionar y dimensionar adecuadamente cada uno de los componentes de un sistema eléctrico y predecir el comportamiento del mismo en condiciones nominales, todo ello partiendo de la información técnica suministrada por el fabricante a través de tablas, hojas de especificaciones, gráficos y placas de características.

9. Medir las magnitudes básicas de un circuito eléctrico y seleccionar el aparato de medida adecuado, conectándolo correctamente y eligiendo la escala óptima.

Se trata de evaluar la capacidad de seleccionar el aparato de medida necesario para realizar la medida de la magnitud deseada, la escala de medida en previsión del valor estimado de la medida, el modo correcto de realización de la medida en el procedimiento y en la forma de conexión del equipo de medida, y realizar la misma de forma que resulte segura tanto para el alumnado como para las instalaciones sobre las cuales se desea medir.

10. Interpretar las medidas efectuadas sobre circuitos eléctricos o sobre sus componentes para verificar su correcto funcionamiento, localizar averías e identificar sus posibles causas.

Se pretende comprobar si se conoce y valora la importancia de la realización de la medida de las magnitudes eléctricas de un circuito para la comprobación del correcto funcionamiento del mismo y/o el hallazgo de las posibles averías que pudiera presentar. También se pretende evaluar si el alumno o alumna es capaz de realizar un procedimiento pautado de localización de averías a través de la realización de diferentes medidas eléctricas que permitan identificar las posibles causas de la misma, minimizando el coste del mantenimiento correctivo sobre la avería y el tiempo de desconexión del circuito, maximizando y priorizando, en todo caso, la seguridad de las personas y del sistema.

Asimismo, se valorarán los resultados del proceso de verificaciones eléctricas y la capacidad de dictaminar si el circuito eléctrico está en las condiciones mínimas exigibles para su conexión a un suministro eléctrico.

11. Aplicar diversas estrategias para la resolución de problemas del campo de la electrotecnia, expresando los resultados oralmente y por escrito de forma precisa y coherente, valorando su pertinencia.

Este criterio persigue valorar la competencia del alumnado para realizar experiencias y abordar de forma autónoma la resolución de problemas técnicos, empleando diversas estrategias, medios y recursos, incluidas las TIC, para obtener, describir, valorar y exponer las posibles soluciones de los mismos, utilizando el lenguaje y las magnitudes matemáticas de forma rigurosa, correcta y coherente.

TRANSFORMADORES

- Transformadores. Constitución. Funcionamiento. Tipos. Conexión. Características y magnitudes: potencias e intensidades. Pérdidas. Rendimiento.

1.- INTRODUCCIÓN

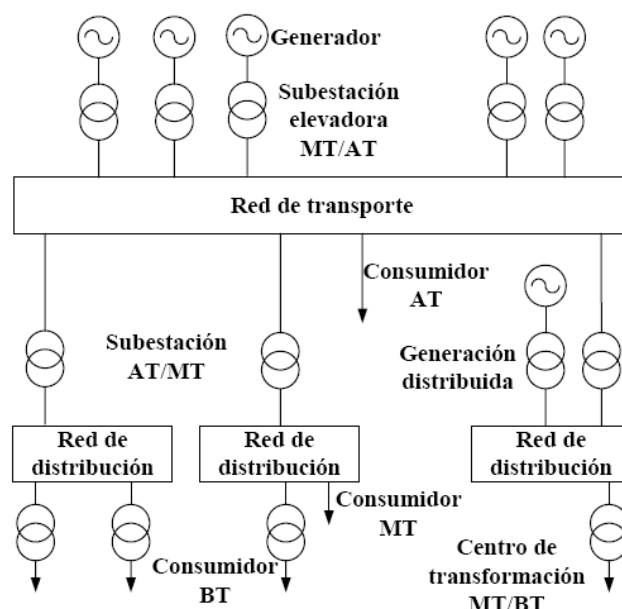
La energía eléctrica es una de las formas de energía que mejor se puede transportar a grandes distancias. Se puede obtener de diversas fuentes primarias de energía y es la que más usos y aplicaciones ofrece en la vida cotidiana.

Sin embargo para que se cumpla lo anterior es indispensable disponer un sistema interconectado mediante el cual nos sea posible generar la energía, transportarla y distribuirla a todos los usuarios en forma eficaz, segura y con calidad.

En este sistema la energía eléctrica, desde su generación hasta su entrega en los puntos de consumo, pasa por diferentes etapas de adaptación, transformación y maniobra. Para la correcta operación del sistema son necesarios equipos que sean capaces de transformar, regular, maniobrar y proteger.

El sistema eléctrico debe cumplir con la tarea de generar energía eléctrica en los lugares más idóneos para tal fin, transformar esa electricidad a unas características propias para transportarla grandes distancias, transformarla nuevamente para poder ser distribuida en los centros de consumo y finalmente adaptarla a valores aptos para los usuarios.

Estructura de los sistemas de energía eléctrica



El sistema eléctrico está compuesto por los siguientes elementos:

- Centrales generadoras de energía.
- Estaciones transformadoras elevadoras.
- Líneas de transporte.
- Subestaciones de transformación reductoras.

- Subestaciones de distribución.
- Red de distribución primaria.
- Centros de transformación.
- Red de distribución secundaria.

Red de transporte



Actualmente los sistemas operan con energía eléctrica en forma de corrientes alternas trifásicas, esto es debido a su facilidad para modificar las tensiones de transporte por medio de transformadores. Otra razón para el uso de corrientes alternas trifásicas es la simplicidad de los generadores y transformadores que trabajan con este tipo de corrientes, así mismo resulta también más sencilla y económica la transmisión y la distribución de este tipo de corrientes.

La generación de energía eléctrica (hidráulicas, térmicas, nucleares, eólicas, solares, etc.), se logra generalmente a niveles de tensión menores a los 30 kV, el generar a mayores tensiones sería más costoso debido a las dimensiones y al aislamiento necesario en los generadores. Esta tensión no es la más apropiada para el transporte a largas distancias a causa de las pérdidas que se producirían en los conductores, por lo que es necesario instalar transformadores elevadores.

Las estaciones transformadoras elevadoras tienen por función elevar la tensión de generación a la tensión de transmisión (220 ó 440 KV). Esto debido a que generalmente las centrales se encuentran alejadas de los grandes centros de consumo, así que debe ser transportada. Y con el fin de que el transporte se haga con las menores pérdidas y la instalación de las líneas de transmisión resulte más económica se elevan las tensiones de generación a estos rangos. Esta elevación de tensión justo después de su generación implica tener valores de corriente bajos para una potencia determinada, y no provocar pérdidas elevadas en la impedancia propia de la línea de transmisión. Al final de la etapa de transmisión en las cercanías de los

centros de consumo, se hace entonces necesaria una reducción de la tensión, para su correcta distribución y entrega a usuarios.

Otra de las ventajas derivadas de transportar la energía eléctrica a valores altos de tensión, y en consecuencia valores reducidos de corriente, es el ahorro económico que implica poder utilizar cables con menor sección; ya que para la misma potencia a transportar pero a menores valores de tensión serían necesarios conductores de mayor sección, más costosos, para transmitir energía con valores más altos de corriente.

Las subestaciones reductoras tienen la función básica de reducir los valores de tensión de transmisión a valores propios para el reparto en las áreas industriales de los grandes centros de consumo, así como para las subestaciones de distribución del propio sistema eléctrico. Estos valores pueden ser 138, 115 o 69 kV. Frecuentemente estas subestaciones realizan la misión de interconexión entre distintas líneas de transmisión, con la intención de formar anillos en áreas de consumo importante y asegurar la continuidad en el servicio ante la presencia de fallas en alguna de estas subestaciones. En estos casos las subestaciones reductoras cumplen también con la función de maniobra. Las subestaciones de distribución transforman los valores de tensión de las redes de distribución primarias a valores de distribución en media tensión, 13, 23 ó 33 kV.

Subestaciones



La red de distribución es un componente del sistema de suministro, siendo responsabilidad de las compañías distribuidoras. La distribución de la energía eléctrica desde las subestaciones de transformación de la red de transporte se realiza en dos etapas.

La primera está constituida por la red de reparto, que, partiendo de las subestaciones de transformación, reparte la energía, normalmente mediante anillos que rodean los grandes centros de consumo, hasta llegar a las estaciones transformadoras de distribución. Las tensiones utilizadas están comprendidas entre 25 y 132 kV. Intercaladas en estos anillos están las estaciones transformadoras de distribución, encargadas de reducir la tensión desde el nivel de reparto al de distribución en media tensión.

La segunda etapa la constituye la red de distribución propiamente dicha, con tensiones de funcionamiento de 3 a 30 kV y con una disposición en red radial. Esta red cubre la superficie de los grandes centros de consumo (población, gran industria, etc.), uniendo las estaciones transformadoras de distribución con los centros de transformación, que son la última etapa del suministro en media tensión, ya que las tensiones a la salida de estos centros es de baja tensión (230/400 V).

Como sistemas de protección se utilizan conductores aislados, fusibles, seccionadores en carga, seccionadores, órganos de corte de red, reconectores,

interruptores, pararrayos antena, pararrayos autoválvulas y protecciones secundarias asociadas a transformadores de medida, como son relés de protección.

El transformador es una máquina eléctrica estática, que transforma energía eléctrica, con una tensión e intensidad determinada, en energía eléctrica con tensión e intensidad distintas o iguales.

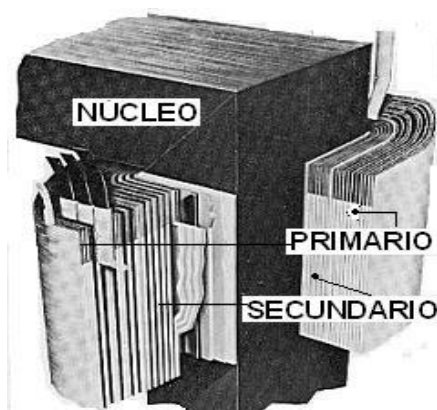
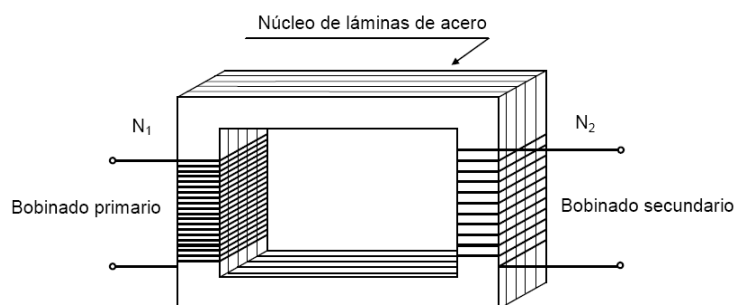
Los transformadores son básicamente, circuitos magnéticos con dos bobinas que convierten energía eléctrica de un nivel de tensión y corriente a otro nivel de tensión y corriente diferente, gracias al distinto número de vueltas de cada uno de los devanados y al flujo común, variable en el tiempo, que ambos enlazan. Estas características lo hacen indispensable en aplicaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica en corriente alterna. El transformador de dos devanados se denomina monofásico, y es el más elemental. En circuitos de potencia trifásicos se usan bancos de tres transformadores monofásicos o bien transformadores trifásicos.

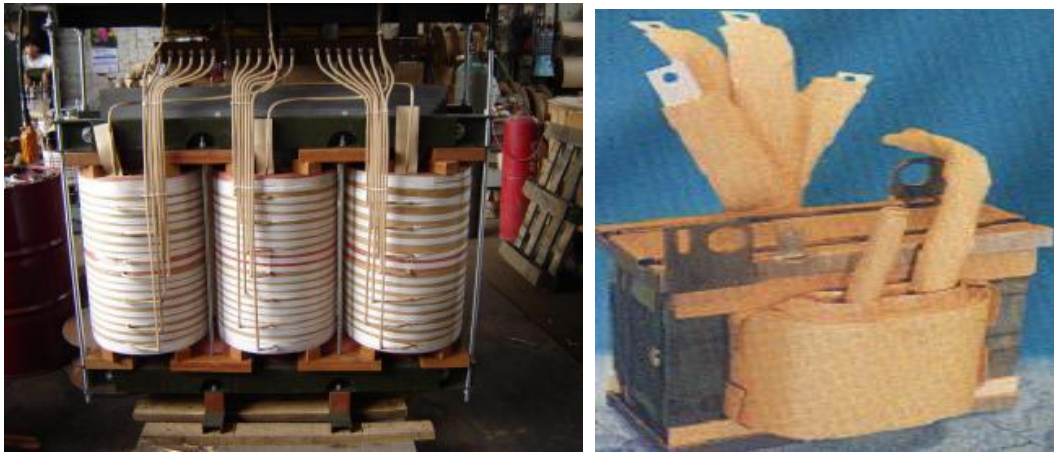
2.- CONSTITUCION DE UN TRANSFORMADOR

Un transformador está constituido por dos circuitos eléctricos acoplados mediante un circuito magnético.

El funcionamiento del transformador se basa en la Ley de inducción de Faraday, de manera que un circuito eléctrico influye sobre el otro a través del flujo generado en el circuito magnético.

Al conectar el devanado primario a una corriente alterna, se establece un flujo magnético alterno dentro del núcleo. Este flujo atraviesa el devanado secundario induciendo una fuerza electromotriz en el devanado secundario. A su vez, al circular corriente alterna en el secundario, se contrarresta el flujo magnético, induciendo sobre el primario una fuerza contraelectromotriz.





Los circuitos eléctricos están formados por bobinas de hilo conductor, normalmente cobre. Estas bobinas reciben el nombre de devanados y, comúnmente se les denomina devanado primario y secundario del transformador.

El bobinado primario con “N1” espiras es aquel por el cual entra la energía y el secundario con “N2” espiras es aquel por el cual se suministra dicha energía.

Estos bobinados están aislados entre sí, y con el núcleo. Los materiales aislantes para el bobinado, o para colocar entre capas, son: papel barnizado, fibra, mica, cinta impregnada, algodón impregnado, etc., para transformadores con bobinados al aire, y para los sumergidos en baños de aceite, se utilizan los mismos materiales sin impregnarse; debe evitarse el uso del caucho en los transformadores en baño de aceite, pues este lo ataca, y tiene efectos nocivos también sobre la mica y aun sobre los barnices.

Las piezas separadoras entre bobinados, secciones, o entre estas y el núcleo pueden ser de madera, previamente cocida en aceite, aunque actualmente se prefieren los materiales duros a base de papel o similares (papel, etc.). Si se usa madera, no debe interpretarse como que se dispone de aislación, sino solamente de un separador.

En cuanto a los conductores para hacer bobinas, su tipo depende de la sección, pues hasta 6mm² pueden usarse alambre y más arriba de ese límite se usan cables de muchos hilos, o bien cintas planas, para facilitar el bobinado. El aislamiento para los conductores puede ser algodón, que luego se impregnará si no se emplea baño de aceite.

La disposición de los devanados en los transformadores, debe ser hecha de tal forma, que se concilien en la mejor forma las dos exigencias, el aislamiento y de la menor dispersión del flujo. La primera requiere de la mayor separación entre devanados, en tanto que la segunda, requiere que el primario se encuentre lo más cercano posible del secundario. En la práctica, se alcanza una solución conveniente del problema con la siguiente disposición de los devanados:

- Concéntricos: En el tipo concéntrico, cada uno de los devanados está distribuido a lo largo de toda la columna, el devanado de tensión más baja se encuentra en la parte interna (más cercana al núcleo) y aislado del núcleo, y del de tensión más elevada, por medio de tubos aislantes (cartón baquelizado, baquelita, etc.).

En la disposición de concéntrico doble, el devanado de tensión más baja se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro.

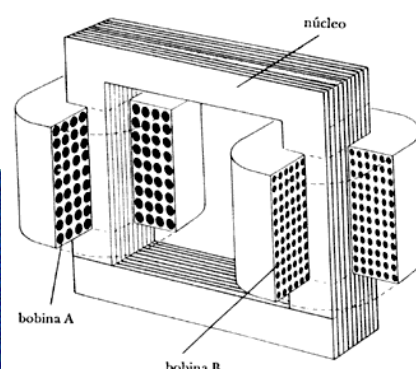
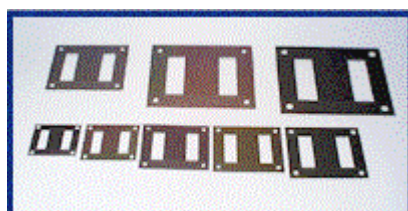
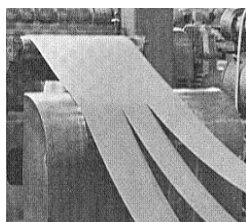
- Alternados: En el llamado tipo alternado, los dos devanados están subdivididos

cada uno en una cinta número de bobinas que están dispuestas en las columnas en forma alternada.

Las consideraciones que orientan desde el punto de vista de diseño, la disposición de los devanados, son aquellos referentes al enfriamiento, el aislamiento, la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos.

El llamado concéntrico doble tiene la prerrogativa de dar lugar a la reactancia de dispersión con valor de alrededor de la mitad de aquel relativo al concéntrico simple. El tipo alternado, en cambio, permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los dos devanados. Para los esfuerzos mecánicos son mejor las disposiciones de tipo alternado, pues permite que el transformador soporte mejor los esfuerzos mecánicos.

El circuito magnético está constituido por chapa magnética de acero aleado a base de Si (3-5%), generalmente de grano orientado laminada en frío, esta laminación tiene la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por los efectos de la histéresis magnética y las corrientes de Foucault. Un espesor típico de la chapa es 0,35 mm. La sección de las columnas y culatas no es rectangular; tampoco es circular, aunque se aproxima a esta geometría a base de una disposición por escalones. Las capas van aisladas entre sí mediante un barniz o un tratamiento termoquímico de nombre comercial *carlite*.



En los núcleos magnéticos de los transformadores tipo columna se distinguen dos partes principales: las columnas y los yugos. En las columnas se alojan los devanados y los yugos unen entre sí a las columnas para cerrar el circuito magnético.

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento, los núcleos que cierran el circuito magnético, terminan al mismo nivel en la parte que está en contacto con los yugos, o bien con salientes, en ambos casos los núcleos se arman con juegos de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos "pares" e "impares".

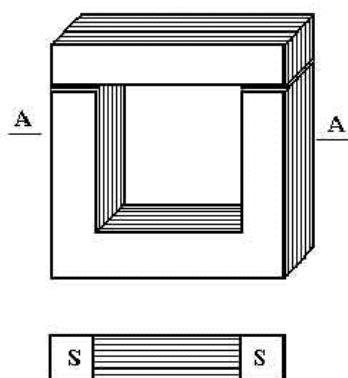
Cuando se han armado los niveles a base de juegos de laminaciones colocadas en "pares" e "impares" el núcleo se sujeta usando tornillos opresores y separa por medio de los tornillos tensores.

En los transformadores pequeños se colocan las chapas una a una, alternando las juntas, para dar más solidez al conjunto y evitar piezas de unión entre partes del núcleo. En los grandes, las dos cabezas quedan separadas, y deben sujetarse con pernos roscados.

En los transformadores de gran potencia suele ser necesario formar conductos de refrigeración en la masa del núcleo, para aumentar la superficie de disipación del calor se colocan entonces separadores aislantes, de espesor conveniente para la circulación del aceite.

El **circuito magnético o núcleo**, constructivamente, puede ser:

- De columnas: Dos columnas (para un trafo monofásico), sobre las que se arrollan los devanados.

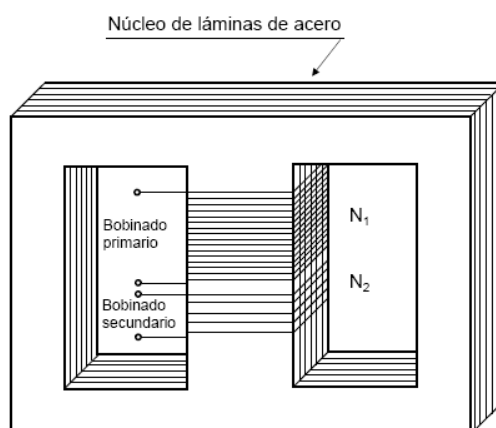


Existen distintos tipos de núcleos tipos columna, que está caracterizado por la posición relativa de las columnas y de los yugos.

Núcleo monofásico: Se tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en cada una de estas columnas se encuentran incrustadas la mitad del devanado primario y la mitad del devanado secundario.

Núcleo trifásico: Se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primarios y secundarios de una fase. Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, teniendo en cuenta que la corriente de vacío es bastante baja, tiene influencia solamente para las condiciones de operación en vacío.

Acorazado: Tres columnas, o sea, dos ventanas. Sobre la columna central, que tiene como sección el doble de las laterales, se disponen los devanados. Los dos bobinados se ubican en la rama central, logrando con este sistema reducir el flujo magnético disperso de ambos bobinados, colocando generalmente el bobinado de baja tensión en la parte interna y el de mayor tensión rodeando a este en la parte externa.



Las columnas laterales son para retorno del flujo.

Este tipo de núcleo acorazado, tiene la ventaja con respecto al llamado tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos. En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

Además de los circuitos eléctricos y magnéticos, el transformador se compone de CUBA, FLUIDO REFRIGERANTE, RADIADORES, ELEMENTOS DE PROTECCIÓN A LA CONEXIÓN Y TERMINALES.

Núcleo.

Columnas.

Culatas.

Transformadores acorazados y transformadores de columnas.

Chapas magnéticas.

Devanados.

Alta y Baja.

Concéntricos o alternados.

Refrigeración.

Seco.

Baño de aceite. (Depósito de expansión). Pirelanos prohibidos. Ahora aceite de siliconas.

Radiadores para potencias grandes (más de 200kVA).

Los sistemas de aislamiento usados en transformadores de potencia pueden ser líquidos, gaseosos y sólidos. Los sistemas líquidos incluyen aceite, que es el más usado. Los sistemas gaseosos incluyen nitrógeno, aire y gases fluorados (por ejemplo, exafluoruro de azufre). Los gases fluorados se usan para evitar la combustibilidad y limitar los efectos secundarios de defectos internos.

El aislamiento que separa el devanado de alta tensión del devanado de baja tensión, soporta la tensión más elevada y ocupa el espacio más limitado; por esta razón, generalmente funciona con las solicitaciones más elevadas. Según la construcción, puede utilizarse el aislamiento de capas o el aislamiento de bobinas entre las distintas secciones de los devanados. El aislamiento de espiras se aplica a cada cable del conductor o a grupos de cables que formen una espira única.

Transformadores con aislamiento de aceite: El bajo costo, la elevada rigidez dieléctrica y la posibilidad de recuperación aun después de estar sometidos a solicitaciones dieléctricas excesivas, hacen del aceite mineral el material aislante más ampliamente usado en transformadores. El aceite se refuerza con aislamientos sólidos de varias maneras; generalmente presenta barreras de aislamiento sólido alternando con espacios con aceite. El esfuerzo sobre el aceite es del 50 al 100% superior que el esfuerzo sobre el aislamiento sólido, debido a la constante dieléctrica relativamente baja del aceite. Por consiguiente, la sollicitación del aceite limita la rigidez de la estructura. Los pequeños conductos de aceite pueden soportar sollicitaciones más altas que los grandes conductos. Así barreras sólidas, convenientemente espaciadas, permiten una mejor utilización del espacio.

El aislamiento entre bobinas adyacentes generalmente es sólido, para proporcionar un soporte mecánico y dar una rigidez dieléctrica relativamente elevada respecto a las tensiones transitorias elevadas de corta duración. El aislamiento sólido a veces se usa entre capas de un devanado o entre devanados.

El aislamiento sólido de gran espesor se usa en los terminales de alta tensión en zonas de concentración de esfuerzos dieléctricos. La constante dieléctrica relativamente elevada del material sólido hace que la sollicitación del sólido sea sólo la mitad o las dos terceras partes de la que habría si el aceite ocupara el mismo espacio.

La mayoría de materiales de aislamiento sólido usados en los transformadores de potencia son porosos, permitiendo eliminar, mediante el vacío, los gases y agua vaporizada, así como conseguir el relleno de todas las cavidades e intersticios con aceite. Cualquier pequeña cantidad de gas dejada inadvertidamente en el campo dieléctrico sufre una elevada sollicitación dieléctrica (dos veces la que tendría el aceite) debido a la baja constante dieléctrica del gas. Como el gas encerrado, además de estar sometido a esfuerzos dieléctricos elevados, tiene una rigidez dieléctrica baja como consecuencia se tiene una pérdida importante de rigidez dieléctrica.

Los materiales sólidos usados frecuentemente, incluyen el papel impregnado con aceite, el papel impregnado con resinas, el cartón prensado, el algodón, la madera tratada con aceite al vacío y los esmaltes.

Las pérdidas en los devanados, en el núcleo, y en otros elementos motivan el calentamiento del transformador, los cuales, hemos de evitar. Los principales **medios refrigerantes** que se utilizan, en contacto con los arrollamientos, son el aire y aceite mineral.

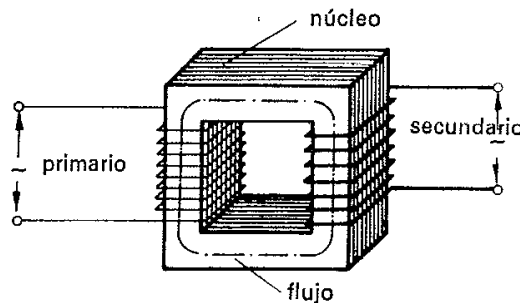
El uso del aceite, frente al aire, está justificado dado que tiene una mejor conductividad térmica y posee un mayor calor específico. La función del aceite es doble, actúa como aislante y como agente refrigerante. La rigidez de los aceites usados suele ser del orden de los 200 kV/cm. Básicamente se trata de una mezcla de hidrocarburos. El aceite cobra un especial interés en los casos en el que el transformador se vea sometido a sobrecargas pasajeras.

La parte activa del transformador suele ir sumergida en aceite, esta parte está en el interior de un tanque o caja. Esta caja puede tener una superficie de refrigeración considerable, compuesta por tubos, o con radiadores adosados. Este sistema de refrigeración, puede efectuarse por convección natural, o bien forzada (mediante ventiladores que activen la circulación en el caso de refrigeración por aire, y de bombas en el caso del aceite, que mediante un circuito cerrado puede a su vez enfriarse mediante la acción por ejemplo de otra circulación de agua).

La potencia de un transformador viene limitada por su valor máximo de calentamiento, por tanto, la ventilación forzada puede ser un medio eficaz para aumentar la potencia. Sin embargo, el principal problema de la refrigeración en los transformadores, y de las máquinas en general, aumenta en dificultad a medida que crecen las potencias. A medida que aumentan las potencias, la caja, los tubos de ventilación,... todo debe crecer. Existen también transformadores indicados para aquellos casos en que la máxima potencia sólo se suministra durante unas horas. En esas horas, se efectuará una ventilación forzada, mientras, en horario de servicio normal, sólo se necesita una ventilación natural.

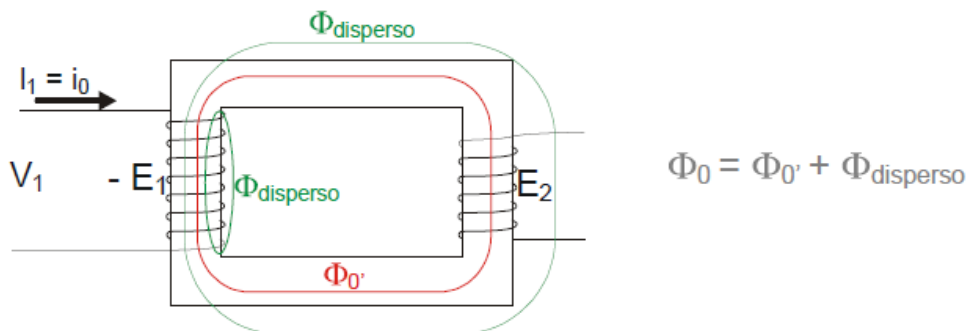
3.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del transformador se basa en los fenómenos de inducción electromagnética (producción de f.e.m. por variación de flujo en un circuito estático o por corte de flujo en un circuito en movimiento).



Un transformador elemental está formado por un núcleo de chapas magnéticas, al que rodean los devanados primario y secundario. Al conectar el devanado primario a una red de c.a., se establece un flujo alterno en el circuito magnético que, a su vez, inducirá las f.e.m. E_1 y E_2 , en los dos devanados del transformador.

EN VACÍO: Al aplicar una tensión alterna V_1 en el primario (con secundario abierto), circula una corriente alterna i_0 por él y establece el flujo alterno Φ_0 que concatena a N_1 y N_2 , induciendo una f.e.m. E_2 en el secundario, que por estar en vacío, $E_2 = V_2$. En el primario, se autoinduce la f.c.e.m. ($-E_1$) (fuerza contra electromotriz), que se opone a la tensión aplicada V_1 .

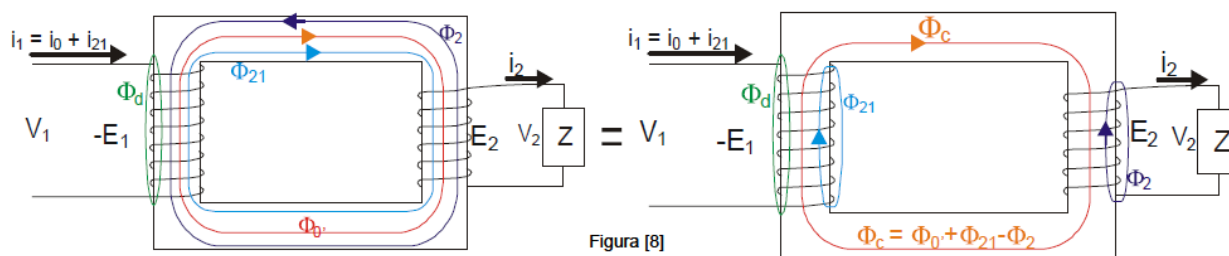


El Φ_0 debido a la menor reluctancia que le presenta el hierro en comparación al aire, sigue en su mayoría, el circuito ferromagnético. Las líneas de campo que se cierran a través del aire (espacios entre el núcleo y las bobinas) y que no aportan al flujo principal Φ_0 , constituyen el flujo disperso (Φ_d).

La corriente i_0 está compuesta por una corriente alterna magnetizante (i_m), en fase con el flujo principal que produce y una corriente en cuadratura, por pérdidas magnéticas en el hierro (i_{pm} , histéresis y Foucault): $i_0 = i_m + i_{pm}$

EN CARGA: Al cerrar el secundario a través de una carga Z , circulará la corriente i_2 generando en el arrollamiento secundario un flujo Φ_2 , oponiéndose a la causa que lo produce o sea, al flujo principal Φ_c , por lo que tenderá a disminuirlo y por consiguiente a $-E_1$. Esta disminución de la f.e.m. primaria origina un aumento en la corriente primaria a $i_1 = i_0 + i_{21}$, donde la i_{21} es la corriente i_2 referida o reflejada en el primario. En relación a los flujos, el primario reacciona a esta disminución con un flujo (Φ_{21}) de igual magnitud que Φ_2 pero que se adiciona al flujo principal (Φ_c); entonces el flujo principal o flujo concatenante (Φ_c) se mantiene igual tanto en carga como en vacío

(un estudio detallado nos dará que el $\Phi_0 \approx \Phi_{\text{carga}}$, ya que en carga el c tiende a ser menor). Esto será así mientras no se sature el núcleo.



3.1.- TRANSFORMADOR IDEAL

Para analizar un transformador, vamos a iniciar su estudio suponiendo que el mismo es ideal, por lo que debe presentar las siguientes características:

- En las bobinas primaria y secundaria se considera la resistencia despreciable.
- Todo el flujo magnético que se establece en el núcleo es común a ambos devanados, al suponer nulo el flujo disperso.
- El núcleo no tiene reluctancia.
- El núcleo no tiene pérdidas por corrientes parásitas ni por histéresis.

3.1.1.- TRANSFORMADOR IDEAL FUNCIONANDO EN VACÍO

Si al transformador en estudio lo alimentamos desde su bobinado primario, por medio de una fuente de tensión alterna sinusoidal de la forma: $v_1 = V_{\text{max}} \cdot \sin \omega t$. Y el devanado del secundario está desconectado de la carga (en vacío), circulará por el primario una corriente i_0 que, a su vez, producirá un flujo magnético Φ , común a ambos devanados y variable, al serlo la corriente que lo ha establecido.

El flujo variable da lugar a una f.e.m. inducida en el primario (autoinducida) de valor instantáneo:

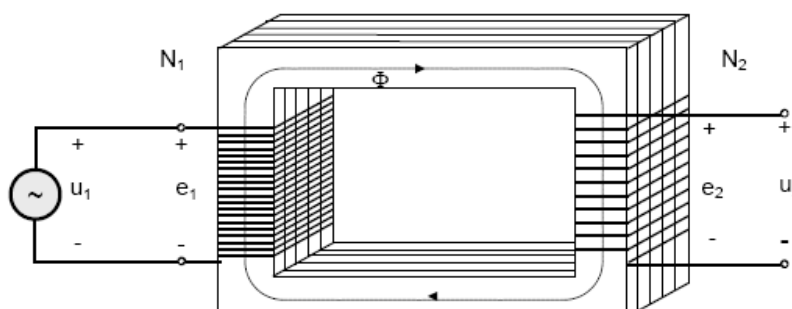
$$e_1 = -n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

El sentido de la f.e.m. inducida es de oposición a la causa que la produce, que ha sido la tensión de la red (ley de Lenz), y se indica con el signo menos.

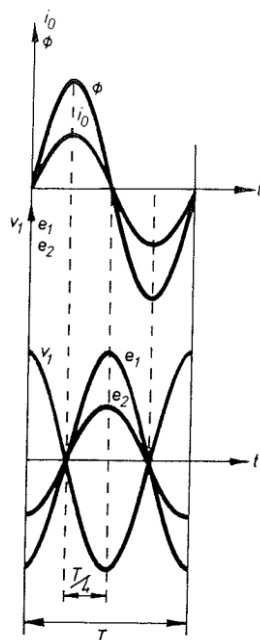
Al suponer nula la resistencia del primario R_1 , se cumplirá:

$$i_0 = \frac{v_1 + e_1}{R_1}, \quad v_1 + e_1 = 0, \quad v_1 = -e_1 = +n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

El valor de la tensión de la red v_1 , aplicada al primario es igual y opuesta a la f.e.m. inducida en e_1 .



La f.e.m. obtenida es una función de tipo senoidal, que va desfasada 90° en retraso con respecto al flujo que la produce. A su vez, el flujo es producido por la corriente de vacío, que ira desfasada 90° en retraso respecto a la tensión aplicada v_1 .



El valor eficaz de la f.e.m., e_1 , puede determinarse a partir del valor máximo:

$$E_1 = \frac{E_{1 \text{ máx.}}}{\sqrt{2}}$$

También puede obtenerse el valor medio de la f.e.m. inducida, a lo largo del tiempo de $\frac{1}{4}$ de periodo, y relacionarlo con el valor eficaz; siendo la variación del flujo en el segundo cuarto de periodo ($T/4$):

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{final}} - \Phi_{\text{inicial}} = 0 - \Phi_{\text{máx.}} = -\Phi_{\text{máx.}}$$

Al sustituir el flujo en la expresión de la f.e.m. media, quedará:

$$E_{m1} = n_1 \cdot \frac{-\Phi_{\text{máx.}}}{\frac{T}{4}} = 4 \cdot \Phi_{\text{máx.}} \cdot \frac{1}{T} \cdot n_1$$

Como el periodo es inverso a la frecuencia:

$$E_{m1} = 4 \cdot \Phi_{\text{máx.}} \cdot f \cdot n_1$$

Teniendo en cuenta la relación entre el valor eficaz y el valor medio de una f.e.m. alterna senoidal ($E_1 = 1,11 E_{\text{medio}}$), quedará finalmente:

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi_{\text{máx.}} \cdot f \cdot n_1$$

En donde:

$\Phi_{\text{máx.}}$ = flujo máximo (Wb)

f = frecuencia (Hz)

n_1 = número de espiras del primario

E_1 = f. e. m. inducida en el primario (V)

Como el flujo producido por la corriente de vacío es común al primario y al secundario, dará lugar a la creación de una f.e.m. inducida en el devanado secundario e_2 , en fase con e_1 , y de valor:

$$e_2 = -n_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \text{ en valor instantáneo.}$$

Según el razonamiento seguido para E_1 , el valor eficaz de la f.e.m. inducida en el secundario E_2 , será:

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi_{\text{máx.}} \cdot f \cdot n_2$$

En donde:

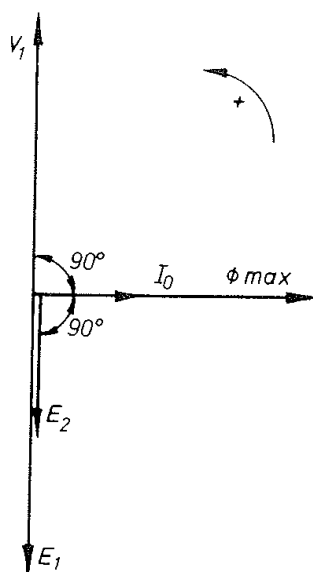
n_2 = número de espiras del secundario.

E_2 = f.e.m. inducida en el secundario.

Dividiendo entre si las expresiones de las ff. ee. mm. eficaces, inducidas en los devanados, nos dará la relación de transformación en vacío:

$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = m$, siendo las ff. ee. mm. inducidas en los devanados proporcionales a su número de espiras.

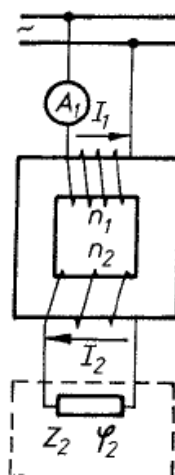
Dado que las magnitudes que intervienen en el funcionamiento de un transformador son de corriente alterna, podemos representar el funcionamiento en vacío de un transformador ideal mediante su diagrama vectorial.



Partiendo de la tensión de red aplicada al primario V_1 , que va adelantada 90° del flujo máximo $\Phi_{\text{máx.}}$, y 180° de las ff. ee. mm. E_1 y E_2 ; la corriente I_0 produce el flujo y va en fase con él.

3.1.2.- TRANSFORMADOR IDEAL FUNCIONANDO EN CARGA

Si en lugar de permanecer el secundario abierto, se cierra a través del circuito exterior de impedancia Z_2 , circulará una corriente por el secundario I_2 , desfasando un ángulo ϕ_2 de la f.e.m. E_2 . El valor de ϕ_2 dependerá del circuito exterior, siendo en la mayoría de los casos de tipo inductivo. Por lo que la I_2 irá en retraso con relación a E_2 .



En estas condiciones, el secundario suministra una potencia P_2 , que se transmite al primario por acción del flujo común, con el correspondiente aumento de la corriente primaria I_1 .

Al suponer nulas las pérdidas, coincidirán la potencia absorbida de la red P_1 y la suministrada al circuito exterior P_2 .

$$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2; \text{ de donde: } \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$m = \frac{I_2}{I_1}; \text{ o bien: } \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = m$$

La relación de transformación será:

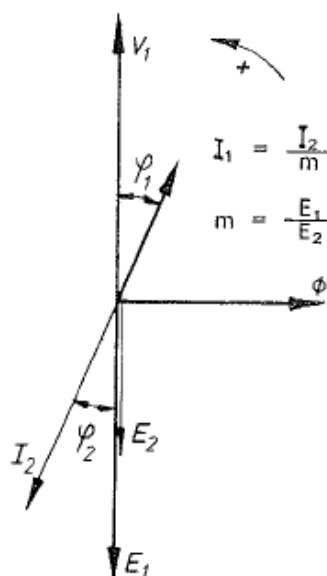
A plena carga, se cumple con bastante aproximación que la relación entre las corrientes del secundario y las del primario son inversamente proporcionales a su número de espiras; ya que se ha supuesto nula la corriente de vacío, I_0 suele ser inferior al 5% de la corriente de plena carga en un transformador real.

Para dibujar el diagrama, se parte de los datos del circuito de carga (I_2, ϕ_2): El vector I_2 va retrasado un ángulo ϕ_2 , de la f.e.m. E_2 .

Al despreciar la corriente de vacío I_0 , resultará:

$$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2; \quad I_1 = I_2 \cdot \frac{n_2}{n_1} = I_2 \cdot \frac{1}{m}$$

De forma que serán conocidos el módulo de I_1 y la dirección opuesta a I_2 . La tensión V_1 , irá adelantada un ángulo ϕ_1 , de la corriente que circula por el primario I_1 .



3.2.- TRANSFORMADOR REAL

En el transformador real han de tenerse en cuenta:

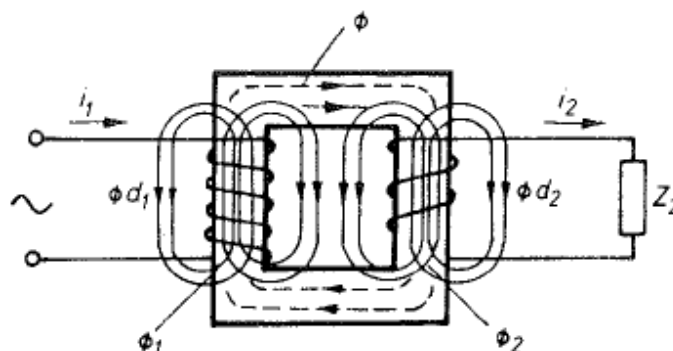
- El flujo no es común a lo largo del circuito magnético, debido a la existencia de flujos disperso, tanto en el primario como en el secundario.
- La resistencia óhmica de los devanados no es despreciable, por lo que habrá de tenerse en cuenta.
- El núcleo del transformador está formado por un apilado de chapas magnéticas, que motivarán unas pérdidas en el hierro.

Flujo disperso: En el transformador ideal se suponía la existencia de un solo flujo a lo largo del circuito magnético; sin embargo, existe un flujo disperso en el primario y otro en el secundario debidos a las corrientes primarias y secundarias, respectivamente.

En la Fig., se representan los flujos dispersos y el flujo medio común a ambos arrollamientos, cumpliéndose que:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} \quad \Phi_2 = \Phi - \Phi_{d2}$$

Φ = flujo común
 Φ_{d1} = flujo disperso en el primario
 Φ_{d2} = flujo disperso en el secundario
 Φ_1 = flujo total en el primario
 Φ_2 = flujo total en el secundario



El flujo disperso es variable y da lugar a una f.e.m. inducida, que vendrá dada por la expresión:

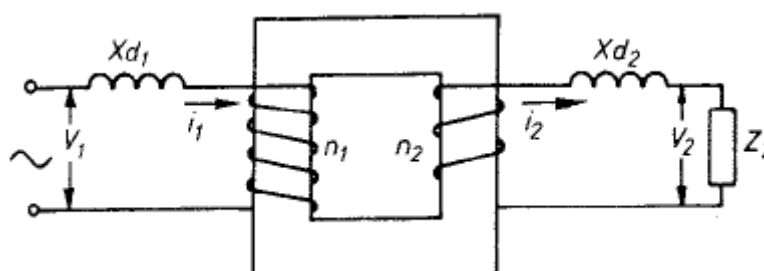
$$-n \cdot \frac{d \cdot \Phi_d}{d \cdot t}$$

Dado que el flujo disperso se cierra a través de un circuito de reluctancia prácticamente constante (aire, conductores, aislantes, ...), se materializa el efecto del flujo de dispersión por el de una bobina ficticia de coeficiente de autoinducción L_d , de valor:

en donde:

$$L_d = n \cdot \frac{d \cdot \Phi_d}{d \cdot i} ;$$

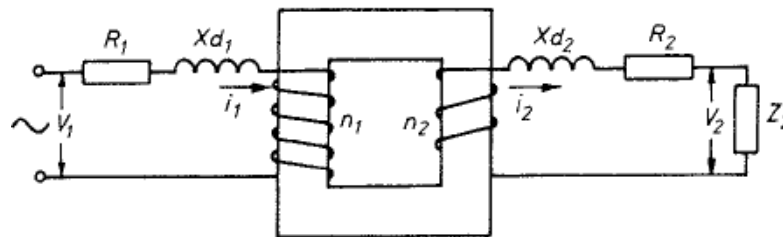
n = número de espiras de la bobina
 Φ_d = flujo de dispersión
 i = corriente variable que circula por la bobina
 L_d = coeficiente de autoinducción



El flujo disperso da lugar a que haya de considerarse la presencia de unas bobinas ficticias (en serie con el primario y con el secundario), que darán lugar a las reactancias de dispersión X_{d1} y X_{d2} , siempre que circule corriente por los devanados del transformador.

Resistencia óhmica de los devanados: En la mayoría de los casos se emplea el cobre electrolítico, aunque en algunos países se emplea el aluminio.

Los conductores de los devanados de los transformadores suelen ser de sección circular para pequeñas intensidades, y en forma de pletina rectangular para intensidades más elevadas. Estos conductores dan lugar a una resistencia óhmica pura, que puede considerarse conectada en serie con el bobinado. Para simplificar el circuito eléctrico, se supondrá que las resistencias de los devanados primario R_1 y secundario R_2 están situadas fuera del transformador.

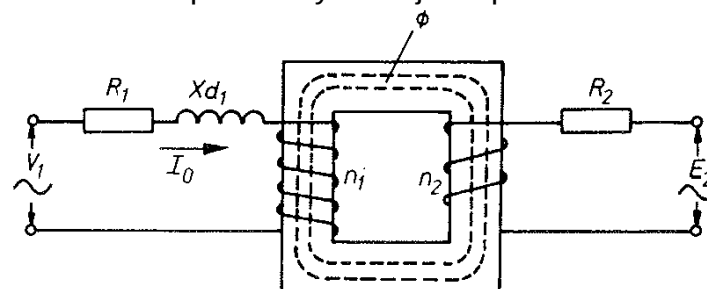


Las resistencias R_1 y R_2 producirán caídas de tensión cuando circulen corrientes por los devanados del transformador, y pérdidas por efecto Joule ($R \cdot I^2$) que se transformarán en calor.

Pérdidas en el hierro: Al someter el núcleo de chapas magnéticas a un flujo alterno, se producen los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas de Foucault, las cuales, a su vez, originan una pérdida de potencia, que habrá de sumarse a las pérdidas Joule para dar las pérdidas principales de un transformador.

3.2.1.- TRANSFORMADOR REAL FUNCIONANDO EN VACÍO

En el comportamiento del transformador real en vacío se han de considerar la resistencia del devanado en el primario y su flujo disperso.



La corriente absorbida en vacío, i_0 se obtendrá a partir de la expresión:

$$i_0 = \frac{\sum e}{\sum z} = \frac{v_1 + e_1}{R_1 + jX_{d1}}$$

de donde, el valor de la tensión de red v_1 :

$$v_1 = -e_1 + i_0 \cdot R_1 + i_0 \cdot jX_{d1} = n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} + i_0 \cdot R_1 + i_0 \cdot jX_{d1}$$

Expresada vectorialmente:

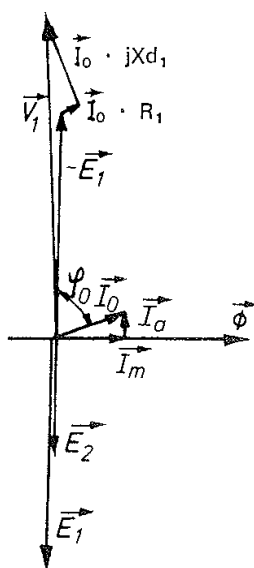
$$\vec{V}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_0 \cdot R_1 + \vec{I}_0 \cdot jX_{d1}$$

E_1	= f. e. m. inducida en el primario
$I_0 \cdot R_1$	= caída de tensión óhmica en el primario, en vacío
$I_0 \cdot jX_{d1}$	= caída de tensión por reactancia de dispersión en el primario en vacío
V_1	= tensión de red lado primario

Al conectar el primario a la red de c.a., se creará un flujo variable por acción de la corriente, denominada corriente magnetizante I_m (reactiva). Además, se producirán pérdidas en el hierro y en el cobre, que las deberá proporcionar otra componente de corriente, denominada corriente de pérdidas I_a (activa).

En la Fig., se ha representado el diagrama vectorial, en vacío, del transformador real, en el que se aprecian las dos componentes de I_0 :

$$|I_0| = \sqrt{(I_m)^2 + (I_a)^2}$$



La corriente I_0 está desfasada un ángulo ϕ_0 , en retraso, con respecto a la tensión V_1 .

Corriente magnetizante o reactiva: En el estudio del transformador ideal, tanto la f.e.m. inducida E_1 como el flujo común al circuito magnético son funciones senoidales, por lo que cabe pensar que también lo será la corriente I_m , por ser la causante del flujo. La corriente I_m , solo podría ser senoidal y en fase con el flujo cuando la chapa magnética no trabaje a saturación y se mantenga así la proporcionalidad entre la inducción β y la intensidad de campo H .

A la hora de proyectar el transformador, el aspecto económico obliga a disminuir en lo posible los núcleos a costa de aumentar la inducción considerablemente. El ciclo de histéresis magnética en la chapa, motiva, también, una deformación de la corriente magnetizante I_m . Por lo tanto, podríamos concluir que la corriente magnetizante I_m no es senoidal y no va rigurosamente en fase con el flujo.

Esta deformación de la I_m , no se tendrá en cuenta en el estudio del transformador, por no afectar apenas a su funcionamiento práctico. Por último, se supondrá que la corriente magnetizante permanece constante para cualquier régimen de carga.

Corriente activa de vacío: Se deduce a partir de las pérdidas en el hierro y en el cobre, siendo el valor de la corriente activa I_a muy reducido, si comparamos los

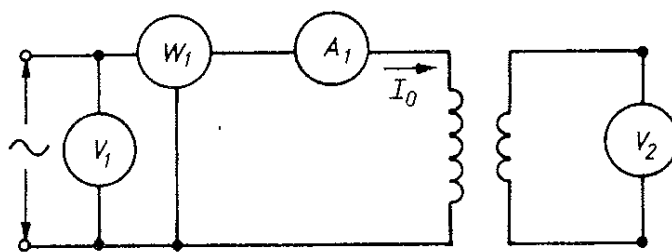
valores modulares de I_m e I_a , la corriente magnetizante alcanza valores del 90 al 95% de la corriente de vacío I_0 .

3.2.1.1.- ENSAYO DE VACÍO

El comportamiento del transformador en vacío puede verificarse por medio del ensayo en vacío. En su realización, se conecta el primario a su tensión y frecuencia nominales, mientras el secundario permanece en circuito abierto; también puede hacerse el ensayo alimentando el secundario y dejando en circuito abierto el primario.

Los principales datos a determinar en el ensayo son:

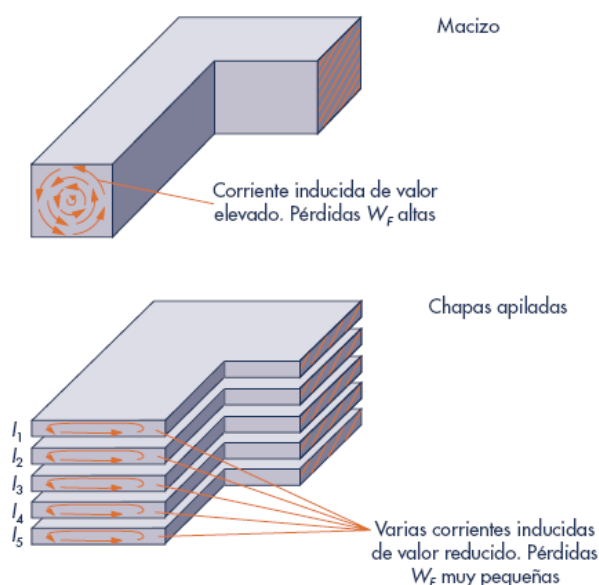
- Las pérdidas en el hierro P_{Fe} .
- La corriente de vacío I_0 .
- La relación de transformación m .



Determinación de las pérdidas en el hierro: Al conectar el devanado primario a su tensión nominal, el circuito magnético está sometido a inducción normal, dando lugar a las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis.

Para reducir la pérdida de energía, y la consiguiente pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo un flujo variable no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí.

La corriente eléctrica, al no poder circular de unas chapas a otras, tiene que hacerlo independientemente en cada una de ellas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault. En la Figura, podemos observar cómo circula la corriente por ambos núcleos magnéticos.



Las **corrientes de Foucault** se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético.

Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores se genera una fuerza electromotriz inducida que origina corriente de circulación en los mismos, lo que da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule.

Las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético.

Para el tipo de chapa magnética de una inducción de 1 Tesla o 10 000 Gauss, trabajando a una frecuencia de 50 Hz de laminado en frío de grano orientado, las pérdidas en el núcleo se estiman entre 0,3 W/kg y 0,5 W/kg, mientras que las pérdidas de la chapa de laminado en caliente para la misma inducción y la misma frecuencia oscilan entre 0,8 y 1,4 W/kg.

La Tabla, indica las características de construcción, los valores magnéticos y la composición química para la determinación de las pérdidas de potencia en el hierro en función del espesor, la aleación y la inducción.

Espe- sor (mm)	Tole- rancia	Aleación % SI	1 Tesla (10 ⁴ Gauss) W/kg	1,5 Tesla 1,5 · 10 ⁴ Gauss W/kg
0,5	0,10	0,5 – 1	2,9	7,40
0,5	0,10	2,5	2,3	5,6
0,35	0,10	2,5	1,7	4
0,35	0,10	4	1,3	3,25
0,35	0,10	4,5	1,2	3
0,35	0,10	4,5	0,9	2,1

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro por las corrientes de Foucault recurriremos a la Fórmula, que indica que las pérdidas en el hierro son proporcionales al cuadrado de la inducción y al cuadrado de la frecuencia.

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}}$$

Donde:

P_F = pérdidas por corrientes de Foucault en W/kg

f = frecuencia en Hz

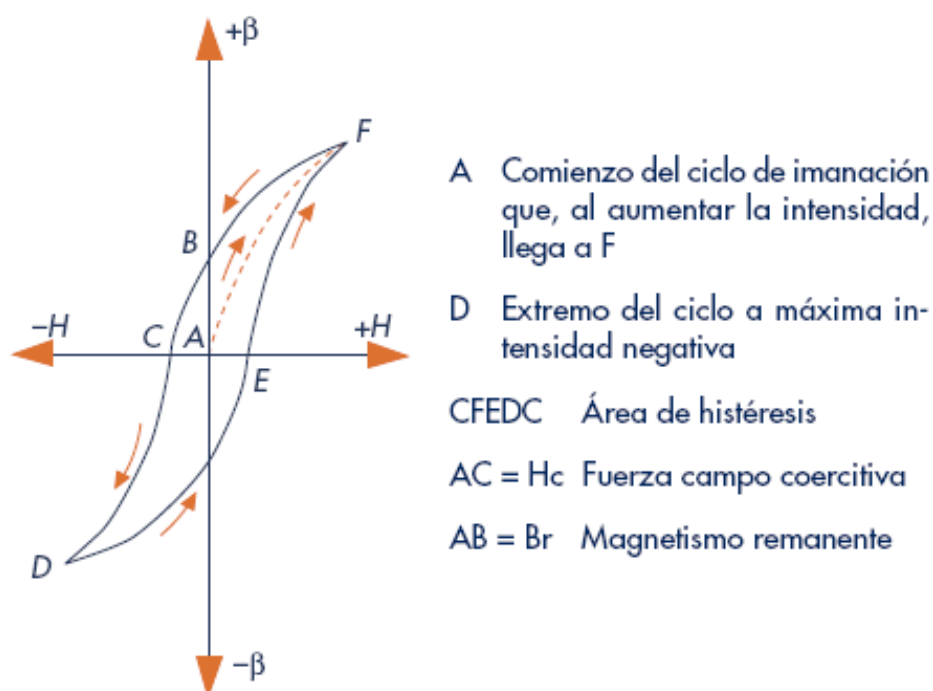
β_{max} = inducción máxima en Gauss

Δ = espesor de la chapa magnética en mm

De la fórmula anterior se deduce que el cambio de frecuencia de 50 a 60 Hz, por ejemplo, hace que aumenten las pérdidas en el transformador.

La **histéresis magnética** es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no sólo depende del valor del flujo, sino también de

los estados magnéticos anteriores. En el caso de los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo variable, lo que provoca una pérdida de energía que se justifica en forma de calor.



La potencia perdida por histéresis depende esencialmente del tipo de material; también puede depender de la frecuencia, pero como la frecuencia en una misma zona o país siempre es la misma, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa. A través de la **fórmula de Steinmetz** (Fórmula 4.2) se determinarán las pérdidas por histéresis.

El coeficiente de chapa oscila entre 0,0015 y 0,003, aunque baja hasta 0,007 en hierro de muy buena calidad.

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta_{max}^n$$

Donde:

K_h = coeficiente de cada material

f = frecuencia en Hz

β_{max} = inducción máxima en Tesla

P_H = pérdida por histéresis en W/kg

$n = 1,6$ para $\beta < 1$ Tesla (104 Gauss)

$n = 2$ para $\beta > 1$ Tesla (104 Gauss)

Las pérdidas de potencia en el hierro (P_{Fe}) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault (P_F) y por histéresis (P_H), como indica la siguiente fórmula:

$$P_F + P_H = P_{Fe}$$

Además de las pérdidas en el hierro, existen unas pérdidas en el cobre, en el devanado conectado a la red, debido a la circulación de la corriente de vacío I_0 ; sin

embargo, dado el pequeño valor de I_0 en comparación con la corriente de plena carga, estas pérdidas se suelen despreciar en los ensayos de transformadores de potencia.

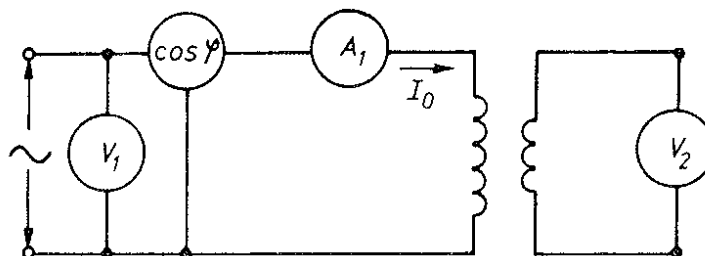
Para averiguar las pérdidas en el hierro se intercala el vatímetro W_1 en el circuito conectado a la tensión de red, su lectura se toma como pérdidas aproximadas del hierro total en el transformador.

Determinación de la corriente de vacío y sus componentes: La corriente I_0 viene dada por la lectura del amperímetro A_1 conectado en serie con el devanado sometido a la tensión de red.

Las componentes activa y reactiva pueden deducirse a partir de las lecturas del vatímetro, voltímetro y amperímetro:

$$I_a = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = \frac{W_{Fe}}{V_1}$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = \sqrt{I_0^2 - I_a^2}$$



Las componentes activas y reactivas, también, pueden determinarse con la ayuda de un fasímetro y de la corriente de vacío.

Determinación de la relación de transformación m en vacío: La relación de transformación viene dada por la expresión:

$$m = \frac{E_1}{E_2}$$

En el ensayo de vacío, al estar abierto el circuito de carga, I_2 es nula, por lo que se cumple:

$$V_2 = E_2$$

En el primario, la tensión en el primario viene dada por:

$$\vec{V}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_0 \cdot R_1 + \vec{I}_0 \cdot jX_{d1}$$

En el funcionamiento en vacío de un transformador, la corriente I_0 es muy pequeña, así como la reactancia de dispersión X_{d1} , por lo que pueden despreciarse los términos $I_0 \cdot R_1$ e $I_0 \cdot jX_{d1}$ frente a los valores de V_1 y E_1 : quedando:

$$\vec{V}_1 \approx -\vec{E}_1$$

Lo anterior justifica que la relación de transformación puede medirse en vacío como cociente entre lecturas de voltímetros del primario y secundario.

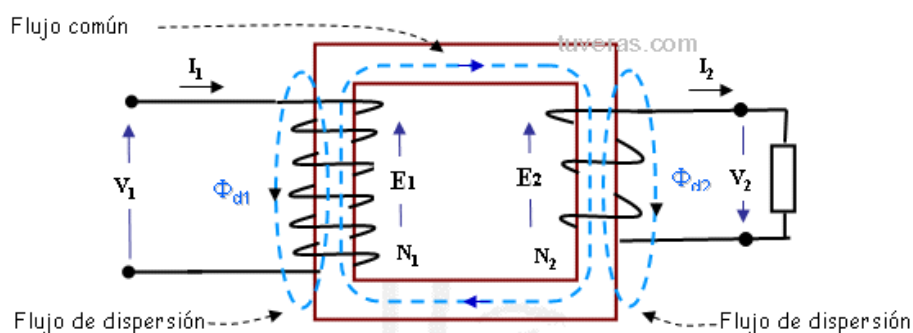
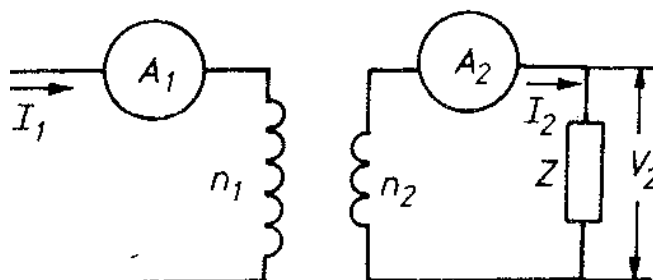
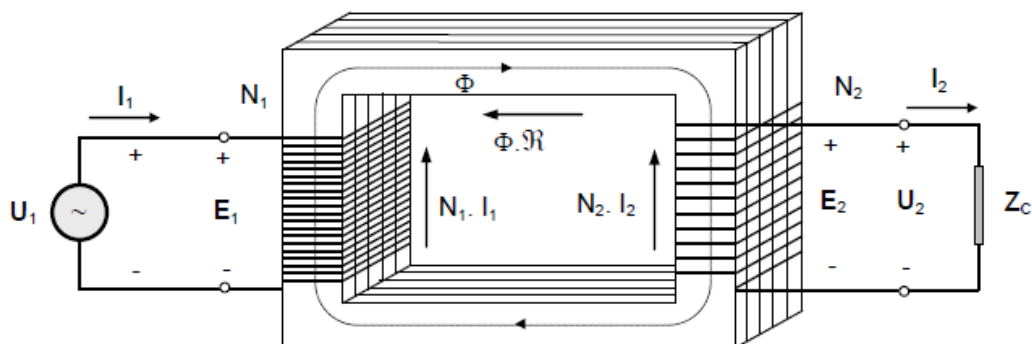
$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES							
Tipo de ensayo	ENSAYO EN VACÍO						
Características del transformador	S_1 _____ (VA)	U_2 _____ (V)		f _____ (Hz)			
	S_2 _____ (VA)	I_1 _____ (A)					
	U_1 _____ (V)	I_2 _____ (A)					
Objetivos del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro						
Esquema de montaje							
Instrumentos de medidas y regulación a utilizar							
Tabla de valores de las medidas realizadas a diferentes valores de la tensión	U_1 (voltios)	U_2 (voltios)	I_1 (amperios)	I_2 (amperios)	W_1 (vatios)	W_2 (vatios)	(m) Relación de transformación
Cálculos definitivos de la potencia perdida en el hierro							

3.2.2.- TRANSFORMADOR REAL FUNCIONANDO EN CARGA

El funcionamiento normal de un transformador corresponde al de plena carga o una fracción de ésta, con la consiguiente variación de sus características con respecto al caso especial de vacío.

A diferencia del transformador ideal en carga, en el real han de tenerse en cuenta las resistencias de los devanados, los flujos dispersos y la corriente de vacío.



Primario	Secundario
N_1 = espiras del primario	N_2 = espiras del primario
V_1 = Tensión aplicada	E_2 = Tensión inducida
I_1 = Corriente en el primario	V_2 = Tensión aplicada a la carga
E_1 = Tensión inducida en el primario	I_2 = Corriente de carga

Impedancia del Transformador

X_1, X_2 = Reactancias de dispersión del primario y secundario
 R_1, R_2 = Resistencia de los conductores primario y secundario

Ecuaciones del transformador

$$V_1 = -E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1$$

$$V_2 = E_2 - R_2 I_2 + jX_2 I_2$$

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2$$

Una vez cerrado el circuito secundario a través de una carga de impedancia Z , circulará una corriente I_2 , al existir una tensión entre sus bornes, que dará lugar a los amperiosvueltas $n_2 \cdot I_2$.

Aplicando la ley de Hopkinson al circuito magnético general de un transformador, se cumplirá:

$$F = \Phi \cdot R = \Sigma n \cdot I$$

A su vez, el flujo magnético permanece prácticamente constante para cualquier régimen de carga, incluido el de vacío, ya que está producido por una corriente I_m de valor constante. La reluctancia puede considerarse constante, despreciando las variaciones que pueda motivar la saturación de la chapa magnética. Esto dará lugar a que $\Phi \cdot R$ sea constante y, por ello:

$$\Sigma n \cdot I = \text{constante}$$

En el funcionamiento en vacío, solamente circula la corriente I_0 , y se utilizará para determinar el valor de la constante:

$$n_1 \cdot \vec{I}_0 = \text{constante}$$

En carga, se crean los amperiosvueltas $n_2 \cdot I_2$, obligando al primario a suministrar los $n_1 \cdot \vec{I}_1$ para equilibrarlos y seguir cumpliendo así la condición de la ecuación:

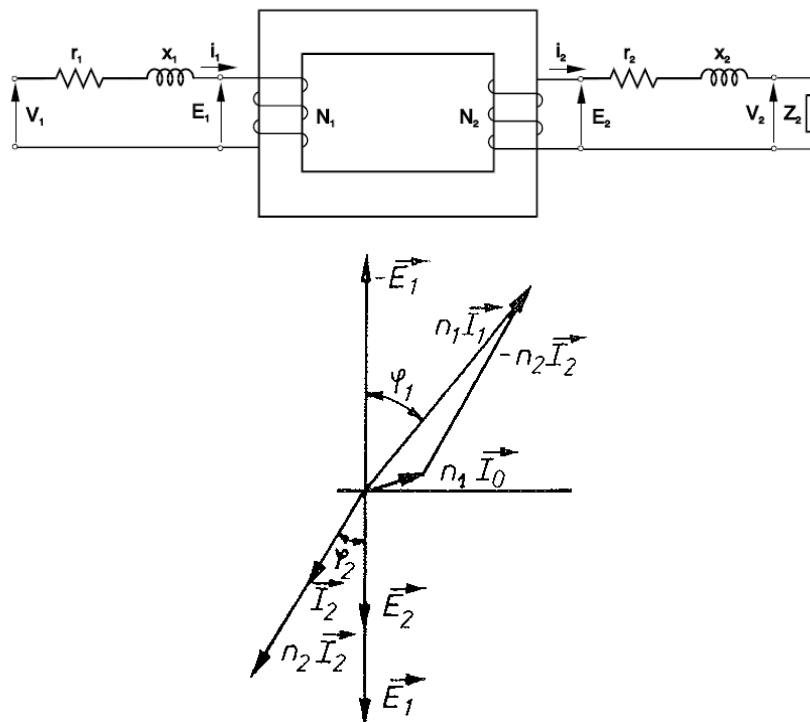
$$n_1 \cdot \vec{I}_1 + n_2 \cdot \vec{I}_2 = \text{constante}$$

O bien:

$$n_1 \cdot \vec{I}_1 + n_2 \cdot \vec{I}_2 = n_1 \cdot \vec{I}_0$$

La representación de la ecuación de amperiosvueltas se indica en el diagrama de la Fig., y corresponde a una carga inductiva, lo que I_2 irá retrasada un ángulo φ_2 , de la f.e.m. E_2 . El valor de los amperiosvueltas primarios $n_1 \cdot \vec{I}_1$, se deduce de la ecuación, a partir de los secundarios y los de vacío:

$$n_1 \cdot \vec{I}_1 = n_1 \cdot \vec{I}_0 - n_2 \cdot \vec{I}_2$$



Determinación de la relación de transformación m en carga: El valor de la corriente I_0 , se sigue considerando despreciable frente al de plena carga. Hecha esta

aclaración, en la zona próxima a la plena carga puede despreciarse el término $n_1 \cdot I_0$, quedando:

$$n_1 \cdot \vec{I}_1 = -n_2 \cdot \vec{I}_2 \quad \text{En valor algebraico: } n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2$$

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

La relación de transformación es el cociente entre las lecturas de los amperímetros del secundario y el primario respectivamente, y puede admitirse como válida a partir de los $\frac{3}{4}$ de plena carga en el funcionamiento del transformador.

A partir de la ecuación general de amperiosvuelas, puede obtenerse la relación entre las corrientes de primario y secundario:

$$n_1 \cdot \vec{I}_1 + n_2 \cdot \vec{I}_2 = n_1 \cdot \vec{I}_0$$

$$\vec{I}_1 = \frac{n_1 \cdot \vec{I}_0 - n_2 \cdot \vec{I}_2}{n_1} = \vec{I}_0 - \frac{1}{m} \cdot \vec{I}_2$$

Designando la corriente $1/m \cdot I_2$ como I'_2 quedará:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 - \vec{I}'_2$$

Ecuación de tensiones en el primario en carga: Puede deducirse por comparación con la ecuación de tensiones primarias en vacío:

$$\vec{V}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_0 \cdot R_1 + \vec{I}_0 \cdot jX_{d1}$$

En carga, al circular la corriente I_1 por el primario, dará lugar a variaciones en las caídas de tensión, y en la f.e.m. E_1 , mientras que la tensión de red V_1 permanecerá fija:

$$\vec{V}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_1 \cdot R_1 + \vec{I}_1 \cdot jX_{d1}$$

Ecuación de tensiones en el secundario en carga: Para deducir la ecuación de tensiones, basta recordar que, por el lado del secundario, el transformador se comporta como un generador de f.e.m. E_2 y, por ello, será la suma de la tensión útil V_2 más las caídas de tensión $\vec{I}_2 \cdot R_2$ e $\vec{I}_2 \cdot jX_{d2}$:

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_{d2}$$

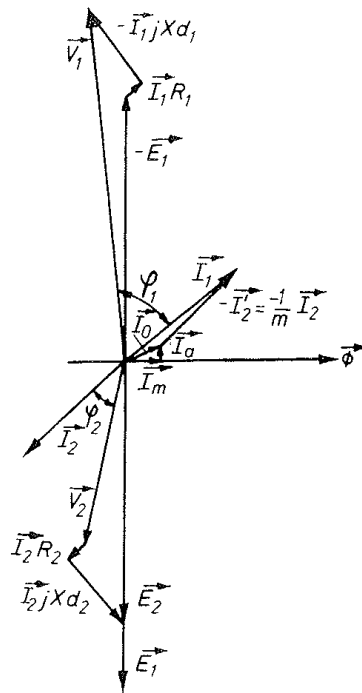
La tensión en bornes V_2 de la carga, será:

$$\vec{V}_2 = \vec{E}_2 - \vec{I}_2 \cdot R_2 - \vec{I}_2 \cdot jX_{d2}$$

Diagramas vectoriales del transformador en carga: De forma similar al transformador ideal, se parte de los datos del circuito de carga, para situar posteriormente los restantes vectores citados en las anteriores ecuaciones. Así, eligiendo una dirección arbitraria de I_2 , a continuación se representa la tensión V_2 , que ira desfasada un ángulo ϕ_2 . El ángulo ϕ_2 depende de los receptores, dando lugar a tres tipos diferentes:

- Cargas inductivas.
- Cargas óhmicas.
- Cargas capacitivas.

En la mayoría de los casos, las combinaciones de receptores dan lugar a un circuito inductivo, por lo que se partirá de él para construir el diagrama:



A partir del vector $\vec{V}_2$, se sumarán los vectores $\vec{I}_2 \cdot R_2$ (en fase con $\vec{I}_2$) e $\vec{I}_2 \cdot jX_{d2}$ (adelantado 90° de I_2), obteniéndose así la f.e.m. E_2 .

El flujo va 90° en adelanto con respecto a E_2 y en fase con la corriente magnetizante I_m .

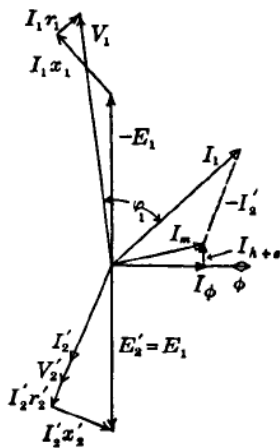
La corriente de vacío se obtiene al sumar I_m , la corriente activa de vacío I_a .

La corriente primaria I_1 , se obtiene aplicando la ecuación de corrientes:

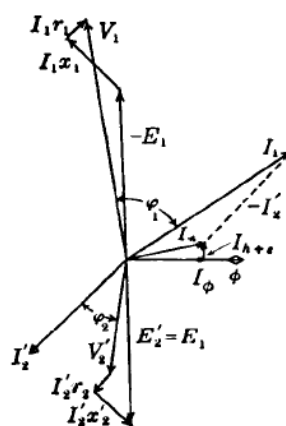
$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 - \vec{I}_2'$$

La tensión de red V_1 , se determina a partir de $-E_1$ (adelantada 90° del flujo), por suma de las caídas de tensión $\vec{I}_1 \cdot R_1$ (en fase con $\vec{I}_1$) e $\vec{I}_1 \cdot jX_{d1}$ (adelantada 90° de $\vec{I}_1$). La tensión de red V_1 va adelantada un ángulo ϕ_1 de la corriente adsorbida I_1 .

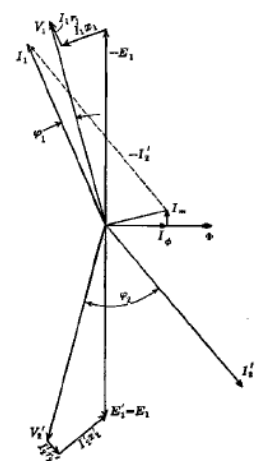
Observando el diagrama, se puede afirmar que, en carga, las tensiones V_1 y V_2 son diferentes a las f.e.e.m.m. E_1 y E_2 , por lo que no podrá obtenerse una relación de transformación como cociente entre tensiones.



Carga Resistiva



Carga inductiva



Carga capacitiva

4.- CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

4.1.- REDUCCIÓN DEL SECUNDARIO AL PRIMARIO

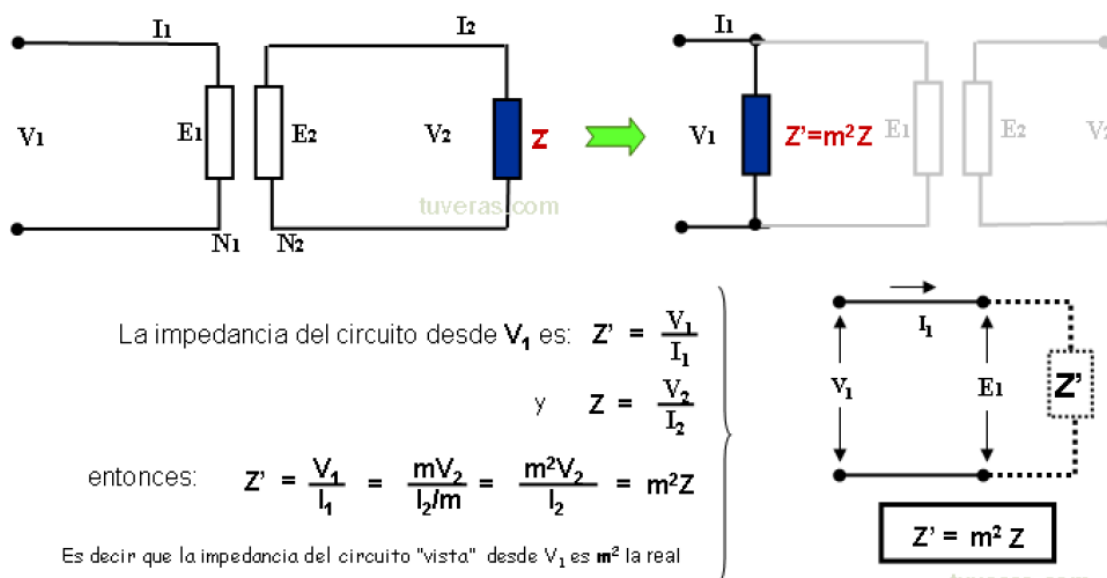
La diferencia numérica existente entre las tensiones o corrientes primarias y secundarias de los transformadores normales da lugar a la utilización de otros métodos más prácticos a la hora de estudiar el comportamiento interno del transformador, principalmente en lo referente al cálculo de caídas de tensión.

El sistema utilizado está basado en la sustitución del transformador normal por otro que disponga del mismo nº de espiras en el primario y en el secundario $m = 1$.

Para cumplir la condición anterior, se puede reducir el secundario al primario o bien el primario al secundario. En general, se utiliza el primero.

El transformador reducido presenta las mismas caídas de tensión, pérdidas y rendimiento que el primitivo y ofrece la ventaja de simplificar considerablemente su estudio.

Los valores reducidos se obtienen a partir de los valores reales y de la relación de transformación, ya que, para poder conectarse a la tensión de primario, es preciso modificar los citados términos convenientemente.



Los valores reducidos de tensiones, corrientes, resistencias, ..., se distinguirán de los reales porque utilizan el símbolo "prima", E'_2 , R'_2 , ...

F.e.m. reducida E'_2 . Tensión reducida V'_2 : La f.e.m. del secundario reducida al primario se obtiene como producto de la relación de transformación por la f.e.m. real E_2 : $E'_2 = m \cdot E_2$

La nueva f.e.m. E'_2 toma el mismo valor que E_1 , ya que en realidad el devanado secundario está formado por un número de espiras equivalentes al primario, $m = 1$; siendo el valor de la tensión reducida: $V'_2 = m \cdot V_2$

Corriente reducida I'_2 : La corriente del secundario reducida al primario es inversamente proporcional a la relación de transformación:

$$I'_2 = \frac{1}{m} \cdot I_2. \text{ Siendo la corriente primaria } I_1: \vec{I}_1 = \vec{I}_0 - \vec{I}'_2$$

Y dado el pequeño valor de lo frente a las otras corrientes, es normal despreciarlo, para así simplificar los cálculos, quedando finalmente que $I_1 \approx I'_2$.

Impedancia de la carga reducida al primario: Para hallar su valor se aplica la ley de Ohm:

$$Z'_{2c} = \frac{V'_2}{I'_2} = \frac{m \cdot V_2}{\frac{1}{m} \cdot I_2} = m^2 \cdot \frac{V_2}{I_2} = m^2 \cdot Z_{2c}$$

Como $Z_{2c} = R_{2c} + jX_{2c}$, para reducir al primario la resistencia o reactancia de la carga, bastará multiplicarlos por el cuadrado de la relación de transformación:

$$R'_{2c} = m^2 \cdot R_{2c}$$

$$X'_{2c} = m^2 \cdot X_{2c}$$

Resistencia del secundario reducida R'_2 : De forma similar a la resistencia de la carga, el valor de la resistencia del devanado secundario reducida al primario será:

$$R'_2 = m^2 \cdot R_2$$

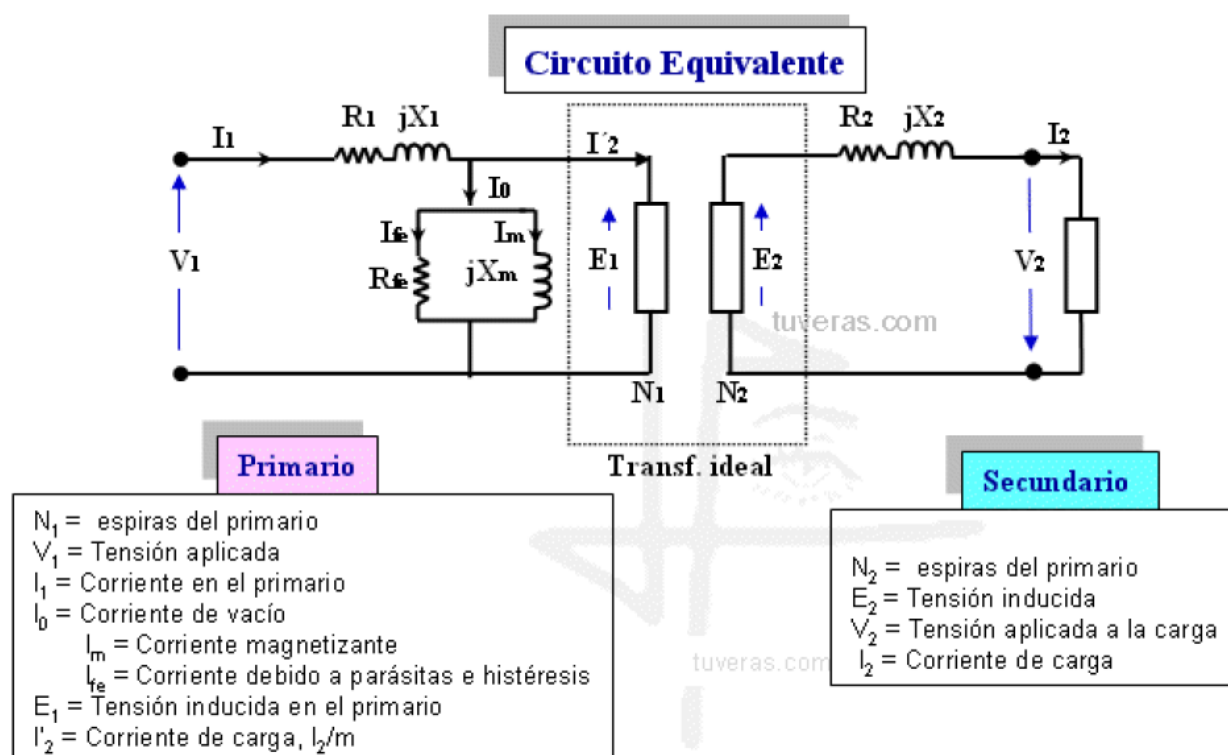
Reactancia de dispersión del secundario reducida X'_{d2} : Por comparación con los resultados para la reactancia de la carga reducida: $X'_{d2} = m^2 \cdot X_{d2}$

Ecuaciones de corrientes y tensiones del transformador reducido al primario en carga: Para representar el diagrama vectorial de un transformador, es preciso conocer las ecuaciones de corrientes y tensiones.

La ecuación que relaciona las corrientes primarias, secundarias y de vacío se deduce a partir de la ecuación general de amperiosvuelta: $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 - \vec{I}'_2$

La ecuación de tensiones del secundario reducidas se obtiene por comparación con la ecuación normal del transformador en carga:

$$\vec{E}'_2 = \vec{V}'_2 + \vec{I}'_2 \cdot R'_2 + \vec{I}'_2 \cdot jX'_{d2}$$



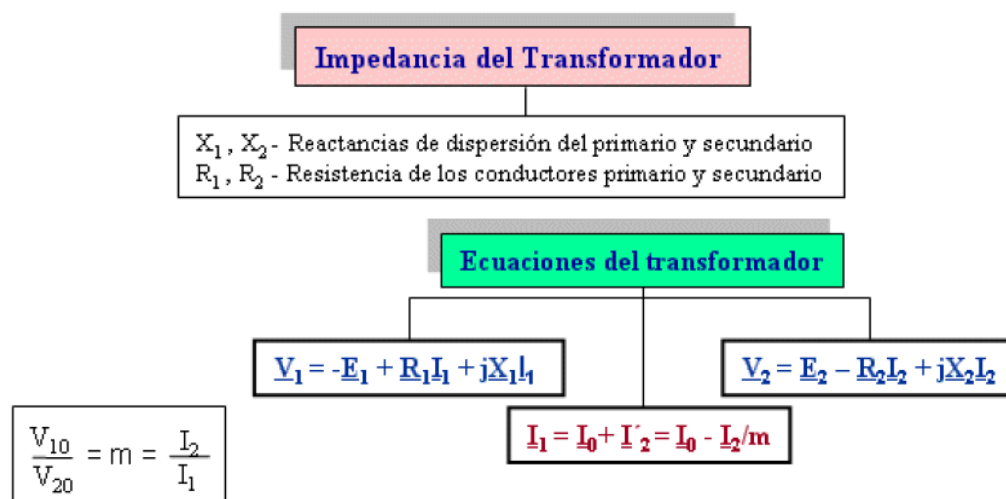
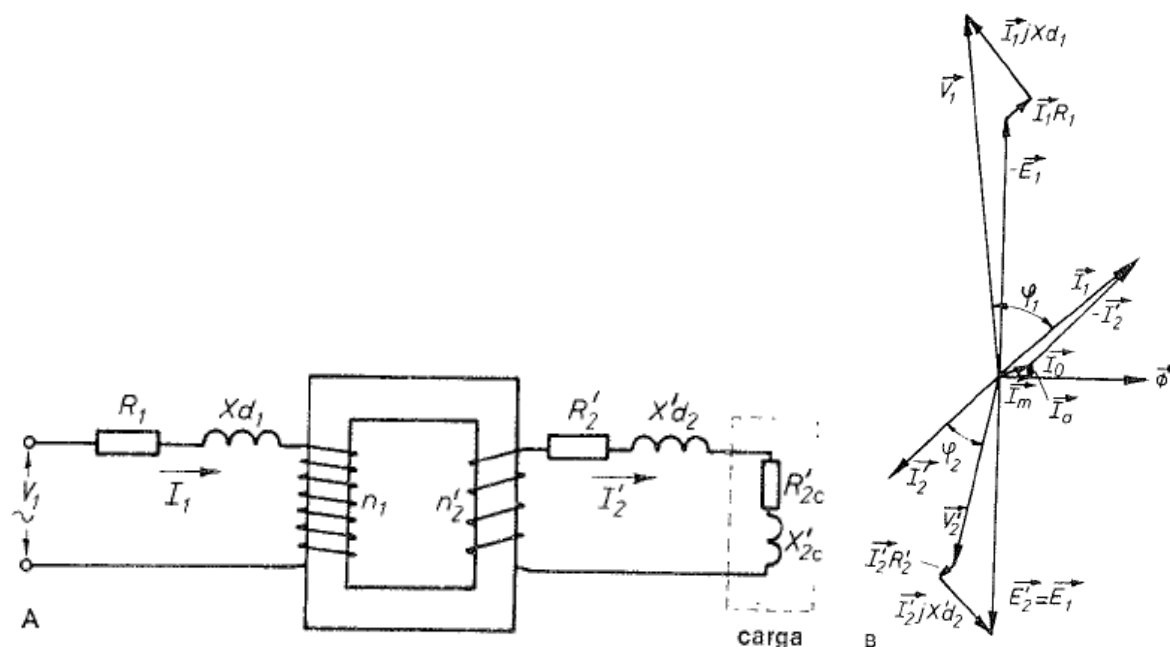
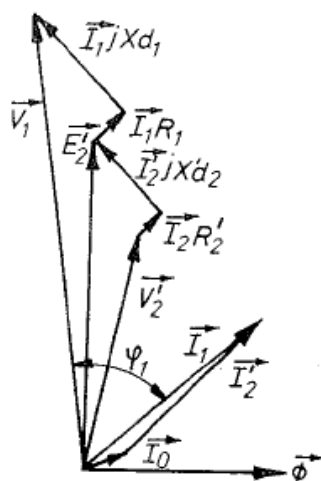


Diagrama vectorial del transformador reducido al primario: La principal diferencia con un diagrama normal es la similitud en magnitud entre los vectores del secundario y primario, que permitirá representarlos a la misma escala.



Aprovechando que $E'_2 = E_1$, puede darse otra orientación a los vectores que representan magnitudes del secundario y simplificarlo considerablemente.



A partir de la tensión reducida V'_2 , se halla la tensión de red primaria V_1 , por suma de las caídas de tensión en el secundario y primario:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}'_2 + \vec{I}'_2 \cdot \vec{R}'_2 + \vec{I}'_2 \cdot j\vec{X}_{d2} + \vec{I}_1 \cdot \vec{R}_1 + \vec{I}_1 \cdot j\vec{X}_{d1}$$

También la corriente primaria sufre una variación, siendo:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}'_2$$

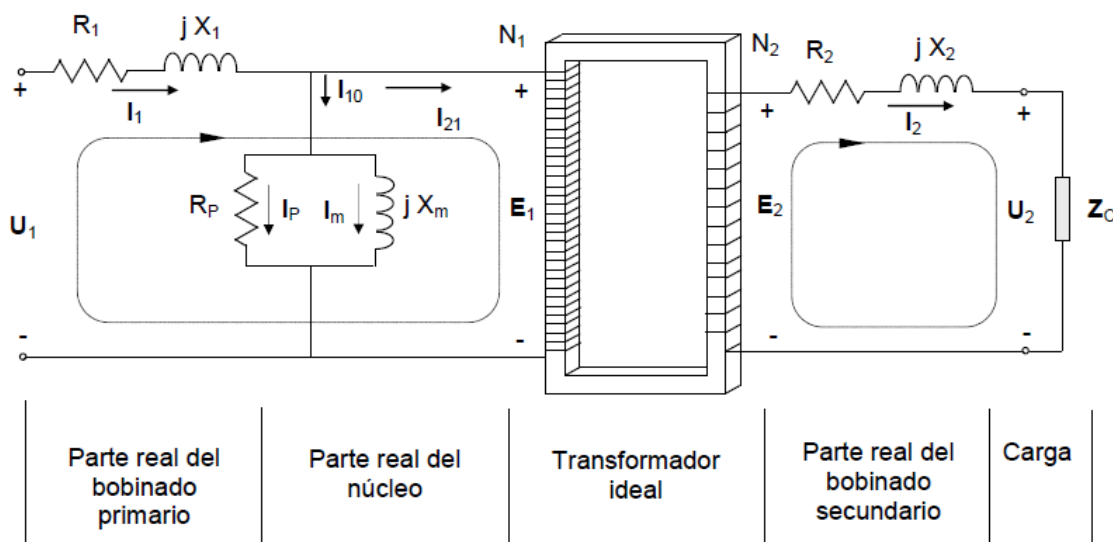
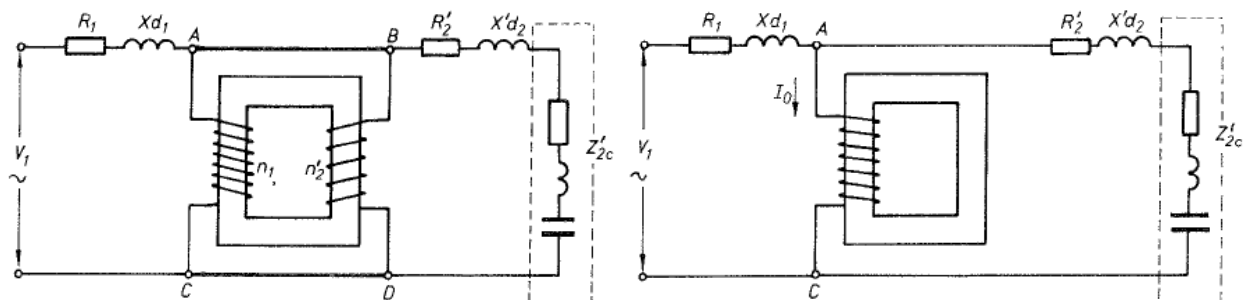
Circuito equivalente del transformador reducido al primario: El número de espiras del secundario n'_2 coincide con el número de espiras del primario n_1 :

$$n'_2 = m \cdot n_2 = n_1$$

La relación de transformación es la unidad o, lo que es igual, la f.e.m. del primario E_1 , coincide con la del secundario reducido E'_2 .

En los esquemas de las Fig., se han unido los terminales A y B, así como C y D, al suponer que ambos están al mismo potencial.

El primer circuito se puede sustituir por el segundo, en el que se han remplazado los dos devanados por otro, ya que ambos estaban en derivación, circulando por dicho devanado la corriente de vacío I_0 .

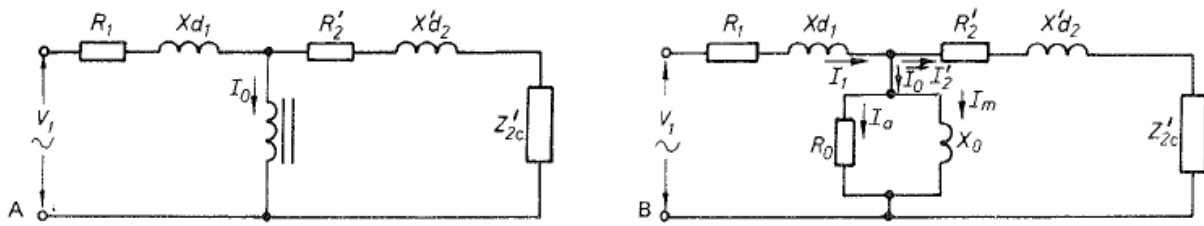


Para mayor claridad, se representa el circuito equivalente del transformador reducido, prescindiendo de su núcleo.

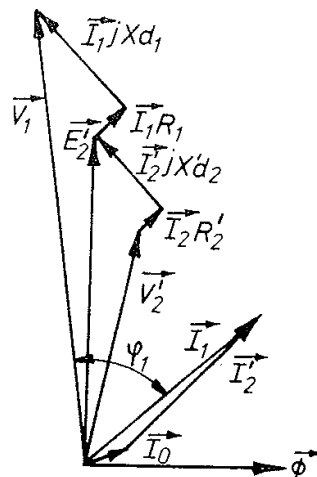
El último paso consiste en sustituir la bobina central por una resistencia R_0 , en paralelo con la reactancia X_0 . Por R_0 circulará la corriente activa de vacío I_a y por X_0 circulará la componente reactiva I_m , ya que ambas dan lugar a la corriente de vacío:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_a + \vec{I}_m$$

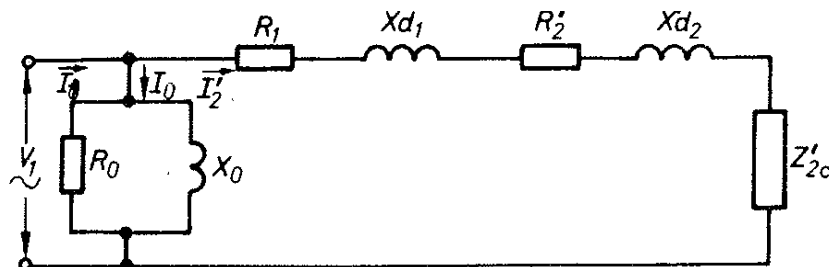
El circuito equivalente representado en la Fig., es el real de un transformador.



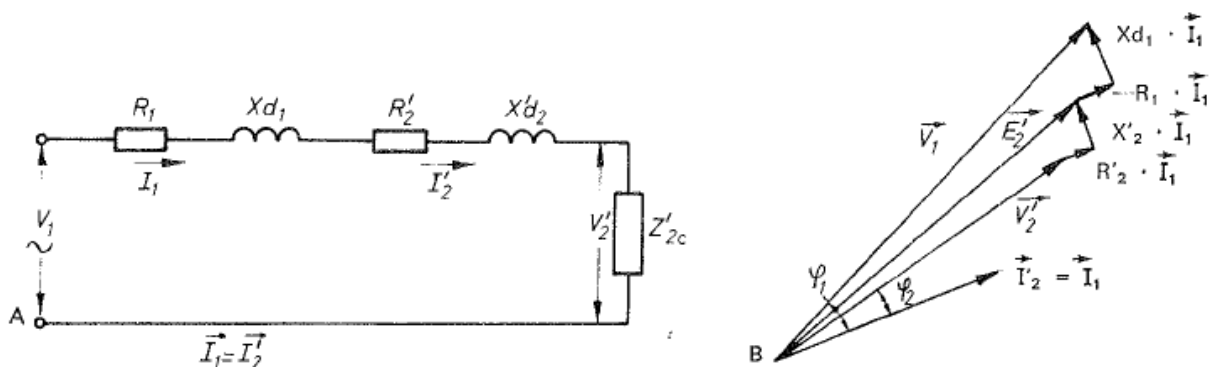
Siendo el diagrama vectorial del circuito equivalente para una carga óhmico-inductiva:



Circuito equivalente aproximado: Con objeto de simplificar en lo posible el cálculo del circuito equivalente, suele representarse según la Fig., ya que las caídas de tensión en las resistencias y reactancias primarias son mínimas y, se obtienen resultados prácticamente idénticos.

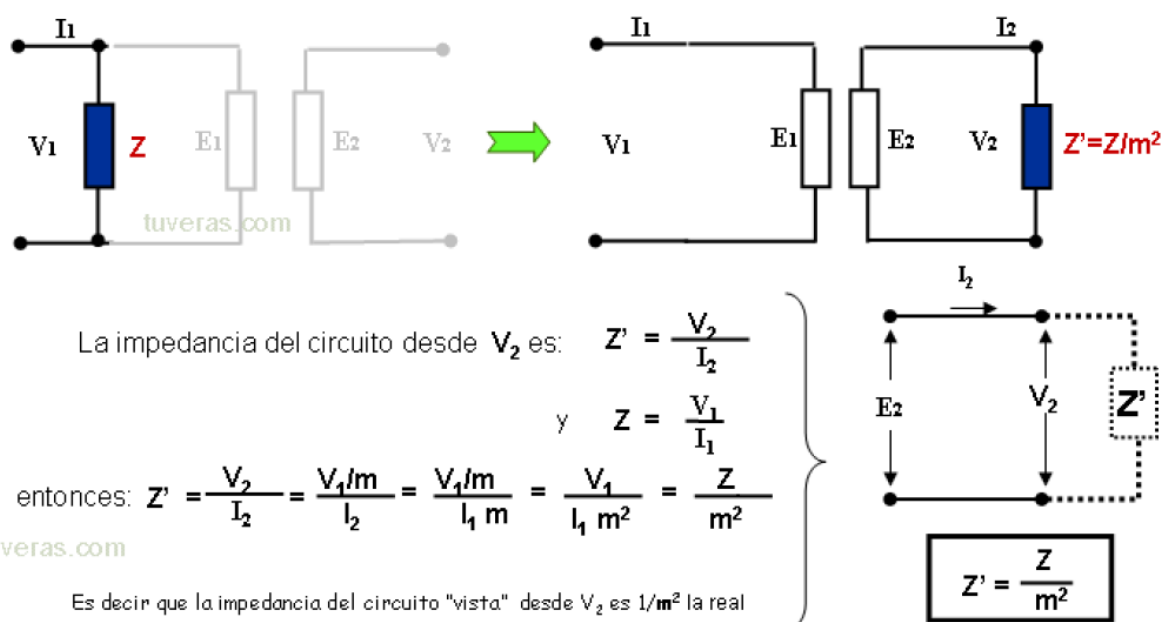


Circuito equivalente simplificado: Dada la escasa influencia de la corriente de vacío en el cálculo de las corrientes primaria y secundaria así como las caídas de tensión del transformador, puede prescindirse de ella y lograr así un circuito equivalente elemental, con la consiguiente simplificación de los cálculos.



4.2.- REDUCCIÓN DEL PRIMARIO AL SECUNDARIO

Todos los cálculos realizados anteriormente se han hecho refiriendo los datos del secundario al primario, siguiendo el mismo procedimiento, pueden referirse los datos del primario al secundario.



Los valores reducidos del primario también se designan con el símbolo "prima", mientras que los del secundario permanecen fijos (E'_1 , I'_1 , R'_1 , ...).

Los valores reducidos serán:

$$E'_1 = \frac{1}{m} \cdot E_1 = E_2$$

$$I'_1 = m \cdot I_1$$

$$V'_1 = \frac{1}{m} \cdot V_1$$

$$Z'_1 = \frac{V'_1}{I'_1} = \frac{\frac{1}{m} \cdot V_1}{m \cdot I_1} = \frac{1}{m^2} \cdot Z_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} R'_1 = \frac{1}{m^2} \cdot R_1 \\ X_{d1} = \frac{1}{m^2} \cdot X_{d1} \end{array} \right.$$

$$I'_0 = m \cdot I_0 \quad \left\{ \begin{array}{l} I'_a = m \cdot I_a \\ I'_m = m \cdot I_m \end{array} \right.$$

$$R'_0 = \frac{1}{m^2} \cdot R_0$$

$$X'_0 = \frac{1}{m^2} \cdot X_0$$

Ecuaciones de corriente y tensiones del transformador reducido al secundario en carga: Recordando que la ecuación general de amperiosvuelta era:

$$n_1 \cdot \vec{I}_1 + n_2 \cdot \vec{I}_2 = n_1 \cdot \vec{I}_0$$

Al dividir todos sus términos por n_2 , quedará:

$$\frac{n_1}{n_2} \cdot \vec{I}_1 + \frac{n_2}{n_2} \cdot \vec{I}_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \vec{I}_0, \text{ como: } \frac{n_1}{n_2} = m, \text{ queda:}$$

$$m \cdot \vec{I}_1 + \vec{I}_2 = m \cdot \vec{I}_0, \text{ o bien: } \vec{I}'_1 = \vec{I}'_0 - \vec{I}'_2$$

La ecuación de tensiones del primario es ahora:

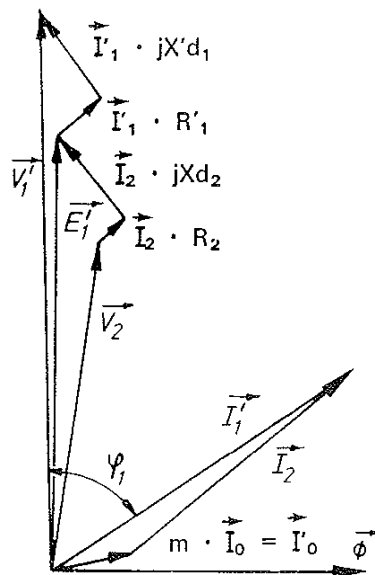
$$\vec{V}'_1 = \vec{E}'_1 + \vec{I}'_1 \cdot R'_1 + \vec{I}'_1 \cdot jX_{d1}$$

En este caso, la ecuación de tensiones del secundario no variará:

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_{d2}$$

Esquema equivalente y diagrama vectorial del transformador reducido al secundario: De igual forma que en el transformador reducido al primario, puede dibujarse el diagrama vectorial con los valores girados 180° , cumpliéndose:

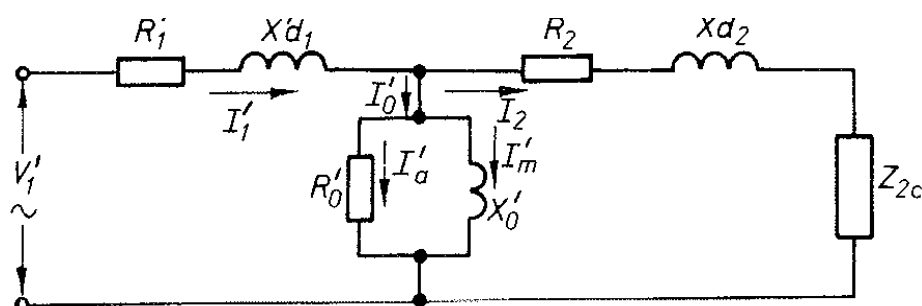
$$\vec{V}'_1 = \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_{d2} + \vec{I}'_1 \cdot R'_1 + \vec{I}'_1 \cdot jX'_{d1}, \text{ y que: } \vec{I}'_1 = \vec{I}'_0 + \vec{I}_2$$



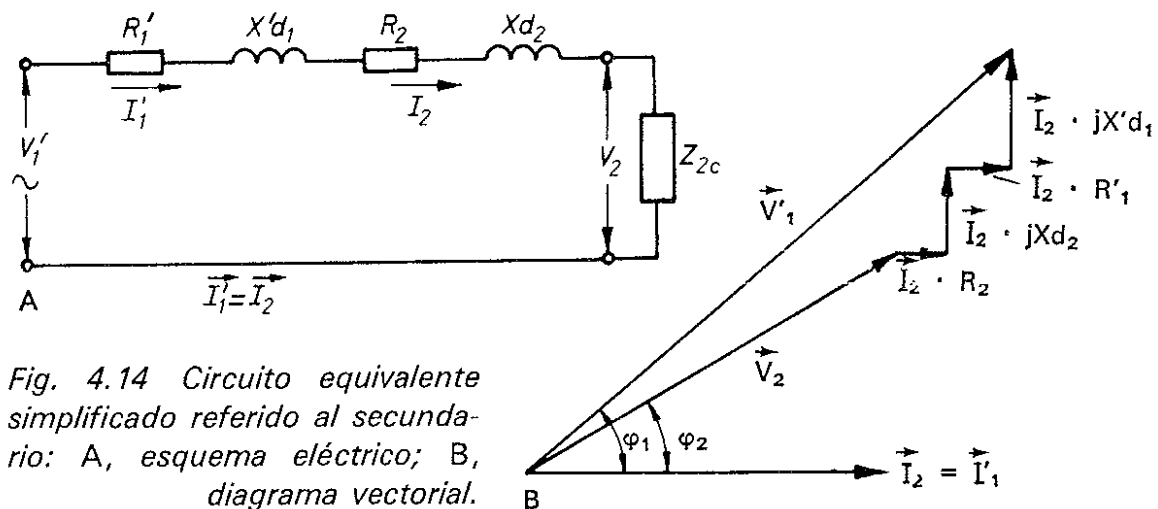
El número de espiras del primario reducido n'_1 coincide con el número de espiras del secundario n_2 ; por tanto, sigue manteniéndose la relación de transformación igual a la unidad:

$$n'_1 = \frac{1}{m} \cdot n_1 = n_2$$

El circuito equivalente del transformador reducido al secundario se representa en la Fig.:



El circuito equivalente simplificado y su diagrama vectorial serán:



5.- ESTUDIO DEL TRANSFORMADOR EN CORTOCIRCUITO.

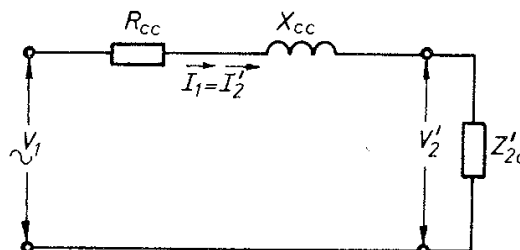
En general, se entenderá por cortocircuito la unión de los terminales del secundario a través de un conductor de impedancia nula $V_2 = 0$, cuando se ha aplicado tensión al primario $V_1 \neq 0$.

Es importante diferenciar dos tipos de cortocircuitos:

- El ensayo en cortocircuito realizado intencionadamente, cuando se ha aplicado al primario una fracción de la tensión nominal, denominada tensión de cortocircuito.
- El cortocircuito accidental, provocado por un fallo cuando el primario está conectado a la tensión nominal.

Antes de pasar al ensayo en cortocircuito, es necesario determinar los parámetros del transformador en cortocircuito (resistencia, reactancia, ...) partiendo de su circuito equivalente.

Resistencia y reactancia totales referidos al primario: El circuito equivalente simplificado puede sustituirse por otro formado por una resistencia R_{cc} y una reactancia X_{cc} , por ser un circuito serie, dando lugar al circuito:



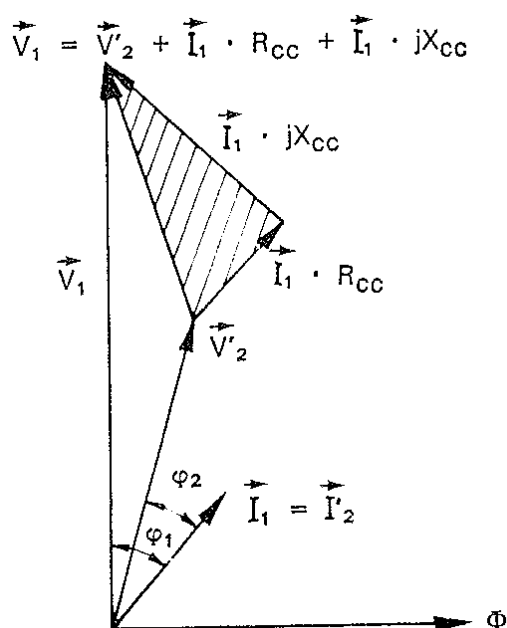
Los valores de la resistencia y la reactancia son:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2}$$

El diagrama vectorial del circuito se representa en la Fig.:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + \vec{I}_1 (R_1 + R'_2) + \vec{I}_1 \cdot j(X_{d1} + X'_{d2}) = \vec{V}_2 + \vec{I}_1 \cdot R_{cc} + \vec{I}_1 \cdot jX_{cc}$$



5.1.- ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

Si en el transformador anterior se unen los terminales del secundario en cortocircuito y se aplica la tensión de cortocircuito al primario V_{cc} , la ecuación de tensiones quedará:

$$\vec{V}_{cc} = \vec{I}_{cc} \cdot R_{cc} + \vec{I}_{cc} \cdot jX_{cc} = \vec{I}_{cc} (R_{cc} + jX_{cc}) = \vec{I}_{cc} \cdot \vec{Z}_{cc}$$

Impedancia de cortocircuito: Al funcionar el transformador en cortocircuito, el paso de corriente vendrá limitado por una impedancia interna o de cortocircuito; siendo la ecuación de tensiones en cortocircuito:

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}, \text{ o bien: } |Z_{cc}| = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

En donde: R_{cc} = Resistencia total de los devanados referidos al primario.

X_{cc} = Resistencia total de dispersión referida al primario.

La corriente de cortocircuito de un transformador viene limitada por las resistencias de sus devanados y por las reactancias de dispersión del primario y del secundario. Los parámetros R, X y Z, se les asigna el subíndice de cortocircuito (cc).

El valor de la impedancia interna de cada transformador se mantiene prácticamente constante para cualquier régimen de carga.

Tensión de cortocircuito de un transformador: La tensión de cortocircuito V_{cc} se define como la tensión referida a la tensión nominal primaria, que es necesario aplicar al primario para hacer circular la corriente nominal primaria, con el secundario en cortocircuito, o viceversa, en cuyo caso se refiere a la tensión nominal secundaria.

La tensión de cortocircuito se expresa en tanto por ciento, se representa por u_{cc} :

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_1} \cdot 100$$

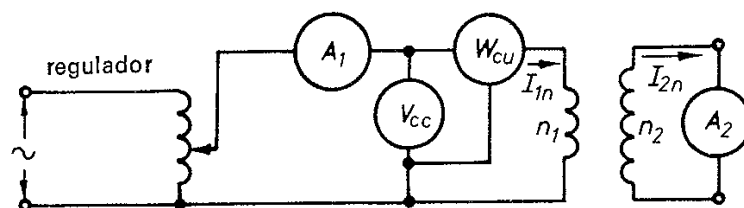
El valor de la u_{cc} para transformadores trifásicos suele estar comprendido entre el 4 y el 10%.

La tensión de cortocircuito es un dato muy importante y por ello figura en la placa de características de cada transformador.

5.2 REALIZACIÓN PRÁCTICA DEL ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.

Al aplicar la tensión de cortocircuito al primario, circularán las corrientes nominales por ambos devanados; y, con ayuda de los aparatos de medida, podrá determinarse su impedancia interna.

En la Fig., se ha representado el esquema correspondiente al ensayo en cortocircuito por el secundario, de un transformador monofásico. Hay que prestar especial atención a la tensión u_{cc} aplicada al primario, con el fin de que no se originen corrientes superiores a las nominales en ambos devanados; para ello es necesario disponer de una fuente de tensión regulable, en la que partiendo de cero se irá aumentando la tensión de cortocircuito u_{cc} hasta que el amperímetro A_1 , señale la corriente nominal I_{1n} .



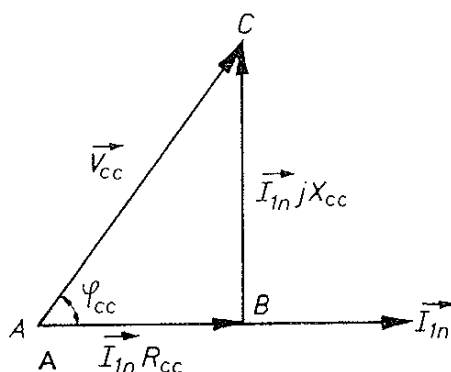
Si se intercala un amperímetro en el secundario, también señalará la corriente nominal I_{2n} cuando por el primario circule I_{1n} .

Como norma general, se cortocircuita siempre el devanado de baja tensión con conductores de gran sección, y se alimenta el circuito de mayor tensión a través de un regulador.

Triángulo fundamental de cortocircuito: Utilizaremos la siguiente ecuación de tensiones:

$$\vec{V}_{cc} = \vec{I}_{1n} \cdot R_{cc} + \vec{I}_{1n} \cdot jX_{cc}$$

La representación vectorial de esta ecuación da lugar a un triángulo rectángulo denominado triángulo fundamental de cortocircuito, denominado también de Kapp.



Los lados del triángulo fundamental expresados en valores porcentuales serían:

$$ac = u_{cc} = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1n}}{V_1} \cdot 100 \quad (\text{tensión de cortocircuito porcentual}).$$

$$ab = u_R = \frac{R_{cc} \cdot I_{1n}}{V_1} \cdot 100 \quad (\text{caída de tensión por resistencia total porcentual}).$$

$$bc = u_x = \frac{X_{cc} \cdot I_{1n}}{V_1} \cdot 100 \quad (\text{caída de tensión por reactancia total porcentual}).$$

La ecuación de tensiones sería ahora:

$$\vec{U}_{cc} = \vec{U}_R + \vec{U}_X, \text{ en donde:}$$

$$U_R = U_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$U_X = U_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

5.2.1.- DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE.

En el ensayo en cortocircuito circulan las intensidades nominales por ambos devanados y, por ello, se producen las pérdidas en el cobre nominales. Las pérdidas en el cobre son $R_1 \cdot I_{1n}^2$ en el devanado primario, y $R_2 \cdot I_{2n}^2$ en el devanado secundario, pudiendo agruparlas:

$$\begin{aligned} P_{Cu} &= R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 (I_{1n} \cdot m)^2 \\ &= I_{1n}^2 \cdot (R_1 + R_2 \cdot m^2) = I_{1n}^2 \cdot R_{cc} \end{aligned}$$

Para medir las pérdidas en el cobre de un transformador será necesario intercalar un vatímetro en el primario, estando el secundario en cortocircuito, y restarle, a la lectura del aparato, las pérdidas en el hierro y las adicionales, producidas por distorsión de flujo, corrientes parásitas, ...

En la práctica, debido al escaso valor que toman las pérdidas en el hierro, puesto que la tensión aplicada V_{cc} es del orden del 5%, se desprecian. Lo mismo sucede con las pérdidas adicionales. El vatímetro W_{Cu} conectado al primario indicará las pérdidas en el cobre nominales del transformador, por circular la corriente nominal.

Determinación práctica de los parámetros R_{cc} , X_{cc} , Z_{cc} : Un procedimiento sencillo para determinar la impedancia interna de un transformador lo proporciona el ensayo en cortocircuito, a través de sus aparatos de medida.

La impedancia Z_{cc} puede obtenerse por el cociente de lecturas del voltímetro V_{cc} y del amperímetro A_1 :

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}}$$

La resistencia R_{cc} puede medirse directamente con un puente de resistencias, o bien deducirse a partir de la potencia:

$$R_{cc} = \frac{W_{Cu}}{I_{1n}^2}$$

Las normas establecen que la resistencia haya de referirse a la temperatura de trabajo, que suele fijarse en 75 °C.

La reactancia puede deducirse por Pitágoras, a partir de Z_{cc} y R_{cc} .

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

Una vez conocidos los valores de R_{cc} y X_{cc} , quedará determinado el triángulo fundamental de cortocircuito y podrá representarse en cualquier diagrama vectorial. Si varía la carga, el triángulo fundamental también lo hará proporcionalmente a ella, puesto que sus lados se obtienen como producto de R_{cc} y X_{cc} por la intensidad.

5.3 CORTOCIRCUITO ACCIDENTAL.

Tiene lugar cuando, por una acción exterior al transformador, se produce un cortocircuito entre los bornes del secundario. El cortocircuito, también, puede tener se origen en causas internas.

Corriente de cortocircuito: En el caso más desfavorable, la corriente de cortocircuito vendrá limitada exclusivamente por la impedancia interna del transformador y alcanzará valores muy elevados:

$$V_{cc} = I_{1n} \cdot Z_{cc}, \text{ (en el ensayo en cortocircuito).}$$

$$V_1 = I_{cc} \cdot Z_{cc}, \text{ (en el cortocircuito accidental).}$$

$$\text{Dividiendo las dos expresiones: } \frac{V_{cc}}{V_1} = \frac{I_{1n}}{I_{cc}}$$

$$I_{cc} = I_{1n} \cdot \frac{V_1}{V_{cc}} = I_{1n} \cdot \frac{1}{\frac{V_{cc}}{V_1}}$$

El valor de la tensión de cortocircuito porcentual $u_{cc}\%$ quedará:

$$I_{cc} = I_{1n} \cdot \frac{1}{\frac{u_{cc}}{100}} = \boxed{\frac{100}{u_{cc}} \cdot I_{1n}}$$

Relación entre I_{cc} y los parámetros R_{cc} y X_{cc} : Para disminuir la corriente de cortocircuito I_{cc} , es necesario elevar la tensión de cortocircuito u_{cc} y, por tanto, la resistencia y reactancia del transformador, pero esto presenta el inconveniente de aumentar la caída de tensión. El constructor a juzgar las ventajas e inconvenientes de una mayor o menor tensión de cortocircuito u_{cc} ; e incluso para determinado valor de u_{cc} , buscar la relación R_{cc}/X_{cc} más apropiada.

En general, a medida que aumenta la potencia del transformador, también lo hace u_{cc} , mientras que la relación R_{cc}/X_{cc} disminuye considerablemente.

Efectos de la corriente de cortocircuito: Aunque el cortocircuito accidental en un transformador suele durar un tiempo muy breve, no es obstáculo para que se produzcan serias averías; teniendo un papel primordial los dispositivos de protección, tanto de la línea como del transformador.

Los principales daños que puede sufrir un transformador, cuando accidentalmente se haya producido un cortocircuito, se deben a dos causas:

- Elevación de la temperatura en los devanados, debido al paso de fuertes corriente, siempre superiores a la nominal.
- Enormes esfuerzos dinámicos entre espiras, por ser estos proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por los devanados; dando lugar a deformaciones de bobinas, rotura de espiras, ..., que normalmente impiden el funcionamiento del transformador.

Fenómenos transitorios: La causa de accidentes puede también originar otros fenómenos, denominados sobretensiones, que en general hacen saltar los aislamientos, como descargas atmosféricas, arcos a tierra, accidentes en líneas próximas, ondas de choque,

6.- CAÍDA DE TENSIÓN EN UN TRANSFORMADOR.

En el transformador se produce una caída de tensión cuando suministra una corriente I_2 a los receptores conectados al secundario para un determinado factor de potencia $\cos\phi_2$. La tensión de red V_1 se supondrá siempre constante.

Se entiende por caída de tensión la diferencia entre las tensiones del secundario en vacío E_2 y en carga V_2 :

$$\Delta V = E_2 - V_2$$

Normalmente la caída de tensión se suele expresar en tanto por ciento de la tensión secundaria en vacío E_2 y se denomina coeficiente de regulación ε .

$$\varepsilon = \frac{E_2 - V_2}{E_2} \cdot 100$$

E_2 = Tensión del secundario en vacío.

V_2 = Tensión del secundario en carga.

ε = Caída de tensión porcentual en el transformador real.

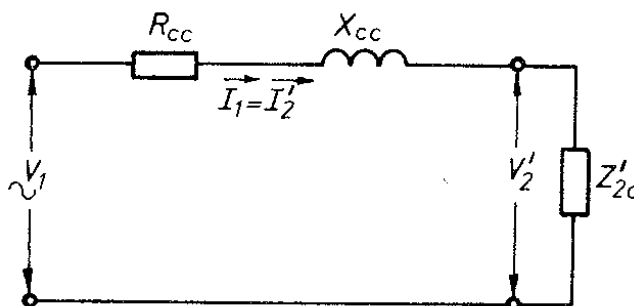
Coeficiente de regulación en el circuito equivalente simplificado: En el esquema del circuito equivalente simplificado, el coeficiente de regulación ε para una carga Z'_{2c} será:

$$\varepsilon' = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \cdot 100$$

V_1 = tensión de red constante (V)

V'_2 = tensión del secundario en carga reducida al primario (V)

ε' = caída de tensión porcentual en el circuito equivalente simplificado



Teniendo en cuenta que la tensión de red V_1 permanece fija, puede decirse que en valor absoluto es igual a la f.e.m. de vacío E_1 , que interviene en la relación de transformación. El coeficiente ε podría transformarse en ε' con solo multiplicar los términos de la expresión por m :

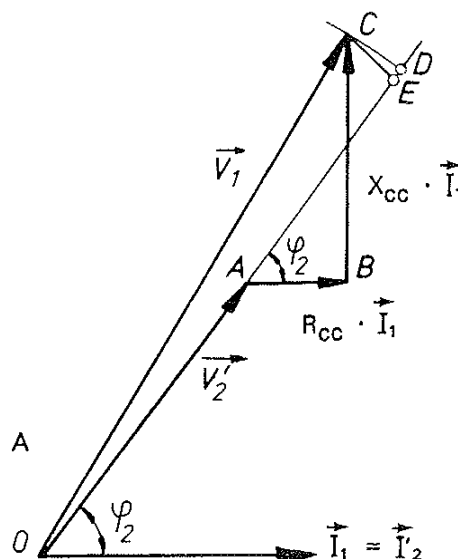
$$\varepsilon = \frac{E_2 \cdot m - V_2 \cdot m}{E_2 \cdot m} \cdot 100 = \frac{E_1 - V'_2}{E_1} \cdot 100 = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \cdot 100$$

En definitiva: $\varepsilon = \varepsilon'$

Cálculo del coeficiente de regulación: Para el cálculo de la caída de tensión, se parte del circuito equivalente simplificado, al ser un circuito sencillo de resolver.

Se representa el diagrama vectorial del circuito simplificado partiendo del vector intensidad en posición horizontal. El coeficiente ε será:

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \cdot 100 = \frac{OC - OA}{V_1} \cdot 100 = \frac{AD}{V_1} \cdot 100$$

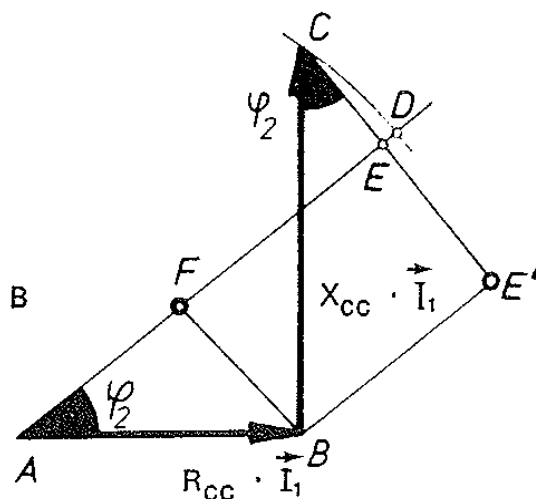


El punto D es el extremo del radio V_1 . El segmento AD puede tomarse por el Ae, cometiendo un pequeño error, que en la mayoría de los casos es despreciable:

$$AD \approx AE$$

De esta forma, el segmento AE es la suma de las proyecciones de las caídas de tensión sobre la dirección AE:

$$AE = AF + FE = R_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_{cc} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2 \approx AD$$



Sustituyendo el termino AD en el coeficiente ε :

$$\varepsilon = \frac{R_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_{cc} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2}{V_1} \cdot 100$$

Recordando las relaciones porcentuales del triángulo fundamental, al sustituir en la expresión anterior, quedaría:

$$\varepsilon = u_R \cdot \cos \varphi_2 + u_X \cdot \sin \varphi_2$$

6.1.- DIAGRAMA DE KAPP

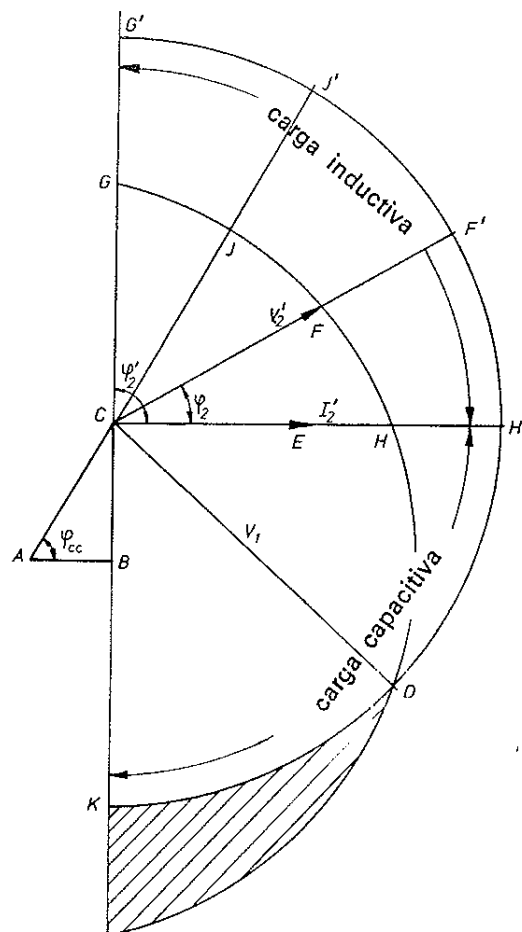
Parte del triángulo fundamental determinado en el ensayo en cortocircuito y, sobre él, se completa el diagrama vectorial de tensiones para un valor constante de la corriente I_2 de carga.

Una vez dibujado el triángulo ABC, con centros en A y en C, se trazan dos arcos de radio V_1 , que se cortan en el punto D. La dirección de la intensidad I'_2 se representa por el segmento CE; y, a partir del punto C, se trazarán vectores para distintos ángulos $\varphi_2, \varphi'_2, \dots$, que cortarán al arco interior en los puntos F y G; y el exterior, en los puntos F' y G'.

La caída de tensión en valor absoluto $\Delta U = V_1 - V'_2$ quedará determinada, para cada ángulo de desfase, por los segmentos comprendidos entre los dos arcos; así, para los ángulos φ_2 y φ'_2 , serán F'F y G'G, respectivamente.

La caída de tensión absoluta ΔU para un ángulo cualquiera, como φ_2 , será:

$$\Delta U = V_1 - V'_2 = AF - CF = CF' - CF = F'F$$



Entre los puntos que ofrecen especial interés, destacan:

a) El punto D, que corresponde a una caída de tensión nula en el transformador para una carga capacitiva: $\Delta U = 0$.

b) El punto H, que corresponde a la caída de tensión de una carga óhmica; y, por tanto $\varphi_2 = 0$. La caída de tensión es: $\Delta U = H'H$.

c) El punto G de una carga totalmente inductiva, $\varphi_2 = 90^\circ$. La caída de tensión es: $\Delta U = G'G$.

d) El punto J, donde se produce la máxima caída de tensión para un ángulo de carga igual al cortocircuito: $\varphi_2 = \varphi_{cc}$; $\Delta U = J'J$ (máxima).

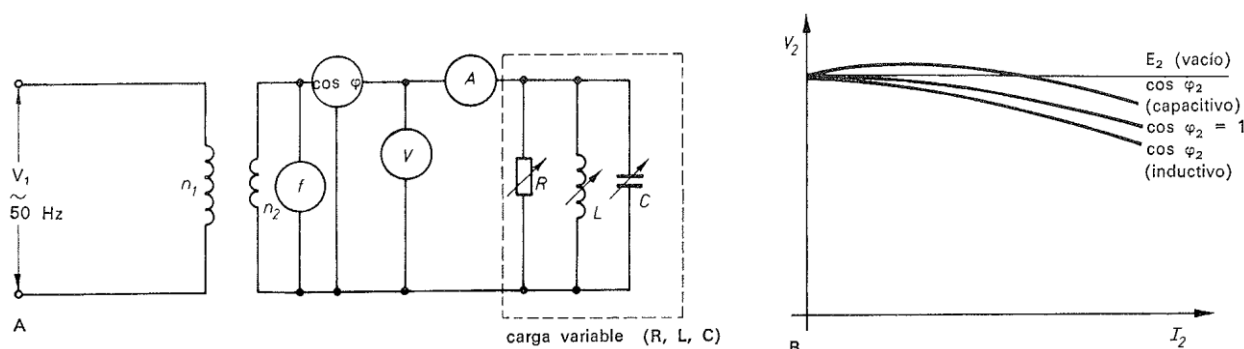
e) La zona sombreada comprendida entre los puntos D y K, en los que se produce una caída de tensión negativa; y, por tanto, la tensión en carga es superior a la de vacía. Este caso especial se produce para cargas muy capacitivas y se conoce como efecto Ferranti.

6.2.- CARACTERÍSTICA EXTERIOR.

Es la curva que representa la tensión en carga en función de la corriente suministrada por la máquina, para un factor de potencia constante: $V_b = f(I)$; para $\cos \varphi_2 = \text{cte}$. Se supondrán fijas la tensión de red y la frecuencia.

Esta característica depende de los datos de la carga y, por ello, se denomina exterior. La característica exterior solamente podrá realizarse directamente en los pequeños transformadores y de tensiones no excesivas, mientras que, en los grandes, será necesario recurrir a los métodos indirectos, como el de Kapp.

En la Fig., se indica el esquema de montaje que debe utilizarse para realizar el ensayo directo. En él, se aprecian los aparatos de medida que indicarán los valores de las magnitudes por medir y una carga R, C, L, variable, para poder conseguir en cada punto de la curva la constancia del factor de potencia.



En el ensayo, se parte del punto de vacío y se ira aumentando la corriente I_2 progresivamente; las variables por representar son la tensión y la corriente.

Para cada $\cos \varphi_2$, se obtendrá una curva, pudiéndose obtener una familia formada por infinitas curvas.

El funcionamiento normal en la práctica corresponde a cargas óhmico-inductivas, en las que se aprecia un descenso de la tensión cuando aumenta la carga.

Para evitar el inconveniente de la variación de tensión cuando lo hace el número y potencia de receptores, los transformadores van dotados de reguladores de tensión o conmutadores que se ajustan al valor de tensión que interese; actúan por variación del número de espiras, para lo que el transformador ha de disponer de varias tomas.

7.- RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

Se define el rendimiento como la relación entre la potencia útil cedida por el secundario y la potencia absorbida por el primario de la red, expresadas en las mismas unidades. Se indica generalmente en tanto por ciento.

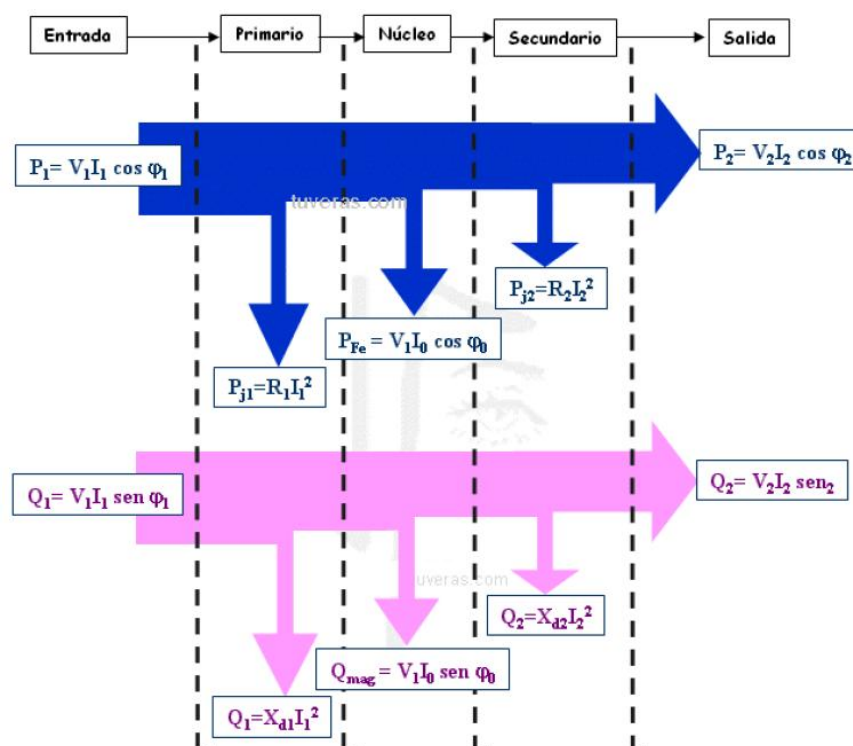
Los métodos más utilizados son:

Medida directa: Consiste en medir directamente la potencia suministrada por el transformador y la potencia que absorbe; para ello, se coloca un vatímetro en el secundario W_2 y otro en el primario W_1 , siendo el rendimiento el cociente entre ambas lecturas: $\eta = W_2 / W_1 \cdot 100$.

W_1 = Potencia activa cedida a la carga.

W_2 = Potencia activa absorbida de la red.

Sin embargo, por causa del elevado rendimiento de los transformadores, normalmente comprendido entre el 93% en los de 1 KVA y del 99,5% para potencias elevadas, este método daría lugar a errores considerables y falsearía los resultados.



Medida indirecta: Consiste en medir las pérdidas del transformador. Añadiendo estas pérdidas a la potencia suministrada por el secundario, se obtiene la potencia absorbida. Siendo el rendimiento:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_p} \cdot 100$$

P_u = Potencia activa cedida a la carga.

P_p = Potencia pérdida en el transformador.

Este método se aplica preferentemente a transformadores de gran potencia, y en general a todos, por ofrecer mayor precisión.

Las pérdidas existentes en el transformador son:

- Pérdidas en el hierro (independientes de la intensidad).
 - Pérdidas en el cobre por efecto Joule (dependientes de la intensidad)
 - Pérdidas adicionales a la carga (dependientes de la intensidad).
- Las pérdidas en el hierro se determinan mediante el ensayo en vacío.

Las pérdidas en el cobre y las adicionales se miden en el ensayo de cortocircuito. Dado el escaso valor de las pérdidas adicionales, es normal prescindir de ellas y resumir las pérdidas de un transformador a las del hierro y las del cobre.

El rendimiento vendrá dado por:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100 = \frac{P \cdot \cos \varphi_2}{P \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100$$

Teniendo en cuenta que las pérdidas en el hierro son siempre constantes $P_{Fe} = K$ (mientras no varía la tensión de red), y que las pérdidas en el cobre dependen del cuadrado de la potencia útil, $P_{Cu} = C \cdot P_u^2$, al sustituir los nuevos términos, quedará:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + K + C \cdot P_u^2} \cdot 100 = \frac{1}{1 + \frac{K}{P_u} + C \cdot P_u} \cdot 100$$

$$\frac{K}{P_u} = C \cdot P_u$$

El rendimiento depende de la suma $\frac{K}{P_u} + C \cdot P_u$, o sea, del régimen de carga a que trabaje el transformador. Cuando suministre potencias bajas, el término K / P_u predominará sobre el otro, mientras que, para cargas elevadas, será al revés; por tanto, existirá una carga P'_u para la cual se cumplirá que la suma de ambos términos es mínima y, por tanto, el rendimiento será máximo.

Matemáticamente se demuestra que el rendimiento máximo tiene lugar cuando ambos términos son iguales:

$$\frac{K}{P_u} = C \cdot P_u, \text{ o bien: } K = C \cdot P_u^2$$

K = pérdidas en el hierro.

$C \cdot P_u^2$ = pérdidas en el cobre.

El rendimiento del transformador es máximo cuando las pérdidas en el hierro son iguales a las del cobre.

La carga P' del máximo rendimiento se obtiene mediante:

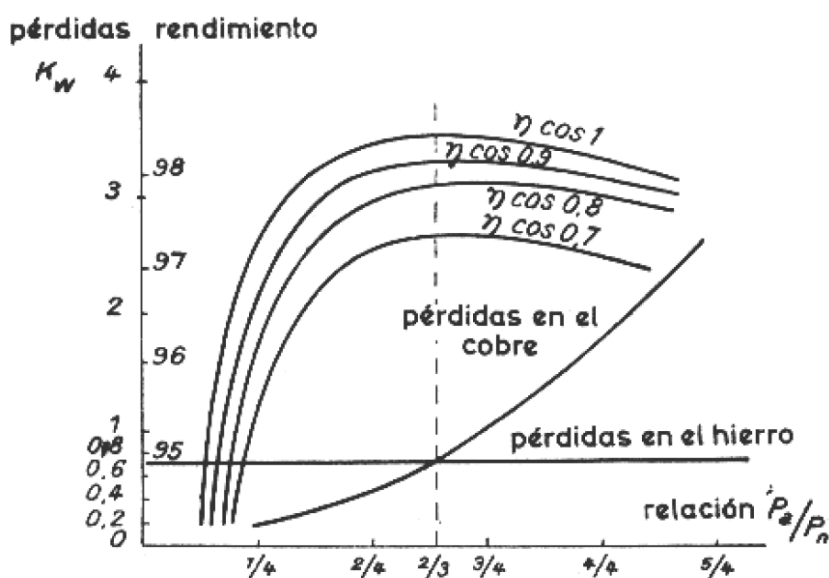
$$P' = P_{P.C.} \cdot \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}}$$

P_{Fe} = pérdidas en el hierro.

P_{Cu} = pérdidas en el cobre.

$P_{P.C.}$ = potencia nominal.

P' = potencia para la cual el rendimiento es máximo.

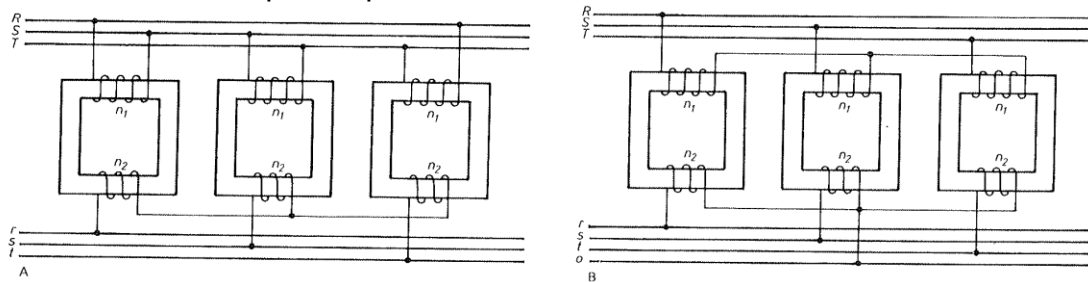


En la tabla siguiente vemos valores típicos de diferentes transformadores

8.- TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

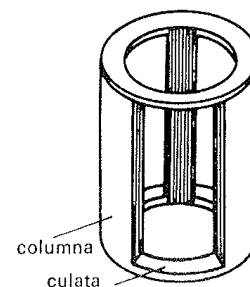
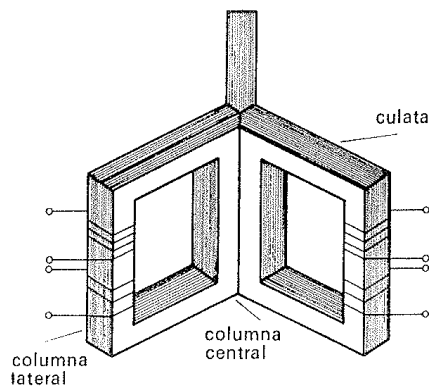
Partiendo de un sistema trifásico equilibrado, su transformación consistirá en la variación de tensiones y corriente, dando lugar a otro sistema trifásico equilibrado.

Partiendo de tres transformadores monofásicos (banco trifásico), y conectando los primarios y secundarios en estrella o en triángulo. Se obtiene un sistema caracterizado por su total independencia entre los circuitos magnéticos del transformador, pero presenta el inconveniente de coste y volumen elevado. Una ventaja es la rentabilidad económica, frente al trifásico, ya que en caso de avería en uno de ellos, se sustituiría por otro monofásico, más económico que el trifásico. Las pérdidas en el hierro del transformador monofásico son mayores que el trifásico de las mismas características, por lo que el rendimiento disminuirá

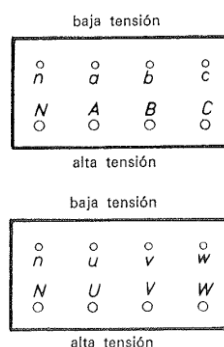


La utilización del banco trifásico es muy limitada, reduciéndose su aplicación a algún caso en el que, por motivos de seguridad en la instalación, se tenga que disponer de transformadores de reserva, o bien que existan dificultades de transporte para los grandes transformadores.

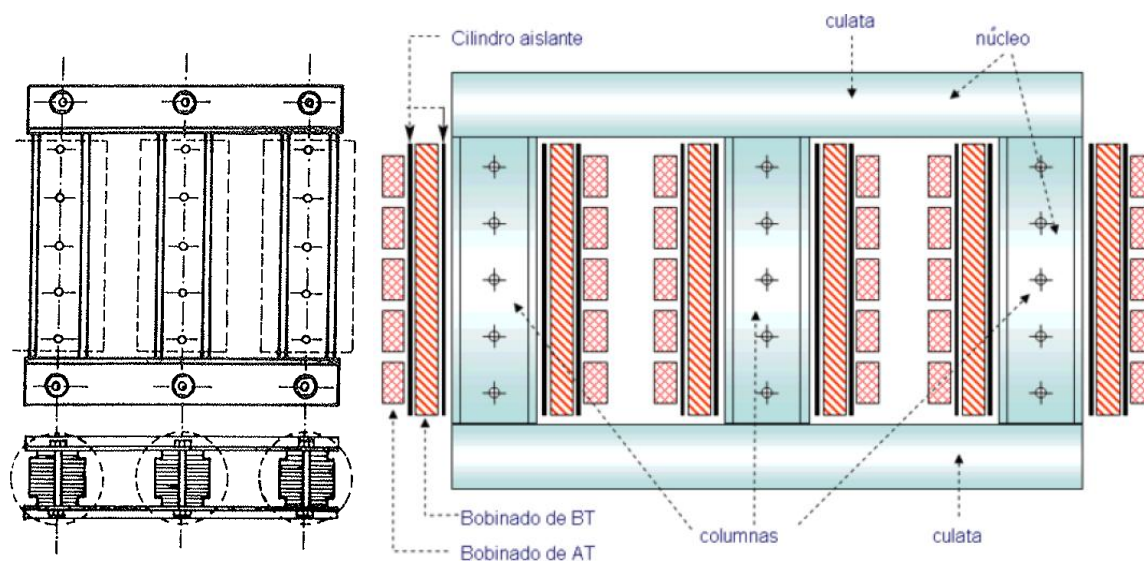
En lugar de tres transformadores, los devanados primarios y secundarios se disponen sobre un mismo núcleo, dando lugar al transformador trifásico. Aunque existen varios tipos de montajes del núcleo magnético, los más utilizados son los de culatas en estrella y en triángulo; por razones constructivas se ha impuesto la fabricación de transformadores de columnas con culatas en estrella.



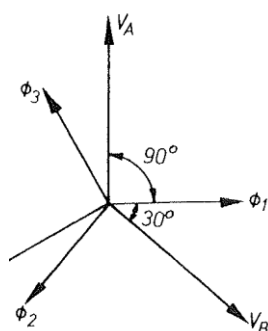
La designación de bornes correspondientes de los transformadores trifásicos se hace según normas CEI y las recomendaciones de UNESA.



Transformador trifásico con culatas en estrella: Este transformador se obtiene a partir de la unión de los circuitos magnéticos de tres transformadores monofásicos. Este montaje sufrió algunas modificaciones hasta llegar al circuito magnético actual.

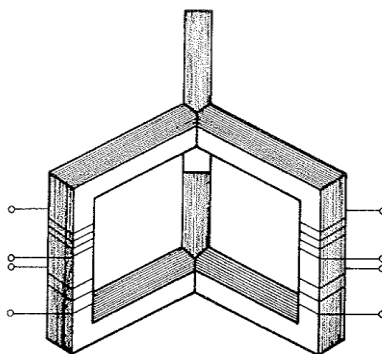


En un sistema trifásico de tensiones equilibradas, las tensiones de red están desfasadas 120° eléctricos entre sí y da lugar, en los devanados primarios, a tres flujos desfasados 90° en retraso; pero entre ellos los flujos van desfasados 120° , cumpliéndose que el flujo resultante es: $\vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2 + \vec{\Phi}_3 = 0$

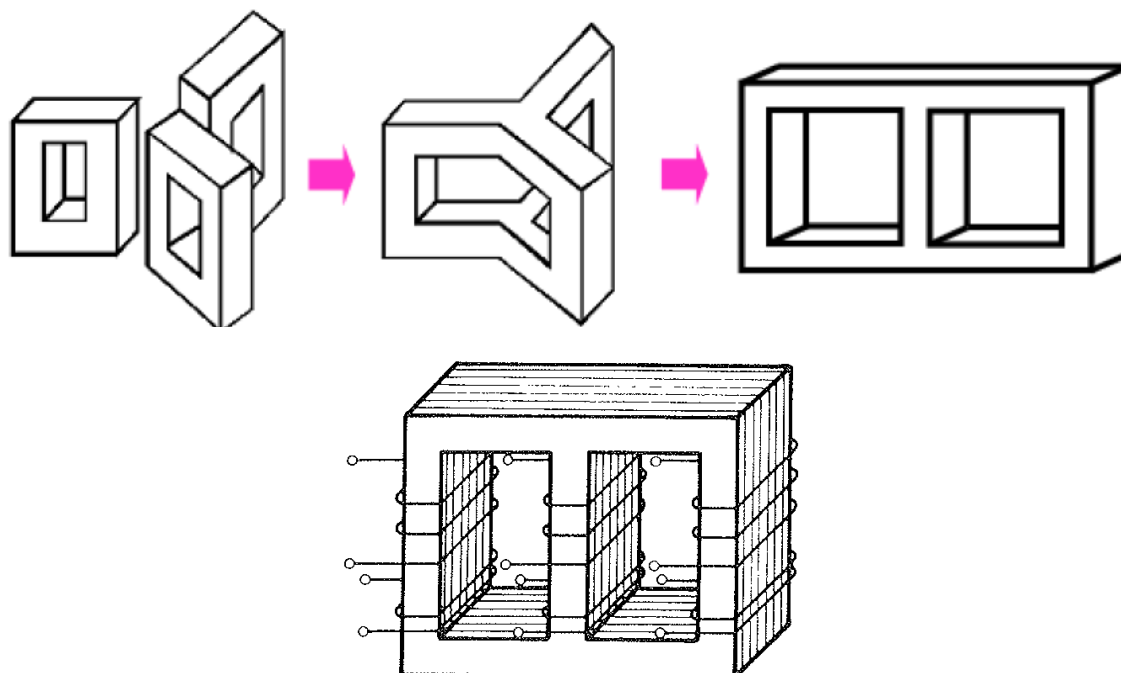


De forma que, por la columna central, circulará el flujo resultante, que en cualquier instante será nulo, ya que se trata de un núcleo simétrico.

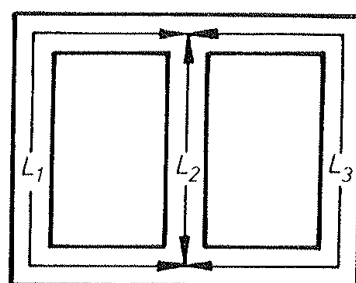
Esto motivó su eliminación, convirtiendo el circuito en el señalado en la Fig.:



Modificando ligeramente el circuito magnético, se obtiene el de la Fig., en el que se han situado las culatas en el mismo plano, con la consiguiente sencillez desde el punto de vista constructivo.



En la Fig., se indican las longitudes medias de los circuitos magnéticos de las tres ramas, que serán proporcionales a sus reluctancias, al suponer constantes la sección y permeabilidad:



$$R = \frac{l}{\mu \cdot S} = K \cdot l$$

$$R_1 = K \cdot l_1$$

$$R_2 = K \cdot l_2$$

$$R_3 = K \cdot l_3$$

En la rama central disminuye la reluctancia del circuito magnético por haberse anulado sus culatas y, aunque los tres flujos son idénticos (al ser producidos por tres tensiones iguales), no lo serán las fuerzas magnetomotrices:

$$\vec{F}_1 = \vec{\Phi}_1 \cdot R_1$$

$$\vec{F}_2 = \vec{\Phi}_2 \cdot R_2$$

$$\vec{F}_3 = \vec{\Phi}_3 \cdot R_3$$

En definitiva, las corrientes magnetizantes I_m serán diferentes, así como también lo serán las componentes activas I_a , por tener mayor volumen las ramas laterales que la central.

Analizando el circuito magnético completo mediante el diagrama vectorial, y teniendo en cuenta las diferencias expuestas, se demuestra que la simetría del núcleo magnético motiva la desigualdad en las tres corrientes de vacío I_0 de un transformador.

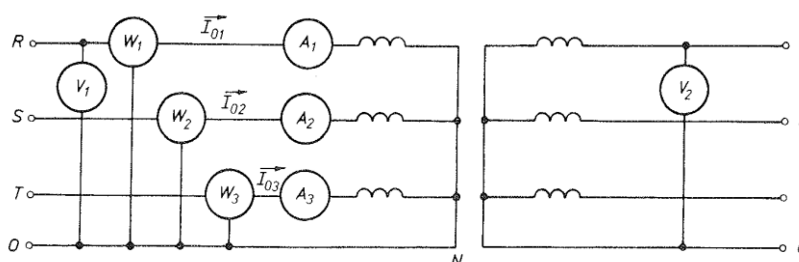
Como en el transformador monofásico, la corriente de vacío tiene escasa influencia en el funcionamiento en carga del transformador, por lo que tampoco afectará al transformador trifásico.

La ventaja principal del transformador trifásico con las culatas alineadas, es su facilidad de construcción. También es interesante el ahorro de material y, por tanto, la disminución de las pérdidas en el hierro.

8.1.- TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN VACÍO.

Al conectar el primario a un sistema trifásico de tensiones equilibrado, circulará la corriente de vacío por cada fase I_0 y se establecerá el circuito magnético, tal como sucedía con el transformador monofásico. En las fases del devanado primario se inducirán las ff. ee. mm. E_1 , E_2 , E_3 , y en el secundario, que permanecerá abierto, las ff. ee. mm., e_1 , e_2 , e_3 , respectivamente.

La principal diferencia con respecto al monofásico es la desigualdad de corrientes por fase, y por lo tanto, la potencia absorbida por cada fase. Para representar el diagrama vectorial en vacío será necesario determinar la corriente y potencia absorbidas en cada fase, como se indica en el esquema de conexiones de la Fig.



8.1.1.- ENSAYO EN VACÍO.

Al aplicar al primario las tensiones nominales, los vatímetros indicarán las pérdidas en el hierro por fase. Las pérdidas totales serán: $P_{Fe} = W_1 + W_2 + W_3$.

El ensayo en vacío permite hallar la relación de transformación por fase o simple m_s , como cociente entre las lecturas del voltímetro V_1 y V_2 :

$$m_s = \frac{V_1}{V_2}$$

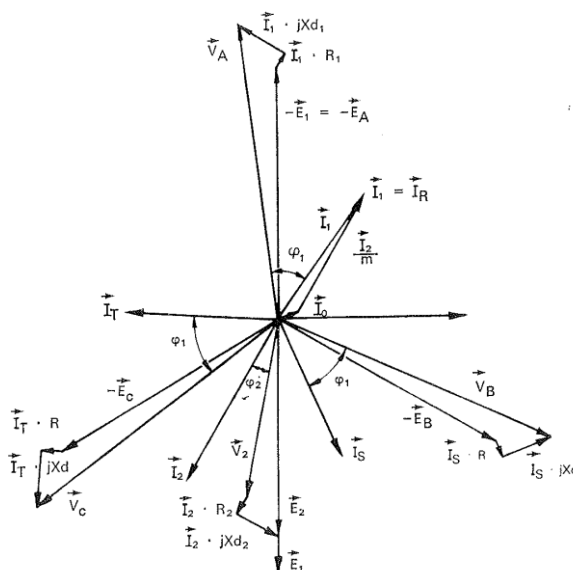
En los sistemas trifásicos habrá que diferenciar la relación de tensiones simples m_s (por fase) de la compuesta m_c (entre fases).

8.2.- TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN CARGA.

El comportamiento de un transformador trifásico en carga es similar al de un conjunto de tres transformadores monofásicos, ya que cada fase da lugar a un circuito independiente; la desigualdad de corrientes existente entre las tres fases en vacío no incide apenas en el funcionamiento en carga, por tomar valores despreciables frente a éstas, y con objeto de simplificar los cálculos, se despreciaba el valor de la corriente de vacío.

Así, el estudio del transformador en carga se ajusta en su totalidad al realizado para el transformador monofásico, siempre que todos los valores de los parámetros se tomen por fase. El siguiente diagrama vectorial corresponde a un transformador trifásico, con el primario y secundario en estrella, que alimenta una carga óhmico-

inductiva; solamente se han representado los valores primario y secundario para una fase.



8.3.- TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN CORTOCIRCUITO.

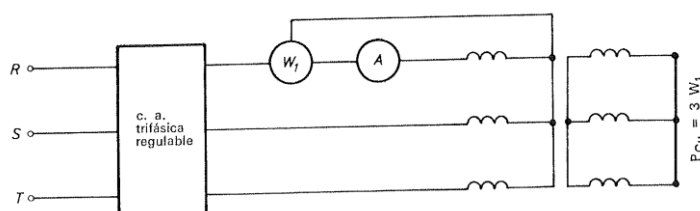
El funcionamiento del transformador trifásico en cortocircuito coincide con el del transformador monofásico en su totalidad, ya que el desequilibrio que surgía en vacío no tiene lugar ahora, por circular las corrientes nominales por cada fase, pudiéndose considerarlas prácticamente iguales.

Se pueden presentar otros tipos de cortocircuitos en el transformador trifásico, como son los cortocircuitos de una fase y los de dos fases, en cuyo estudio no se entrará (corresponden a sistemas trifásicos desequilibrados).

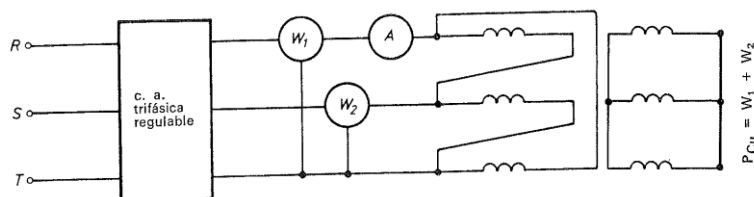
Por la importancia que presenta el parámetro u_{cc} en el caso de un cortocircuito, se recuerda que la corriente de cortocircuito vendrá limitada exclusivamente por la tensión de cortocircuito, y que un excesivo aumento de u_{cc} dará lugar a una fuerte caída de tensión. Los valores de u_{cc} vienen grabados en la placa de características de los transformadores.

8.3.1.- ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

Dado que las tres resistencias del devanado primario son iguales, así como las del secundario, para averiguar las pérdidas en el cobre del transformador será suficiente aplicar la tensión de cortocircuito a un devanado y conectar el otro en cortocircuito. La lectura del vatímetro W_1 indicará las pérdidas por fase; las pérdidas totales en el cobre serán: $P_{Cu} = 3 \cdot W_1$.



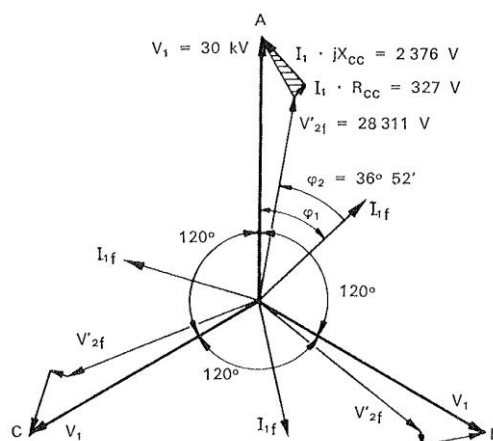
También pueden determinarse las pérdidas en el cobre, con dos vatímetros, utilizando la conexión Aaron: $P_{Cu} = W_1 + W_2$.



Para realizar el ensayo en cortocircuito, es necesario disponer de una fuente de c.a. trifásica de tensión regulable.

8.4.- CIRCUITO EQUIVALENTE.

Se aplica lo mismo que para el transformador monofásico, con la diferencia de referirse todos los datos a una sola fase, pudiendo resumirse el circuito equivalente a la resistencia R_{cc} , en serie con la reactancia X_{cc} , obtenidas en el ensayo en cortocircuito, para la tensión u_{cc} nominal. Se representa siempre el circuito equivalente por fase, aunque el diagrama vectorial puede hacerse completo.



8.5.- CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

En nomenclatura abreviada se utilizan las letras mayúsculas para A.T. y minúsculas para b.t.; para triángulo D, d; estrella Y, y; zigzag Z, z.

Según se realice la conexión de los devanados primario y secundario, se obtendrán diferentes tipos de transformadores:

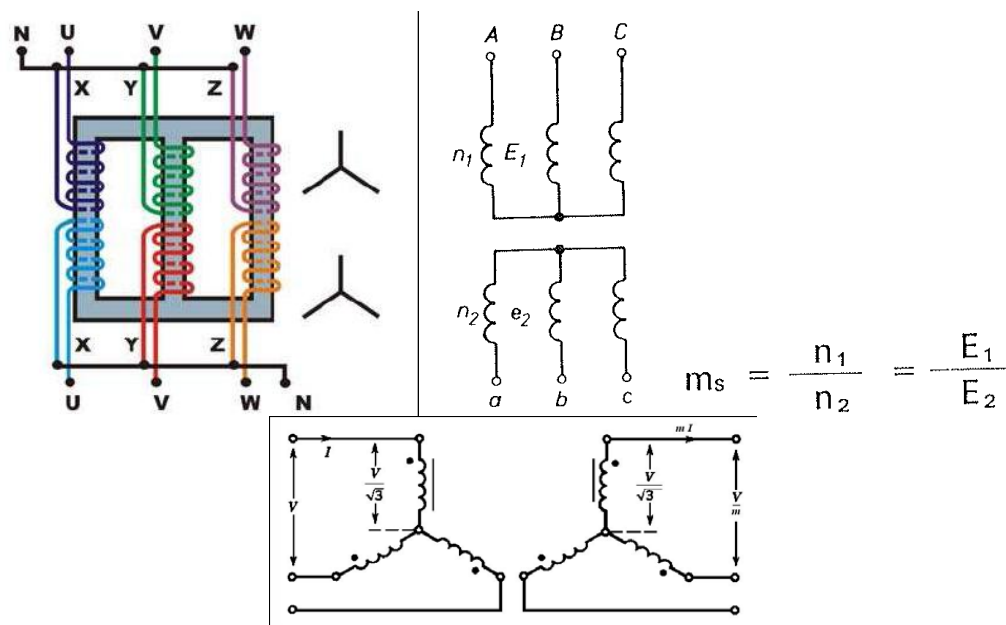
- Estrella en el primario **Y** – estrella en el secundario **y**, o simplemente estrella-estrella **Yy**.
- Estrella-triángulo **Yd**.
- Estrella-zigzag **Yz**.
- Triángulo-triángulo **Dd**.
- Triángulo-estrella **Dy**.

Las relaciones de transformación corresponden siempre a las ff. ee. mm. de vacío, por lo que se utilizarán las nomenclaturas de V y E, indistintamente, para la tensión.

8.5.1 CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA.

En este tipo de transformador, sus devanados primarios y secundarios están conectados en estrella, y se puede llevar el neutro tanto en el primario como en el secundario.

La relación de transformación simple m_s se determina como cociente entre el número de espiras de una fase del primario y otra del secundario y coinciden con la relación entre las ff. ee. mm. por fase de ambas en vacío:



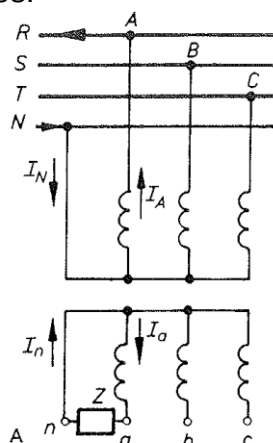
La relación de transformación compuesta m_c es el cociente entre las tensiones de línea del primario al secundario, en vacío:

$$m_c = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_1}{\sqrt{3} \cdot e_1} = \frac{E_1}{e_1} = m_s$$

En la conexión estrella-estrella, se cumple: $m_s = m_c$.

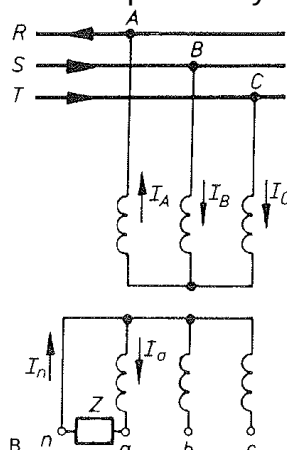
El principal inconveniente de la conexión estrella-estrella es el desequilibrio de tensiones en la línea conectada al primario, que aparece cuando fuertes desequilibrios en la carga secundaria.

En el transformador estrella-estrella, con neutro en ambos devanados, al sobrecargar una fase en el secundario I_a , aumentará proporcionalmente la corriente en la fase en el secundario I_a , aumentará proporcionalmente la corriente en la fase del devanado de la misma columna del primario I_A y, por tanto, provocará caída de tensión mayor en un conductor de línea que en los otros dos. Las corrientes I_a e I_A se cierran por el neutro y no por las otras fases.



Si el transformador sólo dispone de neutro en el secundario, todavía es mayor el desequilibrio, puesto que una sobrecarga en el secundario I_a provoca otra en el primario I_A , que, al carecer de neutro, hace que circule por las otras dos fases I_B e I_C .

sin que hayan variado las corrientes del secundario de estas fases I_b e I_c . Un fuerte aumento de I_B e I_C , sin estar compensadas, motiva una asimetría en los flujos y, por tanto, un desequilibrio en las ff.ee.mm. del primario y secundario.



Una ventaja muy interesante que presenta este transformador es la posibilidad de sacar neutro, tanto en el lado de b.t. como en el de A.T. El neutro permite obtener dos tensiones (230/400 V), o bien, conectarlo a tierra como medida de seguridad en cierto tipo de instalaciones.

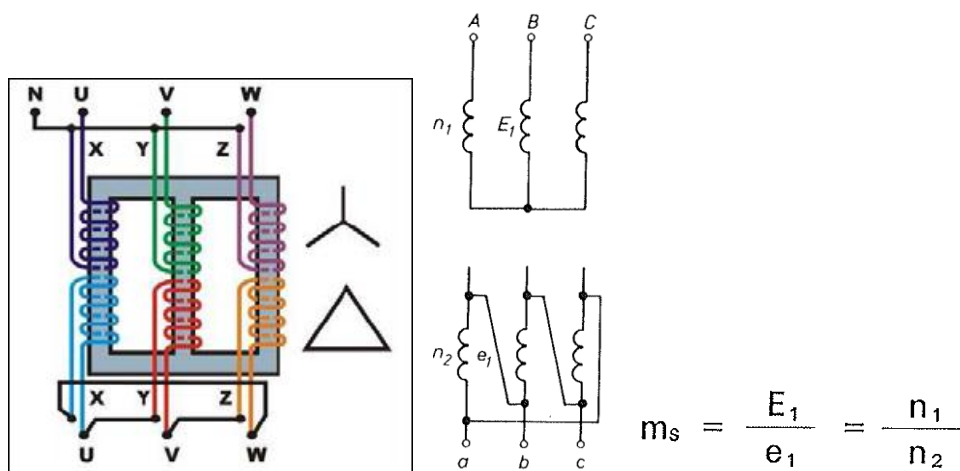
Este tipo de transformador es más utilizado para pequeñas potencias, ya que además de poder disponer de dos tensiones, es más económico, por aplicar una

tensión a cada fase $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ y, por consiguiente, disminuir el número de espiras, aunque ha de aumentarse la sección de los conductores, por circular la corriente de línea I_L por cada fase. Por otra parte, el aumento de sección de conductores favorece la resistencia mecánica a los esfuerzos de cortocircuito.

8.5.2.- CONEXIÓN ESTRELLA-TRIÁNGULO.

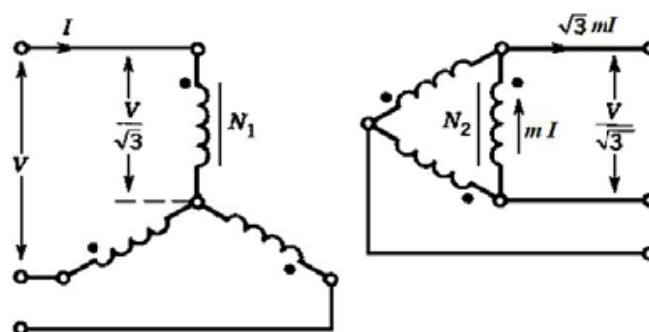
El devanado primario está conectado en estrella, mientras que el secundario lo está en triángulo.

La relación de transformación simple será:



La relación de transformación compuesta es:

$$m_c = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_1}{e_1} = \sqrt{3} \cdot m_s$$



En la conexión estrella-triángulo, se cumple que:

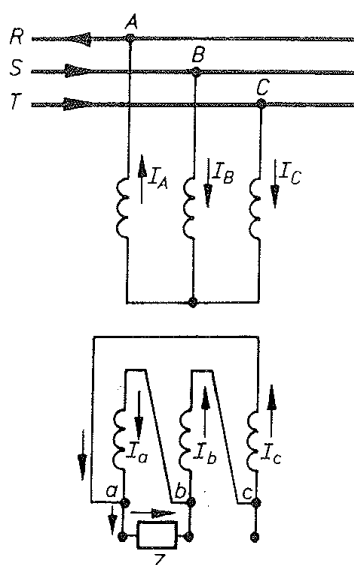
$$m_c = \sqrt{3} \cdot m_s$$

Este transformador no dispone de salida de neutro y, por tanto, no tendrá utilidad en redes de distribución a dos tensiones. Por el mismo motivo, tampoco podrá conectarse a tierra el secundario.

Cualquier interrupción en alguna fase del secundario deja fuera de funcionamiento el transformador.

Aunque el primario pueda conectarse a tierra como medida de protección de la línea, no es aconsejable, al dar lugar a la aparición de armónicos, siempre perjudiciales.

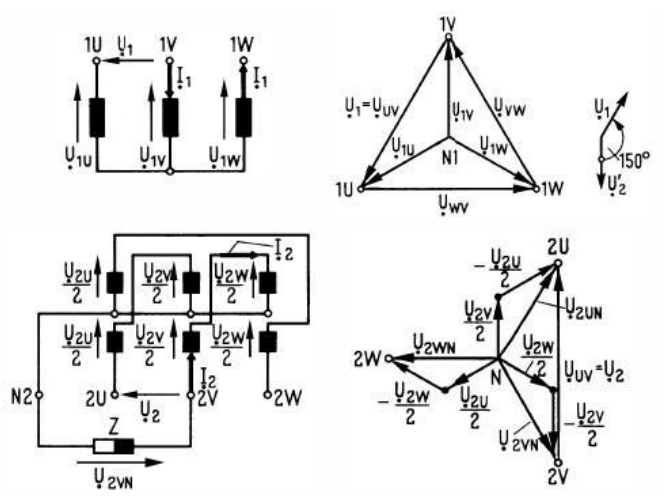
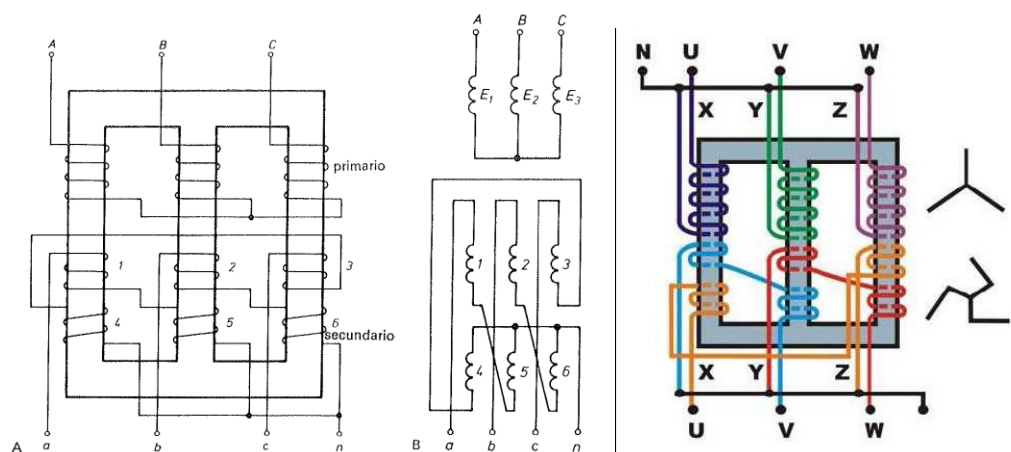
En el funcionamiento con cargas desequilibradas, el desequilibrio en dos fases, como las a y b, se reparte entre las tres fases del secundario, a, b, c, transmitiéndose, por tanto a las tres fases del primario A, B, y C. Su uso es muy limitado.



8.5.3 CONEXIÓN ESTRELLA-ZIGZAG.

Para salvar el inconveniente del funcionamiento del transformador estrella-estrella para cargas muy desequilibradas y conservar sus ventajas, surgió el estrella-zigzag, aunque eleva su coste con respecto a aquél.

La conexión zigzag consiste en dividir cada devanado de una fase en dos partes iguales y enrolladas en sentido contrario, en dos columnas consecutivas, conectándolas en serie.



En la determinación de las relaciones de transformación, ha de tenerse en cuenta el desfase existente entre las bobinas del secundario por encontrarse en distintas columnas.

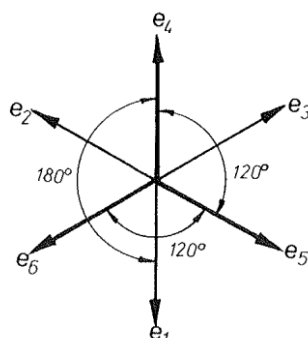
La f.e.m. por fase del secundario se obtiene por suma vectorial de las dos ff.ee.mm. inducidas en dos bobinas (superior e inferior) de dos columnas consecutivas:

$$\vec{e}_{na} = \vec{e}_5 + \vec{e}_1$$

$$\vec{e}_{nb} = \vec{e}_6 + \vec{e}_2$$

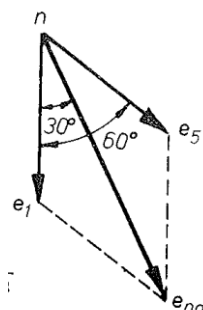
$$\vec{e}_{nc} = \vec{e}_4 + \vec{e}_3$$

El diagrama vectorial de la conexión zigzag se obtiene partiendo de una estrella equilibrada que corresponda a las ff.ee.mm. de las tres bobinas conectadas al neutro (e_4, e_5, e_6) y, a continuación, se representan las ff.ee.mm. de las tres bobinas restantes (e_1, e_2, e_3), teniendo en cuenta que en la misma columna la f.e.m. inducida en una bobina e_4 es de sentido opuesto a la inducida en la otra bobina e_1 .



Con la ayuda del diagrama vectorial, se puede determinar el valor de la f.e.m. inducida en una fase cualquiera del devanado zigzag; por ejemplo e_{na} :

$$\vec{e}_{na} = \vec{e}_5 + \vec{e}_1 = 2 \cdot e_1 \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot e_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = e_1 \cdot \sqrt{3} = e_5 \cdot \sqrt{3}$$



La f.e.m. inducida en una fase del devanado trifásico en conexión zigzag es $\sqrt{3}$ veces superior a la f.e.m. inducida en cada una de las dos bobinas que interviene en dicha fase.

Para averiguar la relación de transformación simple, es necesario advertir que la f.e.m. inducida en una columna en conexión zigzag sería dos veces el valor absoluto de la f.e.m. inducida en cada bobina. En realidad, es la relación de tensiones por columna:

En una de ellas será:

$$m_s = \frac{n_1}{n_2} = \frac{E_1}{e_1 + e_4} = \frac{E_1}{2 e_1}, \text{ ya que: } e_1 = e_4.$$

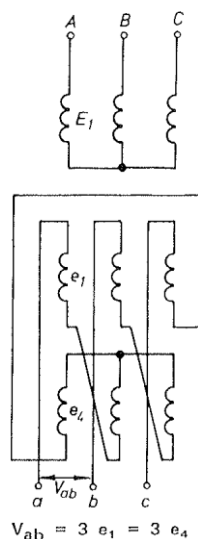
La relación de transformación compuesta del transformador estrella-zigzag es:

$$m_c = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_1}{\sqrt{3} \cdot e_{na}} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_1}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot e_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{E_1}{e_1}$$

Al sustituir en esta expresión el valor de la relación m_s , quedará:

$$m_c = \frac{2 \cdot m_s}{\sqrt{3}} = 1,154 \cdot m_s = 1,154 \cdot \frac{n_1}{n_2}$$

Uno de los inconvenientes que presenta este transformador es el proporcionar en el secundario una tensión compuesta inferior a la que daría un transformador estrella-estrella del mismo número de espiras en el primario y secundario. El valor de la tensión entre fases V_{ab} puede deducirse a partir de las expresiones anteriores:



Transformador estrella-estrella: $V'_{ab} = \sqrt{3} \cdot e'_2$

Transformador estrella-zigzag: $V_{ab} = \sqrt{3} \cdot (\sqrt{3} \cdot e_1) = 3 \cdot \left(\frac{e'_2}{2} \right)$

Ya que $e'_2 = e_1 + e_4$ (en valor absoluto).

Dividiendo ambas expresiones, resultará:

$$\frac{V'_{ab}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} \cdot e'_2}{3 \cdot \frac{e'_2}{2}} = 1,154$$

. Por tanto: $V'_{ab} = 1,154 \cdot V_{ab}$

En donde:

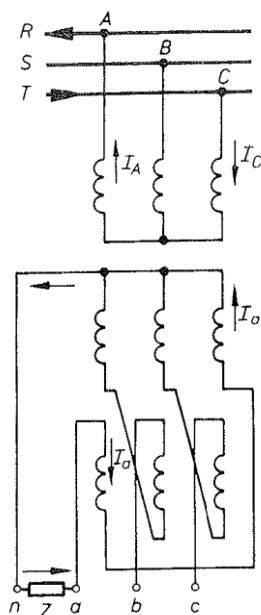
V'_{ab} = tensión compuesta en el transformador estrella-estrella.

V_{ab} = tensión compuesta en el transformador estrella-zigzag.

En definitiva, para obtener la misma tensión compuesta en el secundario será necesario proyectar el transformador estrella-zigzag con un 15,4% más de espiras que si fuera en estrella-estrella, y para el mismo número de espiras del primario en ambos.

Comparándolos con otros transformadores que suministran la misma tensión en bornes del secundario, éste necesitará de más espiras, dando lugar a un mayor coste.

Al producirse un desequilibrio de una fase del secundario I_a , se reparte entre las dos fases del primario, (I_A , I_C), contrarrestándose los flujos y evitándose el desequilibrio entre las ff. ee. mm. del primario y del secundario por esta causa.



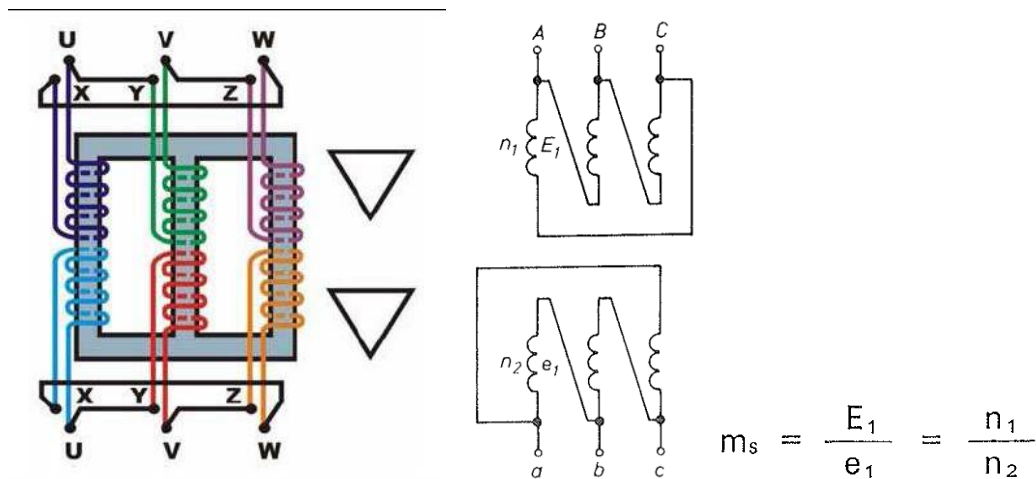
Al igual que en la conexión estrella, este tipo de transformador permite sacar el neutro, por lo que será de aplicación a las redes de distribución que suministren dos tensiones.

El inconveniente del coste del transformador limita sus aplicaciones para fuertes potencias, ya que puede sustituirse ventajosamente por el transformador triángulo-estrella.

8.5.4.- CONEXIÓN TRIÁNGULO-TRIÁNGULO.

En este tipo de transformador, tanto el primario como el secundario están conectados en triángulo.

La relación de transformación simple será:



La relación de transformación compuesta es:

$$m_c = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{E_1}{e_1} = m_s$$

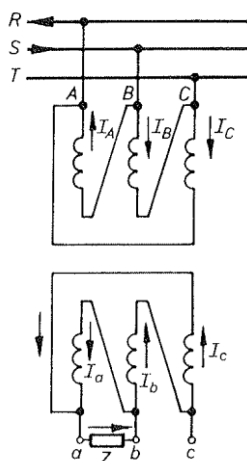
Al igual que en transformador estrella--estrella, se cumple que las relaciones de transformación simple y compuesta son iguales: $m_s = m_c$.

No dispone de salida de neutro, tanto en el primario como en el secundario, con la consiguiente limitación en su utilización.

Otro de los inconvenientes de la conexión en triángulo es que cada bobinado debe soportar la tensión de red (compuesta), con el consiguiente aumento del número de espiras.

Los desequilibrios motivados por las cargas en el secundario se reparten igualmente entre las fases del primario, evitando los desequilibrios de flujos magnéticos.

En el caso de conectar una impedancia Z , entre las fases a y b , hará circular por el secundario las corrientes I_a , I_b e I_c ($I_a > I_b$; $I_b = I_c$), contrarrestadas por las corrientes primarias I_A , I_B e I_C ($I_A > I_B$; $I_B = I_C$), repercutiendo en dos fases de la red R, S.



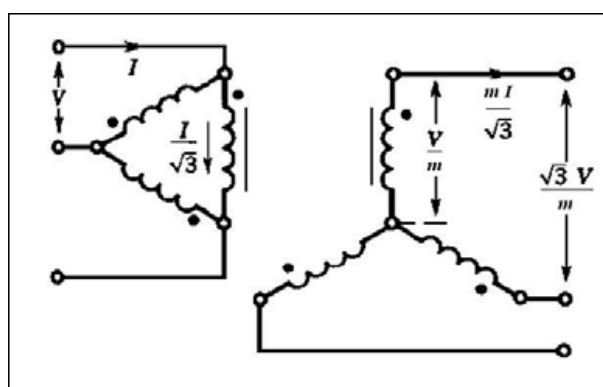
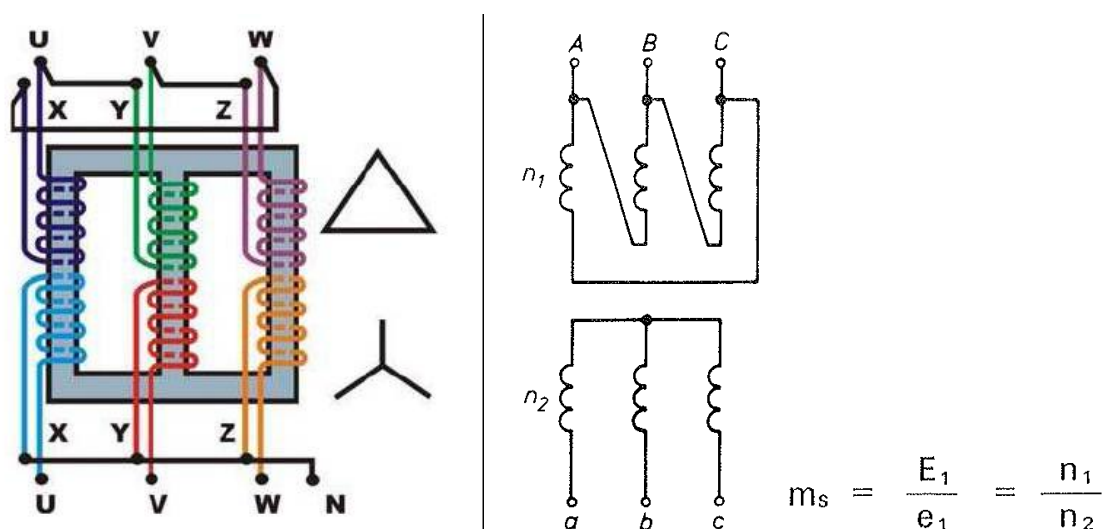
Cuando han de circular corrientes elevadas, por cada fase sólo circulará $\frac{I_L}{\sqrt{3}}$, lo que permitirá disminuir la sección de los conductores.

Cuando han de circular corrientes elevadas, por cada fase sólo circulará $\frac{I_L}{\sqrt{3}}$, lo que permitirá disminuir la sección de los conductores.

8.5.5.- CONEXIÓN TRIÁNGULO-ESTRELLA.

En la conexión triángulo-estrella, se conectan el primario en triángulo y el secundario en estrella.

La relación de transformación simple es:



La relación de transformación compuesta es:

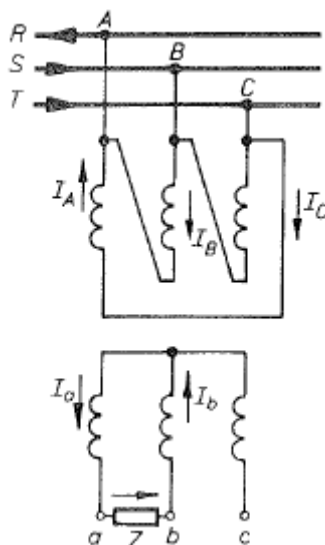
$$m_c = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{E_1}{\sqrt{3} \cdot e_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot m_s$$

De forma que la relación compuesta es $\frac{1}{\sqrt{3}}$ veces la simple:

$$m_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot m_s$$

Este tipo de transformador prácticamente no presenta inconvenientes, si bien su utilización ha de ser adecuada a las características generales que presenta la conexión en triángulo y en estrella. Este transformador es muy empleado como transformador elevador al principio de la línea y no al final, porque cada fase del devanado primario ha de soportar la tensión entre fases de red.

Al producirse un desequilibrio en la carga, no motiva asimetría del flujo, por producirse un reparto entre las tres columnas del primario. Así, como en el caso de una impedancia Z , conectada a las fases a y b , da lugar a las corrientes I_a e I_b en el secundario ($I_a = I_b$), las cuales a su vez motivarán las corrientes I_A , I_B e I_C ($I_A = I_B$; $I_C = 0$), que se transmiten a la red en las tres fases.



También presenta las ventajas del neutro en el secundario, aunque no es aconsejable conectar el neutro a tierra en las líneas de transporte.

Las ventajas citadas y los escasos inconvenientes motivan la utilización de este transformador tanto en transmisión como en distribución de energía.

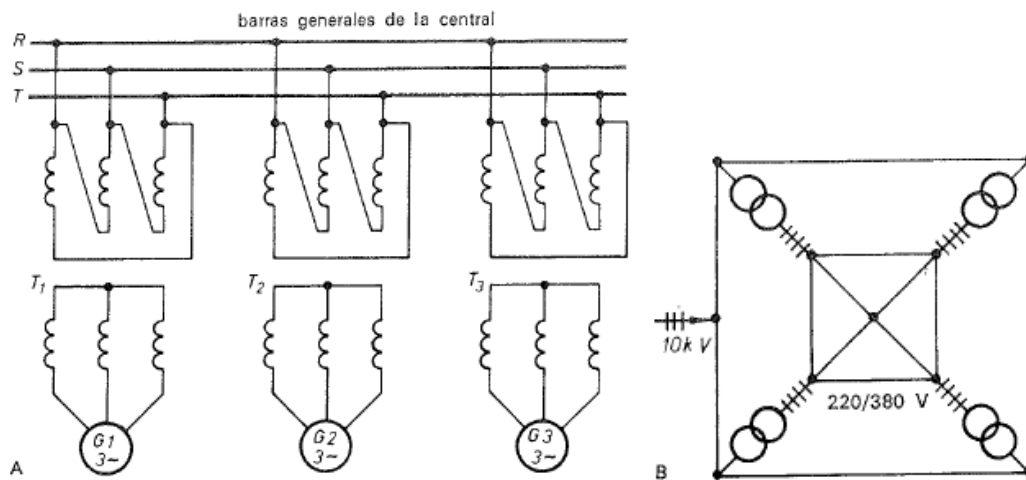
9.- ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES.

Las necesidades de acoplamiento en paralelo de varios transformadores surgen principalmente cuando un solo transformador no es capaz de suministrar la energía que consumen los receptores. En otras ocasiones, se pretende conseguir un óptimo rendimiento en la instalación, permitiendo su conexión o desconexión en función de la carga que debe suministrarse en cada momento.

Otro motivo que justifica el acoplamiento en paralelo de transformadores es la seguridad en el suministro de energía, ya que en caso de avería en uno de ellos, el resto de transformadores permitirá el funcionamiento total o parcial de la instalación.

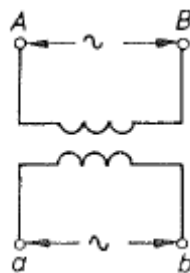
En general, el acoplamiento de transformadores de potencia se realiza en las barras generales de la central y en los centros de transformación.

Es necesario diferenciar entre el caso de que los transformadores estén próximos entre sí, como los conectados a las barras generales de la central, o que estén alejados, como sucede en los de principio y final de línea, o en distribución. En el primer caso, no influye la impedancia de la línea, pero sí que habrá de considerarse en el segundo.

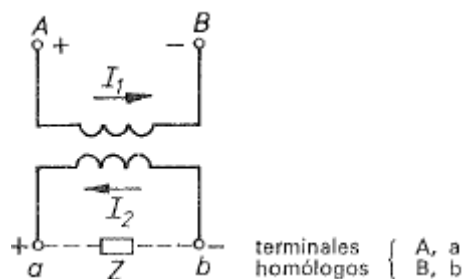


Las normas UNE, definen los terminales homólogos como terminales de alta tensión y terminales de baja tensión, asociados convencionalmente (y señalados), con objeto de poder definir el desfase entre las tensiones correspondientes.

Como los devanados primario y secundario están sometidos a tensiones alternas, habrá en cualquier instante un terminal de alta y uno de baja a mayor o menor potencial que los otros terminales, y se denominarán terminales homólogos. En el transformador de la Fig., pueden ser homólogos los bornes: (A, a) y (B, b), o bien (A, b) y (B, a).

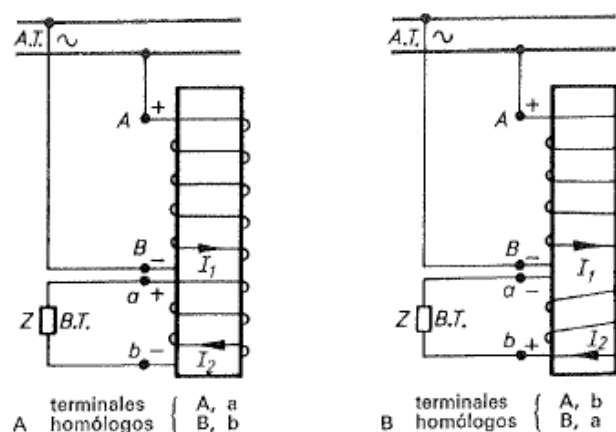


Para determinar los terminales homólogos de dos devanados pertenecientes al primario y secundario de un transformador, se da un sentido cualquiera a la corriente del secundario I_2 (que marcará la polaridad de los bornes a y b), motivando una corriente opuesta primaria I_1 , que a su vez, definirá la polaridad de los bornes A y B. Según el sentido dado a I_2 , serán terminales homólogos (A, a) y (B, b).

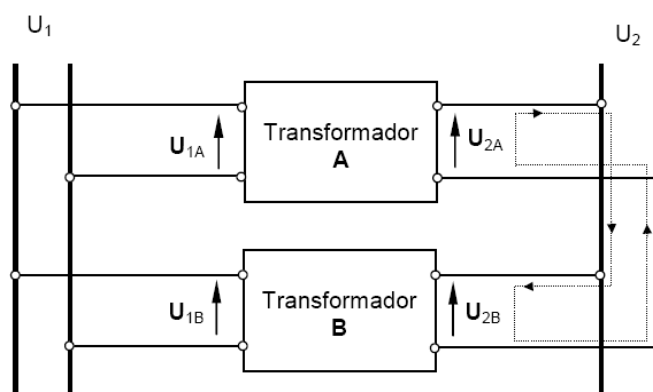


Como existen dos formas de realizar el bobinado sobre la columna (en el mismo sentido o en sentido contrario), habrá dos posibilidades:

- Bobinas de A.T. y b.t. enrolladas en el mismo sentido: terminales homólogos: (A, a) y (B, b).
- Bobinas de A.T. y b.t. enrolladas en sentido contrario: terminales homólogos: (A, b) y (B, a).



Si consideramos una red de suministro eléctrico con una tensión U_1 , que alimenta el primario de los transformadores, y otra red que alimentara una serie de cargas con una tensión U_2 , según se indica en el esquema de la figura.



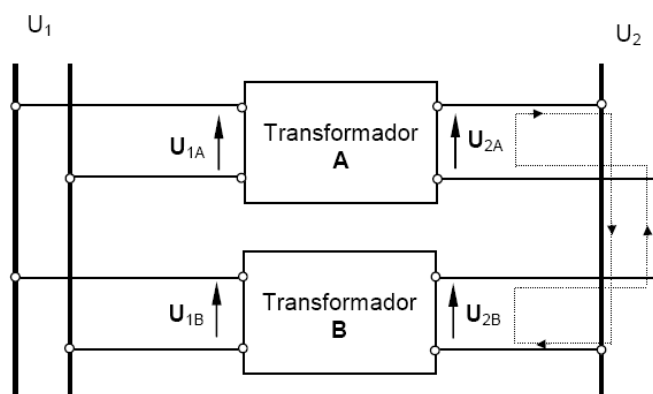
Paralelo de transformadores "conexión correcta"

En la situación de la figura los dos transformadores (**A** y **B**) están conectados en paralelo pero no suministran potencia a carga alguna. Por lo tanto si hacemos un recorrido cerrado como el indicado, la suma de las tensiones debe ser igual a cero.

Se pueden dar dos situaciones de acuerdo a la polaridad instantánea que tengamos en los secundarios de los transformadores.

De acuerdo a la polaridad indicada en la figura, al efectuar el recorrido indicado se cumple: $U_{2A} - U_{2B} = 0$

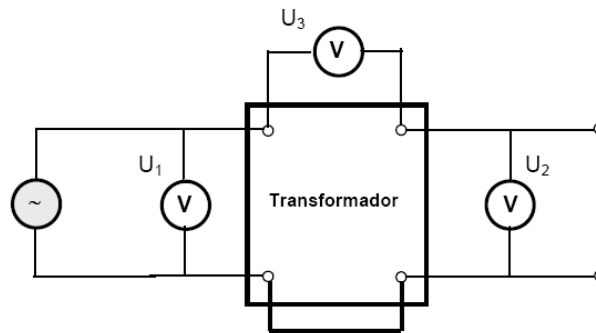
En el caso de tener la polaridad como se indica en la figura, la suma de las tensiones es distinta de cero, por lo cual se ha realizado un cortocircuito en el secundario de los transformadores; pudiendo dañarse: $U_{2A} + U_{2B} \neq 0$



Paralelo de transformadores "conexión incorrecta"

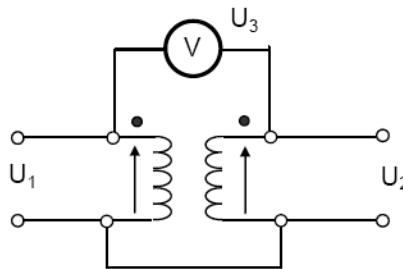
Por lo tanto, antes de efectuar la instalación debemos conocer los bornes con igual polaridad instantánea, o sea lo que se suele llamar “bornes homólogos”, para conectar los mismos entre si.

Los transformadores traen indicados dichos bornes mediante una letra, pero en el caso de tener que individualizarlos se puede recurrir al siguiente método, mediante el uso de 3 voltímetros, uno que mide la tensión del primario, otro la tensión del secundario y un tercero que mide la tensión entre dos bornes uno del primario y otro del secundario, cortocircuitando los otros dos según se muestra en la figura.



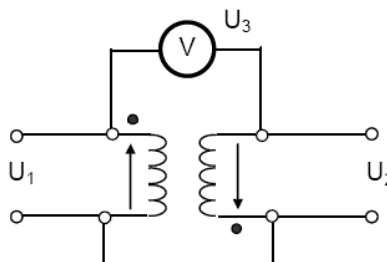
Esquema para determinar la polaridad de un transformador

Si $U_3 = U_1 - U_2$ los bornes marcados con un punto son homólogos.



Voltímetro conectado en bornes de igual polaridad instantánea.

Si $U_3 = U_1 + U_2$ los bornes marcados con un punto son homólogos.



Voltímetro conectado en bornes de distinta polaridad instantánea.

9.1.- ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

El acoplamiento en paralelo de transformadores monofásicos impone unas condiciones a éstos y a las líneas que han de conectarse para que puedan realizarse correctamente:

1º Relaciones de transformación en vacío iguales.

2º Tensiones de cortocircuito prácticamente iguales.

3º Terminales homólogos conectados al mismo conductor, tanto en el lado de A.T. como en el de b.t.

4º Igualdad de frecuencia en las redes que han de conectarse, si bien esta condición es ajena al transformador.

5º No acoplar transformadores de potencias nominales muy diferentes.

Estas condiciones se utilizan en transformadores que van a acoplarse próximos entre sí.

9.1.1.- IGUALDAD EN LAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN.

Al conectar los devanados primarios de dos o más transformadores a la red primaria de tensión V_1 , se inducirán ff. ee. mm. e_1 y e'_1 y, al conectar los terminales homólogos del secundario, estarán funcionando en vacío, suministrando la tensión V_2 . Si las ff. ee. mm. del secundario e_1 y e'_1 son diferentes, por ejemplo $e_1 > e'_1$, aparece una corriente de circulación i_0 , a pesar de estar funcionando en vacío los transformadores; su valor es:

$$\vec{i}_0 = \frac{\vec{e}_1 - \vec{e}'_1}{Z_1 + Z'_1}$$

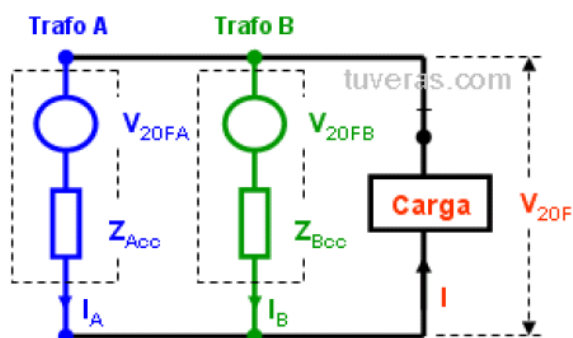
En donde: Z_1 = impedancia del transformador 1.

Z_2 = impedancia del transformador 2.

La existencia de una corriente de circulación en vacío i_0 , por los secundarios, motivará la aparición de otra corriente en los primarios, con el consiguiente aumento de las pérdidas. Para evitar corrientes de circulación, es suficiente con que las ff. ee. mm. inducidas en los secundarios sean iguales $e_1 = e'_1$, ya que entonces se anula el numerador.

Para conseguir un funcionamiento correcto en paralelo, es necesario que ambos tengan la misma relación de transformación.

Si conectamos una carga, cada uno suministra una corriente diferente, por aparecer la corriente de circulación i_0 que se supondrá a la carga.



9.1.2.- IGUALDAD EN LAS TENSIONES DE CORTOCIRCUITO.

En el acoplamiento de transformadores en paralelo, los primarios están conectados a una tensión común V_1 y los secundarios a una tensión común V_2 , en todos los transformadores se producirá la misma caída de tensión. La impedancia de un transformador puede representarse por una resistencia R_{cc} , en serie con una reactancia X_{cc} , el acoplamiento en paralelo de dos o más transformadores puede estudiarse como un circuito eléctrico, con impedancias en paralelo.

Suponiendo que las impedancias de cortocircuito de dos transformadores sean Z_{cc1} y Z_{cc3} , al circular las corrientes I_1 e I_3 , se cumplirá que:

$$Z_{cc(1)} \cdot I_1 = Z_{cc(3)} \cdot I_3$$

Multiplicando y dividiendo estas expresiones por las corrientes nominales y dividiendo ambas por la tensión de red V_1 , no variarán y se convertirán en las siguientes:

$$\frac{Z_{cc(1)} \cdot I_{1n}}{V_1} \cdot \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{Z_{cc(3)} \cdot I_{3n}}{V_1} \cdot \frac{I_3}{I_{3n}}$$

El primer término de las dos expresiones representa la tensión de cortocircuito, para lo cual es necesario multiplicar ambas por 100:

$$u_{cc(1)} = \frac{Z_{cc(1)} \cdot I_{1n}}{V_1} \cdot 100$$

$$u_{cc(3)} = \frac{Z_{cc(3)} \cdot I_{3n}}{V_1} \cdot 100$$

A su vez, el segundo término representa el índice de carga K , expresado en tanto por uno:

$$K_1 = \frac{I_1}{I_{1n}}; \quad K_3 = \frac{I_3}{I_{3n}}$$

Al sustituir los nuevos términos, quedará:

$$u_{cc(1)} \cdot K_1 = u_{cc(3)} \cdot K_3, \text{ o bien: } \frac{u_{cc(1)}}{u_{cc(3)}} = \frac{K_3}{K_1}$$

Según esta expresión, puede afirmarse:

a) En el caso de que los índices de carga sean iguales, también lo serán las tensiones de cortocircuito, por producirse la misma caída de tensión en todos los transformadores.

b) Las tensiones de cortocircuito son inversamente proporcionales a los índices de carga de los transformadores acoplados, repercutiendo en un exceso de carga para el que tenga menor u_{cc} , y viceversa.

c) Si las tensiones de cortocircuito son iguales también lo serán sus índices de carga y se conseguirá un reparto de cargas proporcional a las potencias nominales de cada transformador, que es lo ideal.

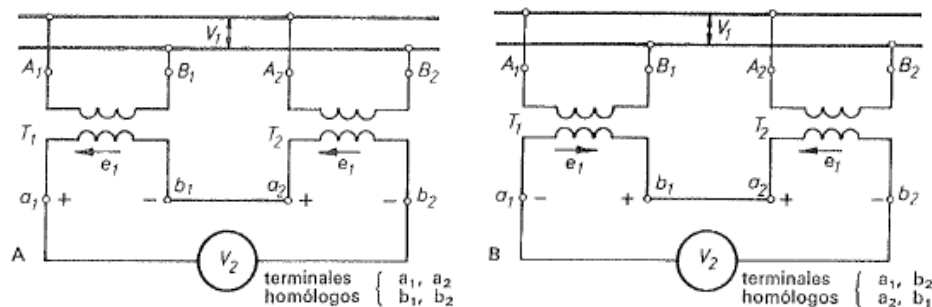
9.1.3 CONEXIÓN CORRECTA DE TERMINALES HOMÓLOGOS.

En el acoplamiento en paralelo de varios transformadores, es necesario que los terminales homólogos del devanado de A.T. estén conectados al mismo conductor; lo mismo se exige a los terminales homólogos del lado de b.t.

Aunque en la tapa del transformador están marcados los bornes correspondientes, no deben confundirse con los terminales homólogos, ya que no siempre coinciden; por tanto, será conveniente determinar prácticamente cuáles son los terminales que van a conectarse al mismo conductor (terminales homólogos).

Ensayo para la determinación de terminales homólogos en el acoplamiento de transformadores monofásicos: Si se van a acoplar en paralelo los transformadores T_1 y T_2 de igual relación de transformación. Se unen directamente los terminales

secundarios b_1 y a_2 , mientras que el a_1 se une, a través de un voltímetro V_2 , con b_2 . La lectura del voltímetro permitirá averiguar cuáles son los terminales homólogos del secundario, que deberán conectarse al mismo conductor:



a) El voltímetro indica aproximadamente el doble de la f.e.m. inducida en el secundario de cada transformador $V_2 \approx 2 \cdot e_1$, por haberse conectado en serie ambos devanados; y, según la polaridad fijada en ese instante, son terminales homólogos los a_1 , a_2 y b_1 , b_2 .

b) El voltímetro indica aproximadamente un valor nulo $V_2 \approx 0$; por haberse conectado en paralelo ambos devanados; son terminales homólogos los a_1 , b_2 y a_2 , b_1 .

En el ensayo realizado, no se han tenido en cuenta los terminales homólogos del primario; al no ser obstáculo para realizar el acoplamiento.

9.1.4.- RELACIÓN DE POTENCIAS EN LOS TRANSFORMADORES ACOPLADOS EN PARALELO.

Si los transformadores que han de acoplarse en paralelo tienen igual relación de transformación y tensión de cortocircuito, el reparto se hará proporcionalmente a la potencia nominal de cada uno, si bien es necesario indicar que la tensión de cortocircuito de un transformador aumenta con su potencia.

Si los transformadores a acoplar tienen diferentes tensiones de cortocircuito, interesa que el de mayor potencia sea el de menor tensión de cortocircuito, y viceversa, puesto que la caída de tensión es la misma.

$$\Delta V = Z_{cc(1)} \cdot I_1 = Z_{cc(2)} \cdot I_2$$

Para conseguir esta igualdad, sería necesario añadir una reactancia en serie con el devanado secundario del transformador de menor u_{cc} , si bien este procedimiento complica y encarece la instalación.

9.2.- ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

Las condiciones del acoplamiento de transformadores trifásicos son las siguientes:

1º Todas las expuestas para los transformadores monofásicos.

2º Que los desfases de las tensiones secundarias respecto a las tensiones del primario sean iguales en los transformadores por acoplar en paralelo. Si los desfases son diferentes, no se pueden acoplar.

3º Que el sentido de rotación de los vectores que representan a las tensiones secundarias sea el mismo en todos los transformadores que han de acoplarse. Caso de

variar el sentido de rotación de algún transformador, no podrá realizarse el acoplamiento.

9.2.1.- DESFASES DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

Las diferencias entre las fases de las tensiones existentes entre terminales del secundario respecto a las tensiones aplicadas al primario, depende del tipo de conexión en los devanados primario y secundario (estrella, triángulo, zigzag); y de la posición de salida de los terminales.

Para realizar el estudio de los desfases, se parte de las siguientes reglas:

1º Se supone siempre que los devanados primario y secundario están enrollados en las columnas del transformador en el mismo sentido. Si en algún caso hay devanados enrollados en sentido contrario, servirá el supuesto anterior, siempre que se inviertan los extremos del citado devanado.

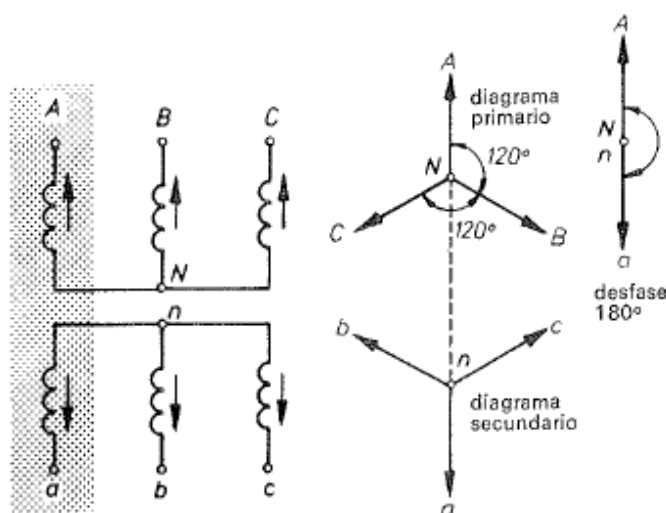
2º Como en cada columna el devanado primario y secundario están sometidos al flujo común, las ff. ee. mm. existentes entre los terminales estarán en fase si son homólogos y en oposición si no lo son.

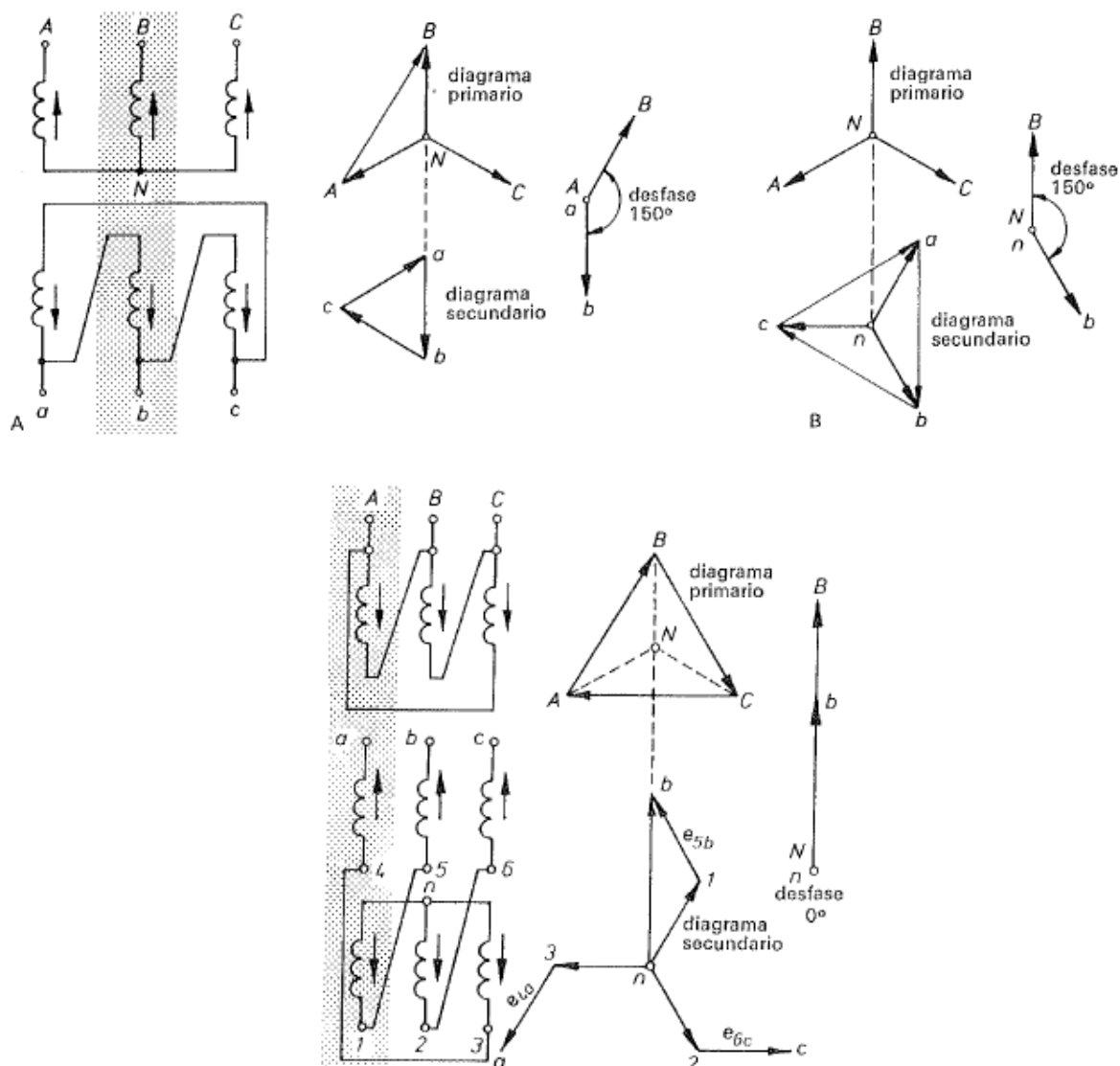
Si, al recorrer los devanados primario y secundario de la misma columna partiendo del neutro o de un terminal extremo, se asciende o desciende en ambas, sus ff. ee. mm. están en fase. Si, en el recorrido, se asciende por un devanado y se desciende en otro, estarán en oposición.

3º Una vez determinada la coincidencia o la oposición de fases de las ff. ee. mm. del primario y secundario por columna, se representará el diagrama vectorial completo tanto para el primario como para el secundario. El desfase existente entre las tensiones primarias y secundarias lo dará el ángulo formado por un vector primario y un vector secundario, designados por las mismas letras (mayúsculas en el primario y minúsculas en el secundario).

4º El orden de sucesión de fases para el primario será siempre el mismo, A-B-C, y le corresponderá al secundario a-b-c.

5º Los desfases comprendidos entre 0 y 180 ° corresponden a tensiones secundarias retrasadas sobre las primarias; y los comprendidos entre 180° y 330°, a tensiones secundarias en adelanto.





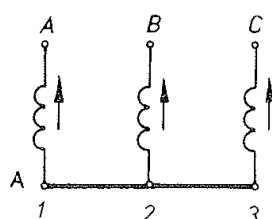
9.2.2.- CONEXIONES POSIBLES EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

Tanto el devanado primario como el secundario pueden ser conectados en estrella, triángulo y zigzag; pero a su vez, estas conexiones pueden realizarse de diversas formas, por lo que motivarán distintos desfases. En todos los tipos, se sigue el orden de terminales: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$.

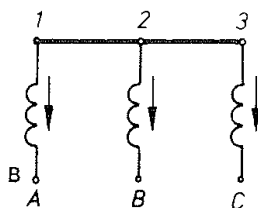
9.2.2.1.- FORMAS DE CONEXIÓN EN ESTRELLA.

Da lugar a dos tipos de conexión:

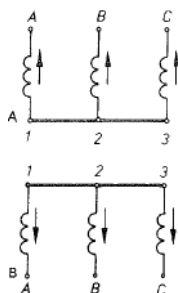
a) Conexión de la estrella en la parte inferior y, por tanto, terminales de salida superiores.



b) Conexión de la estrella en la parte superior y, por tanto, terminales de salida inferiores.



En los diagramas los sentidos de las ff. ee. mm. al recorrer la columna de neutro a terminales son opuestos.



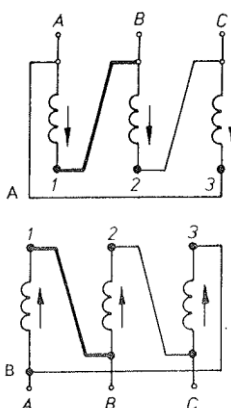
9.2.2.2.- FORMAS DE CONEXIÓN EN TRIÁNGULO.

Da lugar a cuatro tipos de conexión:

a) Conexión del final del primer devanado con el principio del siguiente, lo que a su vez da lugar a dos formas, según que la salida de terminales se haga por la parte superior o bien por la parte inferior.

b) Conexión del principio del primer devanado con el final del siguiente, dando lugar también a dos formas, según se haga la salida de terminales.

Al recorrer el triángulo en el sentido $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$, se comprueba que son opuestas las ff. ee. mm. inducidas en los devanados de las mismas columnas, según se utilicen las formas de conexión.

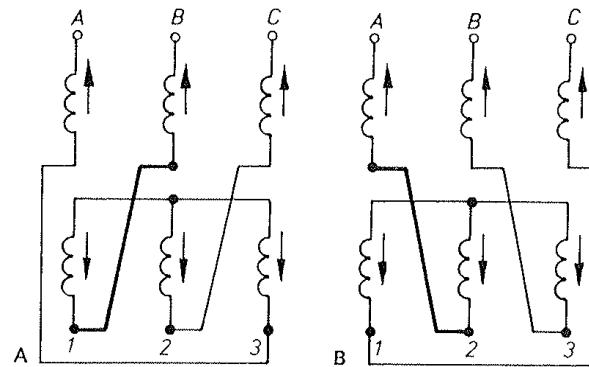


9.2.2.3.- FORMAS DE CONEXIÓN ZIGZAG.

Da lugar a cuatro tipos de conexión:

a) Conexión del final de un devanado inferior con el final del siguiente devanado superior, lo que a su vez da lugar a dos formas, según que la estrella se forme en la parte superior de los tres devanados superiores o bien formando la estrella en la parte superior de los tres devanados inferiores.

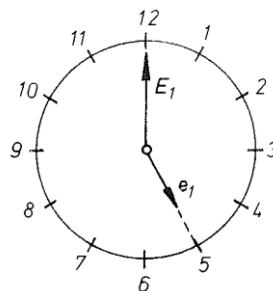
b) Conexión del final del devanado superior con el final del siguiente devanado inferior, dando lugar a dos formas, según que la estrella se forme en los dos devanados inferiores o en los superiores.



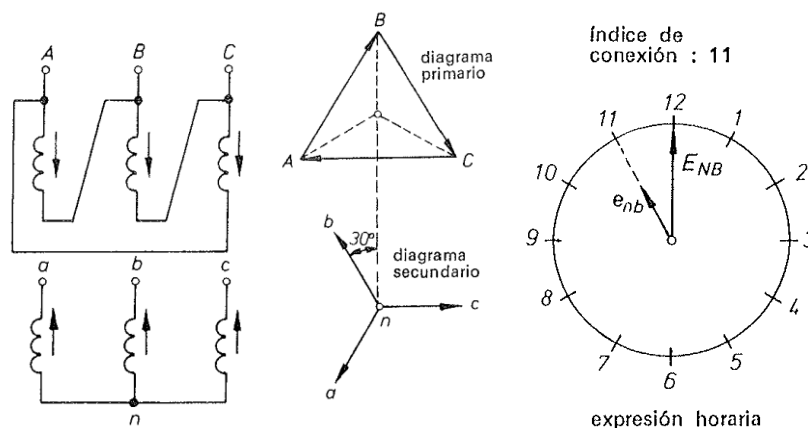
9.3.- INDICE DE CONEXIÓN EN LA EXPRESIÓN HORARIA. SÍMBOLO DE GRUPO.

Los desfases existentes entre las tensiones primarias y secundarias son siempre cero o múltiplo de 30° ; con el objeto de simplificar al máximo, se recurre a una designación especial, denominada expresión horaria.

Teniendo en cuenta que la esfera de un reloj está dividida en 12 partes, cada parte equivale a un ángulo de 30° , y el desfase podrá indicarse por el ángulo que forma la aguja minutera con la aguja horaria al marcar horas exactas. La aguja minutera (que representa a la f.e.m. primaria E_1) se sitúa siempre en las 12 horas, y la aguja horaria (que representa a la f.e.m. secundaria e_2) indicará el desfase.



El número que representa la hora exacta se denomina índice de conexión o índice horario.



9.3.1.- GRUPOS DE CONEXIÓN.

La norma V.D.E. resume las conexiones de transformadores en 12, distribuidas en cuatro grupos. Los grupos se designan por las letras mayúsculas A, B, C, y D; y, a su vez, cada uno de se subdivide en tres tipos A₁-A₂-A₃; B₁-B₂-B₃; C₁-C₂-C₃; D₁-D₂-D₃.

GRUPO A: Da lugar a un desfase cero entre las tensiones del primario y secundario, y puede conseguirse utilizando las siguientes conexiones:

Subgrupo A₁, formado por dos devanados en triángulo conectados de igual forma para el primario y secundario.

Subgrupo A₂, formado por dos devanados en estrella conectados de igual forma para el primario y secundario.

Subgrupo A₃, formado por un devanado en triángulo para el primario y un devanado en zigzag para el secundario, siempre que den lugar a un desfase cero.

Tabla 5.46 Grupos de conexión V.D.E. de transformadores trifásicos

Índice de Conexión	Grupo de conexión V.D.E.	Grupo de conexión C.E.I.	Diagrama vectorial		Esquema de conexiones		Relación de transformación V_{UY}/V_{UV}
			Alta tensión	Baja tensión	Alta tensión	Baja tensión	
0	A1	Dd0					$\frac{n_1}{n_2}$
	A2	Yy0					$\frac{n_1}{n_2}$
	A3	Dz0					$\frac{2}{3} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
6	B1	Dd6					$\frac{n_1}{n_2}$
	B2	Yy6					$\frac{n_1}{n_2}$
	B3	Dz6					$\frac{2}{3} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
5	C1	Dy5					$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
	C2	Yd5					$\sqrt{3} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
	C3	Yz5					$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
11	D1	Dy11					$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
	D2	Yd11					$\sqrt{3} \cdot \frac{n_1}{n_2}$
	D3	Yz11					$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_1}{n_2}$

GRUPO B: Da lugar a un desfase de 180° entre las tensiones del primario y secundario, o bien un índice de conexión 6, y puede conseguirse utilizando las siguientes conexiones:

Subgrupo B₁, formado por dos devanados en triángulo invertidos, que representan el primario y secundario respectivamente.

Subgrupo B₂, formado por dos devanados en estrella invertidos. Uno representa el primario y el otro el secundario.

Subgrupo B₃, formado por un devanado en triángulo para el primario y un devanado en zigzag para el secundario, de forma que den un índice 6, pudiendo utilizarse la conexión zigzag del subgrupo A₃ invertida.

GRUPO C: Da lugar a un desfase de 150° en retraso de las tensiones secundarias con respecto a las primarias, o bien un índice de conexión 5, y puede conseguirse utilizando las siguientes conexiones:

Subgrupo C₁, formado por un devanado primario en triángulo y un devanado secundario en estrella, dando lugar a un desfase de 150° .

Subgrupo C₂, formado por un devanado primario en estrella y un devanado secundario en triángulo.

Subgrupo C₃, formado por un devanado primario en estrella y un devanado secundario en zigzag, conectados de forma que den lugar a un índice 5.

GRUPO D: Da lugar a un desfase de 330° o de 30° en adelanto de las tensiones secundarias con respecto a las primarias, siendo 11 el índice de conexión 5, y puede conseguirse utilizando las siguientes conexiones:

Subgrupo D₁, formado por un devanado primario en triángulo y un devanado secundario en estrella.

Subgrupo D₂, formado por un devanado primario en estrella y un devanado secundario en triángulo, que dé lugar a un índice 11.

Subgrupo D₃, formado por un devanado primario en estrella y un devanado secundario en zigzag, conectados de forma que den lugar a un índice 11.

Se puede comprobar que los secundarios de los transformadores del grupo B son los de los subgrupos A invertidos. Igual sucede con los del D, que resultan de invertir los secundarios del C.

9.3.2.- GRUPOS DE CONEXIÓN C.E.I. Y UNE.

La nomenclatura utilizada por C.E.I. es diferente a la V.D.E; así, los grupos se designan por el tipo de conexión, representando por D (triángulo), Y (estrella) y Z (zigzag), para la tensión mayor; y las mismas letras minúsculas d, y, z, para la tensión inferior. A continuación de las letras, se indica el número que corresponde al índice de conexión. Yz5 = transformador trifásico con el primario en estrella, secundario en zigzag, con desfase $5 \times 30^\circ = 150^\circ$.

La designación de terminales, según la C.E.I., es I, II, III, para tensiones mayores; mientras que para las tensiones inferiores, son: i, ii, iii.

La notación horaria según normas UNE da lugar a cuatro grupos:

Grupo I: índices horarios 0-4-8.

Grupo II: índices horarios 2-6-10.

Grupo III: índices horarios 1-5.

Grupo IV: índices horarios 7-11.

Tabla 5.47 Grupos de conexión C.E.I. de transformadores trifásicos

Índice de conexión	Diagramas vectoriales y esquemas de conexión			
0				
1				
2				
4				
5				
6				
7				
8				
10				
11				

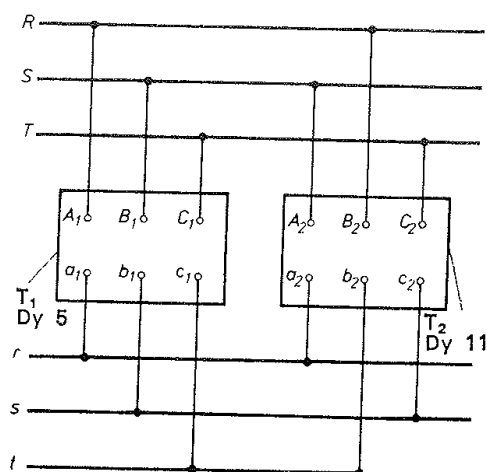
9.4.- POSIBILIDAD DE ACOPLAMIENTO EN PARALELO.

Una de las condiciones que se imponían en los transformadores trifásicos que habían de acoplarse en paralelo era que tuviesen el mismo desfase. Solamente podrá acoplarse en paralelo los transformadores que pertenezcan al mismo grupo, o bien a grupos desfasados 180° en uno de los cuales se realice una permutación, según se indica:

a) Un transformador del grupo A puede acoplarse en paralelo con otro del grupo B invirtiendo las conexiones de los extremos de los devanados primarios o de los secundarios de uno de ellos.

b) Un transformador del grupo C puede acoplarse en paralelo con otro del grupo D, permutando, en uno de ellos, la conexión a red de dos terminales del primario y la de otros dos de la red secundaria que no pertenezcan a las mismas columnas.

No podrán acoplarse en paralelo dos transformadores cuando uno de ellos sea de los grupos A o B y el otro sea de los grupos C o D.



9.5.- ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE TERMINALES HOMÓLOGOS EN EL ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

Una vez que el transformador que va a acoplarse en paralelo cumpla con las condiciones citadas, es necesario comprobar cuáles son los terminales homólogos, por medio de un ensayo, para así conectarse a la red secundaria correctamente.

Supóngase que se va a acoplar el transformador T₂ con el T₁. Se unirán los terminales del primario del T₂ a la red primaria, en cualquier orden, y posteriormente se une un terminal cualquiera c₂ del transformador T₂ con uno c₁ del T₁.

Se conecta un voltímetro V₂ entre un terminal libre cualquiera (a₂ o b₂) con otro (a₁ o b₁) del T₁, pudiendo obtener cuatro lecturas:

1º lectura: V₂ entre a₂-a₁.

2º lectura: V₂ entre a₂-b₁.

3º lectura: V₂ entre b₂-a₁.

4º lectura: V₂ entre b₂-b₁.

(C₂ permanece unido a c₁).

Si de las cuatro lecturas hay dos iguales a cero, por ejemplo la 1º y la 4º, serán terminales homólogos los que coincidan con la lectura del voltímetro.

Si no se han obtenido dos lecturas de tensiones nulas, se cambia la conexión del terminal c_2 , uniéndose ahora con el a_1 ; y se vuelven a repetirse las lecturas del voltímetro entre los terminales siguientes:

5º lectura: V_2 entre a_2 - b_1 .

6º lectura: V_2 entre a_2 - c_1 .

7º lectura: V_2 entre b_2 - b_1 .

8º lectura: V_2 entre b_2 - c_1 .

(C_2 permanece unido a a_1).

Caso de no aparecer dos medidas nulas de tensión, se procede al cambio de conexión del terminal c_2 , uniéndose ahora con el b_1 ; y se repiten las cuatro lecturas:

9º lectura: V_2 entre a_2 - a_1 .

10º lectura: V_2 entre a_2 - c_1 .

11º lectura: V_2 entre b_2 - a_1 .

12º lectura: V_2 entre b_2 - c_1 .

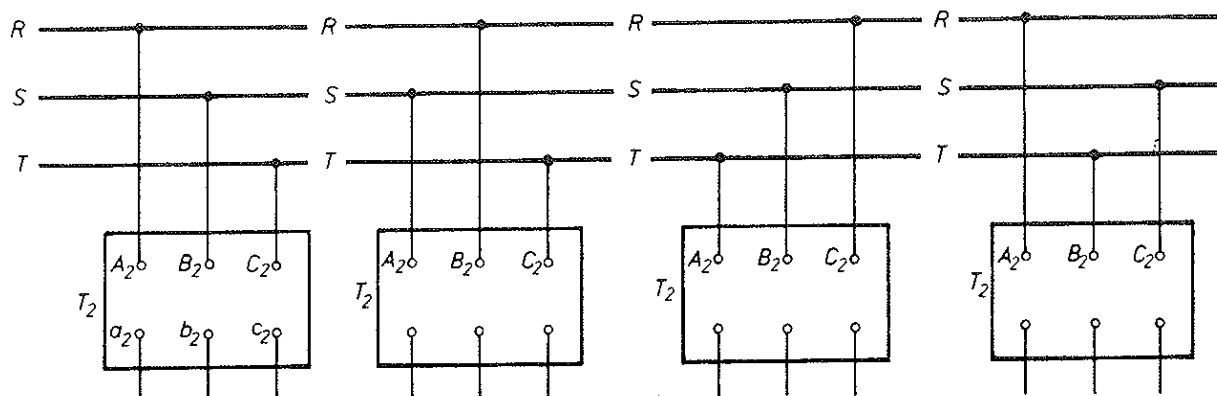
(C_2 permanece unido a b_1).

Si no se han conseguido dos lecturas nulas en las 12 medidas, se procede al cambio de conexión en dos terminales del primario de T_2 y se repiten las mediciones. Como en el primario se realizan cuatro cambios de conexiones entre fases, se obtienen en total 48 mediciones posibles, en el caso más desfavorable.

Una vez localizados los terminales que corresponden a lecturas nulas de tensión, se unen entre sí para realizar el acoplamiento.

Caso de que no se hayan conseguido dos lecturas nulas, entre las 48 posibles, se puede afirmar que no se puede realizar el acoplamiento entre los dos transformadores por incompatibilidad en sus conexiones.

Como medida de precaución se debe elegir un voltímetro cuyo fondo de escala pueda leer el doble de la tensión de red del secundario ya que alguna conexión podría dar esta lectura.



INDICE DE DESFAJAJE	SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA FASORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACION
		ALTA TENSION	BAJA TENSION		
0 (0°)	Dd0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	Dy5				$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
	Yd5				$\sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
	Yz5				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

ÍNDICE DE DESFASAJE	SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA FASORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACION
		ALTA TENSION	BAJA TENSION		
6 (180°)	Dd6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz6				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
11 (330°) (-30°)	Dy11				$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
	Yd11				$\sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
	Yz11				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

- Manejo y análisis de catálogos, placas de características y documentación técnica de las distintas máquinas eléctricas, donde se identifiquen sus principales características y esquemas de conexionado, arranque y regulación, diferenciando los elementos de protección, maniobra, control y regulación.

10.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES.

Por lo general, todos los transformadores trifásicos reúnen una serie de características comunes independientemente del tipo de transformador que sea. Las características más importantes en este aspecto son:

- **Tensión primaria:** es la tensión a la cual se debe alimentar el transformador, dicho en otras palabras, la tensión nominal de su bobinado primario. En algunos transformadores hay más de un bobinado primario, existiendo en consecuencia, más de una tensión primaria.

- **Tensión máxima de servicio:** es la máxima tensión a la que puede funcionar el transformador de manera permanente.

- **Tensión secundaria:** si la tensión primaria es la tensión nominal del bobinado primario del transformador, la tensión secundaria es la tensión nominal del bobinado secundario. Este parámetro debe ser un valor de baja tensión, normalmente 400 V entre fases.

- **Potencia nominal:** es la potencia aparente máxima que puede suministrar el bobinado secundario del transformador. Este valor se mide en kilovoltioamperios (KVA), siendo las más usuales de 50, 100, 160, 250, 400, 630 y 1 000 KVA.

- **Relación de transformación:** es el resultado de dividir la tensión nominal primaria entre la secundaria.

- **Intensidad nominal primaria:** es la intensidad que circula por el bobinado primario, cuando se está suministrando la potencia nominal del transformador. Dicho en otras palabras, es la intensidad máxima a la que puede trabajar el bobinado primario del transformador.

- **Intensidad nominal secundaria:** al igual que ocurría con la intensidad primaria, este parámetro hace referencia a la intensidad que circula por el bobinado secundario cuando el transformador está suministrando la potencia nominal.

- **Tensión de cortocircuito:** hace referencia a la tensión que habría que aplicar en el bobinado primario para que, estando el bobinado secundario cortocircuitado, circule por éste la intensidad secundaria nominal. Se expresa en porcentaje.

La tensión de cortocircuito U_{cc} es, pues, $U_{cc} = I_n Z_{cc}$, siendo I_n la intensidad nominal o asignada del transformador correspondiente al arrollamiento alimentado por la tensión U_{cc} y Z_{cc} la impedancia interna del transformador, referida al arrollamiento alimentado por la tensión U_{cc} .

Por tanto, la tensión de cortocircuito U_{cc} depende por una parte de la intensidad nominal que se ha asignado a aquel transformador, y por otra parte, de la impedancia interna del transformador compuesta de la resistencia óhmica R_{cc} de sus arrollamientos y de la reactancia X_{cc} debida a los flujos magnéticos de dispersión de los arrollamientos primario y secundario.

$$\text{Por tanto, } Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}.$$

Ahora bien, en los transformadores de potencia, X_{cc} es sensiblemente mayor que R_{cc} , de tal manera que a fin de simplificar los cálculos se acostumbra a prescindir de R_{cc} y considerar $Z_{cc} \approx X_{cc}$.

La reactancia X_{cc} depende básicamente de la separación entre los arrollamientos primario y secundario en el transformador. Aumenta al aumentar esta separación pues aumenta la cantidad de flujo de dispersión.

La impedancia Z_{cc} es pues un parámetro constructivo; para variarlo habría que modificar el transformador. Es pues independiente del valor de la intensidad nominal que se haya asignado a aquel transformador. Si se varía su potencia nominal, variará su tensión de cortocircuito U_{cc} en la misma proporción.

La tensión de cortocircuito es un dato que figura preceptivamente en la placa de características del transformador y se expresa en tanto por ciento de la tensión nominal U_n del arrollamiento alimentado por la U_{cc} , o sea: $U_{cc}\% = U_{cc}/U_n$

Este valor $U_{cc}\%$ es independiente de cual sea el arrollamiento cerrado en cortocircuito, y cual el alimentado por U_{cc} . Los valores de U_{cc} , I_n y U_n serán diferentes pero el de $U_{cc}\%$ será el mismo.

En caso de producirse un cortocircuito en los bornes secundarios del transformador estando su primario alimentado a su tensión nominal U_n , la corriente de cortocircuito que se producirá, estará solamente limitada por la impedancia interna Z_{cc} del transformador, por tanto: $I_{cc} = U_n / Z_{cc}$.

Ahora bien, según se ha definido antes, $Z_{cc} = U_{cc} / I_n$. Resulta pues $I_{cc} = I_n U_n / U_{cc}$

La corriente de cortocircuito I_{cc} será tantas veces mayor que la corriente nominal I_n como la relación entre U_n y U_{cc} .

Expresando U_{cc} en tanto por ciento de U_n , se tiene $I_{cc} = I_n \times 100 / U_{cc}$, fórmula que permite calcular directamente la corriente de cortocircuito I_{cc} en función de $U_{cc}\%$. Por ejemplo, si $U_{cc}\%$ vale 4%, $I_{cc} = 25 I_n$.

Se observa que cuanto mayor es $U_{cc}\%$ menor será la corriente de cortocircuito I_{cc} en relación a la nominal I_n .

En este aspecto es pues deseable una tensión de cortocircuito elevada, a fin de reducir la corriente de cortocircuito y sus peligrosos efectos térmicos y dinámicos.

Ahora bien, hay que tener en cuenta que la impedancia Z_{cc} es también causa de la caída de la tensión interna ΔU en el transformador.

En efecto, ΔU , a la intensidad nominal I_n , vale: $\Delta U = R_{cc} I_n \cos \varphi + X_{cc} I_n \sin \varphi$.

Si, según lo antes indicado, se prescinde de R_{cc} , la fórmula queda simplificada a: $\Delta U = X_{cc} I_n \sin \varphi$.

Además, como ahora $X_{cc} \gg Z_{cc}$, resulta $I_n X_{cc} = U_{cc}$, y, por tanto, $\Delta U\% = U_{cc}\% \sin \varphi$.

Se consideran aquí tensiones y corrientes senoidales por lo cual el $\cos \varphi$ es la expresión del factor de potencia de los receptores alimentados por el transformador.

La caída de tensión en el transformador depende pues, por una parte de su tensión de cortocircuito, y por la otra de la naturaleza de la carga (receptores).

Los transformadores de distribución se construyen habitualmente con una tensión secundaria en vacío un 5% superior a la tensión nominal de servicio, a fin de tener un margen para la inevitable caída de tensión.

Los transformadores de distribución acostumbran estar equipados con un conmutador o cambiador de la tensión primaria (MT), para poder ajustarla a la tensión real de alimentación en aquel punto de la red.

Estos conmutadores son para maniobrarlos sin tensión, tanto en MT como en BT, y acostumbran a ser de 5 posiciones: la nominal más 4 posiciones con una variación máxima del 10% entre la de mínima y la de máxima tensión. Resultan pues, escalones del 2,5%. Ejemplos $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$, o bien: $\pm 2,5\%$, $+5\%$, $+7,5\%$, o también $+2,5\%$, $+5\%$, $+7,5\%$, $+10\%$, etc.

En la actualidad, los tipos constructivos de los transformadores de distribución para CT son:

- **Transformador con aislamiento de aceite:** Es el tipo más común de transformador. El aislamiento de las bobinas y la refrigeración se realiza mediante un aceite especial aislante. Dentro de este tipo a su vez se puede distinguir entre transformadores con depósito de expansión y transformadores de tipo llenado integral.



Transformador hermético de llenado integral.



El más utilizado actualmente es el denominado «hermético», o de «llenado integral», es decir, sin depósito conservador. En ellos, la dilatación del aceite por incremento de la temperatura, es compensada por la deformación elástica de las aletas de refrigeración de la cuba. Respecto al tipo anterior con depósito de expansión presentan las siguientes ventajas:

- Ausencia de contacto del aceite con el aire ambiente, con lo cual se evita que el aceite se humedezca, y que se acidifique por el oxígeno del aire. En consecuencia mantenimiento más reducido del aceite,
- La instalación y el conexionado a sus bornes, de MT y BT, son más fáciles por la ausencia del depósito,
- La altura total del transformador es más reducida.

Esta supresión del depósito conservador, ha sido posible gracias a haberse conseguido diseñar transformadores con cantidades de aceite notablemente inferiores a las de los tipos anteriores que precisaban depósito conservador.

Esta gran reducción en la cantidad de aceite, hace que en caso de incendio, las consecuencias y la peligrosidad del mismo sean menores por la menor cantidad de aceite combustible.



Elementos que componen el transformador sumergido en aceite con depósito de expansión.

Partes constructivas de un transformador sumergido en aceite:

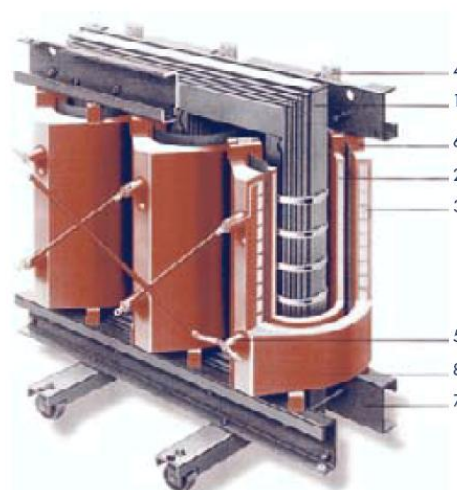
- Pasa-tapas de entrada: conectan el bobinado primario del transformador con la red eléctrica de entrada a la estación o subestación transformadora.

- Pasa-tapas de salida: conectan el bobinado secundario del transformador con la red eléctrica de salida a la estación o subestación transformadora.
- Cuba: es un depósito que contiene el líquido refrigerante (aceite), y en el cual se sumergen los bobinados y el núcleo metálico del transformador.
- Depósito de expansión: sirve de cámara de expansión del aceite, ante las variaciones de volumen que sufre éste debido a la temperatura.
- Indicador del nivel de aceite: permite observar desde el exterior el nivel de aceite del transformador.
- Relé Bucholz: este relé de protección reacciona cuando ocurre una anomalía interna en el transformador, mandándole una señal de apertura a los dispositivos de protección.
- Desecador: su misión es secar el aire que entra en el transformador como consecuencia de la disminución del nivel de aceite.
- Termostato: mide la temperatura interna del transformador y emite alarmas en caso de que esta no sea la normal.
- Regulador de tensión: permite adaptar la tensión del transformador para adaptarla a las necesidades del consumo. Esta acción solo es posible si el bobinado secundario está preparado para ello.
- Placa de características: en ella se recogen las características más importantes del transformador, para que se pueda disponer de ellas en caso de que fuera necesaria conocerlas.
- Grifo de llenado: permite introducir líquido refrigerante en la cuba del transformador.
- Radiadores de refrigeración: su misión es disipar el calor que se pueda producir en las carcassas del transformador y evitar así que el aceite se caliente en exceso.
- **Transformador encapsulado en resina:** En este caso las bobinas del transformador se encuentran aisladas mediante una resina especial, que impide el acceso al interior del transformador.

En ellos, sus arrollamientos están encapsulados dentro de resina del tipo termoendurecible (resina epoxy) mezclada con una llamada «carga activa» pulverulenta formada básicamente de sílice y alúmina hidratada y con aditivos endurecedor y flexibilizador.



Transformador encapsulado en resina epoxy.



- 1 Núcleo de tres columnas construido a base de chapas magnéticas de grano orientado de bajas pérdidas aisladas por ambos lados.
- 2 Arrollamiento de baja tensión construido con banda de aluminio; las espiras están fijamente pegadas entre sí mediante material aislante laminado.
- 3 Arrollamiento de alta tensión a base de bobinas individuales de aluminio, bobinados en fleje; la resina se trata en vado.
- 4 Terminales de baja tensión; arriba, por el lado posterior, y abajo, mediante consulta.
- 5 Terminales de alta tensión: disposición variable para optimizar el diseño del C.T.
- 6 Separadores elásticos: eliminación de vibraciones entre núcleo y devanados, lo que reduce el ruido.
- 7 Armazón y chasis con ruedas orientables para desplazamiento longitudinal y transversal.
- 8 Aislamiento de resina epoxy/cuarzo molido exento de mantenimiento, seguro contra la humedad y tropicalizado, de difícil combustión y autoextinguible.

Transformadores en baño de aceite: ventajas y desventajas

- Ventajas frente a los transformadores secos:

- menor coste unitario. En la actualidad su precio es del orden de la mitad que el de uno seco de la misma potencia y tensión.
- menor nivel de ruido.
- menores pérdidas de vacío.
- mejor control de funcionamiento.
- pueden instalarse a la intemperie.
- buen funcionamiento en atmósferas contaminadas.
- mayor resistencia a las sobretensiones, y a las sobrecargas prolongadas.

Los transformadores en baño de aceite se construyen para todas las potencias y tensiones, pero para potencias y/o tensiones superiores a los de distribución MT/BT para CT, siguen siendo con depósito conservador.

- Desventajas frente a los transformadores secos:

– La principal desventaja, es la relativamente baja temperatura de inflamación del aceite, y por tanto el riesgo de incendio con desprendimiento elevado de humos. Según la norma UNE, el valor mínimo admisible de la temperatura de inflamación del aceite para transformadores, es de 140 °C.

Por este motivo (también por razones medioambientales), debajo de cada transformador, debe disponerse un pozo o depósito colector, de capacidad suficiente para la totalidad del aceite del transformador, a fin de que, en caso de fuga de aceite, por ejemplo, por fisuras o rotura en la caja del transformador, el aceite se colecte y se recoja en dicho depósito.

En la embocadura de este depósito colector acostumbra a situarse un dispositivo apagallamas para el caso de aceite inflamado, que consiste en unas rejillas metálicas cortafuegos, las cuales producen la autoextinción del aceite, al pasar por las mismas, o, como mínimo, impiden que la llama llegue a la caja del transformador y le afecte (efecto cortafuegos).

En muchas ocasiones, estas rejillas metálicas «cortafuegos» o «apagallamas» se sustituyen por una capa de piedras por entre las cuales pasa el aceite hacia el depósito colector.

Actúan pues como apagallamas o cortafuegos en forma similar a las mencionadas rejillas metálicas.

Este depósito colector representa un incremento significativo en el coste de la obra civil del CT, y en ocasiones, cuando la haya, una cierta invalidación de la planta inferior a la del CT.

El riesgo de incendio obliga también a que las paredes y techo de la obra civil del CT sean resistentes al fuego.

– Debe efectuarse un control del aceite, pues está sujeto a un inevitable proceso de envejecimiento que se acelera con el incremento de la temperatura.

Asimismo, aunque se trate de transformadores herméticos, sin contacto con el aire, puede producirse un incremento en su contenido de humedad, debido al envejecimiento del aislamiento de los arrollamientos, ya que la degeneración de la celulosa, desprende agua que va al aceite.

En efecto, en los transformadores en baño de aceite, los aislantes de los arrollamientos acostumbran a ser de sustancias orgánicas tales como algodón, seda, papel y análogos, que en la clasificación de los aislantes para transformadores figuran comprendidos en la «clase A».

Esto obliga a una labor de mantenimiento con controles periódicos del aceite, como mínimo de su rigidez dieléctrica, pues ésta disminuye mucho con el contenido de agua (humedad), y de su acidez (índice de neutralización), ya que los ácidos orgánicos, que por oxidación aparecen en el aceite, favorecen activamente el deterioro de los aislantes sólidos de los arrollamientos.

Transformadores secos: ventajas y desventajas

- Ventajas frente a los transformadores en baño de aceite:

– menor coste de instalación al no necesitar el depósito colector en la obra civil, antes mencionado.

– mucho menor riesgo de incendio. Es su principal ventaja frente a los transformadores en baño de aceite. Los materiales empleados en su construcción (resina epoxy, polvo de cuarzo y de alúmina) son autoextinguibles, y no producen gases tóxicos o venenosos. Se descomponen a partir de 300 oC y los humos que producen son muy tenues y no corrosivos.

En caso de fuego externo (en el entorno), cuando la resina alcanza los 350 oC arde con llama muy débil y al cesar el foco de calor se autoextingue aproximadamente a los 12 segundos.

Puede decirse que este menor riesgo de incendio fue la principal razón y objetivo que motivó su desarrollo.

- Desventajas frente a los transformadores en aceite:
 - mayor coste, en la actualidad del orden del doble.
 - mayor nivel de ruido.
 - menor resistencia a las sobretensiones.
 - mayores pérdidas en vacío.
 - no son adecuados para instalación en intemperie, ni para ambientes contaminados.

Estando el transformador seco en tensión, no deben tocarse sus superficies exteriores de resina que encapsulan los arrollamientos de Media Tensión. En este aspecto, presentan menos seguridad frente a contactos indirectos que los transformadores en aceite dentro de caja metálica conectada a tierra.

Conclusión: De la comparación entre ambos tipos, se desprende que cada uno presenta ventajas e inconvenientes. No puede decirse pues, que uno sea en todo superior al otro.

11.- PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES.

El Transformador de distribución puede sufrir defectos internos, que si no se detectan y corrigen provocarán su avería; además, por su cometido, se ve sometido a todas las incidencias que se producen tanto en el circuito principal de alta tensión como en el circuito secundario de baja tensión (tales como las sobrecargas y los cortocircuitos). Un transformador quemado puede ser el resultado de uno o varios fallos en su origen, que pueden ir desde una sobrecarga eléctrica o térmica mantenida hasta un defecto en el sistema de refrigeración, o un fallo constructivo que hubiese afectado a los devanados en su origen.

Se entiende por fallo externo al transformador, aquel que se produce físicamente fuera de la máquina.

Desde la perspectiva de la vida del transformador, este tipo de fallos son tan importantes como los que se producen internamente, ya que si no se despejan adecuadamente las condiciones que originan el defecto, se va a producir una reducción de la vida de la máquina, que puede derivar, si éste es importante, en una avería e incluso en su destrucción.

Se trata del tipo de fallo más difícil de detectar, ya que en sus fases iniciales, cuando el fallo involucra únicamente unas pocas espiras, resulta prácticamente imposible de detectar, especialmente en el caso de transformadores de alta tensión con un elevado número de espiras. Cuando el fallo se va extendiendo para abarcar un mayor número de espiras, es posible detectarlo a partir de la componente inversa de la intensidad.

LOS PRINCIPALES TIPOS DE FALLOS EXTERNOS, SON:

Sobrecarga externa: La sobrecarga eléctrica es el motivo principal de envejecimiento prematuro de una máquina. Desde un punto de vista térmico, la sobrecarga se produce cuando la condición de equilibrio térmico en la máquina se establece a una temperatura tal que provoca la degradación de los dieléctricos que

aíslan los conductores o las chapas que forman el núcleo magnético del transformador. La condición de sobrecarga involucra parámetros de naturaleza distinta:

1. Nivel de carga eléctrica
2. Condiciones ambientales: temperatura, humedad y altura sobre el nivel del mar.
3. Condiciones de explotación: continua, ocasional, etc.

Desde el punto de vista de la protección de la máquina, la condición de sobrecarga no suele requerir la puesta fuera de servicio inmediata de la máquina, lo que permite realizar actuaciones dedicadas a reducir las condiciones que producen dicha situación, continuando con la explotación de la instalación. Entre las medidas orientadas a reducir el nivel de sobrecarga de la máquina se pueden citar: deslastrado de carga y mejora de las condiciones de refrigeración.

Cortocircuito externo: El cortocircuito externo al transformador es la condición de explotación más grave a la que puede someterse. Desde el punto de vista eléctrico la intensidad de cortocircuito simétrico en una red está limitada únicamente por la potencia de cortocircuito de dicha red. Si dicho cortocircuito se produce en el secundario del transformador, la potencia de cortocircuito en dicho punto se obtendrá como combinación de la potencia de cortocircuito de la red en el primario y la propia potencia de cortocircuito del transformador. Cuando se produce un cortocircuito, además del efecto térmico que produce dicha intensidad en los devanados, aparece un elevado esfuerzo electrodinámico entre conductores que puede producir daños mecánicos en la máquina.

Sobretensión / Reducción de frecuencia: Resulta suficientemente conocido por el lector que un circuito magnético alimentado mediante una tensión alterna genera un flujo cuyo valor eficaz es proporcional al cociente entre el valor eficaz de la tensión y la frecuencia de dicha tensión.

Cuando el valor del flujo alcanza la zona de saturación en la curva B-H del material utilizado para la construcción del circuito magnético, el consumo de intensidad aumenta, incrementando las pérdidas del transformador.

Como se puede observar, el incremento de las pérdidas debido a la saturación puede producirse tanto por una sobretensión como por una reducción de la frecuencia de la tensión de alimentación.

Condiciones ambientales adversas: Desde un punto de vista conceptual, la reducción de vida útil de un dieléctrico se produce por un incremento de temperatura, independientemente de que este sea provocado por una disipación de calor debida al efecto Joule en los conductores, por un incremento de la temperatura ambiente o por un fallo en el sistema de refrigeración.

Ciclos de trabajo: En determinadas condiciones de explotación, como emergencias o condiciones ambientales muy adversas, es necesario que el transformador opere durante un determinado periodo de tiempo por encima de sus características nominales. Esta situación puede ser admisible si se verifica un nivel medio de carga, generalmente inferior al nominal, durante un intervalo global de 24 horas. Se presenta, a continuación, el método simplificado propuesto en la norma UNE 20110 para determinar ciclos de carga; se trata de un método aproximado con las siguientes restricciones de partida:

- La variación diaria de carga se presenta por un ciclo simplificador de sólo dos escalones.
- Las características térmicas pueden no coincidir con un transformador específico.
- Se considera que la temperatura ambiente es constante durante el ciclo de 24 horas.
- Ciclo de carga con una punta. Se aproxima un ciclo de carga irregular por una estructura de doble escalón conservando el área.
- Ciclo de carga con dos puntas de amplitudes iguales y duraciones distintas. En este caso, se elige la punta de mayor duración y se calcula el factor de carga K1 como el valor medio del resto.
- Ciclo de carga con puntas sucesivas. En este caso se elige t suficientemente grande para incluir todas las puntas de valor K2 y se calcula K1 como el valor medio de la curva de carga restante.

LOS PRINCIPALES TIPOS DE FALLOS INTERNOS, SON:

Cortocircuitos entre espiras en la misma fase: Se trata del tipo de fallo más difícil de detectar, ya que en sus fases iniciales, cuando el fallo involucra únicamente unas pocas espiras, resulta prácticamente imposible de detectar, especialmente en el caso de transformadores de alta tensión con un elevado número de espiras. Cuando el fallo se va extendiendo para abarcar un mayor número de espiras, es posible detectarlo a partir de la componente inversa de la intensidad.

Cortocircuitos entre espiras en fases distintas: Los cortocircuitos entre espiras de fases distintas pueden ser detectados mediante una protección diferencial colocada a la entrada y salida de cada bobinado del transformador.

Defectos fase – carcasa: Los defectos de aislamiento entre fase y carcasa debido al deterioro de los dieléctricos provoca la circulación de una intensidad de defecto hacia tierra siempre que el sistema de distribución sea de tipo neutro rígido a tierra o impedante. En los sistemas de distribución con neutro aislado la circulación de intensidad está restringida a las capacidades parásitas existentes.

Defectos en el circuito magnético: Los defectos en el circuito magnético suelen producirse como resultado del deterioro del aislamiento entre chapas producido por un incremento excesivo de temperatura. Estos incrementos pueden estar producidos por una condición de sobrecarga, por la presencia de armónicos en la intensidad, o por sobretensiones o disminuciones de frecuencia que den lugar a una saturación de flujo magnético.

Defectos en el conexionado / aisladores: Este tipo de defectos son producidos por conexiones defectuosas en la interfaz cable / aislador de entrada– salida del transformador. En muchos parques de intemperie se produce con cierta frecuencia la aparición de contorneos y descargas en los aisladores de entrada-salida debido a la suciedad acumulada, especialmente en ambientes costeros, donde existen grandes concentraciones salinas en las brumas y nieblas. Este tipo de fenómenos son típicos también de instalaciones con elevadas concentraciones de polvo en el ambiente, como acerías y cementeras. En muchos casos, la solución consiste en la limpieza periódica de los aisladores, y su protección mediante barnices dieléctricos que repelen la suciedad. En el caso de los defectos producidos por malas conexiones, que se

caracterizan por incrementos de temperatura, es posible realizar su detección mediante termografía infrarroja.

En algunas ocasiones, los defectos son producidos por animales que se electrocutan al acercarse a la máquina buscando calor.

Defectos en el sistema de refrigeración: Los defectos en el sistema de refrigeración comprenden todos aquellos fallos que afectan a la adecuada refrigeración de la máquina. Cabe destacar aquí,

- Pérdida de refrigerante en la cuba, depósito de expansión o conducciones intermedias.
- Deterioro de las características del refrigerante debido a procesos de envejecimiento o contaminación.
- Avería de los termostatos, sondas térmicas o ventiladores.
- Obstaculización de las canalizaciones de refrigeración, en el caso de transformadores que operan en centros de transformación.
- Cálculo inadecuado de la refrigeración o modificación de las condiciones de explotación.

El transformador de potencia es sin duda alguna uno de los equipos más importantes de un sistema eléctrico, pieza básica del transporte y distribución de energía eléctrica. Sencillo, eficaz y fiable, constituye la máquina de rendimiento más elevado debido a su particular faceta de no tener ningún órgano móvil.



Los defectos y averías internas en un transformador de potencia normalmente vienen motivados por perturbaciones de origen externo, haciéndose patentes de manera instantánea o bien evolucionando paulatinamente.

La relación causa-efecto podríamos resumirla como sigue:

Solicitaciones Térmicas:

- Sobreintensidades
- Sobrecargas permanentes o repetidas
- Cortocircuitos

Solicitaciones Dieléctricas:

- Sobretensiones temporales
- Sobretensiones atmosféricas
- Sobretensiones tipo maniobra

También son altamente nocivos los efectos electrodinámicos originados por cortocircuitos externos, «solicitaciones de tipo mecánico», esfuerzos que son relativamente compensados por elementos de presión dispuestos sobre las cabezas de los devanados.

Debido a la fuerza resultante f , queda comprimido el bobinado interior, tendiendo a aplastarlo sobre el núcleo, al igual que a hacer estallar el bobinado exterior que experimenta una presión análoga a la de un cuerpo de caldera.

Este efecto destructor dependiente del cortocircuito quedará tanto más limitado cuanto más rápido sea el sistema de protección dispuesto.

Los efectos causados por tales perturbaciones en el transformador pueden ser:

- Cortocircuitos entre fases.
- Cortocircuitos entre espiras.
- Defectos de aislamiento en el núcleo magnético.

Un análisis superficial de estas incidencias nos hace reflexionar sobre la importancia de proteger al transformador con dispositivos selectivos y sensibles, capaces de interrumpir rápidamente el flujo de energía al lugar defecto.

Existen también causas de avería propias al transformador, derivadas principalmente de defectos de construcción, mantenimiento o utilización, problemas de evolución lenta tales como envejecimiento natural o prematuro; falta de presión en conexiones, deficiencias en la refrigeración etc.

El resultado más común es la alteración del aislamiento en conductores, que se vuelven más frágiles y quebradizos al debilitarse su resistencia mecánica y al disminuir su rigidez dieléctrica por efecto del calor.

Estudios recientes sobre la acción del calor en los aislantes han demostrado que, en las proximidades de una temperatura de 100 °C, un régimen de funcionamiento de 8 °C en más o en menos, puede respectivamente doblar o reducir a la mitad la vida de un transformador.

En las etapas de propagación del calor en transformadores secos y sumergidos, se observa cómo la temperatura varía no solamente del interior al exterior, sino también de la parte inferior a la superior.

Es de suma importancia la limitación de la temperatura en el transformador para prevenirlo contra calentamientos impropios que pudieran ponerlo en peligro.

Para sobrecargas distintas a los cortocircuitos, los relés deberán proporcionar tiempos de actuación en función de la carga, de modo que su curva de respuesta se adapte a la curva de calentamiento dada por el fabricante del transformador.

Por tanto resulta necesario proteger los transformadores y para ello se han desarrollado una serie de sistemas de protección que detectan y provocan la apertura del circuito o realizan una indicación de alarma, cuando se produce aquel defecto (para el que se han diseñado).

Estos elementos se instalan sobre el circuito principal o sobre el propio transformador en función del tipo de detección a efectuar y del tipo de maniobra que deban producir.

Entre las múltiples protecciones que se pueden realizar, las más frecuentes son contra sobrecargas y cortocircuitos, pudiendo agruparse en protecciones tipo directo y tipo indirecto.

Las protecciones de tipo directo son de tipo electromecánico, se instalan en el circuito principal y soportan todas las incidencias que se puedan presentar en este circuito, provocando la apertura del mismo por actuación directa sobre el interruptor a través de un sistema de timonería y/o disparo.

Las protecciones de tipo indirecto son de tipo electrónico, disponen de elementos captadores instalados en el circuito principal que proporcionan una señal proporcional a un relé, que actúa sobre el elemento de disparo o alarma.

Con independencia del tipo de transformador del que se trate, seco o sumergido en dieléctrico líquido, deberán disponer de unas protecciones eléctricas mínimas como cualquier otro receptor eléctrico siguiendo las instrucciones de los fabricantes:

- **Contra sobreintensidades:** Las sobreintensidades pueden ser debidas a sobrecargas externas o internas, y a cortocircuitos, que a su vez pueden ser externos o internos.

La protección se realizará con relés directos (magnetotérmicos) o indirectos (electrónicos).

La protección contra cortocircuitos, se realizará mediante fusibles cuya intensidad sea entre 1,5 a 2 veces la intensidad del transformador.

Otras protecciones frecuentes son:

- **Contra sobretensiones:** En zonas de alta frecuencia de caída de rayos y especialmente cuando las líneas de alta tensión se reciben de forma aérea, existe el riesgo de que un rayo que caiga sobre la línea eléctrica dañe al transformador.

Con objeto de proteger a los centros de transformación frente a posibles daños a consecuencia de sobreintensidades de origen atmosférico, así como debidas a maniobras inadecuadas en las líneas de distribución eléctricas, es aconsejable la instalación de pararrayos en la entrada de alta tensión lo más cerca posible de las bornes del transformador.

- **Contra sobretemperaturas:** En los transformadores a partir de 500 KVA de potencia, es recomendable la disposición de protecciones contra sobretemperaturas con objeto de parar el funcionamiento con antelación a que se produzca una avería. Estas protecciones que se suelen suministrar con el transformador de modo opcional se realizan en transformadores sumergidos a través de termómetros o relés multifunción (termostatos) que toman la temperatura del líquido dieléctrico dependiendo las temperaturas de aviso y disparo de las características de combustibilidad del líquido dieléctrico. En los transformadores de tipo seco la protección suele consistir en detectores térmicos situados en el interior del devanado de baja tensión.

En transformadores sumergidos, en caso de defecto en el funcionamiento del transformador se liberan gases por descomposición del dieléctrico. Con objeto de detectar esta situación a través de los gases desprendidos se coloca la protección conocida como relé Bulchholz con la finalidad de desconectar automáticamente el transformador en caso de detectar estos gases.

- Análisis y cálculo de las principales características y magnitudes de las máquinas eléctricas, y su aplicación a la elección de la más adecuada a un determinado supuesto, utilizando la documentación técnica de los fabricantes.

- Eficiencia energética de los dispositivos electrónicos de control y regulación en la utilización de la energía eléctrica.

12.- EFICIENCIA ENERGETICA DE LOS TRANSFORMADORES.

En diciembre de 1997 se celebró la Convención sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas, en la que se decidió reducir el nivel de emisión de agentes contaminantes. El llamado **protocolo de Kioto**. Éste establece que los países desarrollados deben reducir sus emisiones de gases causantes del efecto invernadero (el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los clorofluorocarbonos (CFC) y el ozono) en un 5,2% para el año 2012 respecto a las emisiones del año 1990. El contenido en dióxido de carbono, principal causante del efecto invernadero, se ha incrementado aproximadamente un 30% desde 1750, como consecuencia del uso de combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón.

En 1996 se consumieron en el mundo 26.100 millones de barriles de petróleo, 2,32 billones de metros cúbicos de gas natural y cerca de 4.700 millones de toneladas de carbón. Si se trasladan esas cifras a unidades de energía, se puede decir que el consumo de energía mundial en ese año fue de 137 billones de julios de petróleo, 88 billones de julios de carbón y 77 billones de julios de gas natural.

En la Unión Europea, y en concreto de España, la dependencia de combustibles fósiles es muy importante, para reducir el consumo y en definitiva la emisión de CO₂ obliga a barajar distintas opciones:

- **Aumentar la presencia de energía nuclear**, pero la generación de residuos radioactivos y la “mala prensa” que esta posee, ha reducido sus posibilidades como solución a reducir las emisiones de CO₂.

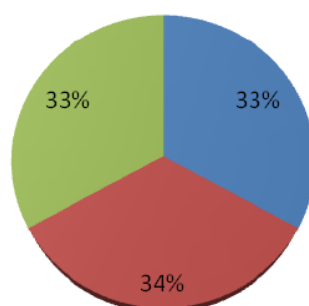
- **Fomentar la utilización de energías alternativas**. Pero éstas son de coste muy elevado y son poco fiables como fuentes de energía estables.

Aunque el desarrollo de ciertas fuentes alternativas de energía se hace cada vez más importante, y es en definitiva una solución a largo plazo y cada vez mas justificable con los incremento de los combustibles fósiles.

- **Reducir los consumos**. Entre ellos el de la energía eléctrica, dentro de la energía eléctrica hay varias formas de reducir éstos, un aspecto “más controlable” por las compañías es la disminución de las pérdidas en los transformadores de distribución.

Perdidas Energéticas

■ Transformadores de distribución ■ Transporte ■ Red de distribución



Dentro de las pérdidas energéticas que podemos encontrar:

- **Perdidas en las redes**, las podemos reducir mejorando el diseño de las redes, su grado de utilización, su operatividad y gestionando mejor la demanda y la generación.

- **Pérdidas técnicas**, se pueden reducir haciendo transformadores más eficientes, eliminando transformadores intermedios, compensando reactiva, equilibrando las cargas en las fases, reconfigurando las redes de media, desplazando consumos mediante tarifas reducidas, adecuando la potencia nominal de los transformadores a las puntas de demanda de su mercado, etc...

12.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA.

La eficiencia energética es el modo más rápido, económico y limpio de reducir el consumo energético y reducir así las emisiones de gases de efecto invernadero para cumplir los objetivos del protocolo de Kyoto, una demanda creciente de los diferentes actores del mercado.

El ahorro energético implica no sólo la reducción del consumo, sino también la reducción de emisiones que afectan al medio ambiente.

De todos los costos operativos, el energético es el más fácil de controlar, pero para su reducción es indispensable un control continuo, una gestión adecuada de la información y una asesoría energética efectiva.

Las mejoras en la productividad se centran en optimizar el rendimiento de los equipos y de los procesos, facilitando un correcto mantenimiento.

La supervisión energética permite garantizar la continuidad del suministro, maximizar el tiempo operativo de su proceso productivo, y alcanzar los requerimientos de calidad y tiempos de respuesta.

En la mayoría de las instalaciones existentes, se puede lograr hasta un 30% de ahorro energético utilizando las soluciones y tecnologías disponibles en la actualidad.

Las acciones locales de eficiencia energética tienen un importante efecto productivo debido a las pérdidas en la generación y en la red eléctrica de distribución y transmisión, 1 kWh de uso en una instalación, con generación a carbón (muy utilizado en los mercados emergentes) requiere 3 kWh de producción.

Las previsiones de la demanda energética, son:

- El consumo de energía ha aumentado 45% desde 1980. Está proyectado que sea un 70% más alto para el 2030.

- Los mercados emergentes (incluyendo China e India) representan más del 75% de la nueva demanda, ejerciendo nuevas presiones en los recursos globales. En tanto, los mercados maduros como Norteamérica, Europa y Japón también enfrentarán una demanda creciente y recursos limitados. Estos mercados maduros continuarán legislando para reducir el consumo, cambiarse a fuentes energéticas alternativas y mejorar la seguridad energética.

- La creciente demanda por los recursos naturales ocasionará que los precios del petróleo y del gas natural se mantengan o estén por encima de los niveles actuales, en un futuro previsible. El carbón continuará siendo un recurso económico y abundante, especialmente en los mercados emergentes. Por esto, cada vez más la necesidad de reducir la emisión de gases contaminantes para evitar el cambio climático global es imperiosa.

- Más que nunca, el calentamiento global es la prioridad. Las preocupaciones ambientales y la opinión pública sobre el cambio climático orientarán acciones

continuas por parte de legisladores, líderes de opinión y grupos de interés especial que obliguen a la industria a tomar acciones correctivas.

La reducción y el manejo del uso de la energía serán el enfoque continuo de aquellos que toman las decisiones en política. Los objetivos claves para las futuras políticas serán:

- Limitar el consumo energético en todos los sectores.
- Medir y monitorear el uso de la energía para establecer puntos de referencia y objetivos.
- Promover fuentes energéticas y tecnologías alternativas.
- Abrir mercados para promover «emissions trading» (sistema de canje con créditos de emisiones) y reducción de la demanda.

12.2.- PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES.

Los transformadores son máquinas eléctricas usados en los sistemas de generación y transporte de electricidad.

Para que el transporte de energía resulte rentable es necesario que en la planta productora de electricidad eleve los voltajes, reduciendo con ello la intensidad. Las pérdidas ocasionadas por la línea de alta tensión son proporcionales al cuadrado de la intensidad de corriente por la resistencia del conductor. Por tanto, para la transmisión de energía eléctrica a larga distancia se utilizan voltajes elevados con intensidades de corriente reducidas. En el extremo receptor los transformadores reductores reducen el voltaje, aumentando la intensidad, y adaptan la corriente a los niveles requeridos por las industrias y las viviendas, normalmente 230/400 V.

Los transformadores de potencia deben ser muy eficientes y deben disipar la menor cantidad posible de energía en forma de calor durante el proceso de transformación. Las tasas de eficacia se encuentran normalmente por encima del 95% y se obtienen utilizando aleaciones especiales de acero para acoplar los campos magnéticos inducidos entre las bobinas primaria y secundaria. Una disipación de tan sólo un 0,5% de la potencia de un gran transformador genera enormes cantidades de calor, lo que hace necesario el uso de dispositivos de refrigeración. Los transformadores de potencia convencionales se instalan en contenedores sellados que disponen de un circuito de refrigeración que contiene aceite u otras sustancias. El aceite circula por el transformador y disipa el calor mediante radiadores exteriores, también pueden ser secos con refrigeración con aire. Los refrigerados por aceites minerales, son los de mayor uso.

La transmisión de energía eléctrica en los transformadores generalmente tiene lugar con un mínimo de pérdidas; siendo necesario saber cómo surgen y que sucede con estas pérdidas.

Según los principios de operación de los transformadores y las bases físicas de su funcionamiento, existen pérdidas provocadas por la resistencia en de los circuitos eléctricos y magnéticos.

Pérdidas en el Cobre o efecto Joule, producción de calor en un conductor cuando circula una corriente eléctrica a través del mismo. La energía eléctrica se transforma en energía térmica debido a los continuos choques de los electrones móviles contra los iones metálicos del conductor, produciéndose un intercambio de

energía cinética, que provoca un aumento de temperatura del conductor. Se usa la denominación genérica de Cu, para el bobinado ya sea de cobre o de aluminio.

Pérdidas del hierro. Son las correspondientes al circuito magnético que se producen en el núcleo del transformador.

Dentro las pérdidas provocadas por los efectos del campo electromagnético en el núcleo las más significativas son las creadas por las pérdidas de Foucault, llamadas también las pérdidas por corriente de remolino, las cuales son resultado de la disipación de potencia al paso de la corriente inducida en las láminas de hierro del núcleo por la tensión alterna, conectada al devanado primario del transformador. Si el núcleo estuviera compuesto de hierro macizo las corrientes de remolino se cerrarían a través de trayectorias concéntricas y se comportaría el fenómeno en forma parecida a un cortocircuito en el devanado

El hierro además de ser un magnífico conductor del flujo electromagnético es un conductor de la corriente eléctrica aunque no tan bueno como otros metales. Por consiguiente estas corrientes de remolino se convierten en un calentamiento significativo del núcleo el cual se opone al flujo electromagnético circulante y esta es una dificultad difícil de eliminar.

Otra pérdida que ocurre en el núcleo es la de histéresis magnética. Todos los materiales ferromagnéticos tienden a retener algún grado de magnetización después de la exposición a un campo magnético externo. Esta tendencia a quedarse magnetizada se llama "histéresis", y desarrolla una cierta inversión en la energía para superar esta oposición y cambiar cíclicamente el campo magnético producido por los cambios de polaridad en el devanado primario.

Las pérdidas de energía en el transformador tienden a aumentar con una frecuencia creciente. El efecto superficial dentro de los conductores reduce el área particular disponible para el flujo de electrones, a su vez aumenta la resistencia eficaz elevando la frecuencia y se crean mayores pérdidas de potencia. También aumentan las pérdidas del núcleo magnético a frecuencias superiores. Por esta razón, se diseñan transformadores para operar eficazmente en un rango limitado de frecuencias. La potencia que se pierde en el proceso de remagnetización del material del núcleo sometido a un campo de corriente alterna.

En los transformadores de distribución la frecuencia es baja, 50 Hz en Europa y 60Hz en América.

Por tanto podemos clasificar las pérdidas de la siguiente forma:

- **Pérdidas fijas (vacío) en el hierro.**
- **Pérdidas variables (en carga) en el cobre.**

Un transformador de distribución normal tiene pérdidas debido a varias razones:

- Pérdidas en el devanado primario (I^2R).
- Pérdidas en el devanado secundario (I^2R).
- Pérdidas de magnetización (función de frecuencia y del hierro del núcleo).
- Pérdidas de origen dieléctrico (por el medio aislante, aceite por ejemplo).
- Pérdidas de tipo parasitarias (asociadas a corrientes parásitas).

La expresión de las pérdidas de un transformador, para una carga x cualquiera será:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{salida}} + P_{\text{pérdidas}}} = \frac{X \times S \times \cos\phi_{\text{carga}}}{X \times S \times \cos\phi_{\text{carga}} + P_{\text{constantes}} + X^2 \times P_{\text{carga}}}$$

Donde:

P_{salida} = potencia requerida por la carga conectada al transformador.

P_{entrada} = potencia absorbida de la red.

P_{pérdidas} = potencia de pérdidas interiores del transformador.

X = grado de carga del transformador.

P_{constantes} = pérdidas que están presentes en todo momento en el transformador, independiente del grado de carga que se conecte a sus terminales.

P_{carga} = pérdida en Joules (I^2R) en el interior del transformador por circulación de la corriente por ambos devanados.

Esta expresión muestra que la eficiencia depende de la potencia de la carga que se conecte, su factor de potencia y las pérdidas propias del transformador (de vacío y de plena carga). Esta eficiencia no será constante para todos los grados de carga conectada, y alcanzará su máxima eficiencia en un grado de carga tal que las pérdidas de vacío igualen a las pérdidas de plena carga, según la expresión:

$$X_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{P_{\text{vacío}}}{P_{\text{carga}}}}$$

Normalmente, la máxima eficiencia se logra para cargas menores a la potencia nominal del transformador. Como ejemplo, para un transformador de 100 kVA, con pérdidas de vacío del orden de 0,9 kW y pérdidas con carga de 2,5 kW, con una carga conectada de potencia variable, pero de factor de potencia 0,7 inductivo constante, la evaluación de la expresión anterior de eficiencia máxima entrega valores del orden:

$$X_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{P_{\text{vacío}}}{P_{\text{carga}}}} = \sqrt{\frac{0,9}{2,5}} = 0,6 \text{ [p.u.]} = 60\%$$

Esto significa que el transformador logrará su máxima eficiencia (95,89%) cuando la carga conectada sea de **60% • 100 kVA = 60 kVA @ cos φ = 0,7** inductivo. Nótese también que la eficiencia dependerá tanto de la potencia como del factor de potencia de la carga conectada.

La gráfica de eficiencia para varios grados de carga se muestra a continuación: Ahora, supongamos que se tienen dos transformadores, A y B respectivamente, y ambos tienen las mismas pérdidas totales de 2 kW, pero con los siguientes detalles:

Transformador A:

P vacío = 1 kW

P carga = 1 kW

η máximo = 98,04%

Transformador B:

$P_{\text{vacío}} = 0,3 \text{ kW}$

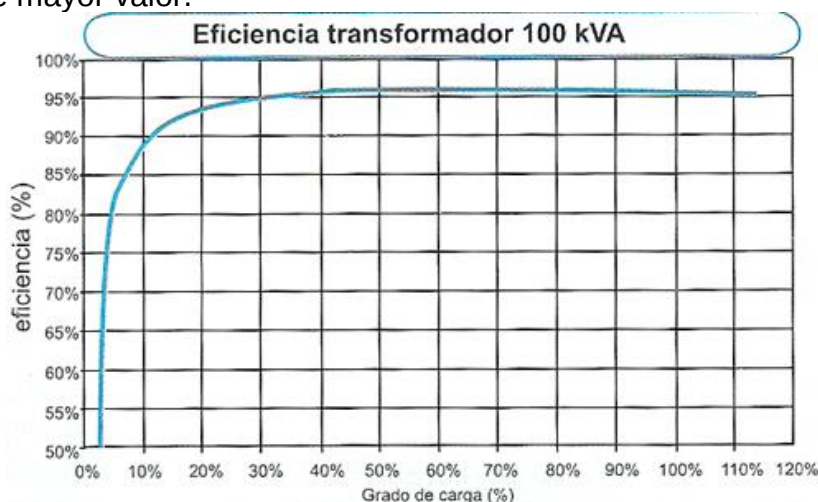
$P_{\text{carga}} = 1,7 \text{ kW}$

$\eta_{\text{máximo}} = 98,04\%$

Como se observa, ambos tienen la misma eficiencia máxima de 98,04% con factor de potencia unitario, excepto que el transformador A tiene esa eficiencia máxima a un grado de carga plena ($x = 1$), mientras que en el caso del transformador B, esta eficiencia máxima ocurre a un grado de carga de

$$X_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{P_{\text{vacío}}}{P_{\text{carga}}}} = \sqrt{\frac{0,3}{1,7}} = 0,42 \text{ [p.u.]} = 42\%$$

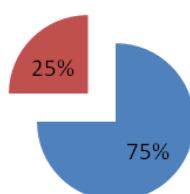
A este grado de carga, el transformador B tiene una eficiencia de 98,59%. La eficiencia máxima del transformador A en este mismo punto de carga será del 97,28%. Entonces, podemos inferir que el transformador A tiene un núcleo de más pérdidas por kg de hierro que la unidad B a una densidad de flujo dada, pero el transformador B tiene menos cobre en sus devanados que el transformador A, y trabaja a una densidad de corriente de mayor valor.



Estas consideraciones y la estimación del grado de carga del transformador, arrojarán criterios que permitirán saber cuál es la mejor opción, de modo que la elección no pase sólo por el precio de compra, sino que también por los costos de operación de cada equipo en evaluación, que pueden llegar al cabo de algunos meses a ser del orden del precio de compra del transformador

Reparto de pérdidas en los transformadores de distribución en España

■ Pérdidas fijas ■ pérdidas variables



Las pérdidas de los transformadores de media y de baja tensión en Europa (UE-15) suponen un 2% de la energía total generada, suponiendo un 7% de pérdidas en general (datos de Endesa que pueden extrapolarse al resto del sector).

Esto supone unas pérdidas de 55 TWh anuales, para hacernos una idea de lo que supone esto la energía demandada en España durante el año 2005 fue aproximadamente de 287 TWh, es decir un 20% de lo que consume nuestro país durante un año, o también el hecho de que necesitaríamos 8 centrales nucleares para compensar estas pérdidas fijas en los transformadores.

A lo que concierne en España encontramos 3 TWh de pérdidas anuales sólo en transformadores de distribución. (1,08% de la demanda del año 2005).

La elección del núcleo determina que resultados tendremos en cuanto se refiere a las pérdidas durante la operación del transformador en las redes eléctricas. Ahora vamos a estudiar los distintos tipos de núcleos.

CLASES DE NÚCLEOS Y EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

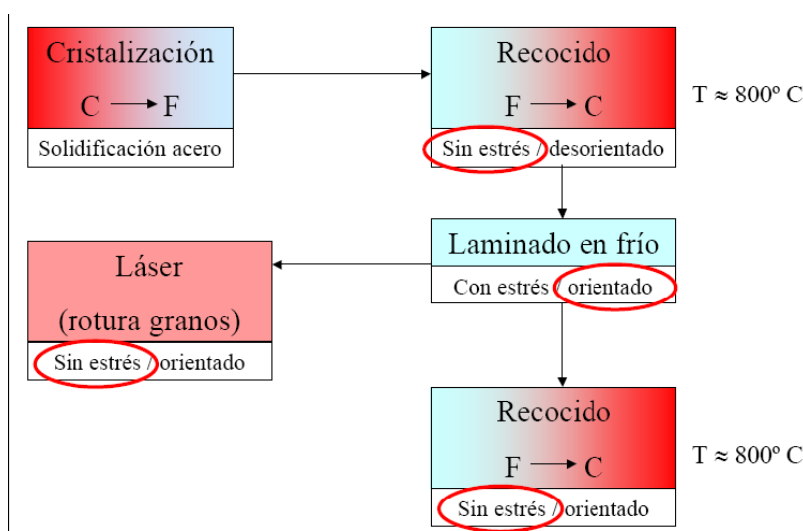
Hay dos tipos de núcleos usados:

1. Carburo de silicio de grano orientado. “CGO”: Este tipo de núcleo posee una estructura ordenada lográndose una anisotropía magnetocristalina poseen una alta coercitividad lo cual dificulta la magnetización y desmagnetización del núcleo.

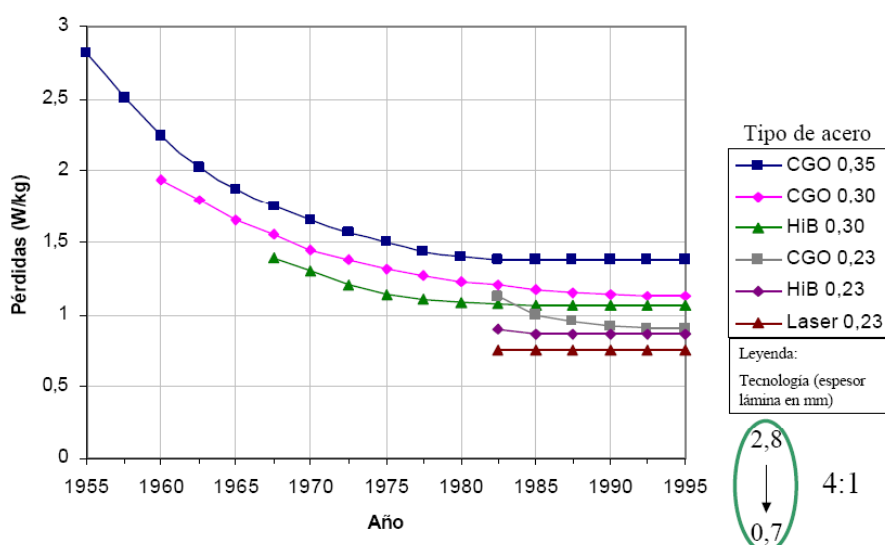


La mayoría de los transformadores actuales aún mantienen las características básicas desarrolladas hace aproximadamente 90 años (laminaciones de hierro dulce delgadas y planas). Dentro de este tipo de núcleo podemos definir a su vez dos clases: la normal y la HiB, la tecnología va dirigida a láminas lo más finas posibles por los efectos anteriormente explicados, logrando un circuito magnético más eficiente.

Proceso industrial:



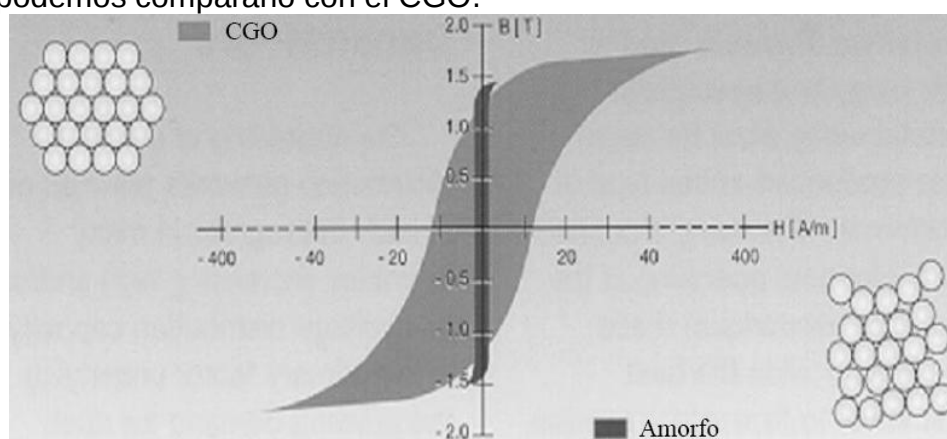
Evolución de la tecnología de grano orientado



2. Núcleo Amorfo “AMDT”: Al contrario de los de núcleo de grano orientado este tipo de núcleo posee una estructura amorfa, este tipo de estructura es aleatoria y tiene una isotropía magneto cristalina y una baja coercitividad, es decir, menos contacto, lo cual favorece la magnetización y desmagnetización del núcleo.

Estructura
Amorfa

La baja coercitividad podemos observarla analizando el ciclo de histéresis del material, podemos compararlo con el CGO.

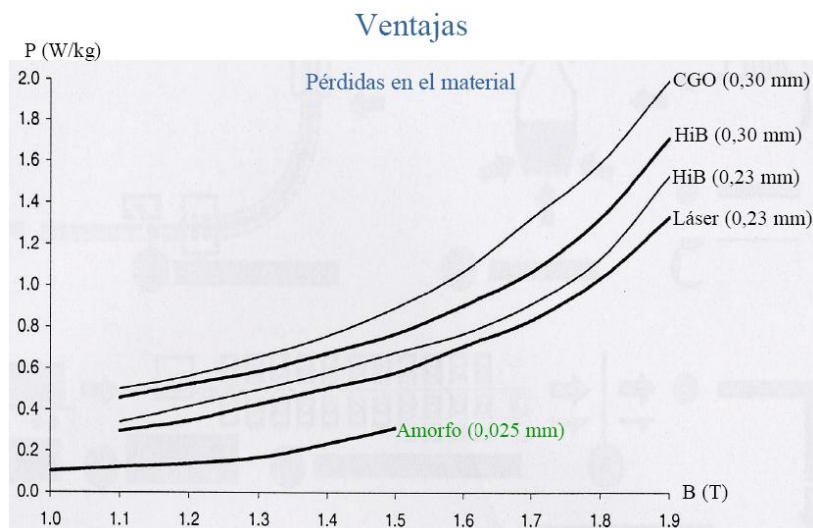


Las ventajas de los transformadores de núcleo amorfo respecto a los de grano orientado son:

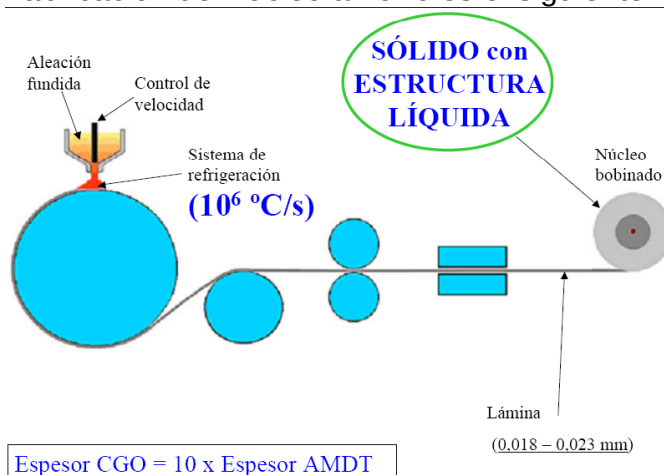
- Pérdidas de núcleo 60-70% más bajas que los transformadores con núcleo de acero al silicio
- Incrementa la productividad operativa

- Alta productividad de transformador.
- Reduce el consumo de energía
- Maximiza la generación de energía

Comparando la eficiencia de los núcleos de grano amorfo frente a los de grano orientado:



El método de fabricación del núcleo amorfo es el siguiente:



3. Superconductores: "HTS": Este tipo de transformadores van ligados a la evolución tecnológica de la superconductividad, que a su vez va ligada a la temperatura crítica de los materiales.

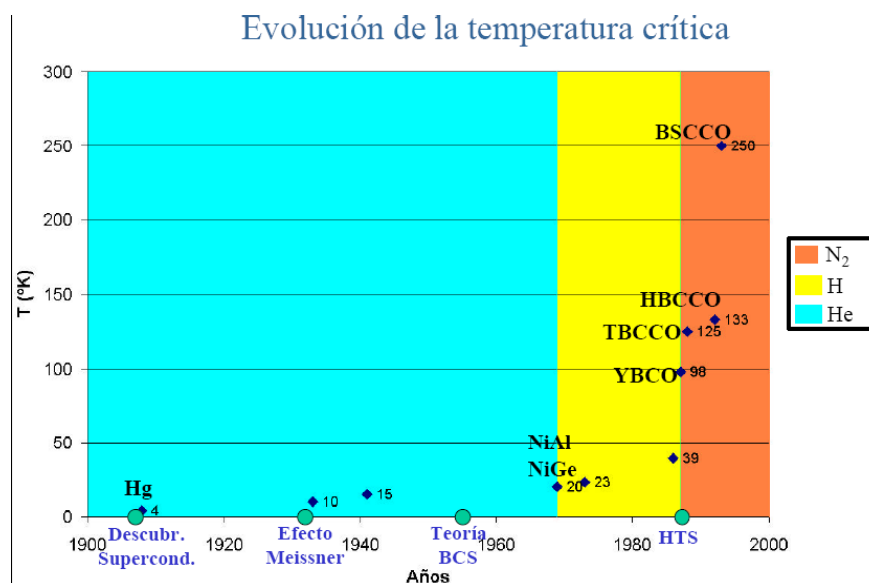
Es una tecnología experimental y por tanto no se encuentra en fase industrial.

Este tipo de núcleo no a ser objeto de estudio en este trabajo, pero haremos una pequeña introducción:

La evolución hasta el momento de la superconductividad es la siguiente:

- **1908:** Descubrimiento (Hg con He $\gg$ 4 K)
- **1933:** Superconductor refrigerado a $T < T_c$:
- **1957:** Teoría BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) pero explica la superconducción en materiales HTS
- **1986:** Superconductores HTS ($98\text{ K} < T < 250\text{ K}$)
- YBCO ("yib-co"): Y, Ba, CuO (98 K)

- TBCCO: Tl, Ba, Ca, CuO (125 K)
- HBCCO: Hg, Ba, Ca, CuO (133 K)
- BSCCO ("bis-ko"): Bi, Sr, Ca, CuO (250 K)



Las ventajas que produciría el uso de este tipo de núcleos son las siguientes:

- Resistencia nula a baja temperatura: $P_v \sim 0$ es más compacto.
- Gran resistencia eléctrica a temperatura ambiente, Limita I_{cc}
- Gran densidad de corriente: hasta 1 millón A/cm² (2000 Cu $\sigma_{cu} = 500$ A/cm²)

EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA EN CUANTO A PÉRDIDAS

Partimos de la norma del año 1996 UNE 21428-1

Normativa de 1996 (UNE 21428-1)

La normativa de este año establece que debemos encontrarnos en este rango de tensiones.

Aunque los de uso más frecuente son de hasta 1000 kVA inclusive:

Series hasta 24 kV inclusive en alta tensión

Potencia asignada (kVA)	Pérdidas debidas a la carga a 75 °C (P_L) (W)	Pérdidas en vacío 100% U_r (P_v) (W)	Nivel de potencia acústica (L_{WA}) dB (A)
50	1 100	190	52
100	1 750	320	56
160	2 350	460	59
250	3 250	650	62
400	4 600	930	65
630	6 500	1 300	67
1 000	10 500	1 700	68
1 600	17 000	2 600	71
2 500	26 500	3 800	76

Esta norma ya reduce pérdidas frente a la normativa anterior.

Normativa de Junio 2006 (UNE 21428): En esta norma ya se incorpora normativa europea y además se reducen las pérdidas en vacío:

Pérdidas y potencia acústica para U_m hasta 24 kV, inclusive, en alta tensión

Potencia asignada (kVA)	Pérdidas debidas a la carga a 75 °C (P_k) (W)	Pérdidas en vacío 100% U_r (P_a) (W)	Nivel de potencia acústica (L_{WA}) dB (A)
50	1 100	145	50
100	1 750	260	54
160	2 350	375	57
250	3 250	530	60
400	4 600	750	63
630	6 500	1 030	65
1 000	10 500	1 400	68
1 600	17 000	2 200	71
2 500	26 500	3 200	76

Normativa europea de abril de 2007 (EN 504641)

Pérdidas en cobre:

Table 2 – Load losses P_k (W) at 75 °C for U_m 24 kV

Rated power kVA	D_k W	C_k W	B_k W	A_k W	Short circuit impedance %
50	1 350	1 100	875	750	4
100	2 150	1 750	1 475	1 250	
160	3 100	2 350	2 000	1 700	
250	4 200	3 250	2 750	2 350	
315	5 000	3 900	3 250	2 800	
400	6 000	4 600	3 850	3 250	
500	7 200	5 500	4 600	3 900	
630	8 400	6 500	5 400	4 600	
630	8 700	6 750	5 600	4 800	6
800	10 500	8 400	7 000	6 000	
1 000	13 000	10 500	9 000	7 600	
1 250	16 000	13 500	11 000	9 500	
1 600	20 000	17 000	14 000	12 000	
2 000	26 000	21 000	18 000	15 000	
2 500	32 000	26 500	22 000	18 500	

Pérdidas en hierro

Table 3 – No load losses P_0 (W) and sound power level (L_{WA}) for U_m 24 kV

Rated power kVA	E_0		D_0		C_0		B_0		A_0		Short circuit impedance %
	P_0 W	L_{WA} dB(A)	P_0 W	L_{WA} dB(A)	P_0 W	L_{WA} dB(A)	P_0 W	L_{WA} dB(A)	P_0 W	L_{WA} dB(A)	
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39	4
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41	
160	460	62	375	57	300	52	260	47	210	44	
250	650	65	530	60	425	55	360	50	300	47	
315	770	67	630	61	520	57	440	52	360	49	
400	930	68	750	63	610	58	520	53	430	50	
500	1 100	69	880	64	720	59	610	54	510	51	
630	1 300	70	1 030	65	860	60	730	55	600	52	
630	1 200	70	940	65	800	60	680	55	560	52	6
800	1 400	71	1 150	66	930	61	800	56	650	53	
1 000	1 700	73	1 400	68	1 100	63	940	58	770	55	
1 250	2 100	74	1 750	69	1 350	64	1 150	59	950	56	
1 600	2 600	76	2 200	71	1 700	66	1 450	61	1 200	58	
2 000	3 100	78	2 700	73	2 100	68	1 800	63	1 450	60	
2 500	3 500	81	3 200	76	2 500	71	2 150	66	1 750	63	

NOTE P_0 = no load losses.
 L_{WA} = sound power level.

Table 4 – Load losses P_{k36} (W) at 75 °C for $U_m = 36$ kV

Rated power kVA	C_{k36} W	B_{k36} W	A_{k36} W	Short-circuit impedance %
50	1 450	1 250	1 050	4 or 4,5
100	2 350	1 950	1 650	
160	3 350	2 550	2 150	
250	4 250	3 500	3 000	
400	6 200	4 900	4 150	
630	8 800	6 500	5 500	
800	10 500	8 400	7 000	6
1 000	13 000	10 500	8 900	
1 250	16 000	13 500	11 500	
1 600	19 200	17 000	14 500	
2 000	24 000	21 000	18 000	
2 500	29 400	26 500	22 500	

Table 5 – No load losses P_{036} (W) and sound power level ($L_{w(A)}$) for $U_m = 36$ kV

Rated power kVA	C_{036}		B_{036}		A_{036}		Short-circuit impedance %
	P_0 W	L_{wA} dB(A)	P_0 W	L_{wA} dB(A)	P_0 W	L_{wA} dB(A)	
50	230	52	190	52	160	50	4 or 4,5
100	380	56	320	56	270	54	
160	520	59	460	59	390	57	
250	780	62	650	62	550	60	
400	1 120	65	930	65	790	63	
630	1 450	67	1 300	67	1 100	65	
800	1 700	68	1 500	68	1 300	66	6
1 000	2 000	68	1 700	68	1 450	67	
1 250	2 400	70	2 100	70	1 750	68	
1 600	2 800	71	2 600	71	2 200	69	
2 000	3 400	73	3 150	73	2 700	71	
2 500	4 100	76	3 800	76	3 200	73	

NOTE P_0 = no load losses.
 L_{wA} = sound power level.

Como conclusión podemos sacar que la normativa europea deja abierta muchas posibilidades, podemos adaptar esta normativa a la curva de la normativa Española es similar a la curva D0.

Como se puede ver la normativa española es con una curva de pérdidas alta ya que de las cinco sólo una es inferior (la E0) lo cual no va acorde con la elevación de precio de los combustibles fósiles. Las empresas distribuidoras adoptan pérdidas más bajas en sus normativas particulares.

Debemos hacer hincapié para este trabajo en las pérdidas en vacío, ya que, son las permanentes y sin depender fundamentalmente de la carga del transformador.

Estas máquinas son de larga duración y la amortización contable es de 40 años por lo que es muy importante la previsión del coste de la energía ya que cuando se decide su compra se hace basándose en este valor para capitalizar las pérdidas justificando, de esta forma, el más elevado coste que tiene un transformador de pérdidas más bajas.

AHORRO DE CO₂: Como se ve en la tabla el ahorro por el cambio de normativa en pérdidas en vacío es del 19%.

Comparativa pérdidas UNE 2006 vs UNE 1996						
UFD	Pérdidas en vatios según normativas UNE					
	UNE 21428 (1996)		UNE 21428 (2006)		Porcentaje de ahorro en vacío	
	Potencia (kVA)	Fe	Cu	Fe	Cu	%
50	190	1.100	145	1.100		24
100	320	1.750	260	1.750		19
160	460	2.350	375	2.350		18
250	650	3.250	530	3.250		18
400	930	4.600	750	4.600		19
630	1.300	6.500	1.030	6.500		21
1.000	1.700	10.500	1.400	10.500		18

Según la fuente Newsletter n.1 proyecto UE SEEDT (Octubre 2006) las pérdidas en transformadores de baja tensión en España son 3TWh. Con estos datos podemos estimar el ahorro energético, suponiendo que se establece en 40 años la renovación total de parque.

Ahorro energético en España= $(3000000 - ((3000000 * 0,75) * 0,81)) = 736$ MWh por año y por los transformadores instalados en un año.

Según datos de Unión Fenosa las emisiones de CO₂ generadas por el mix térmico son de 103084

Toneladas de CO₂ y las emisiones 2006 CO₂ en gramos por kwh generado del mix térmico son

735 luego podemos estimar la cantidad de CO₂ que se dejaría de emitir.

Emisiones 2006 CO₂ en gramos por kwh generado.

Carbón Narcea I	1335
Fuel Sabón I	999
Media mix térmico UF en España	735

NO emisiones totales 2007 en toneladas de CO₂

	Carbón	Fuel	Mix térmico UF España
UNION FENOSA	983	735	541
Sector Eléctrico	983	735	541

Estos ahorros son acumulativos todos los años.

Con los incrementos del precio del combustible es necesario reducir las pérdidas en los transformadores, lo cual es un reto para la industria de fabricación de transformadores.

Añadido a lo anterior es necesario tener en cuenta el coste de la emisión de CO₂ al repercutir a los incrementos de costes anteriores. En el precio de la energía eléctrica uno de los factores es la emisión de CO₂.

Tanto una cosa como la otra nos llevan a transformadores más eficientes y a una modificación en la normativa Española con pérdidas más ambiciosas.

12.3.- MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL USO DE TRANSFORMADORES.

Las principales medidas a tomar para aumentar la eficiencia energética en el uso de transformadores son las siguientes:

- Sustituir los transformadores antiguos por otros nuevos.
- Desconectar los transformadores que estén en vacío.
- Acoplar correctamente los transformadores en paralelo: al conectar a la red los primarios de dos transformadores y a continuación sus secundarios en paralelo pueden producirse circulaciones internas de corriente entre los dos transformadores y desequilibrios en el reparto de las cargas entre ambos. Estas circulaciones internas de corriente provocan consumos de energía evitables y dan lugar a calentamientos y envejecimiento prematuro de los componentes de los transformadores. Las causas más importantes de esta situación son:

- Desigualdad de impedancias de cortocircuito.
- Desigualdad de relaciones de transformación.

Recomendaciones en transformadores

- Conocer la carga asociada al transformador para no sobrecargarlo, y así reducir las cargas en el Cobre.
- Evitar operar con transformadores a baja carga (menor al 20%), si es posible redistribuir las cargas.
- Revisar el nivel y la rigidez dieléctrica del aceite cada 6 meses, con el fin de controlar la capacidad aislante y refrigerante del mismo.
- Realizar una limpieza periódica del transformador es decir superficie del tanque, aletas disipadoras de calor, bornes, etc.
- Medir con frecuencia la temperatura superficial del transformador, ella no debe ser superior a 55°C, de ser así debe revisarse el aceite dieléctrico.

Construcción de Transformadores eficientes

- Diseño eficiente vía reducción de pérdidas fijas
- Reducción de la reluctancia del núcleo
- Reducción de las pérdidas en el campo magnético
- Selección del patrón de corte
- Diseño eficiente vía reducción de pérdidas variables
- Reducción de la resistencia de los devanados
- Selección de forma de los devanados (láminas, cables...)
- Reducir la densidad de corriente (aumentar S)
- Transformadores con devanados de hojas de cobre o aluminio