

Universidad Nacional Autónoma de México

Escuela Nacional de Estudios Profesionales ARAGON

INGENIERIA

145



ENEP ARAGON

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS
CONSTANTES DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES

Sist. 29215

INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

TESIS PROFESIONAL

JOSE ARMANDO ZAMORA SOSA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGON
DIRECCION

JOSE ARMANDO ZAMORA SOSA
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 22 de octubre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. EZEQUIEL OLVERA RAMIREZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS CONSTANTES DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reune los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., diciembre 13 de 1982.
EL DIRECTOR

LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería.
Unidad Académica.
Departamento de Servicios Escolares.
Director de Tesis.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGON - UNAM

INGENIERIA

SRITA. GLORIA BECH GERMAN
JEFE DEL DEPTO. DE SERVICIOS
ESCOLARES
P R E S E N T E .

14-III-83
2:04 PM '83

UNIDAD ACADÉMICA
ENFERMERIA
U. N. A. M.

Por la presente, me permito comunicar a usted que el señor JOSE ARMANDO ZAMORA SOSA, pasante de la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica, ha concluido su trabajo de tesis - cuyo título es:

"DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS CONSTANTES DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES"

Este trabajo ha sido revisado y aprobado por el suscrito, por lo que agradeceré a usted se sirva autorizar su impresión y se fije la fecha en que se examinaría al señor Zamora Sosa.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterarme a sus apreciables y distinguidas órdenes.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

San Juan de Aragón, Edo. de Méx., a 10 de marzo de 1983.

ING. EZEQUIEL OLVERA RAMIREZ

c.c.p. ING. JOEL TOLEDO DURAN, Jefe de la Unidad Académica
ING. JUAN ANTONIO GOMEZ VELAZQUEZ, Coordinador de Ingeniería
Al interesado.

EOR/cir.

Carbón
14-III-83
Cecilia
11/III/83

A MIS PADRES.

RICARDO ZAMORA Y DOMINGUEZ
Y
JOSEFINA SOSA DE ZAMORA.

QUIENES NUNCA ME NEGARON SU AYUDA
CUANDO LOS NECESITE, QUIENES ME -
TENDIERON LA MANO CUANDO SENTI --
CAER, A LOS QUE LES DEBO LO QUE -
SOY AHORA, GRACIAS POR SER COMO -
SON Y POR TODO LO QUE ME HAN DADO.

A MIS HERMANOS QUIENES ME IMPULSARON

A SEGUIR ADELANTE EN MIS ESTUDIOS.

A EUGENIO

A MI HERMANA CARMEN Y A CARLOS

SU ESPOSO.

A MI HERMANA BERTHA Y A GABRIEL

SU ESPOSO.

A BEATRIZ.

POR SU GRAN ENTUSIASMO DE VER

REALIZADO MI ANHELO.

MI SINCERO AGRADECIMIENTO AL
ING. EZEQUIEL OLVERA RAMIREZ. ASESOR DE TESIS.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
EN LA CUAL ADQUIRI LOS CONOCIMIENTOS NECESA-
RIOS PARA MI FORMACION PROFESIONAL.

A LA ENEP ARAGON INGENIERIA
ESPECIALMENTE AL LABORATORIO DE CONVERSION
DE ENERGIA ELECTROMECHANICA.

AL ING. SABINO ORTEGA MONJARAS
POR TODO ESE CUMULO DE CONOCIMIENTOS QUE
CON TESON Y CARINO POR LA ENSEÑANZA Y LA
TECNICA DESARROLLA.

AL ING. A. GIL BENITEZ
POR SU AYUDA DESINTERESADA.

A MIS MAESTROS
QUIENES EN SU JARDIN
SEMBRARON SEMILLAS DE ROSAS
A QUIENES CUIDARON Y MOLDEARON
DANDOLES SU SABIDURIA, ENSEÑAN
DONOS A DESENVOLVERNOS PARA --
ABRIRNOS CAMINO.

PARA MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS
DE SIEMPRE.

JUAN CARLOS TINOCO
ALEJANDRO GUERRERO VARGAS
NESTOR FLORES VAZQUEZ
FCO. JAVIER MORALES GARCIA
ENRIQUE TREJO GARCIA
RAFAEL ZARAGOZA RUVALCABA.

A CARMEN ROJAS ZAMORA E HIJAS
CARMEN Y ANTONIETA

POR SU CONSTANTE APOYO MORAL.

A MIS AMISTADES QUE CON SU BUENA
FE CONTRIBUYERON PARA HACER POSI
BLE EL PRESENTE ESTUDIO.

I N D I C E

1. INTRODUCCION

- a) Importancia de los transformadores en el progreso o de sarrollo actual.
- b) Objetivo de la determinación de las constantes de dise ño del transformador a partir de pruebas.

2. PERDIDAS ELECTRICAS

- a) Medición de la resistencia Ohmica.
- b) Pérdidas eléctricas y por ciento de impedancia
- c) Densidad de corriente.

3. PERDIDAS MAGNETICAS

- a) Determinación de las pérdidas magnéticas y corriente de excitación.
- b) Densidad de flujo.
- c) Prueba de temperatura (elevación de temperatura).

4. DETERMINACION DE DISTANCIAS DIELECTRICAS.

- a) Potencial aplicado
- b) Potencial inducido

5. DETERMINACION DEL NUMERO DE VUELTAS

a) Relación de transformación

b) Método para la determinación de vueltas del primario -
así como las del secundario.

6. DETERMINACION DE DIMENSIONES DE LAS BOBINAS.

a) Determinación de los W/lb

b) Determinación de las constantes de diseño.

7. CONCLUSIONES

8. BIBLIOGRAFIA.

1.

CAPITULO I

I INTRODUCCION

CAPITULO I

a) Importancia de los transformadores en el progreso o desarrollo actual.

Evaluación del Sector Eléctrico.

México crece aceleradamente, un ambiente de dinamismo envuelve al país: cada vez más tupida la red de comunicaciones y la industrialización en México y el mundo entero imponen al sector eléctrico el deber de incrementar su capacidad para hacer frente a las demandas crecientes de energía.

Amplia perspectiva de la electricidad

Factor determinante en el desarrollo de los pueblos, la electricidad se instala en la historia reciente y en el futuro -- próximo de la sociedad como el eje de lo que se ha hecho y lo que se hará en los campos de la industria, la recreación y la cultura. Su aportación será mayor, seguramente en un mundo -- que de antemano está siendo diseñado para la automatización -- en grado máximo y que hará al ser humano más favorecido, pero también mas dependiente de la electricidad.

La energía eléctrica solo se puede transmitir a largas distancias , económicamente empleando ALTAS TENSIONES.

En general debido a sus fuentes de energía (Agua, petróleo, - gas, etc.) Las grandes estaciones generadoras se encuentran muy separadas de los centros consumidores.

Para transmitir de manera económica considerables cantidades de energía hasta las regiones de consumo, se necesitan tensiones; si estas tensiones no fueron sumamente altas se tendrían, por tanto conductores con diámetros exagerados, al grado de - que se haría casi imposible técnicamente su construcción.

No se pueden generar las altas tensiones que se requieren en generadores eléctricos ya que solo llegan normalmente a 13.2KV KV, debido a factores de seguridad y su dificultad de aislamiento.

En las instalaciones de corriente alterna destinadas al suministro de energía, son precisos los CENTROS TRANSFORMADORES, - cuya misión es la de elevar el voltaje de los generadores en las centrales de producción con el fin de efectuar el transporte de la corriente en condiciones económicas, o de reducir la tensión al valor conveniente para el funcionamiento de los receptores, que lo hacen generalmente con bajo voltaje.

El elemento principal en los CENTROS TRANSFORMADORES es el -- transformador que se define como sigue:

El transformador es una máquina estática de inducción en la - cual la energía eléctrica es transformada en sus dos factores

tensión e intensidad. Es decir son aparatos destinados a -- transformar una corriente alterna en otra de la misma frecuencia, siendo diferente los valores de la fuerza electromotriz a la entrada y a la salida del aparato generalmente.

Constan de un núcleo de hierro dulce laminado (Acero al silicio), cerrado entre si mismo, sobre el cual se arrollan dos circuitos: El primario y el secundario. Si el primario es recorrido por una corriente alterna, producirá en el núcleo -- un flujo de inducción alterna.

En el secundario se creará entonces una corriente inducida -- que, en virtud de la ley de Lenz, tenderá a crear un flujo -- magnético opuesto igualmente alterno. La corriente inducida en el secundario será pues, alterna y de la misma frecuencia que la corriente primaria.

UTILIZACION DE LOS TRANSFORMADORES

El transporte de la energía a largas distancias tiene el problema de grandes pérdidas por el efecto Joule, $R.I.^2$.

Si la intensidad de la corriente es muy grande, estas pérdidas son elevadas. No puede disminuirse fácilmente R , por que ello equivaldría a aumentar la sección de los hilos de la línea, lo que resultaría extremadamente costoso por lo tanto es más conveniente disminuir la corriente. Además para transmitir la potencia $P=VI$, siendo V la diferencia de potencial en-

los bornes del generador, hace falta aumentar V a mismo tiempo que se disminuye I ; de ahí el empleo de los transformadores. El elevador de tensión se utiliza a la salida del generador, y el reductor de tensión a la entrada de los aparatos de utilización.

La facilidad con que los transformadores permiten modificar a voluntad la tensión de una corriente alterna es la razón de la superioridad indiscutible de la corriente alterna sobre la corriente continua, desde el punto de vista de la transmisión de la energía eléctrica.

b) Objetivo de la determinación de las constantes de diseño del transformador a partir de pruebas.

El presente trabajo justo cuando el país sufre una crisis económica que parte fundamentalmente de una dependencia tecnológica del exterior. Siendo ahora cuando los mexicanos debemos darnos cuenta de la importancia que tiene el crear nuestra propia tecnología, aprender a conocer bien el equipo ya existente y repararlo, en vez de estar comprando maquinaria nueva que ocasiona pérdidas económicas.

El presente trabajo trata de ubicar uno de los tantos trabajos que se realizan en las escuelas superiores, particularmente en la ENEP-ARAGON y adecuar ó adaptar dichos trabajos a la realidad industrial.

Como mencioné anteriormente el presente trabajo pretende despertar la inquietud de relacionar cada vez mas la teoría con la práctica y no que todos los conocimientos se queden a un nivel exclusivamente técnico.

Esto es un esfuerzo para poder o para demostrar la aplicación que tiene o la función específica de los laboratorios de Conversión, particularmente del "Laboratorio de Conversión de -- Energía Electrica II".

Dicho laboratorio realiza un trabajo enfocado en un 80% hacia pruebas realizada a transformadores.

Actualmente es ya una necesidad poder determinar si un equipo trabaja con un grado de eficiencia adecuado, o si se encuentra en buenas condiciones para funcionar. Para construir un --- transformador primero calculamos las constantes y después procedemos a construir éste.

En nuestro caso mediante pruebas determinaremos las constantes bajo las que fue diseñado y luego determinaremos cual fue el diseño bajo el que se construyó dicho transformador.

El conocer esto nos da facilidades para determinar si trabaja eficientemente dichos transformador y que mejoras se le pueden hacer, etc.

Como es sabido el rendimiento de los transformadores se define, como en cualquier otro aparato o máquina, por la relación

entre la potencia de salida y la potencia de entrada. A la primera la llaman también algunos potencia efectiva, potencia útil, potencia utilizable entregada, potencia cedida, potencia generada y potencia emitida. A la segunda se la llama también potencia tomada, potencia recibida y potencia absorbida.

$$\text{Rendimiento} = \frac{W}{W_a} \times 100$$

W = Watts efectivos

W_a = Watts absorbidos

Como los rendimientos de los transformadores son muy elevados, llegando al 98.8%, en los de potencia media del 95%, para obtener su rendimiento se utiliza la siguiente fórmula.

$$\text{Rendimiento} = \frac{W_a - W_p}{W_a} \times 100$$

W_a = Watts absorbidos

W_p = Watts perdidas

los Watts perdidos son, lo que se llaman pérdidas: en el hierro y en el cobre. Si estas pérdidas se conocen separadamente, también puede usarse la fórmula.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia Útil}}{\text{Pot. Útil} + \text{pérdidas en el hierro} + \text{pérdidas en el cobre}} \times 100$$

El rendimiento de los transformadores no es constante, sino que varía ligeramente con la carga. Los transformadores de distribución suelen construirse en forma que el máximo rendimiento corresponda aproximadamente a su funcionamiento a me--

dia carga, sea algo menor a plena carga, disminuya a $1/2$.

LA VARIACION DEPENDE PRINCIPALMENTE DE LOS MODULOS (Constantes de diseño) ADOPTADOS PARA SU CONSTRUCCION.

La potencia de un transformador se expresa de modo general, - como en todas las máquinas o aparatos eléctricos en Watts, o Kw, pero cuando se quiera precisar en la práctica se expresa en kilovolt amperios (Kva), puesto que, la potencia utilizable es sólo la nominal en Kw cuando el transformador alimenta a un circuito con un factor de potencia igual a 1.

PERDIDAS

Las pérdidas en los transformadores tienen lugar en cada uno de sus 2 materiales activos: en el hierro del núcleo y en el cobre de los arrollamientos.

Pérdidas en el hierro: llamadas también pérdidas en núcleo. - Son debidas a dos causas:

- a) Pérdidas por histeresis
- b) Pérdidas por corrientes parasitas llamadas también corrientes vagabundas y corrientes foucalt.

PERDIDAS TOTALES EN EL NUCLEO.

Como las corrientes de Foucalt y la histeresis producen efectos análogos, se consideran frecuentemente en conjunto, como-

pérdidas en el hierro o en el núcleo. Para suplir tales pérdidas se requiere del arrollamiento primario una componente de la corriente, en fase con la f.e.m. aplicada, de un valor tal que multiplicada por dicha f.e.m. dé un producto igual a los watts perdidos en el núcleo. Por lo tanto la corriente absorbida por las pérdidas en el núcleo puede calcularse inmediatamente si se han determinado separadamente las pérdidas por histéresis y por las corrientes parasitas.

Corriente absorbida por las pérdidas totales en el núcleo = $\frac{P_h + P_p}{E}$

P_h = Pérdidas por histéresis

P_p = Pérdidas por corrientes parasitas

E = Tensión aplicada

En la práctica, los fabricantes de transformadores indican en sus listas o catálogos el valor en watts, de las pérdidas en vacío y el de las pérdidas totales a plena carga. Las pérdidas en vacío corresponden, en su casi totalidad a las pérdidas en el núcleo, ya que las pérdidas en el núcleo, esto es las pérdidas en el cobre del arrollamiento primario, cuando el transformador funciona en vacío, son tan insignificantes que escasamente representan un 0.20% de las pérdidas en el cobre del transformador con carga.

Pérdidas en el núcleo con relación a su peso.

Se observa que tanto las pérdidas por histeresis, como las --
corrientes vagabundas dependen, como era lógico suponer, del-
volumen del material magnético empleado en el núcleo.

Es muy útil formarse una idea aproximada de lo que suponen --
las pérdidas en relación, no ya con el volumen, sino con el -
peso del núcleo. Una característica de calidad en los trans-
formadores es la de que tengan las menores pérdidas por Kg. -
en el núcleo, en comparación con las de otros transformadores
de la misma potencia y del mismo tipo de acero al silicio.

PERDIDAS EN EL COBRE.

Los conductores de los arrollamientos, casi siempre de cobre,
salvo en épocas de escasez de este metal en que se emplea alu-
minio, ocasionando pérdidas por efecto Joule, del mismo valor
que si se tratase de corrientes continuas, es decir que su --
magnitud depende del cuadrado de la intensidad de corriente -
y de la resistencia eléctrica del conductor.

Además se producen en los arrollamientos pérdidas adicionales,
por que parte de las líneas de fuerza de los campos, atravie-
san el cobre provocado en su masa corrientes parásitas. La -
forma de los campos de dispersión y por lo tanto, la magnitud
de dichas pérdidas adicionales, es difícil predecirla "a - --
prior"; a veces son del orden del 10% de las pérdidas por = -
efecto Joule, pero generalmente son menores.

Consideraciones relativas a las pérdidas en el hierro y en el cobre.

Como ya mencionamos, las pérdidas en el hierro pueden disminuirse aumentando el volumen del núcleo, pero al aumentar las longitudes de las espiras medias de los arrollamientos se aumenta la longitud total de éstos y, por lo tanto, las pérdidas en el cobre. Las cantidades relativas de hierro y de cobre a utilizar en un transformador dependen del servicio a -- que se destine. Por lo general, los arrollamientos deberán calcularse para que las pérdidas totales en el cobre, a plena carga, sean del 90% al 200% de las pérdidas totales en el hierro.

En cualquier caso el rendimiento máximo se obtiene a la carga en que las pérdidas en el cobre son iguales a las pérdidas en el hierro.

En este trabajo realizaremos primero las pruebas de pérdidas eléctricas, después las pruebas magnéticas y por último obtendremos las constantes de diseño.

Hablaremos por lo tanto de pruebas a transformadores.

El buen servicio que pueda dar un transformador en operación depende de la calidad de sus componentes (Conductores, núcleo, aislamientos, etc.) el nivel de pérdidas (que es posible reducirlo a un valor mínimo) y el equilibrio entre las pérdidas -

y el sistema de enfriamiento.

La confiabilidad del equipo depende en gran parte "en las - - pruebas de control de calidad", y que tienen por objeto:

- Verificación de las partes constitutivas del transformador-
y EVALUACION DE SUS PARAMETROS.
- Verificación de los aislamientos y su resistencia a los diversos fenómenos que ocurrirán durante la operación.
- Evaluación de los niveles de pérdidas, regulación y eficiencia.
- Verificación del equilibrio entre el nivel de pérdidas y la disipación del sistema de enfriamiento.

Cuando una fábrica de transformadores produce una línea de un número grande de unidades iguales, el control de calidad del producto debe establecer las pruebas que se llevarán a cabo, - en base a la clasificación que establecen las normas y mediante un acuerdo con el comprador:

Algunos aspectos por verificar podrían limitarse a una sola - unidad, la cual se considera representativa del conjunto, y - que se denomina "prototipo".

Otros, en cambio será necesario verificarlos en todas y cada- una de las unidades de producción y por último algunas prue-- bas se harán solo a petición del cliente.

De aquí que las pruebas se clasifiquen en:

Pruebas Prototipo, Son las efectuadas a un transformador que es representativo de toda una línea de producción , para demostrar que todas las unidades de la línea cumplen los requisitos especificados no cubiertos en la prueba de rutina. Sin embargo, el prototipo debe pasar también las pruebas de rutina para su aceptación.

- Pruebas de Rutina. Son las que se deben aplicar a todas y cada una de las unidades de producción.
- Pruebas Opcionales. Son pruebas establecidas por las normas y que se efectuarán sólo a petición del comprador con objeto de verificar características específicas del equipo.

La lista anterior muestra la totalidad de pruebas especificadas en la norma, sin embargo, el comprador puede contratar con el fabricante cuales las, que desea que se efectuen, con lo que tenemos otros dos grupos en la clasificación.

- Pruebas de aceptación. Son aquellas que demuestran a satisfacción del comprador que el transformador cumple con las especificaciones.
- Pruebas especiales. Son pruebas distintas a las de rutina y prototipo, acordadas entre el fabricante y el comprador, aplicables únicamente a uno o mas transformadores de un contrato particular. Este caso puede presentarse princi--

| P R U E B A S | DISTRIBUCION | | | POTENCIA | | |
|--|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| | PROTO TIPO | DE RU TINA | OPCIO NAL | PROTO TIPO | DE RU TINA | OPCIO NAL |
| Características de los componentes | X | | | X | | |
| Características físicas del conjunto | | X | | | X | |
| Resistencia Ohmica | X | | | X | | |
| Resistencia de los aislamientos | | X | | | X | |
| Relación de transformación | | X | | | X | |
| Polaridad o Secuencia de fases | | X | | | X | |
| Pérdidas de excitación | | X | | | X | |
| Corriente de Excitación | | X | | | X | |
| Pérdidas de carga | | X | | | X | |
| Impedancia | | X | | | X | |
| Elevación de Temperatura | X | | | X | | |
| Rigidez dieléctrica de aceite | | X | | | X | |
| Potencial aplicado | | X | | | X | |
| Potencial inducido | | X | | | X | |
| Impulso (*) | X | | X | X | | X |
| Hermeticidad | | X | | X | | |
| Vacio | | | | X | | |
| Operación y calibración de los accesorios | | X | | | X | |
| Factor de potencia del aceite | | X | | | X | |
| Factor de potencia de los aislamientos | | | X | | | X |
| Nivel de ruido | | | X | | | X |
| Pérdidas, corriente de excit. e Imped. a tensiones, cargas o frec. distintas de las nominales. | | | X | | | X |
| Elevación de temp. a capacidades distintas de las nominales | | | X | | | X |

* Las pruebas de impulso se deben hacer solamente a solicitud del comprador y en los devanados que se especifique.

palmente en productos de exportación, en que el comprador - solicite las pruebas según normas vigentes en su país.

Haremos las pruebas mínimas necesarias para poder obtener los datos que necesitamos. Además estas pruebas mínimas necesarias son estipuladas por normas.

Dichas pruebas que realizariamos son:

Pérdidas eléctricas

- a) Medición de la resistencia ohmica.
- b) Obtención de las pérdidas eléctricas y por ciento de impedancia.
- c) Prueba de temperatura

Pérdidas magnéticas

- a) Determinación de las pérdidas magnéticas.

CAPITULO II

En los siguientes capítulos iremos mencionando las diversas - pruebas que nos ayudarán a la obtención de las constantes que andamos buscando.

Hay que hacer mención de que los devanados de nuestro transformador son de aluminio.

Iremos dando teoría para ir apoyándonos y así poder entender algunas pruebas. En el presente capítulo hallaremos la resistencia a 75°C , encontraremos las pérdidas totales de carga y las pérdidas ohmicas, también hablaremos de la densidad de corriente.

CARACTERISTICAS ELECTRICAS.

Las principales características eléctricas son:

- Pérdidas en vacío
- Pérdidas en carga
- Pérdidas totales
- Impedancia.

Generalmente se especifican límites para estas características que el fabricante mismo sugiere.

El porcentaje de impedancia necesita ser fijado cuando la unidad va a operar en paralelo con otras existencias, a fin de asegurar la división correcta de la carga total.

Estas características se irán obteniendo en el desarrollo del

presente trabajo.

Caida Ohmica V_R en los devanados

Viene dada en volts por $V_R = RI$

R es la resistencia del devanado en Ω (Ohms), e I, la corriente en amperios.

Pérdidas eléctricas

Dentro de las pérdidas eléctricas podemos considerar.

a) pérdidas de energía debidas al calentamiento del conductor de los devanados.

El devanado de alta tensión estará formado por un conductor largo y delgado, debido al número elevado de vueltas y a la corriente, baja que circula por él, por tanto debe tener una resistencia apreciable, de acuerdo con la formula.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

ρ = resistividad del material (devanado)
 l = longitud en mt.
 A = Area de sección transversal del conductor

Esta resistencia según el tamaño del transformador puede estar comprendida entre fracciones de ohm, y algunas decenas de ohm. El devanado de baja tensión es de menor longitud y más grueso que el de alta tensión, de manera que su resistencia -

es apreciablemente menor.

La medición de estas resistencias se verá en este capítulo.

La combinación de éstas resistencias y la corriente que circula por ellas, produce calentamiento en los conductores, de acuerdo con el efecto Joule.

$$W = RI^2$$

Medición de la resistencia ohmica

La medición de estas resistencias es de fundamental importancia para 2 propositos.

- a) Para el cálculo de las pérdidas en el cobre, ya que se empleará, en la ecuación I^2R .
- b) Para la determinación de la temperatura de los embobinados al final de la prueba de temperatura.

Es recomendable medir la resistencia ohmica en frio antes que ninguna otra prueba, para garantizar que no ha habido causas de precalentamiento de los embobinados, y así el valor medido corresponderá a la temperatura ambiente.

Es por tanto necesario para la primera medición de resistencia, verificar que el transformador:

- No ha sido excitado durante un tiempo de 4 a 8 horas (de acuerdo al tamaño del transformador) antes de la prueba.

- Esté situado en un área donde la fluctuación de temperatura sea mínima.

Para la medición de resistencia ohmica se recomiendan 2 métodos.

1º Método de la caída de potencial (Ley de OHM)

2º Uso del puente Kelvin

METODO DEL PUENTE KELVIN

El uso de puentes para la medición de resistencias presenta ventajas notables con respecto al método de la caída de potencial y practicamente ninguna desventaja.

Entre las ventajas sobresalientes podemos mencionar.

- Mayor precisión
- Conexión sencilla
- Circulación de corriente de muy pequeña intensidad
- Mayor rapidez en la prueba.

El puente Kelvin tiene un rango de medición desde fracciones de ohm muy pequeñas hasta unos cuantos ohms. Tiene la ventaja de tener una línea por la que circula la corriente, y otra línea distinta para detectar la caída de potencial.

Esta última línea se conecta a las terminales del devanado bajo prueba, lo cual hace que la medición no incluya la caída en los cables de conexión.

Esta es la razón por lo que se recomienda el puente de Kelvin para medición de resistencias pequeñas.

La circulación de corrientes de pequeña intensidad no provoca calentamiento del devanado, por lo que este método se recomienda para todos los casos, incluyendo transformadores cuya corriente nominal sea menor que un ampere.

DESARROLLO DE LA PRUEBA.

Las pruebas que se llevarán a efecto son aplicables a todos los transformadores de cualquier capacidad, la única variante serán la capacidad de los instrumentos de medición.

Aquí hablaremos de las pruebas efectuadas a un transformador-trifásico con las siguientes características.

Capacidad — 7500 KVA

Fases — 3

Tipo OA-FA

Volts — 34400/4160

Configuración — delta — estrella

Mas adelante daremos las características

Totales del transformador.

PROCEDIMIENTO

- Lo primero para efectuar esta prueba es consultar el ins- -

tructivo de manejo del puente.

Instructivo de operación (Puente de Kelvin)

1.- Prepararse a la medición, ajustando

- a) El interruptor BA en off, también GA deberá estar en off
- b) Ponga el indicador GA (indicador de sensibilidad d) en la posición CH y compruebe que la aguja se desvié hacia la Zona azul, si la aguja no se desplazará a la Zona azul habra que checar la batería y cambiar la si es necesaria.
- c) Colocar el indicador GA en posición GZ y comprobar si la - aguja se estabiliza en cero.
- d) Se debe tener la seguridad que las terminales INVA estan - en corto circuito y que las terminales P25 también lo es-- tén.

MEDICION

- Conecte la resistencia desconocida en terminales Rx (dos -- terminales para corriente y dos para potencial)
- Coloque el interruptor BA en ON y presione el interruptor - GA (esto es después de haber colocado la clavija del factor multiplicador en la cavidad correspondiente).
- Ajuste el indicador de medición hasta que el galvanometro - indique cero. Si se requiere una mayor sensibilidad, colo- que el indicador GA en posición G, y Go.

Una vez que el galvanometro indique cero, soltar el interruptor GA, y ya se puede desconectar el puente de Kelvin, colocando BA en posición Off;

- El valor de la resistencia será la lectura del dial por el factor multiplicativo.

NOTA: Recomendaciones que siempre se deberán cumplir.

- Abrir el interruptor del galvanometro
- Abrir el interruptor de corriente
- Nunca olvide colocar GA en Off y BA en Off (en ese orden - una vez concluida la prueba).

Una vez leído el instructivo se procede de la sig. Forma.

Se debe identificar las terminales de alta tensión y las de -
baja tensión del transformador en prueba.

- Se mide la resistencia en alta tensión así como la de baja-
tensión.

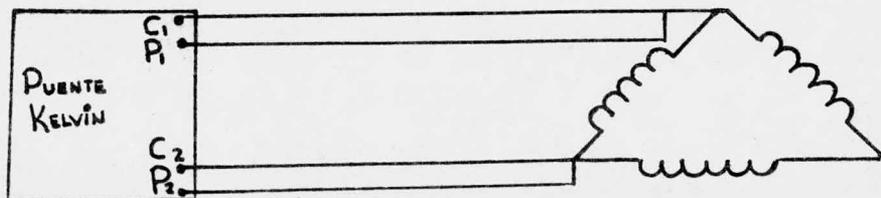
Medición de la resistencia Ohmica. (Prueba)

En primer termino iniciaremos con la medición de la resisten-
cia en la alta tensión y posteriormente se hará la medición -
en el lado de baja tensión.

| | | |
|---|-------------------------------------|----------|
| Número de terminales en alta tensión | <u>3</u> | |
| Circuito de los devanados de alta tensión | <u>Δ</u> | delta |
| Número de terminales en baja tensión | <u>4</u> | |
| Circuito de los devanados de baja tensión | <u>\sphericalangle</u> | estrella |

Alta tensión

Como se tiene un circuito delta, por lo consiguiente se hará-
físicamente, como se indica en la siguiente ilustración

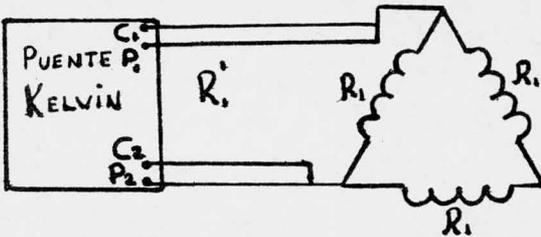


* Conexión del puente Kelvin para la medida de la resistencia

ohmica en transformador trifásico en conexión delta.

Para las mediciones realizadas, llamaremos R_1^1 al valor de la resistencia medida de acuerdo a las lecturas, y R_1 al valor de la resistencia de fase.

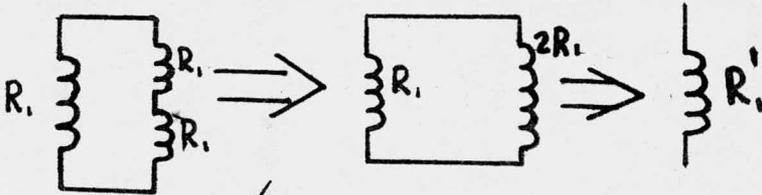
Por lo tanto para poder encontrar el valor de la resistencia tenemos que hacer el siguiente cálculo.



La resistencia que se mide con el puente no es la de fase sino que se mide una resistencia equivalente R_1^1

R_1 = Resistencia de fase

R_1^1 = Resistencia equivalente total (resistencia medida)



$$R_1^1 = \frac{R_1 (2R_1)}{R_1 + 2R_1} = \frac{2R_1}{3} = \frac{2R_1}{3}$$

luego entonces para encontrar R_1 despejamos

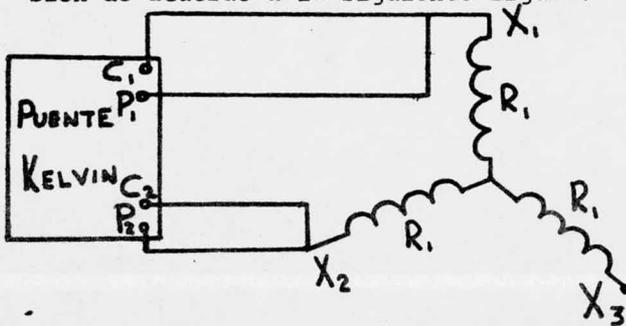
$$R_1 = \frac{3}{2} R_1^1$$

- Se toma la lectura y se anota en la tabla respectiva

- Se repite la medición para los demás pares de terminales de alta tensión y se anotarán solo valores.

BAJA TENSION

- Después de haber realizado mediciones en alta tensión, se cambian las conexiones a dos de las terminales de baja tensión de acuerdo a la siguiente figura.



Conexiones del --
puente Kelvin pa--
ra la medida de --
la resistencia --
ohmica en trans--
formador 3 Ø con --
conexión estrella

Para las mediciones realizadas llamaremos R^1 al valor de la resistencia encontrada, al efectuar las lecturas, y R_1 al valor de la resistencia de fase.

Por lo tanto para poder encontrar el valor de la resistencia tenemos que hacer los cálculos respectivos.

A continuación mostramos los valores arrojados en las lecturas y los calculos de resistencia de fase, en las diversas derivaciones del devanado de alta, tensión y los resultados ob-

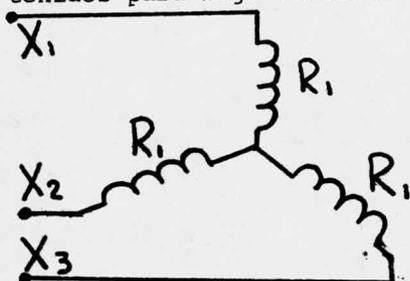
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA OHMICA.

RESISTENCIA OHMICA : ALTA TENSION (5 posiciones).

METODO DE PRUEBA : PUENTE DE KELVIN.

| TERMINALES | LECTURA | RESISTENCIA DE FASE |
|---------------------------------|---------|---------------------|
| H ₁ - H ₂ | 0.764 | 1.146 |
| H ₂ - H ₃ | 0.764 | 1.146 |
| H ₃ - H ₁ | 0.764 | 1.146 |
| H ₁ - H ₂ | 0.74 | 1.11 |
| H ₂ - H ₃ | 0.74 | 1.11 |
| H ₃ - H ₁ | 0.74 | 1.11 |
| H ₁ - H ₂ | 0.726 | 1.09 |
| H ₂ - H ₃ | 0.726 | 1.09 |
| H ₃ - H ₁ | 0.726 | 1.09 |
| H ₁ - H ₂ | 0.708 | 1.06 |
| H ₂ - H ₃ | 0.708 | 1.06 |
| H ₃ - H ₁ | 0.708 | 1.06 |
| H ₁ - H ₂ | 0.69 | 1.04 |
| H ₂ - H ₃ | 0.69 | 1.04 |
| H ₃ - H ₁ | 0.69 | 1.04 |

tenidos para baja tensión.



La resistencia medida R_1^1 es igual a $2 R_1$

Por lo tanto procederemos a encontrar el valor de la resistencia de fase.

$$R_1^1 = \text{Resistencia medida} = 2 R_1$$

$$R \text{ de fase} = R_1 = \frac{R_1^1}{2}$$

- Se toma la lectura y se anota en la tabla sig.
- Se repite la medición para los demas pares de terminales de baja tensión y se anotarán sus valores.

Resultados de la prueba de resistencia ohmica

Resistencia ohmica: Baja tensión.

Método de prueba: Puente Kelvin

| Terminales | Lectura | (OHMS) | Resistencia de fase |
|-------------|---------|--------|---------------------|
| $X_1 - X_2$ | 0.0092 | | 0.0046 |
| $X_2 - X_3$ | 0.0092 | | 0.0046 |
| $X_3 - X_1$ | 0.0092 | | 0.0046 |

Al efectuar cálculos o medidas de las resist. de los arrollamientos para determinar las pérdidas en el cobre, conviene re

ferirlas a la temperatura de 75°C. Debe hacerse notar que las resistencias de los arrollamientos se habrán medido a la temperatura, ambiente, pero no a la que alcanzará el transformador cuando se halla en funcionamiento.

Que como es natural, será muy superior. Las normas corrientes exigen que se considere como temperatura máxima la de 75°C, y por ello se utilizará la formula siguiente.

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = R_{\text{T.A.}} \left(\frac{K_m + 75}{K_m + T_A} \right)$$

K_m = constante de dilatación térmica

para el aluminio es igual a 225

T.A. = temperatura Ambiente

$$R_{75^{\circ}} = R_{20^{\circ}\text{C}} \left(\frac{225 + 75}{225 + 20} \right)$$

Alta tensión (Valor resistivo de todo el devanado)

$$R_{75^{\circ}} = 3.438 \left(\frac{300}{245} \right) = 4.21 \text{ posición extrema superior}$$

$$R_{75^{\circ}} = 3.348 \left(\frac{300}{245} \right) = 4.1 \text{ posición 2}$$

$$R_{75^{\circ}} = 3.27 \left(\frac{300}{245} \right) = 4.01 \text{ posición 3}$$

$$R_{75^{\circ}} = 3.19 \left(\frac{300}{245} \right) = 3.91 \text{ posición 4}$$

$$R_{75^{\circ}} = 3.12 \left(\frac{300}{245} \right) = 3.82 \text{ posición 5}$$

Resistencia Baja tensión (Valor resistivo de todo el devanado)

$$R_{75^{\circ}} = R_{20^{\circ}} \left(\frac{225 + 75}{225 + 20} \right)$$

B.T

$$R_{75^{\circ}} = 0.0134 \left(\frac{300}{245} \right) = 0.0165$$

Como nuestro objetivo es hallar el diseño con el que fue fabricado, es por eso que estamos obteniendo la resistencia a 75°C. Ya hablamos que para efectos de diseño se utiliza la resistencia a la temperatura ya citada.

Esta resistencia la utilizaremos para poder hallar las pérdidas ohmicas.

b) Pérdidas eléctricas y porcentaje de impedancia.

El transformador en operación es afectado por 2 conjuntos de pérdidas que son como ya hemos mencionado las pérdidas eléctricas y las pérdidas magnéticas. En este inciso nos referiremos a las eléctricas.

Cuando circulan corrientes por los devanados del transformador (y además para esta prueba que ahora iniciamos nos interesan en particular las intensidades nominales), debido a que tienen una cierta resistencia, como vimos en la prueba de medición de resistencia óhmica, los devanados sufren un calentamiento, cuya energía se disipa al medio ambiente, constituyendo una pérdida.

Estas pérdidas son conocidas como pérdidas eléctricas o pérdidas de carga. Su magnitud sin embargo, no podemos calcularla como la suma de productos I^2R

donde

I = corrientes nominales

R = resistencia óhmica medida en el inciso a)

Dado que cuando circula una corriente alterna por un conductor, tiende a debilitarse en el centro del mismo y en cambio se intensifica hacia la región periférica, lo que ocasiona -- que la resistencia efectiva a la corriente alterna sea mayor -- que la resistencia óhmica, y por tanto las pérdidas de carga

son mayores que la suma de productos I^2R .

Por tanto, podemos considerar que las pérdidas de carga (P) - tienen 2 componentes, una por suma de productos I^2R que serían las pérdidas óhmicas (P_R) y otra las pérdidas indeterminadas (P_i).

$$P = P_R + P_i$$

Las pérdidas óhmicas (suma de productos I^2R) se calculan a - partir de las corrientes nominales de cada devanado y su respectiva RESISTENCIA OHMICA MEDIDA anteriormente.

Las pérdidas indeterminadas se obtienen restando las pérdidas óhmicas de las pérdidas de carga obtenidas en esta prueba.

Es necesario entonces, medir por medio de una prueba, el monto de las pérdidas de carga para poder conocer su valor.

La prueba se efectúa poniendo en corto circuito el lado de baja tensión, y alimentando por el lado de alta tensión un voltaje reducido de tal valor que se haga circular la corriente nominal a la frecuencia nominal.

De esta manera logramos que circule en todos los embobinados su respectiva corriente nominal. La potencia a que consume - el transformador en estas condiciones, representa las pérdidas eléctricas.

Usualmente el voltaje de alimentación está comprendido entre uno y el 15% del voltaje nominal.

Los aparatos de medición se incluyen en el circuito de alimentación y són

Para transformadores trifásicos

- Un frecuencímetro
- 3 Amperímetros
- Dos ó 3 wattímetros
- Un voltímetro de valor eficaz

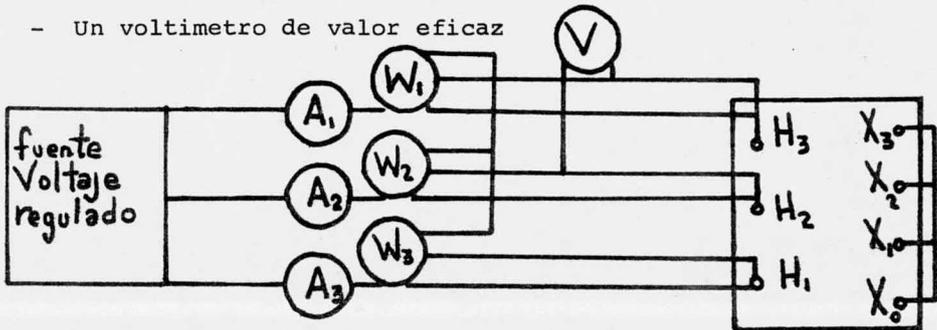


Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas eléctricas por el método de 3 wattímetros en un transformador trifásico.

Porcentaje de Impedancia.

Este es un parámetro del transformador muy útil para el análisis de su comportamiento cuando se integra a un sistema eléctrico, y para el cálculo de corriente de corto circuito.

Su valor se puede obtener en esta prueba de una manera muy sencilla, según la siguiente fórmula.

$$\% Z = \frac{\text{Voltaje de prueba}}{\text{Voltaje nominal}} \times 100 \%$$

Este parámetro debe estar incluido en las especificaciones de placa del transformador, y el objeto de calcularlo en esta -- prueba es verificar su valor.

Además, cuando encontramos esta especificación en la placa, -- nos permite estimar el voltaje de prueba para efecto de selec-- ción de instrumentos

$$V_{pr} = \frac{\% Z}{100} V_{nom.}$$

Desarrollo de la prueba

a) Método de 3 wattímetros

- Selección de los instrumentos de prueba, de acuerdo a los ran-- gos de las cantidades por medir
- Se conecta el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de-- conexiones anterior. Si utilizamos la conexión del neutro-- flotante, verificar que los 3 wattímetros sean iguales.

NOTA: Al energizar el transformador vamos a hacer circular -- la corriente nominal, lo que ocasiona elevación de temperatu-- ra, y a medida que esto ocurre, cambian las medidas de los -- instrumentos, por lo que se recomienda que una vez obtenida -- la corriente nominal rápidamente se tomen todas las lecturas.

- Energice la fuente y aumente gradualmente el voltaje hasta obtener la corriente nominal. Se toman las lecturas y se anotan en la siguiente tabla.

Pérdidas eléctricas

| f | A ₁ | A ₂ | A ₃ | W ₁ | W ₂ | W ₃ | V | temp. |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|-------|
| 60 | 119.85 | 119.83 | 119.86 | 14878 | 14878 | 14879 | 2070 | |

Datos para el devanado de Alta (36120V) ext. Superior.

- Las pérdidas eléctricas ó pérdidas de carga se cálculan sumando las lecturas de los 3 wattímetros.

$$\text{Pérdidas de carga} = W_1 + W_2 + W_3 = \text{Watts.}$$

- Las pérdidas óhmicas se obtienen mediante la suma de productos I^2R , siendo I las corrientes de:

Resultados obtenidos (alta tensión)

Devanado 1 (A.T.) ——— 36120 Volts

Devanado 2 (A.T.) ——— 35260 Volts

Devanado 3 (A.T.) ——— 34400 Volts

Devanado 4 (A.T.) ——— 33540 Volts

Devanado 5 (A.T.) ——— 32680 Volts



$$i_L = \sqrt{3} i_f$$

$$i_f = \frac{i_L}{\sqrt{3}}$$

| Pérdidas Eléctricas | | | | | | | | |
|---------------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| No. Devanado | f | A ₁ | A ₂ | A ₃ | W ₁ | W ₂ | W ₃ | V |
| 1 | 60 | 119.85 | 119.83 | 119.86 | 14878 | 14878 | 14879 | 2070 |
| 2 | 60 | 122.8 | 122.8 | 119.86 | 15039 | 15040 | 15040 | 2027.4 |
| 3 | 60 | 125.9 | 126 | 125.9 | 15243 | 15244 | 15243 | 1981.4 |
| 4 | 60 | 129.1 | 129 | 130 | 15419 | 15419 | 15419 | 1935.2 |
| 5 | 60 | 132.5 | 132.5 | 132.4 | 15643 | 15643 | 15644 | 1888 |

Pérdidas de carga

- 1 - - - - - W = 44635
 2 - - - - - W = 45119
 3 - - - - - W = 45730
 4 - - - - - W = 46257
 5 - - - - - W = 46930

fase y R los valores medidos en la prueba de resistencia - - -
 ohmica. (Con la resistencia ohmica corregida ya a 75°C).

La corriente de fase igual a la corriente nominal si el embobi-
 nado está conectado en estrella, o bién, igual a la corriente-
 nominal dividida entre $\sqrt{3}$ si esta conectado en delta. Con -
 estos valores obtenemos las pérdidas ohmicas.

Lado de alta tensión posición extrema superior.

$$i_f = \frac{i_L}{\sqrt{3}} \text{ Amp.} \quad R = 4.21 \quad I^2R = \text{watts } 20154$$

pérdidas

Lado de Baja Tensión

$$i_f = \frac{i_L}{\sqrt{3}} \text{ Amp.} \quad R = 0.0165 \quad I^2R = 18050 \text{ watts.}$$

Ohmicas

$$i_f = \frac{1045.9}{\sqrt{3}}$$

- Las pérdidas indeterminadas se calculan restando las pérdidas ohmicas de las pérdidas de carga

$$\text{Pérdidas indeterminadas} = \text{Pérdidas de carga} - \text{Pérdidas ohmicas.}$$

El porciento de impedancia se obtiene mediante la fórmula

$$\% Z = \frac{V_{\text{prueba}}}{V_{\text{nom}}} \times 100$$

Productos I^2R alta tensión

$$i_{f1} = \frac{i_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{119.846}{\sqrt{3}} = 69.19 \text{ Amp.} \quad R = 4.21$$

$$RI^2 = 20154$$

$$i_{f2} = \frac{i_{L2}}{\sqrt{3}} = \frac{122.8}{\sqrt{3}} = 70.908 \text{ Amp} \quad R = 4.1$$

$$RI^2 = 20610.12$$

$$i_{f3} = \frac{i_{L3}}{\sqrt{3}} = \frac{125.92}{\sqrt{3}} = 72.7 \text{ Amp.} \quad R = 4.01$$

$$RI^2 = 21194.613$$

$$i_{f4} = \frac{i_{L4}}{\sqrt{3}} = \frac{129.1}{\sqrt{3}} = 74.53 \quad R = 3.91$$

$$RI^2 = 21718.95$$

$$i_{f5} = \frac{i_{L5}}{\sqrt{3}} = \frac{132.5}{\sqrt{3}} = 76.5 \quad R = 3.82$$

$$RI^2 = 22355.595$$

% Z (A.T.) PORCIENTO DE IMPEDANCIA

| | | |
|----------|---|-------|
| Devanado | 1 | 5.73 |
| Devanado | 2 | 5.74 |
| Devanado | 3 | 5.758 |
| Devanado | 4 | 5.77 |
| Devanado | 5 | 5.77 |

$$1) \% Z = \frac{2070}{36120} \times 100 = 5.73$$

$$2) \% Z = \frac{2027}{35260} \times 100 = 5.74$$

$$3) \% Z = \frac{1981}{34400} \times 100 = 5.758$$

$$4) \% Z = \frac{1937}{33540} \times 100 = 5.77$$

$$5) \% Z = \frac{1888}{32680} \times 100 = 5.777$$

pérdidas indeterminadas

| | | |
|------------|----------------------|-----------------------------|
| Devanado 1 | $P_1 - P_{r1} = P_i$ | $44635 - 38204 = 6431$ |
| Devanado 2 | $P_2 - P_{r2} = P_i$ | $45119 - 38660.1 = 6458.9$ |
| Devanado 3 | $P_3 - P_{r3} = P_i$ | $45730 - 39244.6 = 6485.4$ |
| Devanado 4 | $P_4 - P_{r4} = P_i$ | $46257 - 39768.9 = 6488.1$ |
| Devanado 5 | $P_5 - P_{r5} = P_i$ | $46930 - 40405.59 = 6524.4$ |

donde

P = pérdidas de carga

P_r = pérdidas o'hmicas

$P_{r1} = P_{AT} + P_{BT}$

c) DENSIDAD DE CORRIENTE

Los electrones libres en un hilo metálico que transporta una corriente están uniformemente distribuidos, por todo el hilo, y la intensidad de corriente que transporta un hilo de sección constante está distribuida uniformemente a través de cualquier sección (excepto cuando la corriente es alterna, en cuyo caso hay una tendencia a concentrarse en la superficie). La corriente es una característica de un conductor dado. Es una cantidad macroscópica, como la masa de un objeto, o la longitud de una varilla. Una magnitud microscópica relacionada con lo anterior es la densidad de corriente;. Es un vector y es la característica de un punto dentro de un conductor, no es la característica del conductor en conjunto.

Iremos desglosando terminos y conceptos hasta llegar al que nos interesa, que es la densidad de corriente.

Debemos recordar que todas las leyes de electricidad y magnetismo son deducciones de sucesos experimentales y no simples deducciones matemáticas, en otras palabras, en electro magnetismo se cumple que: primero existe el experimento y después el modelo matemático ó ecuación que lo rige.

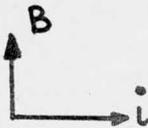
De acuerdo a lo anterior, la ley de Ampere se dedujo del experimento realizado por HANS CH. OERSTED.

EXPERIMENTO DE OERSTED

Oersted observó que una corriente que circula en un alambre produce efectos magnéticos sobre una brújula en su alrededor.



De la figura anterior vemos que si consideramos la corriente que sale del plano o entra a él la orientación de las brújulas es opuesta a una u otra formas de la circulación de la corriente. Aplicando la regla de la mano derecha podemos conocer la dirección del campo magnético, si conocemos la dirección de la corriente en el conductor.



Regla de la mano derecha: Si tomamos el conductor con el pulgar indicando la dirección de la corriente y el resto de los dedos alrededor del conductor, la dirección de enrollamiento de los dedos indicará la dirección del campo magnético.

Del experimento de Oersted se dibujo la dirección del campo magnético, pero falta conocer el valor de dicho campo; fué Ampere el que encontro una ecuación que da el valor del campo y de que depende, la relación es:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (2)$$

conocida como LEY DE AMPERE, cabe mencionar que esta ley fue obtenida y relaciona al campo magnético que produce una corriente en un conductor.

$$\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \frac{\text{Tesla-m}}{\text{ampere}}$$

i = la corriente que pasa por el conductor

r = la distancia radial del centro del conductor al punto donde se desea conocer el campo.

Dada la dependencia de la distancia y debido a que esta es constante en un circulo, la ecuación de la ley de Ampere se puede escribir como:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (3)$$

i es la corriente encerrada por la integral de línea, o sea, es la corriente que cruza el área encerrada por la integral de línea.

Definiendo al vector intensidad de campo magnético como:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} \quad (4)$$

podemos expresar la ley de Ampere como

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i \quad (5)$$

esta ecuación se conoce como ley circuital de Ampere y establece que la integral de línea del vector intensidad del campo magnético $\bar{\mathbf{H}}$ a lo largo de cualquier trayectoria cerrada, es exactamente igual a la corriente directa encerrada por la trayectoria. Aplicando el teorema de Stokes a la ecuación anterior tenemos:

$$\oint_C \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \int_S (\bar{\nabla} \times \bar{\mathbf{H}}) \cdot d\bar{\mathbf{s}} = \int_S \bar{\mathbf{J}} \cdot d\bar{\mathbf{s}} = i \quad (6)$$

donde

$$\bar{\nabla} \times \bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{J}} \quad \text{que es la densidad de corriente}$$

La dirección de $\bar{\mathbf{H}}$ es la misma que la del vector $\bar{\mathbf{B}}$, la dirección de $d\bar{\mathbf{l}}$ es optativa, según uno lo desee, pero al tener una dirección definida de $d\bar{\mathbf{l}}$, la dirección de $d\bar{\mathbf{s}}$ es dependiente de la de $d\bar{\mathbf{l}}$ y se encuentra aplicando la regla de la mano derecha, ya definida anteriormente la dirección de $\bar{\mathbf{J}}$ está dada -- por el rotacional de \mathbf{H} y si está bien la dirección de $\bar{\mathbf{H}}$, $\bar{\mathbf{J}}$ -- tendrá la dirección de la corriente al cruzar la superficie $d\bar{\mathbf{s}}$.

La densidad de corriente en el hilo, representada por \mathbf{J} , se define como la razón de la intensidad de la corriente a la -- sección transversal. Así

$$J = \frac{i}{A} = nev$$

v = velocidad

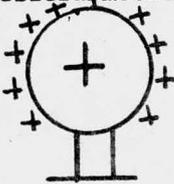
$$c = 1.6 \times 10^{-19}$$

En rigor, la ecuación anterior define la densidad media de corriente a través del Area A. Si la corriente no está distribuida uniformemente, se considera un área infinitesimal dA a través de la cual la intensidad di , y se define la densidad de corriente como

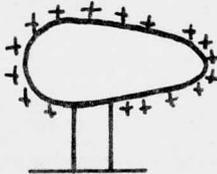
$$J = \frac{di}{dA}$$

Densidad Eléctrica: Se entiende por densidad eléctrica la cantidad de electricidad correspondiente a la unidad de superficie (1 cm^2) del cuerpo electrizado.

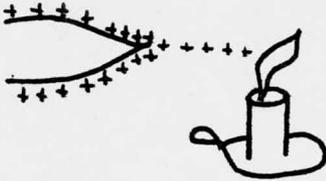
- a) Una esfera metálica electrizada presenta la misma densidad eléctrica en todos los puntos de su superficie.



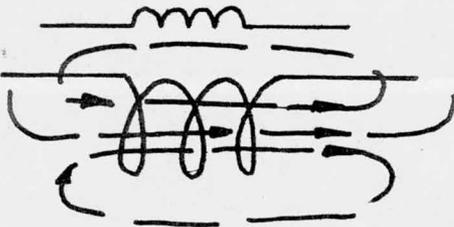
- b) En un conductor curvado la máxima densidad reside en el punto de máxima curvatura.



En las puntas, la densidad eléctrica se eleva de un modo extraordinario, hasta el punto en que la carga eléctrica pasa al aire próximo a ellas y el aire electrizado es repelido, de terminando la producción del viento eléctrico (acción de las puntas).

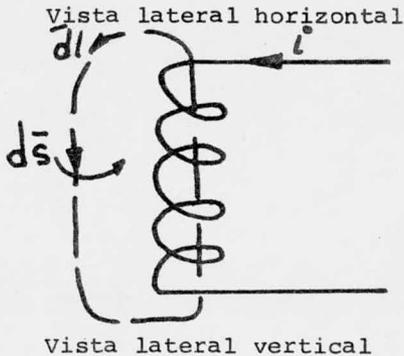


Aplicación a las bobinas



Bobina

(\vec{B}, \vec{H}) (Son líneas cerradas)
al paso de la corriente se forma un campo magnético



Vista lateral vertical

CAPITULO

III

a) DENSIDAD DE FLUJO

Ya habíamos dicho ó habíamos definido un campo magnético en términos de campos eléctricos en movimiento dado que la corriente eléctrica se define como la rapidez de transferencias ó de transporte de cargas eléctricas en un medio (ejemplo una bobina ó alambre), un campo magnético está asociado con una bobina.

Un campo magnético es usualmente considerado compuesto de líneas de fuerza llamadas líneas de flujo ó líneas de inducción representadas por Φ . El número de líneas de inducción por unidad de área (el área se mide en un plano perpendicular a las líneas de inducción), es una medida de la fuerza del campo magnético y es llamada densidad de flujo, representada por B .

Estos principios forman base de los diferentes métodos de análisis de circuitos ferromagnéticos.

Las dimensiones de la estructura magnética son tales que la densidad de flujo en cualquier sección transversal de la estructura puede ser considerada uniforme. Esto significa entonces, que el flujo en el núcleo puede ser obtenido al multiplicar la densidad de flujo por el área de la sección transversal, donde B es la densidad de flujo y A es el área de dicha sección.

$$\text{Flujo } \phi = B \cdot A$$

$$B = \frac{\phi}{A}$$

Oersted, verificó que una corriente eléctrica es capaz de producir efectos magnéticos. Cuando se divulgó el descubrimiento de oersted, atrajo la atención de los grandes científicos de la época, quienes se lanzaron a investigar este fenómeno. Entre todos se destaca el trabajo relevante de Ampere (1775-1836) continuado más tarde por Faraday y culminando con los trabajos de Maxwell.

Estos científicos consiguieron establecer la síntesis, esto es, la unión de la electricidad y el magnetismo.

Actualmente, sabemos que los fenómenos magnéticos se originan en fuerzas que aparecen entre cargas eléctricas en movimiento. Cuando 2 cargas están en reposo, existe una fuerza electrostática entre ellas.

Si estas cargas se mueven, aparece una nueva fuerza: La fuerza magnética. Esta última es la responsable de la aparición de todos los fenómenos magnéticos.

Las líneas de inducción del campo magnético son circunferencias con centro sobre el alambre.

Campo de un Solenoide

Un solenoide (Bobina) se obtiene enrollando un alambre en for-

ma helicoidal. Recordando además que las líneas electricas - comienzan en cargas positivas y terminan en cargas negativas- y las lineas de inducción magnética son siempre lineas cerradas



Haciendo pasar una corriente por las espiras, establecemos en el interior del solenoide un campo magnético paralelo al eje de la bobina. Este campo es prácticamente uniforme principalmente en la región media del solenoide.

Se puede demostrar, a partir de la Ley de Biot - Savart, que siendo N el número de espiras del solenoide, L su largo e i , la corriente que circula, el campo en el interior de la bobina vale

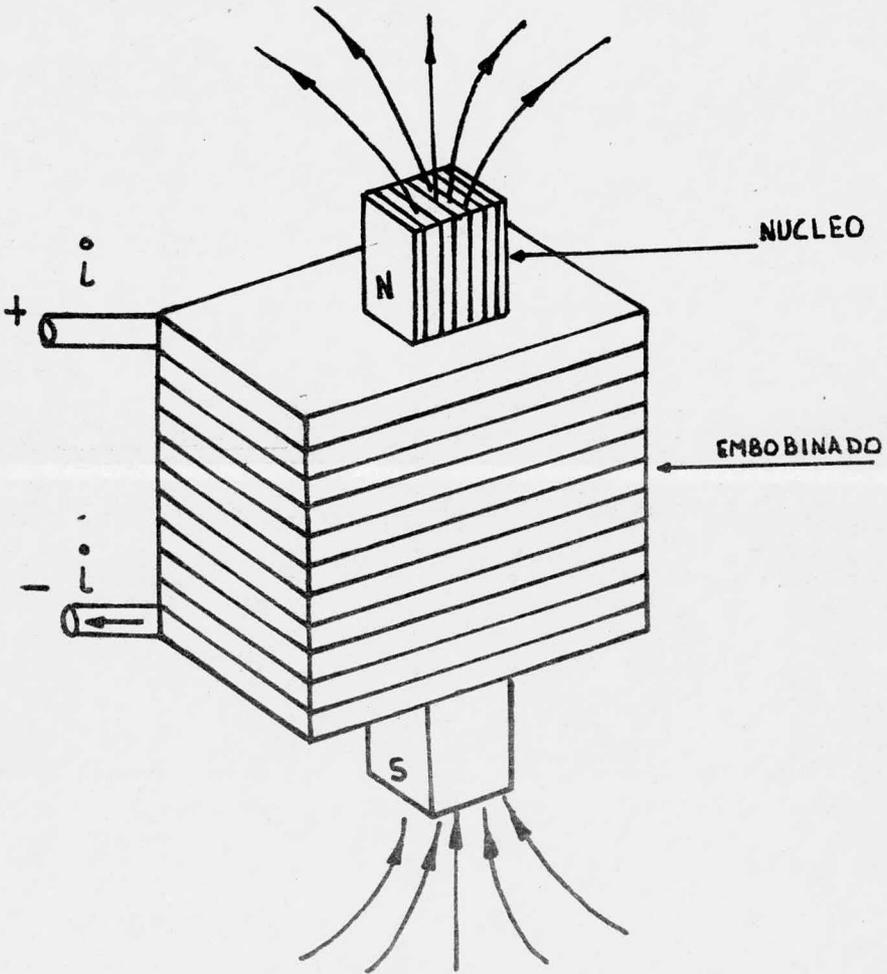
$$B = \mu_0 \frac{N}{L} i$$

el cociente $\frac{N}{L}$ representa el número de espiras por unidad de largo, que designaremos por n .

$$\therefore B = n \mu_0 i$$

Entonces el valor de B puede elevarse si enrollamos muchas espiras por unidad de largo y hacemos pasar una corriente a tratra

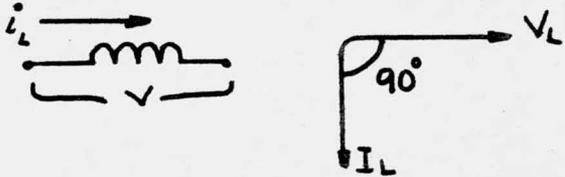
vés de ellas. Sin embargo, para obtener campos magnéticos mucho más intensos, introducimos en el solenoide un material ferromagnético.



b) PERDIDAS MAGNETICAS Y CORRIENTE DE EXCITACION.

Al energizar un transformador en vacio, es decir con el secundario en circuito abierto, el transformador no entrega energía, y por tanto, desde un punto de vista teórico e ideal, no debería tampoco consumir energía, pues equivale a conectar una inductancia pura, en donde la corriente circulante estaría defasada 90° con respecto al voltaje. De esta manera, la potencia real sería

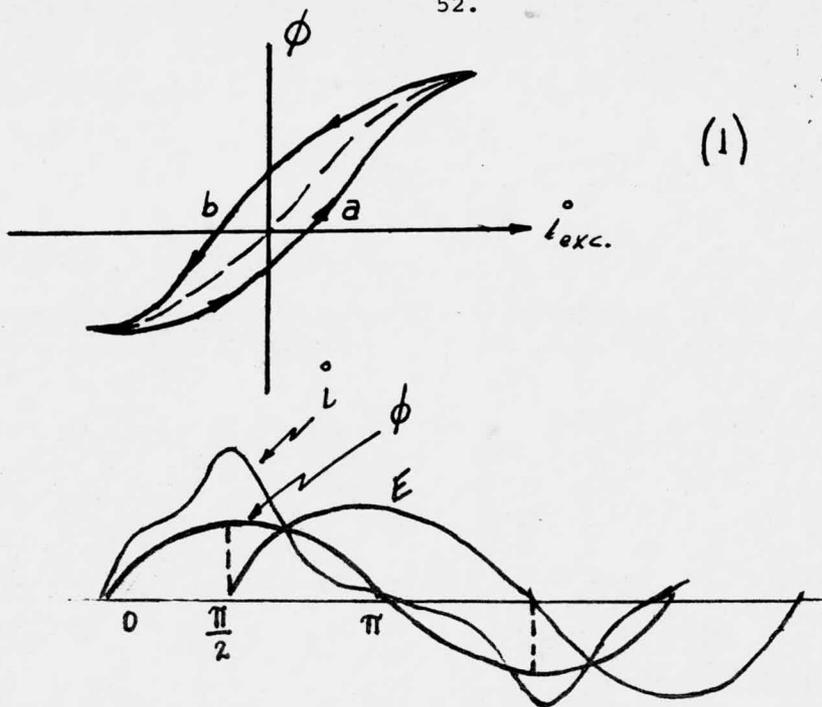
$$P = V I \cos 90^\circ = 0.$$



Hasta ahora siempre hemos supuesto que la corriente primaria de un transformador en vacio era, como la tensión aplicada, -- una senoide pura del mismo valor eficaz que la onda real, y sobre este supuesto, bastará, en general, establecer los cálculos numéricos.

Conviene, sin embargo, no ignorar la realidad, que se aparta de aquella hipótesis, y en ciertos casos será por ello ineludible precisar más el fenómeno y sus consecuencias.

Debido a la saturación del núcleo y a la histeresis magnética, a una f.e.m. senoidal corresponde forzosamente una corriente de excitación de forma compleja, acusándose en ella la presencia de varios armónicos impares, entre los que predominan el tercero.



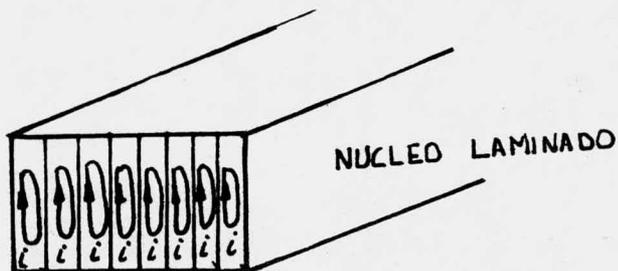
sea, por ejemplo. figura anterior, E la curva senoidal de f.e.m. a inducir en un devanado. El flujo ϕ que se precisa para crearla será también senoidal y adelantado $\frac{\pi}{2}$ respecto a la f.e.m. (curva 2). La (1) representa el ciclo de histéresis de la chapa magnética, de modo que, trasladando a sus ordenadas los valores de la onda de flujo (sobre la rama debida, según sean crecientes o decrecientes), tendremos por las abscisas de (1) la corriente de excitación necesaria en cada momento para producir el flujo. Así, resulta la curva (3) de la misma figura, que difiere bastante de una senoide. Fijandonos en estas curvas y en su mutua dependencia, observaremos los siguiente.

1ª La corriente que se precisa para mantener una onda senoidal de flujo en un núcleo ferromagnético, ha de ser, precisamente por efecto de la saturación, de forma compleja.

2ª El máximo de la onda de corriente coincide siempre con el de la onda de flujo, pero aquélla no es simétrica en sus 2 ramas, anterior y posterior, respecto al máximo.

La asimetría se debe tan sólo al efecto de histeresis; si este ciclo fuese de superficie nula, es decir: si coincidiesen en una sola las ramas ascendentes y descendentes del mismo, la onda de corriente, aunque deformada por la saturación, sería simétrica respecto a sus valores máximos. La potencia media consumida durante un periodo de la f.e.m. en virtud de esta simetría y dado el desfase de E igual a 90° , valdría justamente cero.

Por lo que respecta a corrientes parasitas, debemos tener en cuenta que el acero es un material conductor de la electricidad, y desde el punto de vista del comportamiento eléctrico se constituye como una infinidad de pequeños anillos que rodean las líneas de flujo magnético, y como este flujo es variable con respecto al tiempo, se inducen fuerzas electromotrices en circuitos cerrados,



Corrientes parásitas en un transformador y que nos ocasionan pérdidas magnéticas.

lo que da lugar al paso de corrientes circulantes en circuitos resistivos, lo cual provoca calentamiento del núcleo y -- por consiguiente una pérdida más.

El conjunto de pérdidas magnéticas por histeresis y corrientes para sitas, se conoce con los nombres de pérdidas magnéticas ó pérdidas de excitación.

Las pérdidas magnéticas se miden prácticamente, excitando el transformador por cualquiera de sus devanados, a voltaje y -- frecuencia nominales y con una onda senoidal (sin distorsión), mientras que el otro embobinado permanece en circuito abierto. Se incluyen en el circuito de alimentación, los siguientes -- instrumentos.

- Un frecuencímetro - 3 amperímetros - 3 Wattímetros - 1 Voltmetro de valor eficaz - Un voltmetro de tensión media, Tipo -- rectificador, de preferencia con escala graduada a valores eficaces.

- En caso de que los valores por medio sean superiores a las escalas de los aparatos se incluyen transformadores de corriente y/o potencial

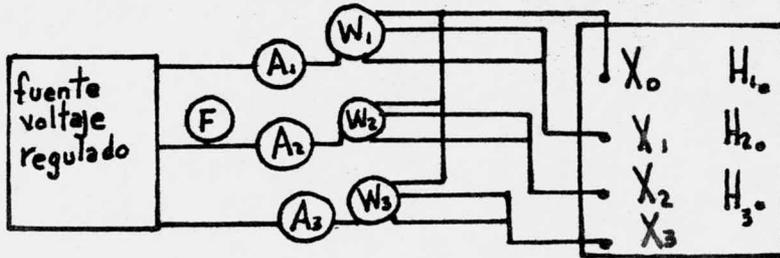


Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas magnéticas --
por el método de 3 wattímetros en un transformador trifásico.

Laminaciones:

Las corrientes de Foucault inducidas en los conductores -- --
o'hmicos producen un calentamiento o'hmico. Esto resulta -- --
útil para crisoles de inductancia que funden metales, pero no
es conveniente para muchos mecanismos de núcleo de hierro.

- Un campo magnético que varía con el tiempo a través de un conductor induce corrientes de Foucault ó parásitas que causan calentamiento o'hmico.
- Si el conductor se lamina de modo que las corrientes inducidas queden confinadas en tiras delgadas, la potencia disipada decrece.

Para reducir esta pérdida de potencia, frecuentemente los núcleos se construyen con muchas laminas delgadas aisladas eléctricamente entre si con delgados revestimientos de óxido.

El flujo de corriente queda confinado dentro de una lámina -- delgada y no puede salir de las laminas.

La prueba se desarrolla aplicando al transformador su voltaje nominal. Para cerciorarnos que la onda de voltaje es senoidal la lectura de los 2 voltímetros no debe diferir más del 1% en el caso de que el voltímetro tipo rectificador tenga -- graduada su escala en función de los valores eficaces de onda senoidal, o bién la lectura del voltímetro eficaz y la lectura del voltímetro tipo rectificador multiplicados por 1.11 en el caso de que este último tenga su escala graduada directamente en valores medios.

Habiendo verificado por medio de los aparatos que se aplican la frecuencia y el voltaje nominales y no existe distorsión -- de onda, los resultados de la prueba se obtienen de la siguiente manera.

Como estamos tratando ó haciendo la prueba a un transformador trifásico podemos utilizar uno de los 2 métodos existentes.

En este caso utilizaremos el método de los 3 wattímetros, y -- obtendremos que la suma aritmetica de watts nos da las pérdidas magnéticas, y el promedio de lecturas de los amperímetros nos da la corriente de excitación.

Desarrollo de la prueba

Primero se seleccionan los instrumentos de acuerdo a los rangos de valores por medio. Para estimar la capacidad del amperímetro y la bobina de corriente del wattmetro se calcula el 10% de la corriente nominal.

$$I_{nom} = \frac{\text{Capacidad}}{\sqrt{3} V_{nom}} = \frac{7500 \text{ KVA}}{\sqrt{3} (2400)} = \frac{1804.27}{\sqrt{3}} \text{ Amp.}$$

$$I_{exc.} = \frac{4.09}{\sqrt{3}} \text{ Amp.}$$

Si es necesario se incluyen transformadores de corriente y/o potencial.

La conexión es según el diagrama ya expuesto.

Se energiza la fuente y se ajusta el voltaje al valor nominal.

Se toman lecturas de frecuencia, volts eficaces y volts medios y se anotan en una tabla.

Las lecturas de los 3 amperímetros y de los 3 wattmetros también se anotan en una tabla.

Lecturas obtenidas en la prueba de pérdidas magnéticas.

| Pérdidas magnéticas | | | | | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| f' | | V _f | V _m | | |
| 60 | | 2400 | 2180 | | |
| A ₁ | A ₂ | A ₃ | W ₁ | W ₂ | W ₃ |
| 4.09 | 4.09 | 4.09 | 3620 | 3620 | 3620 |

Pérdidas magnéticas 10860 Watts

Corriente de excitación 4.09 Amps.

c) Elevación de temperatura.

Cuando se prueba un transformador a la temperatura de trabajo, ya que se parte del valor base de 20°C es necesario referir - después por cálculo a la temperatura tipo, t' , de 75°C o a la de servicio prevista. Esta temperatura toma en cuenta la sobre-elevación de temperatura de 55°C.

Esto es en la medición de la resistencia, toda esta conversión de valores y las respectivas mediciones ya se hizo.

Hablaremos sin embargo de la elevación de temperatura de cada transformador en particular que no es precisamente 75°, esta conversión de la resistencia a 75° se hace por cuestiones de diseño y nuestro objetivo es encontrar las dimensiones de la bobina en base al diseño original.

Temperaturas de trabajo de los transformadores.

La temperatura alcanzada por un transformador durante su funcionamiento, que depende de las pérdidas en vacío y en los -- arrollamientos y de la cantidad de calor cedido al medio refrigerante por unidad de tiempo, debe ser tal que no lleguen a modificarse las propiedades de los aislantes y del aceite.- El valor de dicha temperatura dependerá, como es natural, de la que exista en el ambiente; por ello, en las normas de los diversos países se fijan los valores admitidos como máximos,- partiendo de la base de una determinada temperatura ambiente.

Elevación de la temperatura:

Los aislamientos de los embobinados son los principales afectados, puesto que con el calentamiento están expuestos a un proceso de degradación, lo que redundará en la vida útil del equipo.

La temperatura en los conductores de los devanados no es posible obtenerla por medición directa, y por tanto solamente se calcula su valor final, en función de la constante térmica y la variación de la resistencia térmica con el valor inicial de la prueba de resistencia ohmica y el valor final de una medición en el instante de corte de prueba.

Para medir la resistencia al final de la prueba, se requieren ciertos artificios, dado que el transformador se enfría rápidamente (en particular los devanados), y el tiempo que transcurre desde el instante en que se corta la energía hasta que se han retirado las conexiones y se instala el puente para tomar la lectura, es suficiente para que la medición obtenida difiera del valor al instante de corte.

El procedimiento a seguir abarca los siguientes pasos

1º Se prepara el puente para medición de la resistencia ohmica, y un cronómetro. Entendemos por preparar el puente, colocarle sus cables de conexión, a fin de poderlo instalar en dos terminales del transformador previamente identificadas,

y preparar una lectura algo superior a la prueba de resistencia o hmica.

2^a Se corta la energía y en ese mismo instante se arranca el cronómetro.

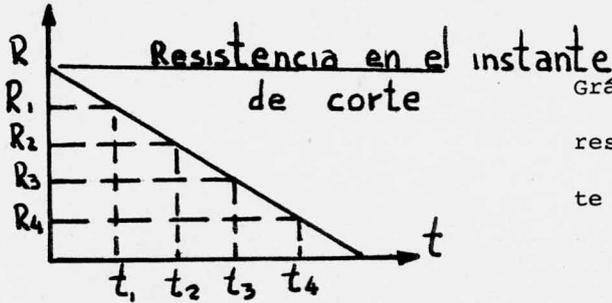
3^a Rápidamente se retiran las conexiones del transformador - y se instala el puente.

4^a Se hace la primera medición de la resistencia y se toma - el tiempo en que se efectuó (R_1 y T_1) siendo R = resist. y t - el tiempo de medición de la R .

5^a Se toman sucesivamente varias lecturas de resistencia y - sus respectivos tiempos, durante un lapso de 5 a 10 minutos - (R_2 - T_2 , R_3 - T_3 , etc.)

6^a En un sistema de coordenadas que tenga los tiempos como - abscisa y las resistencias como ordenadas, se grafican los re - sultados anteriores, y por medio de instrumentos de dibujo, - se continúa esta gráfica con su misma curvatura hasta el tiem - po cero.

Para mayor precisión, conviene exagerar la escala vertical, - aunque el valor de 0Ω no coincida con el origen de coor - denadas.



Gráfica para estimar la resistencia en el instante de corte.

Con el valor de la resistencia en el instante de corte, se puede calcular la temperatura, despejando t' de la fórmula de variación térmica de la resistencia

$$t' = \frac{R'}{R} (K + t) - K$$

en donde

t' = Temperatura del devanado en el instante de corte

R' = Resistencia del devanado en el instante de corte

t = Temperatura a la que se efectuó la prueba No. 1

R = Resistencia medida en la prueba No. 1.

K = constante térmica

$K = 234.5$ para el cobre $K = 225$ para el aluminio

Esta medición puede efectuarse en cualquier lado del transformador, ya sea alta o baja tensión, pero para efectuar la misma medición del otro lado es necesario reiniciar la prueba de temperatura, y después de cuando menos dos horas, hacer un segundo corte.

Carga del transformador.

Un aspecto importante es la forma en que se le da carga al transformador, ya que para transformadores de cierta capacidad resulta problemático tanto un banco de carga real, como el costo de la energía utilizada, dado lo prolongado de esta prueba.

En virtud de que el calentamiento del transformador es producido por sus pérdidas, la generalidad de las veces se prefiere llevar a cabo la prueba de temperatura recurriendo a determinados arreglos en que solamente se suministre la energía correspondiente a las pérdidas nominales, las que ya se determinaron.

Metodos de carga simulada.

Existen varios métodos tanto para transformadores monofasicos como trifásicos, con arreglos en los que se pueden producir las pérdidas nominales sin emplear la energía de la capacidad nominal del transformador. Al producirse las pérdidas magnéticas y electricas nominales el comportamiento de la temperatura es idéntico al que observaría con carga real.

Los métodos de carga simulada podemos clasificarlos en tres grupos.

- a) Métodos de circuito - corto
- b) Método de oposición
- c) Método de Auto-oposición.

El más utilizado es el método de corto - circuito en la medición de pérdidas electricas y además es el mas sencillo y de uso mas frecuente.

Método de Corto Circuito.

Este método requiere de una cantidad pequeña de equipo y de energía, y es adecuado tanto para transformadores grandes como pequeños. Es el recomendado para transf. Sumergidos en aceite.

La prueba se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos.

- 1ª Se suministran las pérdidas totales y se toman lecturas periódicas de las temperaturas tanto ambiente como del nivel superior del aceite, registrando en cada lectura la elevación de temperatura del aceite sobre la del ambiente.
- 2ª Cuando se ha obtenido la temperatura de estabilización, se reduce la alimentación a corriente nominal y se prolonga la prueba por dos horas mas, tomando la temp. del aceite.
- 3ª Después de dos horas se efectúa el corte y se toman las mediciones de la resistencia Ohmica de un devanado.

4ª Se restablecen las conexiones y se continúa la prueba a corriente nominal por dos horas más, tomando temperaturas del aceite.

5ª Después de dos horas se efectúa un segundo corte y se toman las mediciones de la resistencia ohmica en otro devanado. Con estos resultados se calculan las resistencias al instante de los respectivos cortes, así como las temperaturas que alcanzaron los devanados. Sin embargo lo que tiene interes mas práctico es el valor de la resistencia.

Sin embargo nuestro propósito es encontrar las dimensiones de la bobina para lo cual necesitamos la resistencia ohmica en frío para después pasarla a la temperatura de diseño que es 75°C. Hacemos del conocimiento lo anterior para diferenciar las pruebas.

CAPITULO IV

Voltaje y nivel de aislamiento.

El voltaje entre fases del circuito conectado a un transformador determina de acuerdo con la conexión usada, el voltaje de cada devanado. La cantidad de aislamiento está fijada por el nivel de impulso establecido para cada terminal el cual moderadamente se determina de acuerdo con la coordinación deseada - entre los aislamientos del conjunto de aparatos y dispositivos protectores que coinciden en la instalación que se trata. En los transformadores en general, se asocia el nivel de aislamiento según normas americanas.

Características Mecánicas.- Las condiciones de servicios imponen a los transformadores requisitos de resistencia mecánica, no tan fáciles de definir como los electricos. Sin embargo debe reconocerse la existencia de condiciones de operación que afectan mecánicamente al transformador por lo que se diseñan para soportar 25 y 50 veces la corriente nominal.

Las corrientes eléctricas actúan mecánicamente entre si, produciendo fuerzas sobre los devanados que de no ser resistidas por éstos resultan en daño al aislamiento.

Un transformador alcanza una vida normal definida por la velocidad de deterioro químico de su aislamiento (proceso de deshidratación de la celulosa), si resiste las condiciones anormales que imponen a su aislamiento los voltajes transitorios-

debidos a fenomenos externos y a las corrientes de corto circuito.

Es por eso que aunque estas pruebas no se lleven a efecto se mencionen por que son muy utiles en el conocimiento ó en el estudio de los aislantes.

Para lograr estos propositos, deben estudiarse los dos fenomenos principales que atacan al aislamiento de los aparatos conectados a, una misma línea eléctrica que son los disturbios por descargas y los transitorios debidos a operación de interruptores. Ambos efectos originan sobretensiones anormales contra las cuales se diseña dielectricamente el equipo. De acuerdo con las magnitudes que alcanzan estas perturbaciones, se establece el nivel básico de impulso que es económico manejar, base para el buen diseño en coordinación de aislamientos. Para decidir desde el exterior si una máquina tiene el aislamiento adecuado no hay actualmente otro medio, que simular las condiciones mas adversas que le impone el circuito donde actua, mediante pruebas destructivas establecidas por normas basadas en la observación estadística de los fenomenos transitorios.

Estas pruebas son generalmente de dos clases.

a).- A baja frecuencia para reproducir los efectos de las sobretensiones anormales de larga duración tales como sobre -

tensiones generales, condiciones resonantes, fallas intermitentes y algunos tipos de transitorios de operación por alteraciones en el número de ramales conectados. Estas pruebas suelen investigar el aislamiento mayor (contra tierra) y el menor (entre conductores, secciones, etc.) y sus valores aplicados a inducidos, PRUEBA DE POTENCIAL APLICADO Y PRUEBA DE POTENCIAL INDUCIDO, suelen ser del doble del voltaje nominal entre líneas del circuito principal.

b).- A alta frecuencia o impulso simulando los efectos de descargas atmosféricas directas sobre las líneas, con formas de onda tomadas de las que suelen resultar en servicio y crestas relacionadas con el valor nominal de la tensión del circuito.

Hablamos de la importancia que encierran las pruebas dielectricas del transformador y encontramos que el objetivo general es comprobar el estado en que están los aislamientos de los devanados de un transformador antes de ponerlo en servicio.

En la fabricación de un transformador se emplean materiales tales como hierro, cobre o aluminio y aislamiento; cada uno de estos elementos debe llenar los requisitos que se han fijado, de tal manera que el conjunto cumpla, a su vez, con los fines para lo que fue diseñado; para conocer sus características, o-

tener una idea del estado en que está, es necesario efectuar pruebas en estos elementos.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.

La medición de la resistencia de aislamiento sirve para "tener una idea" del estado en que se encuentran los aislamientos, y con base en esto decidir si están en condiciones de soportar los esfuerzos dielectricos que se originan al aplicar tensiones en prueba o trabajo.

La presente prueba es la unica que llevamos a efecto en este trabajo que ahora presentamos, sin embargo mencionamos las otras pruebas como información complementaria.

La medición de la resistencia de aislamiento se efectúa por lo general con un aparato llamado "Megger", que consta básicamente, de una fuente de c.d. y un indicador de megohms. La capacidad de la fuente de c.d. generalmente es baja, ya que la finalidad es ver el estado en que se encuentra el aislamiento; es decir, ésta es una prueba indicativa no destructiva, de tal forma que si un aislamiento está debil no lo agrave.

Las resistencia de aislamiento a determinar en un transformador, son la resistencia que presenta un devanado con respecto a otro y la que presenta un devanado con respecto al núcleo y con respecto al tanque; es decir las lecturas de resistencia de aislamiento que se toman por:

Caso 1: A.T. contra B.T.

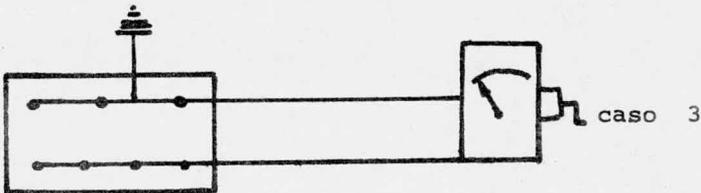
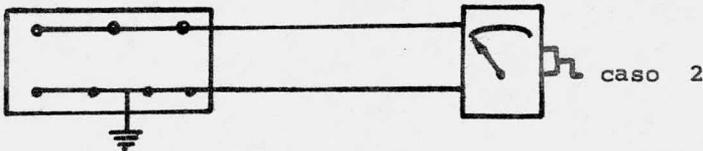
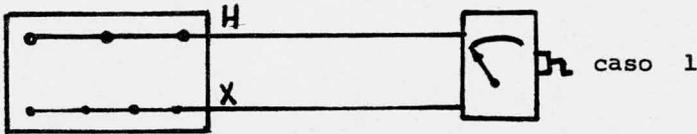
Caso 2: A.T. contra baja tensión + tanque a tierra

Caso 3: A.T. + tanque contra baja tensión

B.T. = baja tensión

A.T. = alta tensión

Diagramas ilustrativos para el ensayo de resistencia de aislamiento con megger



Determinación de distancias dielectricas.

Es muy común el designar a las pruebas de sobre tensión con el nombre de "pruebas destructivas, cuando el diseño, manufactura ó acondicionamiento de los aislamientos son inadecuados.

De ello depende, el que dicho dispositivo eléctrico ofrezca -- la seguridad de servicio y además resulte económica su manufactura.

Las sollicitaciones anormales que se deben tomar en cuenta para el buen diseño de todo dispositivo eléctrico y se pueden clasificar en dos grupos.

- I) Las que se encuentran íntimamente ligadas con la tensión - de la instalación (sobretensiones internas).
- II) Las que tienen origen fuera de las mismas siendo indepen-- dientes del sistema (Sobretensiones externas).

Estas sollicitaciones llegan a provocar que los dispositivos -- electricos fallen; generalmente en sus aislamientos perforandose estos.

Existen dos teorías para explicar la perforación de un dielect. causada por una sobretensión, una se le conoce con el nombre - de descarga térmica y la otra como descarga eléctrica pura.

Descarga Térmica.

Cuando se expone una substancia aislante a un campo eléctrico-

alterno, dicho aislante se calienta debido a las pérdidas por conducción y a las pérdidas dieléctricas ocasionadas por el movimiento iónico en el seno del material. Cuando las pérdidas producidas son superiores a las disipadas, el calentamiento es ascendente hasta que el material se quema y falla.

Por lo regular, este fenómeno no es debido a una sobretensión de baja duración, sino a una tensión excesiva de relativa larga duración.

La descarga térmica ocurre, en aquellos materiales aislantes que tienen un valor relativamente alto de factor de potencia, como son los aislantes sólidos y algunos líquidos.

FACTOR DE POTENCIA DE LOS AISLAMIENTOS.

El factor de potencia de los aislamientos de un transformador depende de la naturaleza y cantidades de los dieléctricos empleados en su diseño.

Los aislamientos de celulosa secos e impregnados en aceite -- con una humedad residual del orden de 0.2 % tienen un factor de potencia del orden 1.5 % a 20°C. (El factor de potencia de aceite es del orden del 0.03 %).

Por lo tanto de lo anterior se deduce que el factor de potencia de la estructura aislante de un transformador seco, debería ser menor que 1.5 % a 20°C ; pero debido a que la estructura esta integrada por aislamientos diferentes a los antes -

mencionados, dicho factor en algunos casos llega a ser mayor de 1.5%.

En un transformador sin aceite, pero con los aislamientos sólidos impregnados, su factor de potencia es del orden de 0.25 a 0.5 a 20 °C.

DESCARGA ELECTRICA PURA.

Cuando el gradiente de potencial a que se somete una sustancia aislante, llega a un valor tal que los electrones libres alcanzan velocidades ionizantes, se forma ante el ánodo una carga espacial positiva compuesta por iones estacionarios, -- que incrementan el gradiente de potencial hasta que ocurre la perforación.

La descarga eléctrica pura ocurre, en aquellos materiales aislantes con muy bajo valor de factor de potencia, como son los gases y algunos líquidos aislantes de alto grado de pureza.

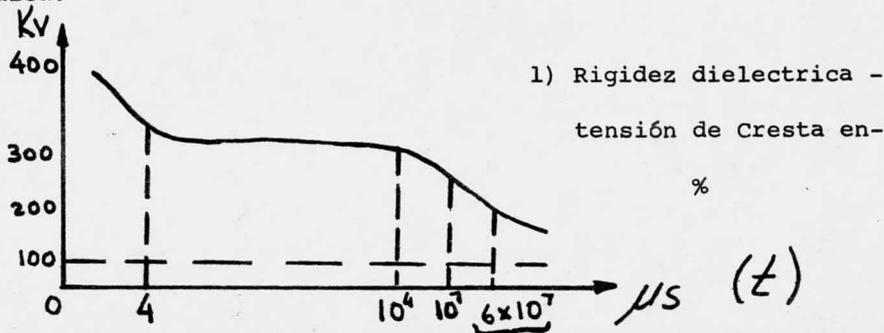
Para que los electrones libres de un aislante sólido alcancen velocidades ionizantes se requiere un gradiente de potencial del orden de 10^8 Volts/cm.

Se comprende que en estos materiales, se alcanza primero la perforación térmica antes de poder llegar a la descarga eléctrica pura.

Del enunciado de las 2 teorías de la perforación de un dieléctrico, se puede concluir que el valor de perforación de un --

aislante, es función del tiempo y frecuencia de la tensión - - aplicada. -

A frecuencia constante el aceite mineral aislante y los aislamientos celulósicos impregnados en aceite combinados, tienen - una respuesta cualitativa a la perforación dieléctrica como se indica.



Curva Típica de Tensión disruptiva para los niveles de tensión de aislamiento.

En esta curva se pueden distinguir 3 zonas fundamentales:

Zona entre 0 y 4 μs:

Se explora en las pruebas de impulso con las ondas de frente - y la pendiente muy pronunciada. Es la zona de ondas cortadas.

Zona entre 0 y 10⁴ μs:

La rigidez dieléctrica del material aislante en esta zona va-- ría muy poco con el tiempo de aplicación de la tensión.

Es la zona que se explora con la onda completa durante la prueba de impulso.

Zona de $10^7 \mu$ s y mayor

La curva tiende en forma asintótica a un valor determinado.

La región entre 10^7 y $6 \times 10^7 \mu$ s es la que se explora con -- las pruebas de sobre potencial aplicado y sobre potencial inducido.

Son las pruebas de sobretensión que se aplican a los transformadores para comprobar sus aislamientos establecidos por el -- fabricante y compradores de transformadores.

- a) Sobre potencial aplicado
- b) Sobre potencial inducido
- c) Impulso de tensión

A) PRUEBA DE SOBRE POTENCIAL APLICADO

Esta prueba tiene por objeto probar la estructura aislante de cada uno de los devanados del transformador, con respecto a -- tierra y los demás devanados.

La frecuencia de la sobretensión es 60 HZ y su magnitud la de termina la parte mínima de la clase de aislamiento de un mismo devanado. En la tabla Núm. 1 se tiene tabulada la tensión de prueba. Durante la prueba de sobre tensión, ésta se incrementa paulatinamente desde un 50 % de la tensión, aumentándose de un modo continuo o por escalones que no excedan del 5%-

a esta tensión última en menos de 10 seg.

Las conexiones para esta prueba se efectúan de la misma forma que para la prueba de resistencia de aislamiento, sólo que en vez de ser el megger la fuente de potencial, es un transformador que está diseñado para tal fin.

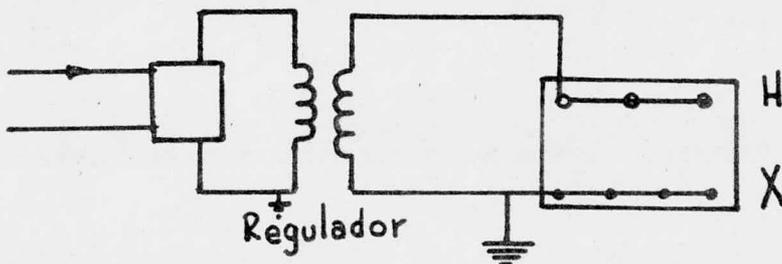
La medición de voltaje aplicado se efectuará por medio de un voltímetro conectado a través de un transformador de potencial, o también por medio de un voltímetro de esferas: esto depende de la clase de aislamiento del equipo sometido a prueba.

El valor eficaz del voltaje por aplicar dependerá también de la clase de aislamiento del equipo que se prueba, pero se puede seguir en general el siguiente criterio:

$$V_{\text{prueba}} = 2 V_{\text{nominal}} + 100$$

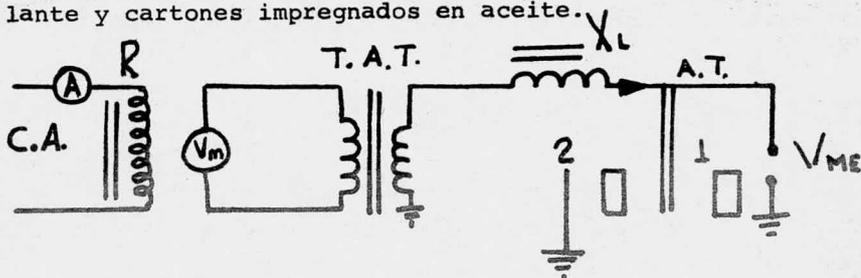
para transformadores usados se toman el 75% del V_{prueba} , la tensión mínima de aplicación será 4,000 volts.

Cuando el voltaje de prueba es muy alto (100 KV ó mas), es conveniente que al llegar al 70 % de él, se mantenga durante 60 segundos: de esta manera se eliminarán al máximo las burbujas que puede tener el aceite del transformador.



NOTA: Deben evitarse la aplicación e interrupción súbita de voltaje, ya que esto ocasiona ondas cuyas formas y valores de cresta originan esfuerzos dielectricos que pueden dañar el --
aislamiento.

En el circuito de prueba, sig. figura, se puede observar que el transformador bajo prueba se representa como una capacitancia, cuyo dieléctrico se componen básicamente de aceite aislante y cartones impregnados en aceite.



R.- Regulador

T.A.T.- Transformador Alta Tensión 2.- Otros devanados y nú

XL .- Reactancia limitadora cleos.

VME .- Voltmetro de esferas 3.- Tanque del transformador.

1.- Devanado bajo prueba.

Para la prueba se requiere un transformador elevador, alimentado en baja tensión con una fuente de voltaje regulado, y capaz de suministrar en alta tensión el voltaje requerido para la prueba.

Debe tener integrado un voltmetro que reporte con la debida precisión los KV en alta tensión.

No se debe colocar (como se ve en el cto. anterior) ninguna resistencia de valor apreciable entre el equipo de prueba y -

| KV Clase de Aislamiento | KV Potencial aplicado |
|----------------------------|--------------------------|
| 0.6 | 4 |
| 1.2 | 10 |
| 2.5 | 15 |
| 5 | 19 |
| 8.7 | 26 |
| 15 | 34 |
| 18 | 40 |
| 25 | 50 |
| 34.5 | 70 |
| 46 | 05 |
| 69 | 140 |
| 92 | 185 |
| 115 | 230 |
| 138 | 275 |
| 161 | 335 |
| 196 | 395 |
| 215 | 430 |
| 230 | 460 |
| 315 | 630 |
| 345 | 690 |
| 375 | 750 |
| 400 | 800 |

Valores del potencial aplicado de acuerdo a la clase de aislamiento.

TABLA No. 1

el transformador por probar. Le permite sin embargo, el uso de bobinas reactivas.

Es conveniente incluir explosores o voltímetros de esferas a una tensión 10% en exceso de la tensión de prueba.

Esta prueba así como las otras no se llevaran a efecto pues - solo es recomendable efectuarlos una vez en la vida del transformador. De preferencia cuando el transformador esta nuevo. Sin embargo se mencionan por que son utiles en la aplicación de distancias dielectricas.

Desarrollo de la prueba (Potencial Aplicado)

- Seleccione de la tabla anterior el valor del potencial de prueba.

| Potencial aplicado | KV |
|--------------------|----|
|--------------------|----|

La prueba debe iniciarse a un valor máximo del 25% de la tensión de prueba, y se incrementa hasta su valor total aproximadamente en 15 segundos.

La tensión de prueba se mantiene durante un minuto.

Después de un minuto se reduce la tensión a un valor igual o menor que el de iniciación en un máximo de segundos y se desenergiza el circuito.

- Se conecta el circuito de prueba indicado de acuerdo a las recomendaciones hechas.

- Se energiza la fuente. Inicialmente puede tener un voltaje

entre cero y el 25 % del potencial de prueba.

- Se aumenta gradualmente el voltaje hasta obtener el potencial de prueba en 15 segundos como máximo.
- Se mantiene el potencial de prueba durante un minuto se observa desde una distancia prudente si no hay arqueo en las partes visibles, burbujas de humo, o alguna otra anomalía.
- Por último, se reduce el potencial aplicado en 5 seg. máx. Al llegar al 25% de la tensión de prueba se puede desenergizar el equipo.

NOTA: Nunca esta por demás un exceso de precaución de manera que antes de meter mano para retirar las conexiones conviene tocar las líneas del potencial aplicado con un cable aterrizado, para descargar cualquier voltaje electrostático acumulado.

B) Prueba de sobre potencial inducido

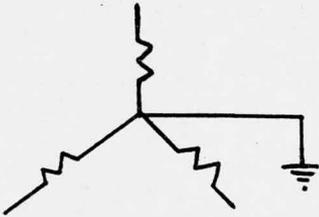
Esta prueba tiene por objeto verificar los aislamientos entre vueltas, entre secciones, entre bobinas y entre guías de un transformador, y es la única manera de probar los aislamientos de las partes de más alto potencial, en los transformadores cuyos devanados tienen aislamiento graduado.

En un transformador con aislamiento uniforme la prueba de sobre potencial inducido es de 200 % de la tensión nominal del-

transformador.

En un transformador trifásico con aislamiento graduado se puede estimar la tensión de prueba, de la siguiente manera; analizando el siguiente diagrama de un transformador conectado en estrella con aislamiento graduado al neutro.

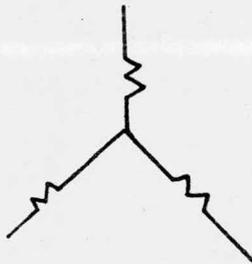
Como la prueba especifica 2 veces la tensión tenemos:



$$2e \div \frac{E}{\sqrt{3}} = 2 \sqrt{3}E = 3.45 E$$

o sea el 345 % de la tensión nominal.

Para un transformador monofásico.



$$2E \div \frac{E}{(\sqrt{3})} + \frac{E}{2\sqrt{3}} = 2.31 E$$

o sea el 231 % de la tensión nominal.

La prueba del inducido se puede modificar para no hacer tan acentuado el porcentaje de sobretensión en aparatos con aislamiento graduado, sin embargo, no existe forma práctica de evitar sobre pasar los niveles de tensión de prueba, de alguna parte de la estructura aislante.

La frecuencia óptima para la prueba de inducido es del orden de 200 HZ para un transformador tipo núcleo con bobinas con--

centricas.

El efecto térmico de la frecuencia en los aislamientos se compensa limitando el tiempo de la prueba de inducido a 7200 ciclos. Siendo estimado el tiempo de duración de dicha prueba por

$$T = \frac{7200 \text{ ciclos}}{f}$$

T = Tiempo en segundos

f = Frecuencia ciclos/seg.

Esto se debe a lo siguiente.

El valor máximo de la onda de flujo en el núcleo del transformador está dado por:

$$\phi = \frac{V}{4.44 Nf}$$

en donde

ϕ = flujo magnético

V = Voltaje eficaz en el devanado en estudio

N = Número de espiras del mismo devanado.

f = frecuencia de la onda de voltaje

De la fórmula anterior observamos que el flujo en el núcleo - es directamente proporcional al voltaje suministrado e inversamente proporcional a la frecuencia, de manera que si se va a suministrar un voltaje mayor al de diseño, es necesario - - aumentar también la frecuencia para evitar la saturación del núcleo.

Las normas marcan como frecuencia mínima de prueba

$$F = \frac{\text{Tensión inducida a través del devanado}}{1.1 \text{ Tensión nominal del devanado}} \times \text{Frecuencia nominal}$$

pudiendo utilizarse, desde luego a frecuencias mayores.

Mientras mayor sea la frecuencia, la prueba es más severa, de manera que se recomienda que su duración sea aproximadamente de 7200 ciclos.

Para frecuencias múltiples de 60 HZ, la duración de la prueba está especificada en la sig. tabla.

Duración de la prueba de potencial inducido.

| Frecuencia HZ | Duración segundos |
|------------------|----------------------|
| 120 ó menos | 60 |
| 180 | 40 |
| 240 | 30 |
| 300 | 24 |
| 360 | 20 |

Para esta prueba se requiere una fuente de voltaje regulado, a una frecuencia comprendida en la tabla anterior.

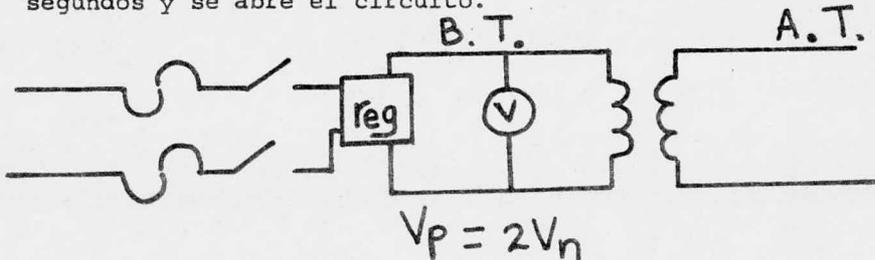
Si la fuente no incluye un voltímetro y un amperímetro, éstos deben intercalarse en el circuito de alimentación del transformador en prueba.

Conexiones: Se debe elegir uno de los embobinados del transformador que sea posible alimentar al 200 % de su voltaje nominal el cual se conecta a la fuente, incluyendo un voltmetro y un amperimetro. El otro embobinado debe permanecer en circuito abierto.

Procedimiento. La prueba se debe iniciar con un valor igual o menor que el 25 % de la tensión completa y se aumenta gradualmente hasta alcanzar el valor de prueba en aproximadamente 15 segundos. Se mantiene la tensión plena durante el tiempo de prueba, mientras se observa si no aparece ninguna anomalía, como:

- Ruidos extraños
- Burbujas de humo (las burbujas de aire no necesariamente son anormales, y si aparecen sería aconsejable repetir la prueba).
- Inestabilidad en la corriente de excitación.

Al concluir el tiempo de prueba, se reduce el voltaje a un valor igual o menor que el de iniciación, en aproximadamente 5 segundos y se abre el circuito.



PRUEBA DE IMPULSO

Durante largo tiempo, las pruebas a las que se someten los transformadores se limitaban a las hoy conocidas como "de baja frecuencia basadas exclusivamente en la tensión de operación del sistema, pero sin tomar en cuenta los transitorios problemas ni la coordinación del aislamiento a lo largo del mismo. En otras palabras, los transformadores que pasaban las pruebas de tensión aplicada y de tensión inducido eran considerados aceptables.

Si se aumenta la frecuencia de alimentación de la prueba se reduce la corriente de excitación pero se aumentan las corrientes capacitivas aumentando por consiguiente la corriente de carga.

El desarrollo mismo de los sistemas condujo, hacia 1931, a la necesidad de adaptar un nuevo sistema de pruebas, las clases de aislamiento, que originalmente se basaban en el valor nominal de tensión entre fases, quedaron referidos a un nuevo valor llamado Nivel básico de Impulso (BIL), de tal manera que dado éste, quedaban definidos los valores de prueba, independientemente de la tensión nominal.

El objetivo de una prueba de impulso es comprobar que la estructura aislante de un transformador esta diseñada para soportar en la zona de 0 a 10^5 seg. las sobretensiones transito-

rias ocasionadas por descargas atmosféricas, operaciones de -
switchero y fallas en el sistema, para los dos últimos casos -
no hay norma aprobada y se hace solo por especificaciones de -
valores y tiempos convenidos entre fabricantes y usuario la -
onda standar de Impulso para la prueba es de 1.5 x 40 se--
gundos (onda americana). Si el transformador es capaz de di -
sipar estas ondas sin dañarse, pasa la prueba.

Esta prueba se hace para comprobar que el transformador sopor -
ta las ondas que se presentan durante las descargas atmosféri -
cas y, por lo general, se realiza cuando así se especifica en
un contrato de compra de transformadores de nuevo diseño (pa -
ra demostrar dicho diseño). Por el contrario, es muy raro --
aplicar esta prueba a transformadores de operación.

CAPITULO V

a) Relación de transformación.

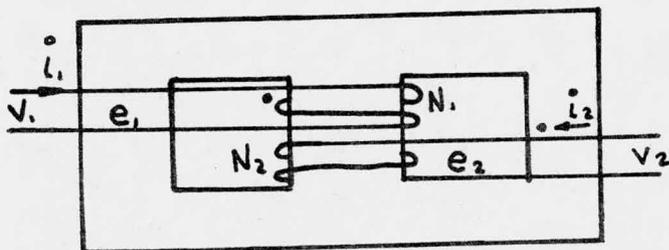
Las pérdidas de energía son del grado tal que la potencia de entrada es prácticamente igual.

(0.2 % a 5 % de diferencia).

Por esta razón y para sencillez de cálculos, en un gran número de problemas prácticos, se considera al transformador real como si fuera ideal. Suponiendo como se dijo que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida.

Relaciones básicas en un transformador ideal.-

Supongamos que los siguientes datos nos describan al embobinado 1 (para fines prácticos).



$v_1(t)$ voltaje entre las terminales del embobinado 1 /

$i_1(t)$ corriente en el embobinado 1

$\phi_{11}(t)$ flujo establecido por $i_1(t)$

$e_1(t)$ voltaje inducido en el embobinado 1 por el flujo que lo enlaza

N_1 número de vueltas en el embobinado 1.

Hagamos que $V_2(t)$, $i_2(t)$, $\phi_{22}(t)$, $e_2(t)$ y N_2 sean los datos correspondientes al embobinado 2.

En vista de la suposición 2, tanto $\phi_{11}(t)$ como $\phi_{22}(t)$ son confinadas dentro del núcleo. Así por superposición, se obtiene que el flujo total enlazado de los dos embobinados es el mismo.

$$\text{Flujo total } \phi_m(t) = \phi_{11}(t) + \phi_{22}(t)$$

Los voltajes inducidos en los embobinados son, de acuerdo con la ley de Faraday, de inducción electromagnética, en el embobinado 1:

$$e_1(t) = N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt}$$

en el embobinado 2:

$$e_2(t) = \frac{N_2 d\phi_m(t)}{dt}$$

Por consiguiente.

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

Como consideramos un transformador ideal, los embobinados no tienen resistencia, la aplicación de la ley de voltaje de -- Kirchoff a los mismos nos da:

$$V_1(t) = e_1(t) \qquad V_2(t) = e_2(t)$$

$$\frac{V_1(t)}{V_2(t)} = \frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

además consideramos que por lo tanto la fmm. neta requerida para establecer flujos en el núcleo es cero.

$$N_1 i_1(t) + N_2 i_2(t) = 0$$

De la cual obtenemos

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

El signo negativo indica que las corrientes son de diferente signo en un mismo instante.

Desde el punto de vista de pruebas de laboratorio, la relación de transformación definida en función de las variables de operación es precisamente la que nos interesa.

Basandonos en esta definición incluimos la necesidad de que el transformador se excite en vacío, es decir, sin carga, puesto que si existieran corrientes en los devanados, las tensiones que mediríamos no serían iguales a las fem's inducidas, debido a que se producirían caídas de voltaje en las resistencias y reactancias de dispersión.

Para determinar la relación de transformación en laboratorio utilizaremos el método del transformador patrón.

Para este método se dispone de un transformador cuya relación

de transformación es conocida, y por comparación, se obtiene la relación del transformador en prueba.

Los transformadores patrón podemos clasificarlos en dos grupos.

- Transformador patrón de relación constante
- Transformador patrón de relación variable (TTR) nosotros utilizaremos el TTR.

El transformador patrón con relación variable, conocido comercialmente con las siglas TTR (transformerturn - Ratio), es un instrumento que nos permite medir cualquier relación de transformación dentro de una escala de valores muy amplia.

Este equipo consta de:

- Un generador de corriente alterna accionado manualmente, para excitar los devanados de baja tensión.
- Voltmetro y Amperímetro para medir los valores de excitación.
- Un selector para cambiar el número de espiras en el devanado de Alta tensión del transformador patrón, con objeto de igualar su relación con la del transformador en prueba.

En la siguiente figura (1) se presenta un diagrama simplificado del probador. La figura 2 muestra los lugares o la localización de los controles y conectores. Sus nombres y funciones

nes son listadas abajo.

- a) Crank.- es usado para poder mover el generador de A.C., el cual suministra toda la potencia para prueba requerida por el probador. En 115 volts, 60 ciclos.
- b) Conductor de excitación (X_1), negro, es un cable con 2 conductores uno de estos es grueso, el otro delgado. El conductor grueso es usado para conectar el transformador bajo prueba al primario del transformador de referencia en el probador. El conductor ligero pasa corriente de excitación a la unión.
- El conductor delgado es llevado a la tapa; carcasa y tiene un gancho "C" que es conectado electricamente al tornillo del seguro. Dicho cable está aislado desde la tapa.
- c) Conductor de excitación (X_2) Rojo, es un cable igual al de (X_1) excepto por la identificación del color en el gancho.
- d) Conductor secundario. (H_1) negro, es un conductor flexible sencillo, más pequeño en diametro que los conductores de excitación X_1 y X_2 . Esta terminado en un clip de resorte.
- Este conductor conecta el secundario del transformador de referencia del probador al transformador bajo prueba.
- e) Conductor secundario, (H_2) Rojo, es un conductor igual (H_1)

excepto por la identificación de color en el clip aislado.

f) Voltmetro, (V) tiene una graduación hasta 8 volts. Este aparato está conectado para leer el voltaje de salida del generador.

g) Amperímetro. (A) es como el voltmetro un instrumento de hierro móvil conectado para leer la corriente de salida del generador.

Desde frecuencia y forma de onda son igualmente variables durante la prueba. El amperímetro no está calibrado en Amperes. En su lugar, la escala es arbitrariamente dividida en 10 divisiones iguales. Para una onda senoidal de corriente aplicada a 60 ciclos, una calibración está dada en la figura 4.

h) Detector, (D) es un microamperímetro d.c. con cero centralizado para medir magnitud y polaridad de corriente fluyendo en el secundario del transformador de referencia en el probador. Cuando el detector indica 0 es señal que la relación del TTR es igual al del transformador.

i) Switch primero de rangos, (S_1), suma los rangos de vueltas del transformador en referencia en pasos de 10 desde 0 hasta 120. El dial está marcado con graduaciones 0, 1, 2, ..., 11, 12. La rotación horario de la perilla incrementa la relación

lación.

- j) Segundo switch de relaciones, (S_2), suma las relaciones de vueltas del transformador en pasos de 1, desde 0 hasta 10. El dial está marcado con graduaciones 0, 1, 2 - - - 9.10.- La rotación horario de la perilla incrementa la relación - como S_1 .
- k) Tercer switch de relaciones, (S_3) suma las relaciones de vueltas del transformador referencia en pasos de 0.1 desde 0 hasta 1. El dial es el mismo como aquel de S_2 . La rotación es la misma como pasa S_1 .
- l) Cuarto dial, potenciómetro, (R_4) suma la relación efectiva de vueltas del transformador referencia continuamente desde 0 hasta 0.1. El dial esta dividido en 100 partes e indicado 0, 05, 10, 15 --- 95. La rotación es la misma que para S_1 . Un segmento del dial etiquetado abierto nos indica una sección abierta del potenciómetro el cual es usado para abrir el circuito secundario. Cuando es requerido para propositos de chequeo.
- m) Punto decimal, es un remache localizado entre el segundo y tercer dial para facilitar la lectura de la relación. Para leer después de obtenido el balanceo (D) en cero, es obtenida tomando primero la lectura del primer dial, segun

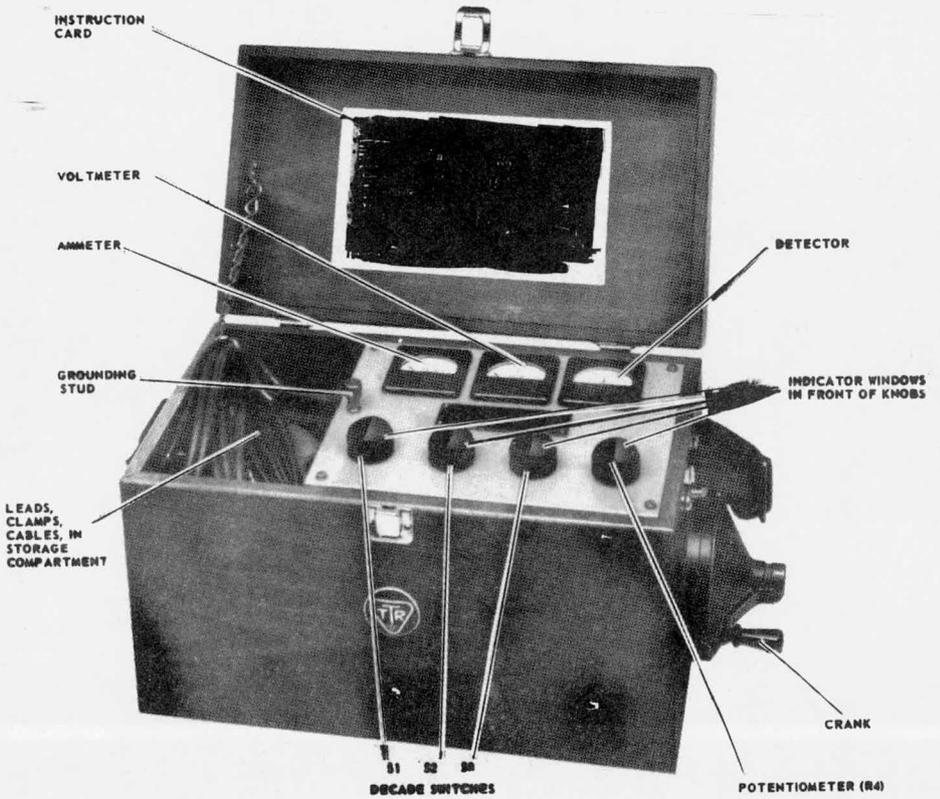


Figure 2 - Showing the various visible parts and their locations.

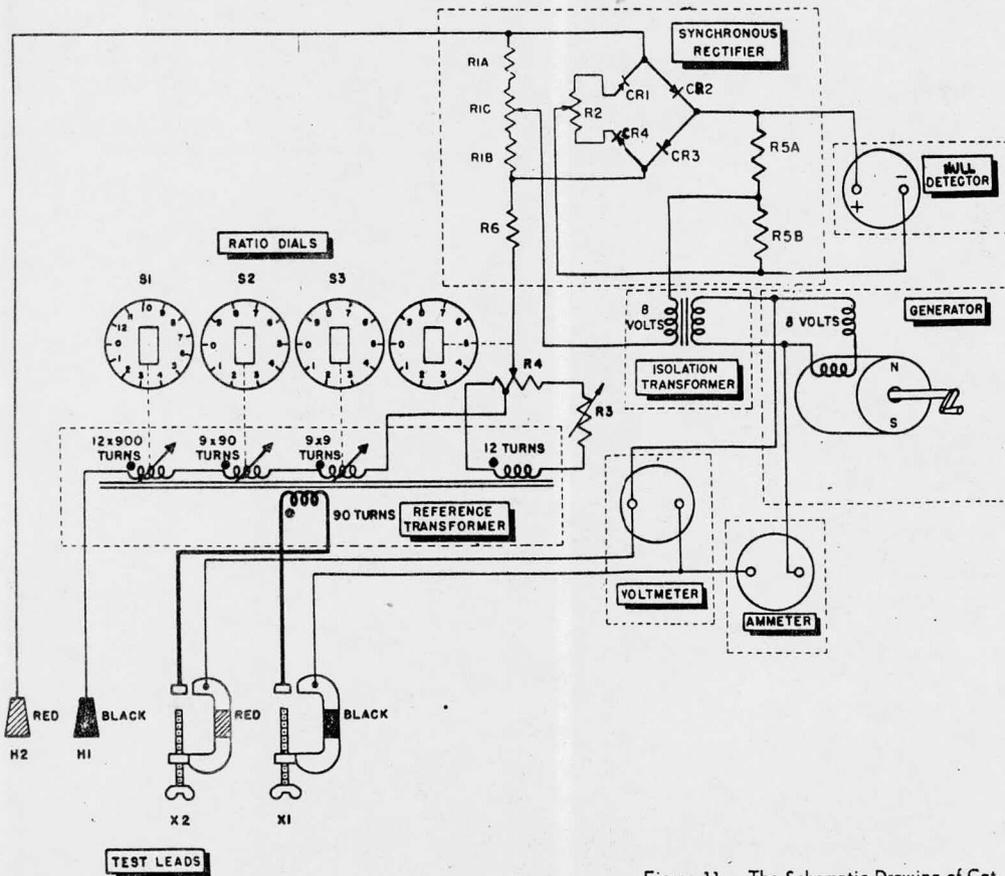


Figure 11 - The Schematic Drawing of Cat. No. 55003 TTR Set.

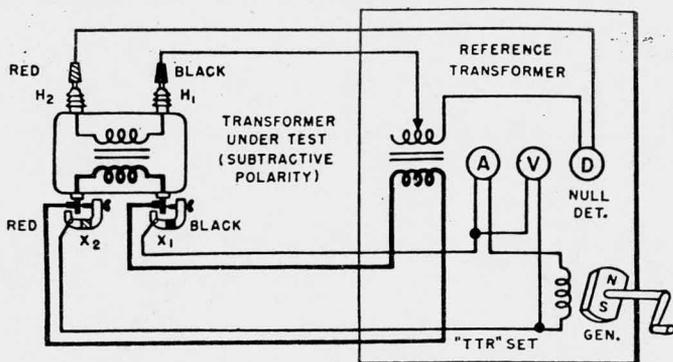


Figure 3 - Showing simplified schematic diagram for Model 3 TTR Set.

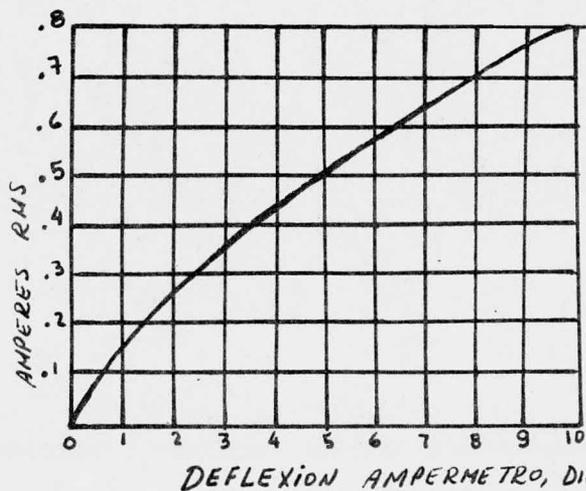


FIG. 4
MUESTRA LA CALIBRACIÓN
APROXIMADA DEL
AMPERMETRO EN EL TTR
CUANDO ES APLICADA UNA
ONDA SENOIDAL DE
CORRIENTE A 60 CICLOS.

do dial, punto decimal, tercer dial y finalmente cuarto -- dial. Una lectura ilustrativa; (11) (7). (3) $(42\frac{1}{2})$, se podrá escribir: 117.3425

- n) Contacto de tierra, es un poste usado para conectar la tapa del instrumento a la tierra deseada.

Principio de Operación:

Cuando un transformador es excitado por el devanado de bajo voltaje, la relación al voltaje sin carga es siempre exactamente igual a la relación de vueltas si el transformador es práctico. La diferencia entre estas dos relaciones es cuando por caída de tensión en el primario que resulta de la corriente de magnetización fluyendo a través del primario. En la práctica la diferencia es frecuentemente menor que 0.1%.

Todos los métodos eléctricos de medición de relación de vueltas están basados en el principio arriba mencionado. El problema básico es la medición de la relación de voltajes sin carga.

El probador TTR es arreglado para que el transformador sea probado y la relación ajustable es obtenida del transformador referencia en el probador TTR que es excitado desde la misma fuente de voltaje.

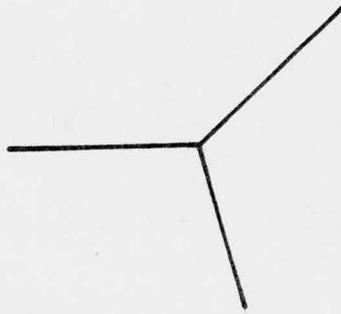
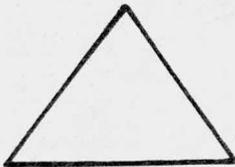
El devanado secundario está conectado en serie en oposición di

recta al detector de nulificación. Cuando la relación del -- transformador referencia esta ajustado para que no fluya co-- rriente en el circuito secundario (nulificación), dos condi-- ciones son cumplidas simultaneamente. La relación de voltaje de dos transformadores son iguales y no hay carga en el otro-- secundario. La relación de voltajes sin carga del transformador referencia es conocida, por lo tanto la relación de voltajes del transformador bajo carga se conoce, y la relación de-- vueltas es también conocida, sujeta solamente a los errores - arriba mencionados.

Relación de transformadores

Método de prueba

Diagrama de conexiones



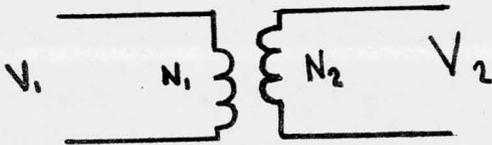
| Fase | <u>terminales</u> alta tensión | Baja tensión | Relación de transformación |
|------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------|
| I | $H_1 - H_2$ | $X_1 - X_2$ | 15.05 |
| II | $H_2 - H_3$ | $X_2 - X_3$ | 15.049 |
| III | $H_3 - H_1$ | $X_3 - X_1$ | 15.05 |

B) Método para la determinación de vueltas del primario así -
como las del secundario.

Existe un método por medio del cual podemos encontrar el número de vueltas del primario, así como las del secundario. Dicho método se halla fundamentado en principios ya expuestos y de ellos haremos uso, primero describiremos el método y después encontraremos o daremos los datos del transformador que estamos analizando.

Sabemos que la relación de transformación la podemos encontrar así:

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

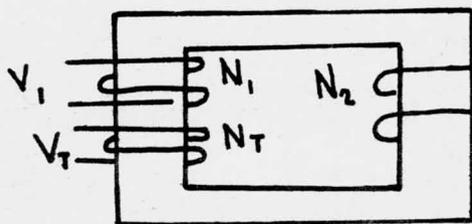


$$\frac{N_P}{N_S} = r = \frac{V_P}{V_S}$$

Los datos del voltaje primario así como los del voltaje secundario son datos de placa, así que podemos obtener el valor de \$r\$. Una vez conocida esa relación iremos por medio del método encontrando el número de vueltas del primario así como las del secundario.

Nos encontramos con que en un transformador tenemos dos embobinados pero un solo núcleo y luego entonces podemos arrollar un embobinado terciario, y tomar el terciario como uno de los devanados y cualesquiera entre el primario y el secundario que -

sea el otro embobinado, de tal manera que:



V_T = Voltaje terciario

N_T = Número de vueltas del devanado terciario.

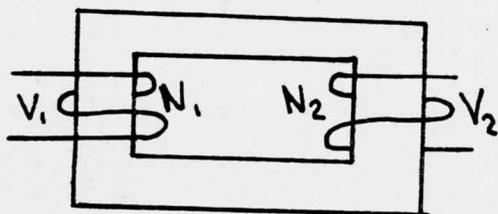
obteniendo la relación de transformación tomando el devanado primario y el devanado terciario, tenemos

$$\frac{V_1}{V_T} = \frac{N_1}{N_T} = r$$

El devanado terciario es el que se arrolla para poder determinar el número de vueltas del primario así como el número de vueltas del secundario. Por lo tanto N_T es conocida, V_1 y V_T también se pueden conocer por medio de mediciones, luego entonces por simple despeje conoceremos el.

$$N_1 = \frac{V_1}{V_T} (N_T)$$

quitando el devanado terciario, el cual solo se utiliza para poder encontrar el valor de V_1 . Tendremos ahora nuestro transformador original y podemos tener 3 datos, dos de ellos por medición (V_1 y V_2) y el otro que es una constante que fue hallada por un método indirecto.



Solo nos resta encontrar el valor de N_2 .

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1}\right) N_1$$

Para un transformador trifásico se hace exactamente lo mismo - pero por fase.

Para el transformador que estamos trabajando se encontraron -- los siguientes valores.

Tomaremos

N_1 = número de vueltas del devanado alta tensión

N_2 = número de vueltas del devanado baja tensión.

Con la ayuda de un devanado terciario de 10 vueltas, además -- con la relación de transformación.

$$\frac{N_1}{N_T} = \frac{V_1}{V_T}$$

N_T = devanado terciario, número de -- vueltas.

$$N_1 = \left(\frac{V_1}{V_T}\right) N_T = \left(\frac{2400}{500}\right) 10 = 48$$

conociendo N_1 y con la relación de transfe. conocemos N_2

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1}\right) N_1 = \left(\frac{36120}{2400}\right) 48 = 722.4$$

Datos obtenidos con las sucesivas derivaciones tenidas para -
el lado de A.T.

posición 1 Extremo Superior

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1} \right) N_1 = \left(\frac{36120}{2400} \right) 48 = 722.4 \text{ vueltas}$$

posición 2

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1} \right) N_1 = \left(\frac{35260}{2400} \right) 48 = 705.2$$

posición 3

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1} \right) N_1 = \left(\frac{34400}{2400} \right) 48 = 688$$

posición 4

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1} \right) N_1 = \left(\frac{33540}{2400} \right) 48 = 670.8$$

posición 5

$$N_2 = \left(\frac{V_2}{V_1} \right) N_1 = \left(\frac{32680}{2400} \right) 48 = 653.6$$

Las relaciones de transformación se dan en el siguiente capítulo en una tabla.

CAPITULO VI

Las constantes que se van a encontrar versan alrededor del --- conductor por lo que haremos lo siguiente.

a) Primero encontraremos la longitud del conductor y luego veremos ó hallaremos algunas características de este conductor en especial.

I.- Peso del conductor

II.- Dimensiones físicas del núcleo para poder encontrar la densidad de flujo del núcleo

III. Los watts/lb de los arrollamientos y los watts/lb del núcleo.

En este capítulo procederemos a determinar las constantes de diseño.

Como primer paso procederemos a enumerar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, dichos datos nos ayudaran a obtener las constantes que buscamos y que son enfocadas al conductor.

Reporte de pruebas

Características (Datos de placa)

Capacidad ----- 7500 KVA

Número de fases - 3

Secuencia de fases --- ABC

Polaridad ----- Sustractiva

Voltaje Alta Tensión ----- 34400 \pm 2.5%

Voltaje Baja Tensión ----- 4160

Frecuencia ----- 60HZ

Elevación de temperatura ----- 55 °C

Tipo OA/FA

Conexión ----- delta-estrella

Altura de funcionamiento s.n.m.- 2300

Resistencia Ohmica (Lecturas obtenidas)

Alta tensión (34400

Baja tensión

Terminales R ()

terminales R ()

H₁ - H₂ ----- 0.764

X₁ - X₂ ----- 0.0092

H₂ - H₃ ----- 0.764

X₂ - X₃ ----- 0.0092

H₃ - H₁ ----- 0.764

X₃ - X₁ ----- 0.0092

R/fase ----- 1.146

R/fase ----- 0.0046

Relación de transformación

| fase | Relación de transformación | | | | |
|-------|----------------------------|-------|-------|--------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A - B | 15.05 | 14.69 | 14.33 | 13.975 | 13.61 |
| B - C | 15.049 | 14.69 | 14.33 | 13.97 | 13.61 |
| C - A | 15.05 | 14.69 | 14.33 | 13.97 | 13.61 |

Pérdidas magnéticas

| | |
|--------------------------|--------|
| Volts medios ----- | 2180 |
| Volts eficaces ----- | 2400 |
| Amperes excitación ----- | 4.09 |
| Watts ----- | 10860 |
| % Iexc. ----- | 0.13 % |

pérdidas eléctricas.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Amperes | 119.85 | 122.8 | 125.8 | 129.1 | 132.5 |
| Volts | 2070 | 2027.4 | 1981.4 | 1937.2 | 1888 |
| % Z | 5.73 | 5.74 | 5.75 | 5.77 | 5.77 |
| Watts | 44635 | 45119 | 45730 | 46257 | 46930 |
| I^2_{Ra} 75°C B.T. | 18050 | 18050 | 18050 | 18050 | 18050 |
| I^2_{Ra} 75°C A.T. | 20154 | 20610.1 | 21194.6 | 21718.9 | 22355.5 |
| indeterminadas a 75°C | 6431 | 6458.9 | 6485.4 | 6488 | 6524 |

Resistencia corregida (total)

B.T. a 75 °C = 0.0165 (Ω)

A.T. a 75 °C = 4.21 (Ω) posición extrema sup.

Primero hablaremos de las características físicas, forma física del conductor, para esto nos auxiliaremos de dibujo e ilustraciones.

Iremos haciendo mediciones de los calibres de los devanados de alta tensión, como el de baja, con y sin aislamiento.

Se muestra una figura en la cual se advierte las sucesivas ca pas de conductor, de conductos y de aislantes, se presenta un corte transversal de los devanados y el resto que compone el transformador:

Todo el montaje de los devanados se hace con el auxilio de an llos de presión, roldanas de aislamiento, esto es para las, - bobinas en el caso de un corto circuito, no entra en vibración. Con un dibujo podemos darnos cuenta de la colocación de las -- bobinas.

Los esfuerzos axiales a que se halla sometido el arrollamiento a causa de las sacudidas de la corriente, pueden tener conse-- cuencias graves si las bobinas que van colocadas unas sobre -- otras no están sólidamente apretadas; pueden entonces sufrir - un choque peligroso. A pesar del empleo de materiales aislantes muy resistentes, éstos se ablandan después de, permanecer, algún tiempo en el aceite, y ello unido a las contracciones -- por los efectos alternativos del calor y del enfriamiento hace necesaria la seguridad de una presión permanente. A continua-- ción se muestra un esquema donde se observa el uso de anillos- y roldanas de presión, los cuales mantienen constantemente - - apretadas las bobinas.

Por otra parte, la onda de frente escarpado, se amortigua por- los anillos metálicos situados en las extremidades de los arro

llamientos y que se hallan en conexión eléctrica con la 1^{era}. y la última espira.

Estos anillos presentan también la ventaja de uniformar el campo eléctrico creado por las bobinas, evitando así las solicitudes demasiado elevadas en los aislantes.

Una condición esencial para la duración del transformador es que la evacuación del calor se efectue activamente en todas -- las partes de los arrollamientos, por lo cual su construcción se hace de forma que en ningún punto se produzcan calentamientos anormales.

En nuestro caso el arrollamiento está formado por varias bobinas, por lo cual se interponen entre ellas calas que mantienen ranuras por las cuales el aceite entra en contacto en dos caras de la bobina.

Distancias

Altura de la ventana $40 \frac{1}{4}"$

Tolerancia total $\frac{1}{39 \frac{1}{4}"}$

Anillos de presión $5/8"$ $\frac{1 \frac{1}{2}"}{37 \frac{3}{4}"}$

Roldanas de Aislamiento $\frac{1/4}{37 \frac{2}{4}"}$
($1/8"$)

Roldana de Aislamiento $\frac{3/4"}{36 \frac{3}{4}"}$
($3/8$)

La determinación de la distancia de $36 \frac{3}{4}"$

Se hizo así

$13 \times 2.39 = 31.07$ ---- 31.07

dos collares de relleno $\frac{3.5}{34.57}"$

para transposiciones $\frac{.125"}{34.695}$ $34 \frac{5}{8}$

$34 \frac{5}{8} = 34.625$

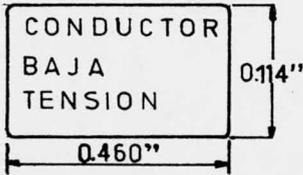
collar relleno ($1 \frac{1}{1b}$) son $2 \frac{2}{1b} = 2 \frac{1}{8} = 2.125$

$\frac{34.625}{+ 2.125}$

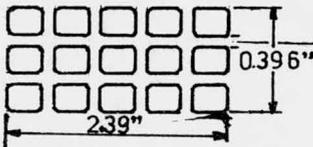
$36.750 = 36 \frac{3}{4}"$

altura de la bobina primaria.

BAJA TENSION



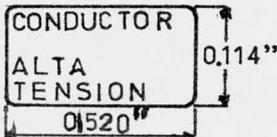
15 CONDUCTORES
0.114" X 0.460" C/CONDUCTOR



aislamiento (0.018)
Espesor del aislamiento para
cada conductor (0.009").

Conductor desnudo de 0.114" X 0.460".

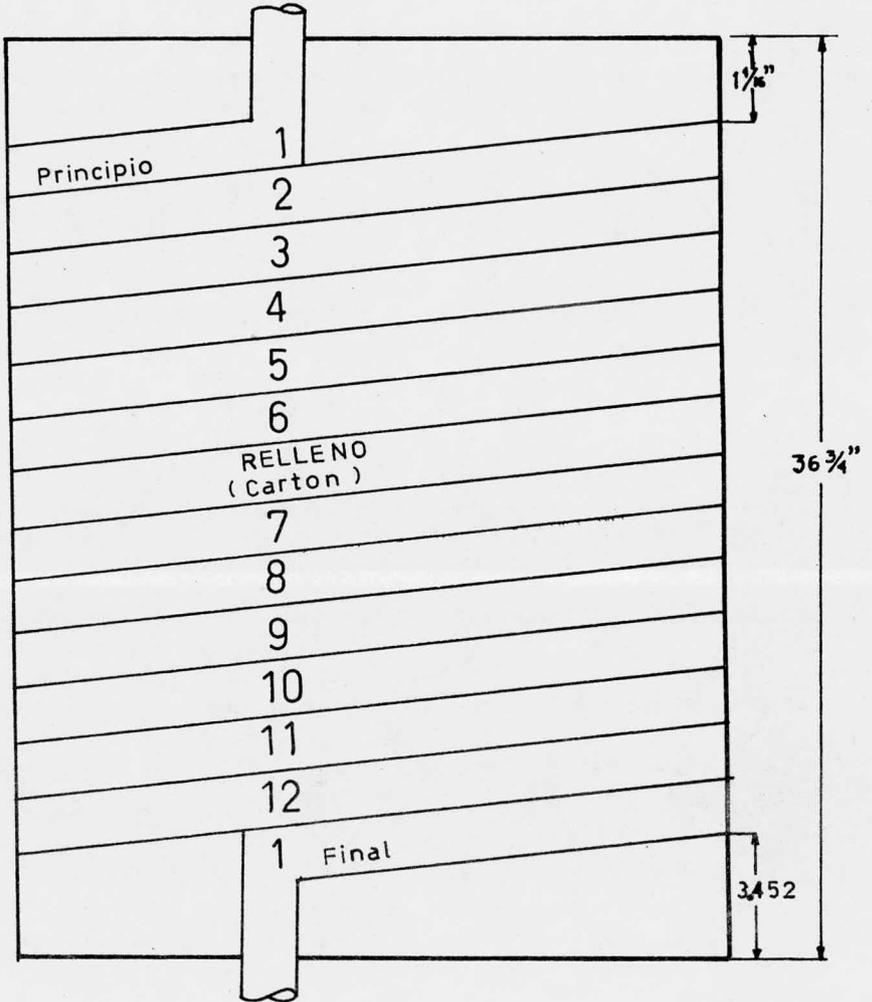
ALTA TENSION



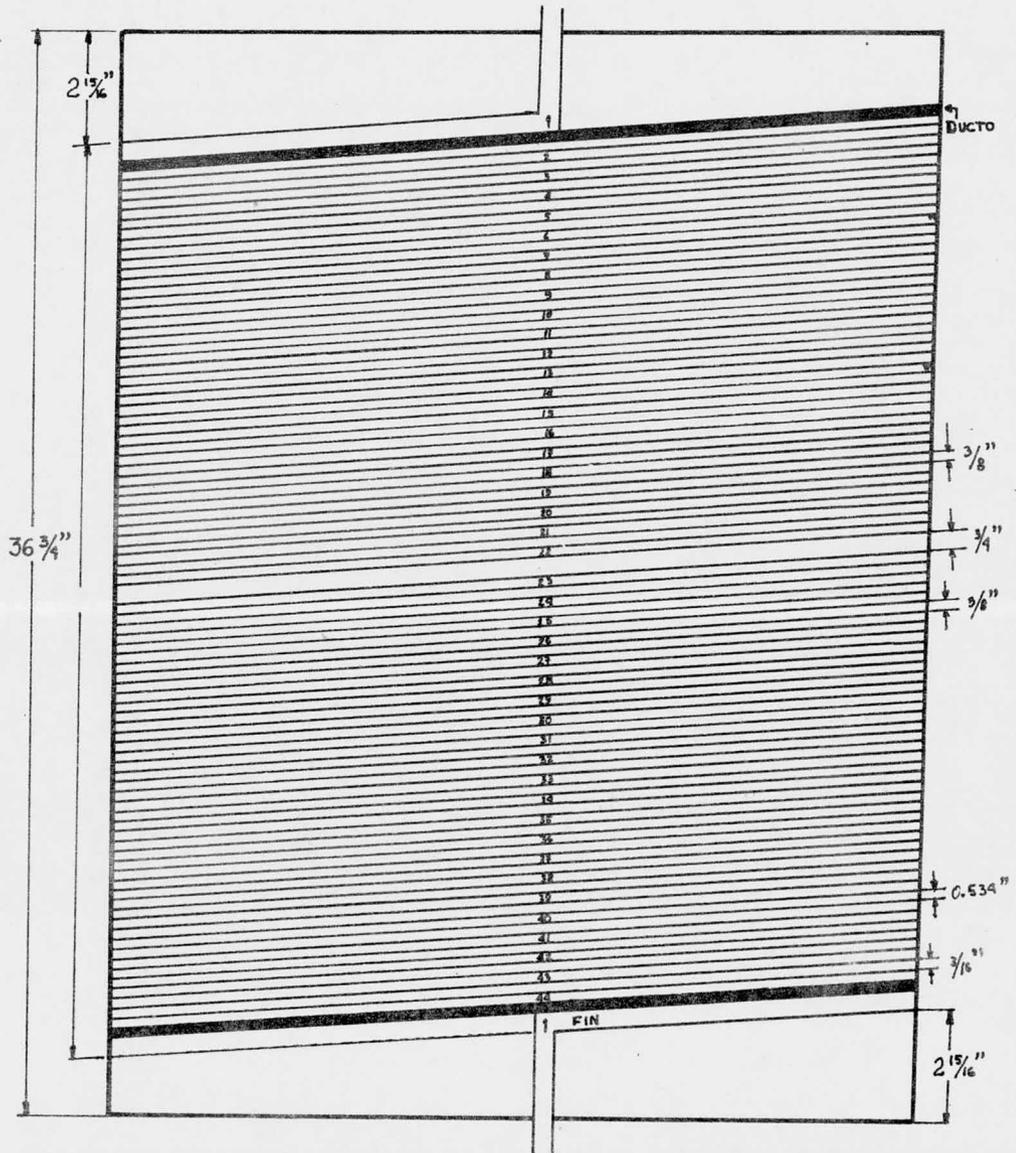
Espesor del aislamiento para
cada conductor (0.007").

Conductor desnudo de 0.114" X 0.520".

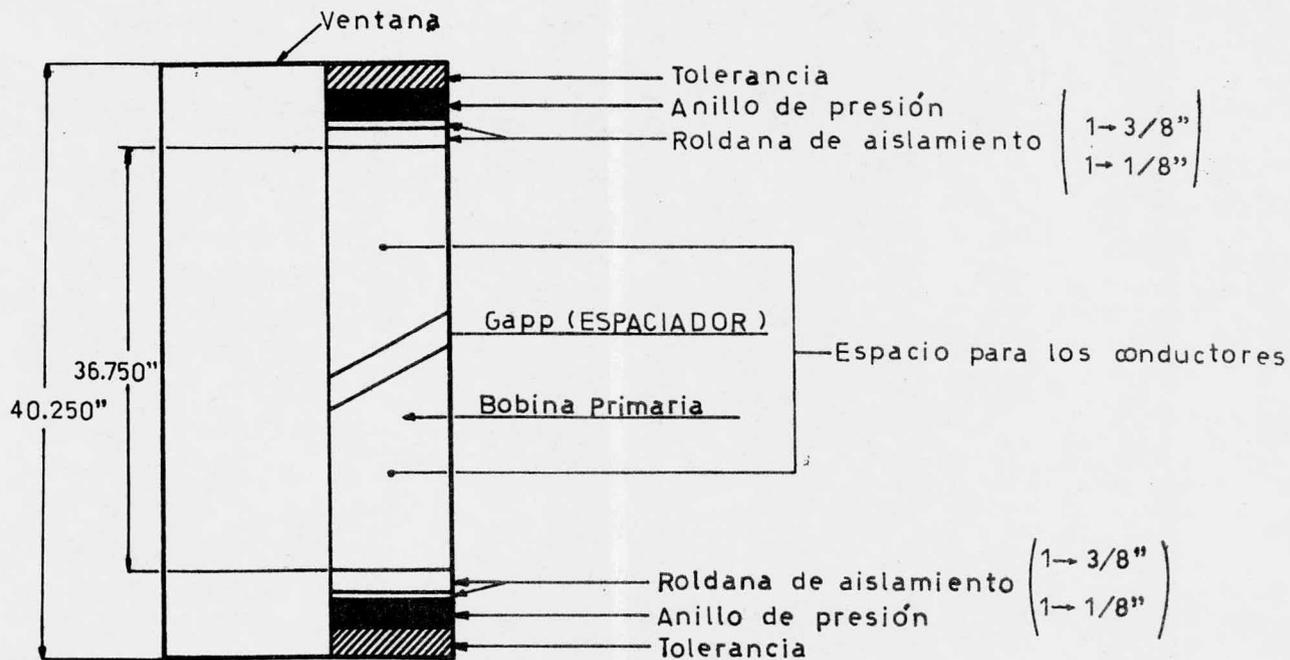
BAJA TENSION



Por transposición $1/4$ "



BOBINA DE ALTA TENSION



Propiedades Del Aluminio.

Capacidad térmica 7.48 W/lb. X = C X inch

Conductividad termica 5.3 $\frac{W}{inch}$ X inch X °C

Conductividad eléctrica .- 61 % de la del cobre, modulo de --
elasticidad.- 10×10^6 lb/inch

Coefficiente de resistividad eléctrica (por cada grado °C)

0.00403

Coefficiente de expansión lineal termica (por °C)

punto de ruptura a la tensión ± 2 % 400 lb/inch.

Para determinar la longitud del conductor se emplean las formu
las de diseño.

Longitud del conductor = L

$$L = \frac{M_T \times N \times 3}{12}$$

donde

M_T = vuelta media en pulgadas

N = número de vueltas

3 = constante número de fases

12 = constante para conversión a pies

$$M_T = \left(\frac{\text{Radio interior} + \text{Radio exterior}}{2} \right) \pi$$

$$M_T = (8.938 \mp 11.128) \pi = 63.23'' \text{ para el conductor de baja --} \\ \text{tensi3n.}$$

$$M_T = (12 + 14,176) \pi = 82.25 \text{ para el conductor de alta ten-} \\ \text{ci3n.}$$

L para baja tensi3n

$$L = \frac{63.23 \times 48 \times 3}{12} = 758. \text{ pies}$$

L para alta tensi3n

$$L = \frac{82.25 \times 722 \times 3}{12} = \frac{14846.125}{12} \text{ pies}$$

Nuestro conductor es un conductor de aluminio, de tablas localizamos el peso especifico.

Watts por libra de aluminio a 75 °C

$$= \left(\frac{4780 I}{A_1} \right)^2 = \left(\frac{0.00374 I}{A_2} \right)^2$$

donde I = Amperes R.M.S. en el devanado

A_1 = Area de la secci3n transversal de aluminio en circular-
mils

A_2 = Area de la secci3n transversal de aluminio en pulgadas-
cuadradas.

Watts por pulgada cuadrada de la superficie de la bobina.

Cálculo de la densidad de flujo magnético

El primario de un transformador es un circuito devanado en su núcleo de hierro. Si la resistencia de este circuito es baja, entonces la fuerza electromotriz es esencialmente un voltaje - producido por la acción del flujo en las espiras primarias.

Por lo tanto si consideramos que la resistencia en el devanado primario es cero, el valor instantaneo del voltaje aplicado es igual a e_p

$$V_p = e_p = - N_p \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$$

donde

N_p = número de espiras del primario

ϕ = valor instantaneo del flujo en el nucleo (maxwells)

1 Weber = 10^8 maxwells

1 $\frac{\text{Weber}}{\text{m}^2}$ = 10^4 Gauss

Si el voltaje aplicado es senoidal es decir

$V_p = V_p \max \sin wt$, el flujo también es senoidal

$$V_p = N_p \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad \text{siendo } \phi = \phi \max \sin wt \quad w = 2\pi f.$$

$$V_p = V_p \max \sin 2\pi ft \quad \phi = \phi \max \sin 2\pi ft$$

entonces como $V_p = e_p$

$$e_p = N_p \frac{d}{dt} (\phi \text{ máx sen } 2\pi \text{ ft}) \times 10^8$$

$$e_p = N_p \phi \text{ máx COS } 2\pi \text{ ft} \times 2\pi f \times 10^8$$

Para obtener el valor cuadrático medio dividimos entre $\sqrt{2}$

$$E_p = N_p \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi \text{ máx} \times 10^8$$

$$E_p = 4.44 f N_p \phi_m \times 10^8$$

La ecuación anterior recibe el nombre de ecuación general del transformador, y se aplica por igual a los voltajes inducidos en el primario y en el secundario.

$$E_p = 4.44 f N_p \phi_{\text{máx}} \times 10^8$$

$$E_s = 4.44 f N_p \phi_{\text{máx}} \times 10^8$$

por lo tanto podemos conocer ϕ máx.

$$\phi \text{ máx} = \frac{E_p}{4.44 f N_p} \times 10^8 \text{ maxwells}$$

$$E_p = \frac{2400 \text{ Volts}}{N_p} \text{ Volts por vuelta.}$$

$$\frac{E_p}{N_p} = V_T = \text{volts} = \frac{2400}{48} = 50$$

También necesitaremos la sección transversal donde se genera el flujo.

Conociendo el area ó sección transversal y el flujo podemos -
conocer la densidad de flujo magnético que es igual a

$$B = \frac{\phi}{A} \quad \text{tomando la baja tensión}$$

dicha densidad de flujo magnético (B) estará dada en Gauss.

Area obtenida es = 196.8 inch² valor en la pierna del - -
transformador.

$$\phi = \frac{E_p \times 10^8}{4.44 (60) (48)} = \frac{2400 \times 10^8 \text{ maxwells}}{12787.2}$$

$$\phi = 0.187687 \text{ 6 webers}$$

siendo 1 Vs = 1wb = 10⁸ Gcm² = 10⁸ maxwells

$$B = \frac{0.1876876 \text{ weber}}{196.8 \text{ inch}^2}$$

$$A = 196.8 \text{ inch}^2 = 1269.67 \text{ cm}^2$$

$$B = \frac{0.1876876 \text{ weber}}{1269.67 \text{ cm}^2} = \frac{0.1876876 \text{ weber}}{1269.67 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

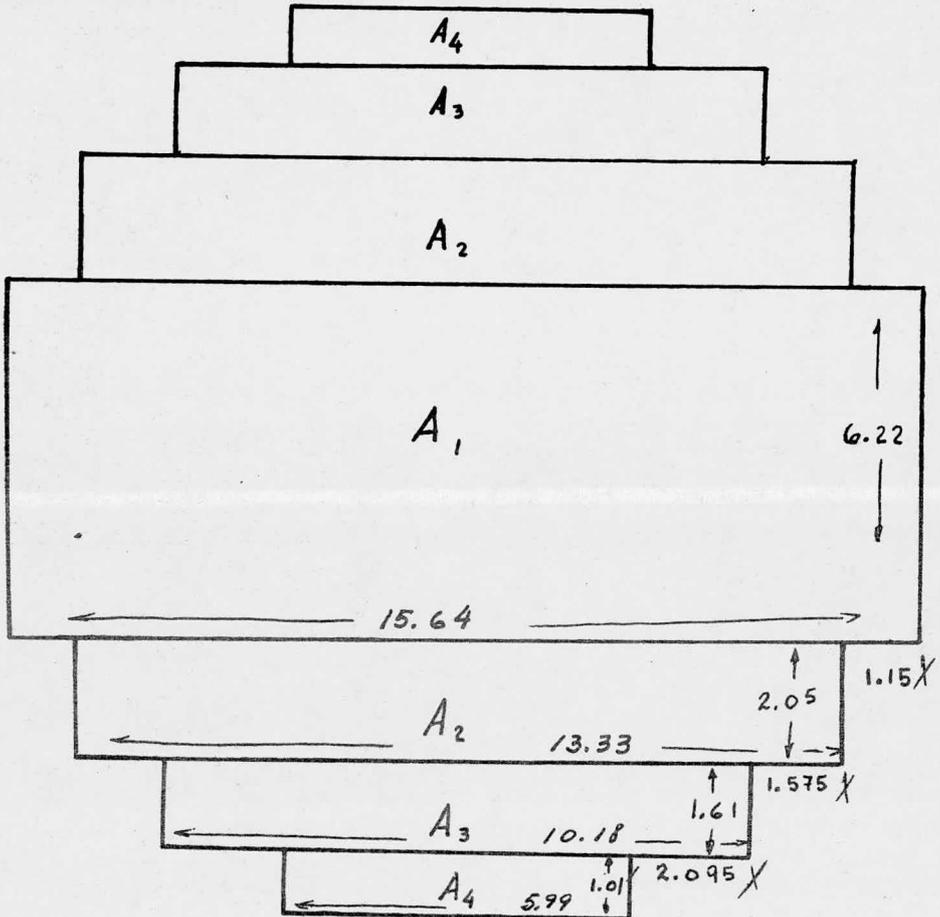
$$B = 1.4782392 \frac{\text{w}}{\text{m}^2}$$

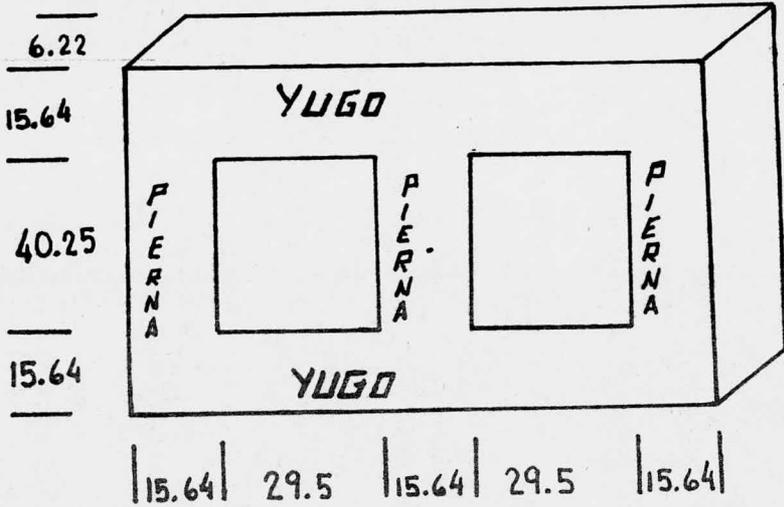
Demostración (Conversión de unidades)

$$1.165 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2 \text{ft}} \cdot \frac{\text{ft}}{12 \text{ pulg}} = 0.0970833 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3}$$

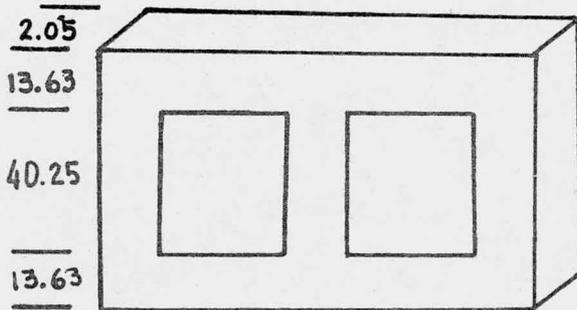
$$0.0970833 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3} \cdot \frac{0.4536 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} = 0.0440369 \frac{\text{Kg}}{\text{pulg}^3}$$

PIERNA

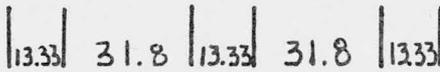




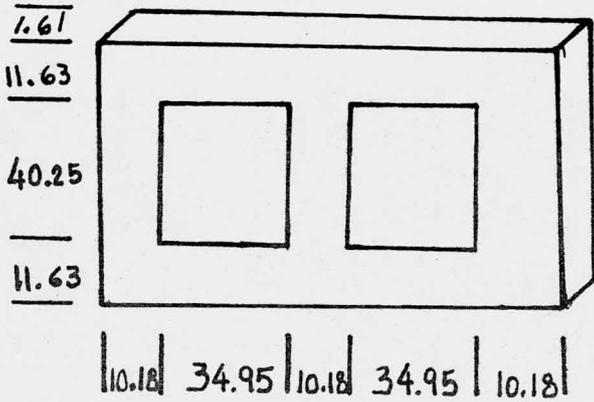
AREA 1 (LAS MEDIDAS ESTAN DADAS EN PULGADAS)



$$29.5 + 2.3 = 31.8$$



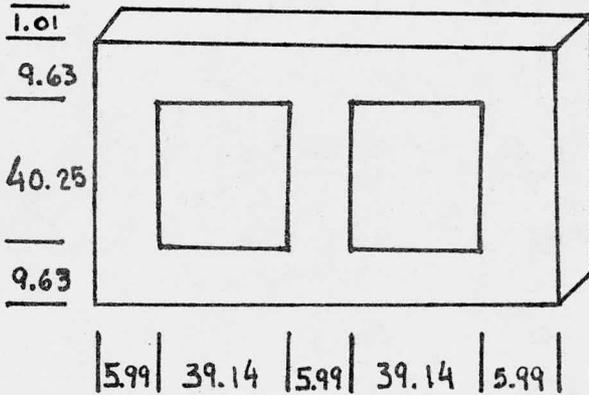
AREA 2



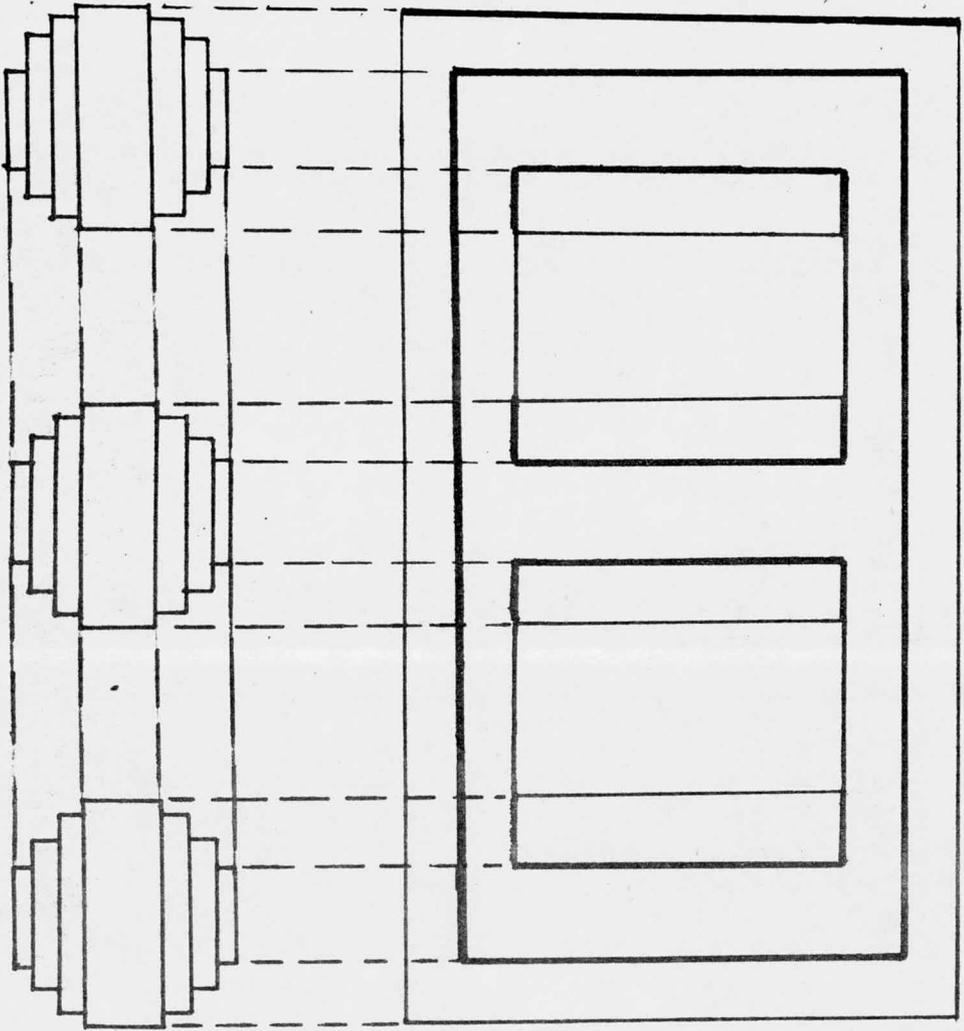
$$31.8 + 1.575(2)$$

$$= 34.95$$

AREA 3 (3)



AREA 4

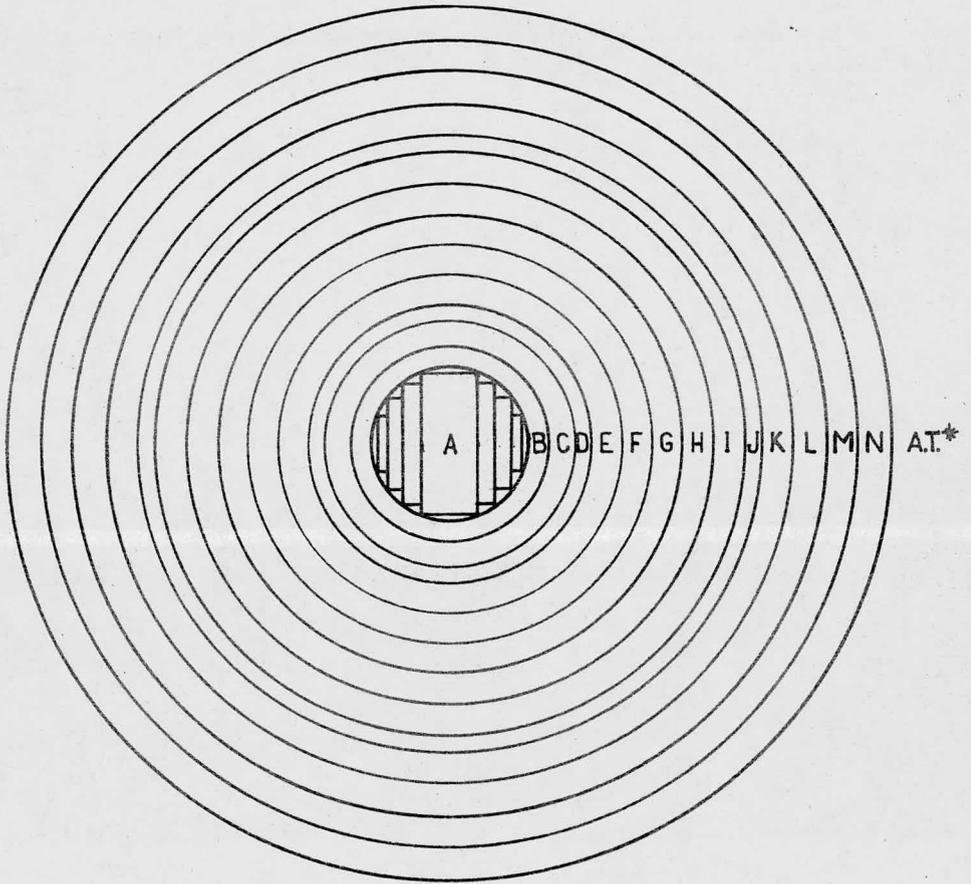


VISTA DE PLANTA

VISTA LATERAL

NUCLEO DEL TRANSFORMADOR.

BAJA TENSION



NUCLEO. Y EMBOBINADOS CON SUS CORRESPONDIENTES ETAPAS.

- A.- Nucleo.
- B.- Ducto de 3/16".
- C.- Tubo de cartón. de 3/16".
- D.- Paso de aceite para enfriamiento de los devanados. de 1/8".
- E.- Primera capa (Bobina Primaria).
- F.- Ducto de 1/4".
- G.- Segunda capa (Bobina Primaria).
- H.- Ducto de 1/4".
- I.- Tercera capa (Bobina Primaria)
- J.- Aislamiento de 0.076".
- K.- Cuarta capa (Bobina Primaria).
- L.- Ducto de 5/16".
- M.- Tubo de cartón de 1.4".
- N.- Ducto de 1/4".

* ALTA TENSION.

$$0.0440369 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \frac{x^1 \text{pulg}^3}{(.254)^3 \text{dm}^3} = \frac{0.0440369}{0.016387} \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} =$$

$$2.687 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \quad \text{valor localizado en tablas en kg/dm}^3$$

$$1.165 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2 \text{ft}} = 2.687 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

$$\text{siendo } 10^4 \text{ Gauss} = 1 \frac{\text{weber}}{\text{m}^2}$$

$$B = 14782.392$$

Si utilizamos la bobina de Alta tensión obtendremos la misma - densidad de flujo.

$$\text{Siendo } E_S = 34400 \text{ Volts}$$

$$N_S = 688 \text{ vueltas}$$

$$\phi_S = \frac{E_S \text{ webers}}{4.44 f N_S}$$

$$O_S = \frac{E_S \times 10^8 \text{ maxwells}}{4.44 (60) (688)} = \frac{34400 \text{ weber}}{183283.2}$$

por ser 1 weber = 10^8 mexwells.

$$\phi_S = 0.1876876 \text{ webers}$$

el área es la misma

$$\therefore B = \frac{\phi}{A} = \text{Gauss } 14782392$$

Ahora procederemos a encontrar el peso total con otra de las formulas para diseño de transformador.

Este peso es el de los devanados de alta y baja tensión respectivamente.

DEVANADO (ALTA TENSION) (W_T = peso total en libras)

$$W_T = 1.165 \times 0.0592 \text{ inch}^2 \times 14846 \text{ ft} = 1025 \text{ Lbs.}$$

$$1.165 \frac{\text{Lbs}}{\text{inch}^2 \times \text{ft}} = 2.7 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = \text{peso específico del aluminio}$$

$$0.05928 \text{ inch}^2 = \text{Area del conductor de alta tensión}$$

$$14846 \text{ ft} = \text{longitud del devanado de alta tensión}$$

$$\text{Area del conductor A. T.} = (0.520)(0.114) = 0.05928 \text{ inch}^2$$

Devanado (Baja tensión)

$$W_T = 1.165 \times 0.774 \text{ inch} \times 758 \text{ ft} = 683.49618 \text{ Lbs.}$$

buscando en tablas de diseño de transformadores de tablas con conductores desnudos tenemos que para un conductor de

$$0.114 \times 0.460$$

$$\text{Area} = 0.0516 \text{ inch}^2$$

$$\text{Resistencia} = .1919 \Omega / 1000 \text{ ft}$$

$$\text{Peso} = 198.5 \text{ lbs} / 1000 \text{ ft.}$$

Obtención de areas del transformadorArea del yugo

$$A_1 = 6.22 \times 15.64 = 97.28 \text{ inch}^2$$

$$A_2 = 2.05 \times 13.63 \times 2 = 55.83 \text{ inch}^2$$

$$A_3 = 1.61 \times 11.63 \times 2 = 37.448 \text{ inch}^2$$

$$A_4 = 1.01 \times 9.63 \times 2 = 19.45 \text{ inch}^2$$

$$\text{Area total} = 210 \text{ inch}^2$$

Area de la pierna

$$A_1 = 6.22 \times 15.64 = 97.28 \text{ inch}^2$$

$$A_2 = 2.05 \times 13.33 \times 2 = 54.65 \text{ inch}^2$$

$$A_3 = 1.61 \times 10.18 \times 2 = 32.77 \text{ inch}^2$$

$$A_4 = 1.01 \times 5.99 \times 2 = 12.1 \text{ inch}^2$$

$$\text{Area total} = 196.8 \text{ inch}^2$$

Relación de masas

Peso total Bobinas 1710 lbs.

Peso total nucleo. 14662 lbs.

Obtención de los watts/lb de cada uno de los devanados.

Devanado Alta Tensión.

$$\frac{\text{Watts}}{\text{lb}} = \frac{20154}{1025} = 19.66 \frac{\text{watts}}{\text{libra}}$$

Debanado Baja Tensión

$$\frac{\text{watts}}{\text{libra}} = \frac{18050}{683.49} = 26.4$$

Peso total bobinas

$$\text{A.T.} + \text{B.T.} = 1025 + 683.49 = 1708.49 \text{ libras}$$

Obtención de volúmenes a partir de las áreas ya obtenidas.

$$V_1 = (15.64 \times 3 + 29.5 \times 2) (15.64 \times 2 + 40.25) (6.22) \\ - 2(29.5 \times 40.25 \times 6.22)$$

$$V_1 = 32354.621$$

$$V_2 = (13.33 \times 3 + 31.8 \times 2) (2.05) (13.63 \times 2 + 40.25) \\ - 2(31.8 \times 40.25 \times 2.05)$$

$$V_2 = 9088.595$$

$$V_3 = (10.18 \times 3 + 34.95 \times 2) (1.61) (11.63 \times 2 + 40.25) \\ - 2(34.95 \times 40.25 \times 1.61)$$

$$V_3 = 10270.1$$

$$V_4 = (5.94 \times 3 + 39.14 \times 2) (9.63 \times 2 + 40.25) (1.01) \\ - 2 (40.25 \times 1.01 \times 39.14)$$

$$V_4 = 2593.8223$$

$$V_T = V_1 + 2 V_2 + 2 V_3 + 2 V_4$$

$$V_T = 76259.655 \text{ pulg}^3$$

$$V_T = 76259.656 \text{ pulg}^3$$

$$\gamma = 0.19226 \frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^3} \text{ se trata de un material H}_3$$

Obtención de la masa del nucleo.

$$m = \gamma v = \left(0.19226 \frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^3}\right) (76259.656 \text{ pulg}^3)$$

$$m = 14661.681 \text{ libras}$$

$$1 \text{ pulgada cubica} = 16.39 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ kg} = 2.2 \text{ libras}$$

Obtención de los watts/libras del fierro

$$\frac{\text{watts}}{\text{libra}} = \frac{10860}{14661.681} = 0.7407 \frac{\text{watts}}{\text{libra}}$$

El material H₃ tiene un limite de trabajo 0.76 W/lb.

Esto es sin usar refrigerante, en este caso aceite.

Relación de Pesos.

| | |
|------------------------|----------|
| Peso total bobinas | 1710lbs |
| Peso total nucleo | 14662lbs |
| Peso total aislamiento | 1400 lbs |
| Peso total estructura | 2040 lbs |
| Peso total tolerancias | 188 lbs |

Peso total transformador = 20000 lbs.

CAPITULO VII

Con el presente trabajo me propuse -- demostrar que se tienen medios y conocimientos necesarios para desarrollar este tipo de investigaciones las cuales nos permitiran acortar la distancia tecnológicas con los paises desarrollados, para de esta forma desarrollar una tecnología propia.

CONCLUSIONES.

En todo sistema industrial ó de potencia, la función de transformación es de gran interes, ya que del buen funcionamiento de ésta, depende la continuidad del servicio.

El estudio de los transformadores es importante a causa de -- sus extensas y variadas aplicaciones y de sus interrelaciones con procesos y aparatos para la conversión de energía electromecanica.

Es debido al desarrollo tecnológico de la ingeniería eléctrica, que se ha provocado que sea necesario tener un conocimiento más amplio de los diversos sistemas de facil clasificación así como de procesos y pruebas además de conocer las normas - establecidas para este fin.

Por tanto para poder controlar la calidad en la manufactura - o en la reparación de equipo resulta de gran importancia efectuar una serie de pruebas, ya desarrollados además sus métodos, que permiten estimar si el equipo puede trabajar en las especificaciones para las cuales se han diseñado, con un minimo riesgo de falla.

Esta serie de pruebas nos permite conocer sus constantes como lo son la cantidad de aluminio que tiene en sus devanado.

Teniendo estos valores y las pruebas podremos utilizar efi- - cientemente nuestros transformadores, además de poder contar-

con técnicas adecuadas y al alcance de un laboratorio para poder efectuar reparaciones o mejoras al equipo.

Las pruebas que se efectuaron ó que se mencionan son mas que-
ilustrativas para lograr nuestro fin.

BIBLIOGRAFIA.

Aguilar Campuzano, Guillermo, Conversión de energía electrome-
canica I. Instructivo de laboratorio F. I. Instructivo de la-
boratorio F. I.

Mendez Tellez Girón, Jose. Practicas de Conversión de energía
electromecanica II. F. I.

Normas Oficiales Mexicanas

NOM-J-169 (CCONNIE 2-1-3) Métodos de prueba

NOM-J-116 (CCONNIE 2-1-1) Transformadores de dist.

NOM-J-284 (CCONNIE 2-1-2) Transformadores de potencia.

Gourishankar, Vembic. Conversión de energía electromecanica, -
Representaciones y Servicios de Ingeniería.

Teoría, Cálculo y construcción de transformadores Editorial -
Labor. Juan Corrales Martín.

Estaciones transformadoras y de distribución Gaudencio Zoppe-
tti. Gustavo Gili.

Curso de Transformadores y motores trifásicos de inducción, -
ENRIQUEZ HARPER IIMUSA.

Aplicación del equipo eléctrico.

IEM.

Manual de fórmulas técnicas.

Kurt Gieck. Representaciones y Servicios de Ingeniería.

Teoria Electro Magnética Zahn.

Grain - Oriented Electrical Steed Nippon Steel Corporation.