

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE CUAUTITLAN

TESIS SOBRE:
**"ESTUDIO DE LAS NORMAS
DE TRANSFORMADORES DE
POTENCIA Y MOTORES
DE INDUCCION"**

Q u e p r e s e n t a n

**OSCAR OROZCO VILLA
JESUS SOTO CRUZ
RICARDO ROMERO OBREGON**
para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Director de Tesis:
ING. ALFREDO LOPEZ TAGLE

CUAUTITLAN 1981



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

INTRODUCCION.

Antecedentes Históricos de la Normalización en México.....	9
Concepto de la Normalización	10
Importancia de la Normalización.....	11
Ventajas de la Normalización.....	12
Organismos Nacionales de Normalización.....	14
La Normalización en los Estados Unidos de América.....	16
Organismos Internacionales de Normalización.....	20
Institutos de Normalización en el Mundo.....	22

CAPITULO I TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Introducción.....	27
Principio del Transformador.....	27
El Transformador Ideal.....	30
Diagrama Fasorial.....	31
Circuito Equivalente.....	33
Definiciones, Especificaciones Mecánicas, Eléctricas y Físicas.....	37

CAPITULO II PRUEBAS DE FABRICA Y CAMPO A TRANSFORMADORES.

Prueba de Resistencia Óhmica de Devanados.....	56
Relación de Transformación. Transformador Patrón.....	60
Polaridad y Secuencia de Fases. Diagrama Vectorial.....	64
Impedancia y Pérdidas debidas a la Carga.....	69
Impedancia. Método del Corto Circuito.....	73
Autotransformadores. Pérdidas de Carga e Impedancia en un Autotransformador.....	75
Impedancia de un Transformador Trifásico con Voltaje Trifásico. Puente de Impedancias.....	76
Resistencia de Aislamiento.....	81
Fallas de Aislamiento. Absorción Dieléctrica.....	82
Potencial de Prueba Aplicado. Carga Residual. Envejecimiento.....	85
Aplicación de la Resistencia de Aislamiento.....	86

Factor de Potencia de Aislamiento en Equipo Eléctrico.....	97
Factor de Potencia de Transformadores.....	98
Recomendaciones Generales.....	104

CAPITULO III PRUEBAS A TRANSFORMADORES EN FABRICA.

Pérdidas de Excitación. Método del Voltmetro de Tensión Media.....	106
Corriente de Excitación.....	112
Método del Factor de Forma.....	113
Método del Ampérmetro de Cresta.....	115
Circuitos y Conexiones Básicos.....	119
Factores que afecten las pruebas de Corriente de Excitación.....	132
Desmagnetización en Conexiones Estrella.....	135
Detección de Fallas con Corriente de Excitación.....	140
Regulación.....	141
Eficiencia.....	144
Prueba de Temperatura Métodos de Carga Real y de Corto Circuito....	145
Corrección por Altitud.....	147
Factor de Corrección de Frecuencia.....	148
Pruebas Dieléctricas.....	156
Potencial Aplicado. Potencial Inducido.....	157

CAPITULO IV PRUEBAS DE CAMPO A TRANSFORMADORES.

Tensión de Ruptura Dieléctrica del Aceite.....	160
Método de Electrodos Planos.....	162
Método de Electrodos Semiesféricos.....	167
Factor de Potencia y Constante Dieléctrica.....	169
Resistividad.....	174

CAPITULO V PROCEDIMIENTOS PARA SECADO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Principios Teóricos.....	180
Humedad. Eliminación de Humedad.....	180
Grados de Secado. Método con Alto Vacío.....	185
Aislamientos Sólidos en Transformadores de Potencia.....	193
Humedad en Aislamientos Sólidos.....	193
Determinación de Humedad Residual.....	195
Valores Máximos Aceptables de Humedad Residual.....	198
Método del Punto de Rocío del Gas.....	201

CAPITULO VI PRUEBAS DE IMPULSO A TRANSFORMADORES.

Respuesta a Sistemas de 1er y 2o orden.....	207
Efecto de la 3er y 5a Armónica.....	214
Formas de ondas de impulso.....	217
Circuito de Pruebas de Impulso.....	220
Detección de Fallas.....	229
Tamaño del Generador de Impulsos.....	236
Detección de fallas por Oscilogramas de Onda Completa.....	238
Efectos de Magnetización del Núcleo en Detección de fallas.....	243
Detección de Fallas por Oscilogramas de Corriente.....	246
Detección de Fallas por Ondas Cortadas.....	253

CAPITULO VII MOTORES ELECTRICOS.

Principio de Funcionamiento. Campo Giratorio.....	261
Diagrama Fasorial.....	265
Circuito Equivalente.....	270
Prueba de Circuito Abierto.....	271
Prueba de Rotor Bloqueado.....	271

CAPITULO VIII CLASIFICACION DE MOTORES.	
Clasificación por Protección Mecánica y Enfriamiento.....	273
Diseños Eléctricos.....	280
Clasificación por Potencia.....	283
Aislamiento.....	283
Protección Térmica.....	286
Armaduras a Carcasas. Dimensionamiento por Letras.....	290
Montaje del Motor y Caja de Terminales.....	295
CAPITULO IX CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES.	
Eficiencia.....	298
Factor de Potencia.....	298
Factor de Servicio.....	300
Pares de los Motores Eléctricos.....	308
Código de Letras.....	313
Secuencia de Fases.....	313
Marcas de Terminales.....	314
Frecuencia.....	321
Datos de Placa.....	321
CAPITULO X METODOS DE PRUEBA.	
Prueba de Alto Potencial.....	323
Potencial Util y Corriente de Plena Carga.....	326
Eficiencia. Método del Freno. Método del Dinamómetro.....	327
Pérdidas. Del Rotor, por Blindaje, Fricción y del Núcleo.....	334
Deslizamiento.....	338
Par y Corrientes de Arranque.....	339
Par Máximo. Factor de Potencia.....	340
Prueba de Rotor Bloqueado.....	341
Prueba Par-Velocidad y Corriente-Velocidad.....	342
Prueba de Temperatura: Incremento de Temperatura.....	346
CONCLUSIONES.....	366
BIBLIOGRAFIA.....	368

I N T R O D U C C I O N

I.- ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA NORMALIZACION EN MEXICO.

En nuestro país, desde la época prehispánica hasta nuestros días, las actividades de pesar y medir han estado reglamentadas en base a patrones fijados por el Estado. Entre los aztecas fueron los jueces quienes ejercieron esta labor en los mercados, posteriormente, durante la época de la Colonia fue designado un organismo llamado "Fiel Contraste" como el encargado de tener y conservar los patrones y verificar los pesos y medidas con los particulares. Estas medidas se continuaron empleando hasta el siglo XIX, siendo entonces substituídas por las unidades del Sistema Métrico Decimal, adoptado de Francia, mediante el Decreto de Don Ignacio Comonfort del 15 de marzo de 1857, el cual fijaba únicamente el cambio en el sistema de pesas y medidas; posteriormente, el 15 de marzo de 1861 Don Benito Juárez promulgó un Decreto reformando el Sistema Métrico Decimal - anteriormente publicado fijando al Metro como Unidad de Longitud, al Area para medidas de superficie y agrarias, al Metro Cúbico para medidas de sólidos, el Litro para líquidos y el Gramo para todas las pesas, y la Peseta Mexicana como unidad monetaria para toda la República.

El 19 de junio de 1895, el Presidente Porfirio Díaz dicta la Ley sobre Pesas y Medidas, ordenando que el Sistema Métrico Decimal Internacional de Pesas y Medidas sea el único legal en los Estados Unidos Mexicanos.

En enero de 1943, el antiguo Departamento de Pesas y Medidas fue transformado en la Dirección General de Normas con el propósito de elaborar en el menor tiempo posible las normas industriales destinadas a reglamentar la producción, así como la realización de trabajos técnicos -

e investigaciones económicas y sociales. Estos proyectos se vieron reforzados desde el punto de vista legal con la expedición de la Ley de Normas Industriales el 31 de diciembre de 1945, la cual sentó las bases; para el establecimiento de contactos con organismos internacionales de normalización.

El 7 de abril de 1961 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley de Normas, Pesas y Medidas, actualmente en vigor. Las bases legales para esta Ley son los Artículos 71, 72, 73 y 89 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley de Atribuciones del Poder Ejecutivo Federal y recientemente el Reglamento Interior de la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial que adscribe la Dirección General de Normas a la Subsecretaría de Fomento Industrial, y la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

1.1 CONCEPTO DE LA NORMALIZACION.

La normalización está definida como una disciplina que trata del establecimiento, aplicación y adecuación de Reglas o Normas destinadas a conseguir y mantener un ordenamiento dentro de un campo determinado, con el fin de procurar beneficios para la sociedad acordes con su desarrollo económico y social; es una disciplina con base técnica científica que confiere la capacidad de hacer reglas o normas, vigilando su aplicación y perfeccionamiento con el tiempo.

Podemos agregar que es un mecanismo de desarrollo que identifica los niveles de calidad alcanzadas en un determinado sistema productivo, descubre deficiencias terminológicas ampliando consiguientemente el lenguaje ...

técnico, insuficiencias tecnológicas y oriente la investigación científica hacia la superación de las mismas. Entonces, es el sistema mediante el cual se procura el desarrollo a través de retroalimentación de la información, - su confrontación con las metas del desarrollo y la orientación de la investigación a dicho propósito.

1.2. IMPORTANCIA DE LA NORMALIZACION.

En toda transacción comercial deben establecerse, por necesidad especificaciones acordadas tanto por el productor como el consumidor. - si acuerdan normalizar las características de los productos en tal forma -- que simplifiquen los pedidos del consumidor y reduzcan las variedades producidas por el fabricante, ambos obtendrán un beneficio inmediato.

Al reducir la variedad de artículos, satisfaciendo no obstante, las necesidades de todos los consumidores, el fabricante obtendrá una - ventajosa disminución de costo al reducir su variedad de herramental, de materiales de producción, al emplear más fácilmente obreros especializados. - Si hace más corto el tiempo de elaboración de sus artículos reducirá sus -- existencias de almacén logrado como resultado un artículo de mejor calidad a más bajo precio. Reflejado esta actitud a todo el país redundará en una - economía más sana con todos los beneficios inherentes.

En la normalización se distinguen claramente dos grandes etapas: la identificación científica de la producción normal y la fijación de los límites aceptables de la calidad para el mercado. La primera requiere - de la investigación necesaria para definir los parámetros o características distintivas de calidad, la definición de las unidades, métodos y sistemas -

de medición y la segunda se refiere el procesamiento estadístico de los resultados de los análisis de pruebas y ensayos de laboratorio, su resultado es la identificación de los parámetros adecuados: el conjunto de estos parámetros hacen el proyecto básico de toda norma. La normalización se lleva a cabo con la discusión del proyecto base y consiste en la confrontación - entre las posibilidades de los productores y las exigencias de los consumidores, procurando obtener el óptimo ajuste.

1.3. VENTAJAS DE LA NORMALIZACION.

Dentro de las ventajas derivadas de la Normalización podemos mencionar:

En el aspecto general:

- Fijar los niveles de calidad de un producto para que el consumidor esté satisfecho con lo que adquiere.
- Reducir la diversificación de modelos o tipos de un producto a un número capaz de cubrir las necesidades que prevalezcan en una época dada.
- Unificar o definir ciertos requisitos de los productos con el fin de hacer posible la complementación o intercambiabilidad entre ellos.

En el campo de la producción:

- Facilitar el planeamiento de la producción.
- Mejorar los procesos de fabricación.
- Facilitar la producción en serie.
- Uniformizar la mano de obra.

- Reduce el espacio para almacenamiento.
- Reduce las existencias almacenadas.
- Disminuye costos de adquisición, fabricación y mantenimiento de equipo y embalaje.
- Facilita la capacitación de personal.

En el campo de la comercialización y el consumo:

- Garantiza una calidad estable.
- Facilita el acceso a datos técnicos, anteriormente dispersos o inciertos.
- Facilita la selección del producto más adecuado a las necesidades.
- Agiliza la formulación de pedidos.
- Disminuye los precios
- Reduce los plazos de entrega.
- Permite la comprobación de la calidad.
- Disminuye los litigios.

En el campo de la Economía:

- Mejora la producción en cantidad, calidad y regularidad.
- Establece cierto orden en las actividades económicas.
- Permite la estructuración progresiva de un catálogo de productos nacionales.
- Promociona las ventas en el mercado internacional.
- Acelera el proceso socio-económico.

1.4 ORGANISMOS NACIONALES DE NORMALIZACION.

En nuestro país la Dirección General de Normas de la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial es el organismo oficial encargado de la coordinación de los diferentes sectores interesados en la elaboración de Normas.

Para lograr las finalidades que le han sido asignadas, la Dirección General de Normas realiza las siguientes funciones a través de sus Departamentos:

- Normaliza los productos industriales a fin de garantizar una calidad sostenida en la que confíen el consumidor nacional y el extranjero.
- Otorga la autorización para el uso del Sello Oficial de Garantía, a productos sujetos a Norma Oficial de Calidad.
- Revisa sistemáticamente los instrumentos de pesar y medir para asegurar -- que su uso sea correcto y evitar posibles fraudes en grande o pequeña escala.
- Vigila la fabricación y uso de los instrumentos de pesar y medir.
- Estudia e investiga permanentemente la realidad nacional para hacer factibles los patrones que establecen las Normas y para lograr su renovación, -- bien por exigencias del consumidor o por avances técnicos o industriales.

Para ello el Departamento de Normalización encausada adecuadamente la actividad técnica de los expertos en producción y consumo, y define la política que ha de aplicarse, contando con los siguientes Comités de Normalización:

- 1.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria Eléctrica.
- 2.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria Siderúrgica.
- 3.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria Electrónica y de Comunicaciones Eléctricas.
- 4.- Comité Consultivo de Normalización de Productos y Materiales para la Construcción.
- 5.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria Alimentaria
- 6.- Comité Consultivo de Normalización de Alimentos para Animales.
- 7.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria del Papel.
- 8.- Comité Consultivo de Normalización de Materiales, Equipo para Manejo y Uso de Gas Natural.
- 9.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria de Productos Químicos.
- 10.- Comité Consultivo de Normalización de Industria Textil.
- 11.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria Automotriz.
- 12.- Comité Consultivo de Normalización de la Seguridad Industrial.
- 13.- Comité Consultivo de Normalización de Metales No Ferrosos.
- 14.- Comité Consultivo de Normalización de Minerales No Metálicos.
- 15.- Comité Consultivo de Normalización de Armas y Cartuchos Deportivos.
- 16.- Comité Consultivo de Normalización de Productos Plásticos.
- 17.- Comité Consultivo de Normalización de Materiales Refractarios.
- 18.- Comité Consultivo de Normalización de Bebidas Alcohólicas.
- 19.- Comité Consultivo de Normalización de Parasiticidas Agropecuarios.
- 20.- Comité Consultivo de Normalización de Soldadura.
- 21.- Comité Consultivo de Normalización de Dibujo Industrial.
- 22.- Comité Consultivo de Normalización de Fertilizantes.
- 23.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria de Objetos de -

Plata Labrada, Oro, Platino y Paladio.

- 24.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria de la Cerámica.
- 25.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria de la Madera.
- 26.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria del Vidrio.
- 27.- Comité Consultivo de Normalización de Herramientas y Máquinas Herramientas.
- 28.- Comité Consultivo de Normalización de Aparatos de Medición.
- 29.- Comité Consultivo de Normalización de Artes Gráficas.
- 30.- Comité Consultivo de Normalización de Equipos para Proceso de Combustión.
- 31.- Comité Consultivo de Normalización de Materiales, Instrumentos y Equipos Dentales.
- 32.- Comité Consultivo de Normalización de Pinturas, Barnices, Productos Afines y Materias Primas.
- 33.- Comité Consultivo de Normalización de Empaques y Embalajes.
- 34.- Comité Consultivo de Normalización de Frutas y Hortalizas en Estado --- Fresco.

En todo tipo de producción industrial existen tres niveles de -- normas.

El primero es el empresarial, llamado así porque la norma es elaborada internamente por una compañía. Las normas empresariales son de tipo estrictamente interno; una empresa puede establecer normas dimensionales para -- sus herramientas de corte, normas de diseño para propiciar el uso de determinadas partes o secciones de un producto igualmente normalizadas, norma de métodos de prueba para determinar las características tanto de las materias primas como de sus propios productos.

El segundo nivel, en nuestro caso el más importante es en el --
cual la norma elaborada por los grupos directamente interesados en las especi-
ficaciones de un producto: organismos comerciales, institutos técnicos y de -
investigación y por representantes del interés general, resultando en una Nor-
ma Nacional.

El tercero y último es el nivel internacional, en el que varios
representantes de varios países coordinan la coincidencia de diversas normas
nacionales.

En el caso del segundo nivel, se encuentran en nuestro país dos
tipos de Normas, siendo el primero de Normas Obligatorias como las que rigen
el sistema general de pesas y medidas, las de seguridad y otras que son fija-
das por la Dirección General de Normas; en el segundo caso se encuentran las
normas optativas que fijan niveles de calidad preferenciales, procesos o méto-
dos de prueba.

LA NORMALIZACION EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMERICA.

En los Estados Unidos de América la Normalización se realiza en
dos formas: A nivel especial por medio de organismos establecidos por el go-
bierno y a nivel particular.

En el primer caso el gobierno de los Estados Unidos formó la ofi-
cina de Normalización, organismo destinado a fomentar la Normalización, ----

pero por inoperante fue cerrada hace tiempo, actualmente existe en su lugar la Oficina Nacional de Normas (National Bureau of Standards) dependiente del Departamento de Comercio del Gobierno Federal, esta dependencia -- elabora únicamente Normas del área de Metrología y no son aplicables en -- todos los estados, además de que en cada estado de la Unión Americana las Normas son diferentes en su contenido y aceptación. A la fecha, el Gobierno Federal está organizando un sistema que reconozca una sola Norma de un producto para todo el país.

El otro tipo de Normalización, a nivel particular es una serie de agrupaciones de fabricantes de un tipo definido de productos que elaboran sus propias normas de carácter interno, pueden ser, también, agrupaciones de funcionarios de un sector industrial, que elaboran Normas de alta calidad y contenido técnico, sin el reconocimiento de sus mismas empresas, como en el caso de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE).

Todas estas agrupaciones se encuentran reunidas en una gran asociación que contempla casi todos los productos industriales, denominada American National of Standards Institute (ANSI) la cual no tiene reconocimientos de parte del gobierno federal en la Unión Americana, a excepción del Estado de Nueva York que si le otorga el reconocimiento y, por el contrario, acepta a la National Bureau of Standards como un comité que elabora Normas de Metrología. Las agrupaciones que tiene la ANSI actualmente son:

AAMA	Architectural Aluminum Manufacturers Association
AAR	Association of American Railroads.

AASHO	American Association of State Highway Officials
AATCC	American Association of Textile Chemists and Colorists
ACI	American Concrete Institute
ADA	American Dental Association
AFBMA	Anti-Friction Bearing Manufacturers Association, Inc.
AGMA	American Gear Manufacturers Association
AHAM	Association of Home Appliance Manufacturers
ANS	American Nuclear Society
API	American Petroleum Institute
ARI	Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
ASA	Acoustical Society of America
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
ASLE	American Society of Lubricating Engineers.
ASME	American Society of Mechanical Engineers.
ASQC	American Society for Quality Control
ASSE	American Society of Sanitary Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
AWWA	American Water Works Association
BHMA	Builders Hardware Manufacturers Association
CEMA	Conveyor Equipment Manufacturers Association
CGA	Compressed Gas Association
DCDMA	Diamond Core Drill Manufacturers Association
EIA	Electronics Industries Association

NOTA: ISO se encarga de la Normalización internacional por parte de ANSI, es diferente del ISO del inciso 1.5 (B)

FCI Fluid Controls Institute
FSPT Federation of Societies for Paint Technology
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
IES Illuminating Engineering Society
IME Institute of Makers of Explosives
IP Institute of Petroleum (London)
IPC Institute of Printed Circuits
IPCEA Insulated Power Cable Engineers Association
IRE Institute of Radio Engineers : name changed to Institute of
 Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
ISA Instrument Society of America
ISO International Organization for Standardization
ITE Institute of Traffic Engineers
MPTA Mechanical Power Transmission Association
NAAH National Association of Architectural Metal Manufacturers
NBS National Bureau of Standards
NCCLS National Committee for Clinical Laboratory Standards
NEMA National Electrical Manufacturers Association
NFPA National Fire Protection Association
NFPA National Fluid Power Association
NLGI National Lubricating Grease Institute
NMA National Microfilm Association
NWMA National Woodwork Manufacturers Association
RETHA Radio-Electronics-Television Manufacturers Association; name
 changed to Electronic Industries Association
RVIA Recreational Industry Vehicle Association

RWMA	Resistance Welder Manufacturers Association
SAE	Society of Automotive Engineers
SAMA	Scientific Apparatus Makers Association
SIS	Swedish Standards Association
SMA	Screen Manufacturers Association
SPR	Simplified Practice Recommendation
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TFI	The Fertilizer Institute
UL	Underwriters Laboratories

1.5 ORGANISMOS INTERNACIONALES DE NORMALIZACION.

A).- COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS (COPANT)

La Comisión Panamericana de Normas Técnicas es un organismo que agrupa a 14 instituciones de Normalización, que representan a 18 países del Continente Americano,. Su esencial objetivo es la formulación de Normas Panamericanas que sirvan de base a las --- transacciones comerciales de los países americanos. Así mismo persigue coadyuvar a la creación de organismos de normalización en aquellas naciones que aún no los tienen. Actualmente COPANT tiene aprobadas 326 Normas Panamericanas y en estudio 518.

B).- ORGANIZACION INTERNACIONAL DE NORMALIZACION (ISO)

Este organismo fué creado en 1947. Actualmente cuenta como --- miembros a 54 Organismos Nacionales de Normalización que representan a otros tantos países. Sus funciones son coordinar y -

unificar las normas nacionales de los países miembros, establecer Normas Internacionales y cooperar con otros organismos internacionales interesados en la normalización. A la fecha dispone de aproximadamente 2 000 Normas Internacionales y en estudio alrededor de 3 000 documentos.

C).- COMISION DEL CODEX ALIMENTARIUS (FAO/OMS)

En el año de 1962 la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) formularon un programa conjunto sobre Normas Alimentarias, que dio origen a la creación de la Comisión del Codex Alimentarius, organismo al cual pueden pertenecer todos los miembros de FAO y de la OMS que deseen intervenir en esta Comisión. Sus propósitos son: establecer Normas Alimentarias aceptadas internacionalmente, para proteger la salud del consumidor y asegurar la aplicación de prácticas equitativas en el comercio de los alimentos a nivel internacional.

INSTITUTOS NACIONALES DE NORMALIZACION EN EL MUNDO

PAIS	NOMBRE DEL INSTITUTO	SIGLAS	MIEMBRO			
			ISO	IEC	CEE	COPAN T
Africa del Sur	Departamento Sudafricano de Normas	SABS	+	+		
Alemania	Comité Alemán de Normas	DIN	+	+	+	
Argentina	Instituto Argentino de Racionalización de Materiales	IRAM		-		-
Australia	Asociación de Normalización de Australia	SAA	+	+		
Austria	Comité Austriaco de Normalización	ONN	+	+	-	
Bélgica	Instituto Belga de Normalización	IBN	+	-	-	
Bolivia	Instituto Boliviano de Normalización	IBN				
Brasil	Asociación Brasileña de Normas Técnicas	ABNT	+	+		-
Bulgaria	Instituto de Normalización, Medidas y Aparatos de Medición	ISMIC	+	+		
Canadá	Asociación Canadiense de Normas	CSA	-	+		
Centroamérica	Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial	ICAIII	+			-
Ceylán	Departamento de Normas de Ceylán		+			

PAIS	NOMBRE DEL INSTITUTO	SIGLAS	ISO	MIEMBRO		
				IEC	CEE	COPANT
Checoslovaquia	Oficina de Metrología y Normalización de Checoslovaquia.	CSN	+	+	+	
Chile	Instituto Nacional de Investigaciones Tecnológicas y Normalización	INDETEC NOR	+			+
Colombia	Instituto Colombiano de Normas Técnicas	ICONTEC	+			+
Cuba	Dirección de Normas y Metrología	UNC	+			
Dinamarca	Consejo de Normalización de Dinamarca	DS	+	+	+	
Ecuador	Instituto Nacional de Normalización	INEN				+
España	Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo	IRATRA	+	+		
Estados Unidos de América	Instituto Nacional Americano de Normas	ANSI	+	+		
Filipinas	Departamento de Normas de Filipinas	KP	+			
Finlandia	Asociación de Normalización de Finlandia	SFS	+	+	+	
Francia	Asociación Francesa de Normalización	AFNOR	+	+	+	
Ghana	Instituto de Normas de Investigación Industrial	ISIG	+			

PAIS	NOMBRE DEL INSTITUTO	SIGLA	ISO	MIEMBRO		COPANT
				IEC	CEE	
Grecia	Comité de Normalización de la Cámara Técnica de Grecia	ENO	+	+	+	
Hungría	Oficina Hungara de Normalización	MSZH	+	+	+	
India	Institución Hindu de Normas	ISI	+	+		
Indonesia	Instituto de Normalización de Indonesia	DNI	+	+		
Irán	Instituto de Normas e Investigación Industrial de Irán	ISIRI	+	+		
Irak	Organización Iraquese de Normalización	IOS	+			
Irlanda	Instituto de Investigación Industrial y Normas	IIRS	+			
Israel	Institución de Normas de Israel	SII	+	+		
Italia	Instituto Nacional de Normalización	UNI	+	+	+	
Japón	Comité Japonés de Normas Industriales	JISC	+	+		
Líbano	Institución de Normas Libanesas	LIBNOR	+			
Malasia	Institución de Normas de Malasia		+			
Marruecos	Servicio Marroquí de Normalización Industrial	SNIMA	+			
México	Dirección General de Normas	DGN	+			+

PAIS	NOMBRE DEL INSTITUTO	SIGLA	ISO	MIEMBRO		COPANT
				IEC	CEE	
Noruega	Asociación de Normalización de Noruega	NSF	+	+	+	
Nueva Zelanda	Asociación de Normas de Nueva Zelanda	SANZ	+			
Países Bajos	Instituto de Normalización de los Países Bajos	NMI	+	+	+	
Pakistán	Institución Pakistana de Normas	PSI	+	+		
Panamá	Comisión Panameña de Normas Industriales y Técnicas	COPANIT				+
Paraguay	Instituto de Tecnología y Normalización	INTN				+
Perú	Instituto de Investigación Tecnológica y de Normas Técnicas	ITINTEC	+			+
Polonia	Comité Polaco de Normalización	PKN	+	+	+	
Portugal	Departamento de Normalización	IGPAI	+	+		
Reino Unido	Institución Británica de Normas	BSI	+	+	+	
República de Corea	Departamento Coreano de Normas	KBS	+	+		
República Popular Democrática de Corea		CSK	+	+		

PAIS	NOMBRE DEL INSTITUTO	SIGLA	ISO	IEC	CEE	COPANT
Rumania	Departamento Estatal de Normalización.	OSS	+	+		
Singapur	Unidad de Investigación Industrial de - Singapur.	SIRU	+			
Suecia	Comisión Sueca de -- Normalización.	SIS	+	+		
Suiza	Asociación Suiza de Normalización.	SNV	+	+		
Tailandia	Centro Nacional Tailandés para Especificaciones de Normas.	CTNSS	+			
Turquia	Instituto Turco de Normalización.	TSE	+	+		
Unión de Repúblicas Soviéticas Socialistas	Comité de Normas y - Medidas del Consejo de Ministros de la URSS.	GOST	+	+		
Venezuela	Comisión Venezolana de Normas Industriales.	COVENIN	+			+
Yugoslavia	Instituto Yugoslavo de Normas.	JZS	+	+		

- 1.- ISO Organización Internacional de Normalización.
- 2.- IEC Comisión Electrónica Internacional.
- 3.- CEE Comisión Internacional de Reglas para el Aprovechamiento de Equipo Eléctrico.
- 4.- COPANT Comisión Panamericana de Normas Técnicas.

C A P I T U L O I

TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

1.1. INTRODUCCION.

El transformador desempeña uno de los más importantes factores que intervienen en el desarrollo de los grandes sistemas eléctricos de potencia y se ha convertido en un elemento vital e indispensable, y a la vez, indicador del grado de desarrollo obtenido por la industria eléctrica.

Su característica de operación es una aplicación directa de la Ley de Faraday sobre la inducción electromagnética y podemos definir al transformador como una máquina electromagnética estática destinada a transformar un sistema primario de corriente alterna en otro secundario, con la misma frecuencia, pero con otras características, en particular tensión y corriente --

1.2. PRINCIPIO DEL TRANSFORMADOR.

Cualquier circuito eléctrico que concatena un campo magnético variable en el tiempo tiene un voltaje inducido en él cuya magnitud instantánea se obtiene por Ley de Faraday. El transformador es un dispositivo con un núcleo común de acero rodeado por dos o más devanados, el núcleo de acero se usa para concentrar y dirigir el campo magnético reduciendo la corriente de magnetización requerida.

Considerando un transformador de dos devanados, ver figura 1.1., donde se aplica la convención de marcas de punto, es decir, cuando las corrientes entran por las terminales marcadas con un punto, sus fuerzas magnetomotrices son aditivas, o sea que el signo de la inductancia mutua es positivo; obteniendo las magnitudes de los voltajes inducidos e_1 y e_2 por la Ley de Faraday.

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} \quad \text{y} \quad e_2 = \frac{d\psi_2}{dt} \quad (1.1)$$

donde ψ es el flujo concatenado.

Los dos devanados tienen respectivamente N_1 y N_2 espiras, -- r_1 y r_2 resistencias en ohms, L_{11} y L_{22} autoinductancias en henrys e inductancias mutuas L_{21} - L_{12} , también en henrys. Aplicando las leyes de --- Kirchoff para cada espira.

$$v_1(t) = i_1(t) r_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad (1.2)$$

$$v_2(t) = i_2(t) r_2 + \frac{d\psi_2}{dt}$$

Como resultado de suponer un transformador ideal (que será -- visto más adelante) se obtienen las siguientes relaciones:

$$v_1(t) = \frac{d\psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = e_1(t) \quad (1.3)$$

$$v_2(t) = \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.4)$$

esta última relación (N_1/N_2) se usa mucho en cálculos de transformadores y se llama relación de espiras.

Considerando:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (1.5)$$

de la ecuación (1.4) se obtiene:

$$v_1 = (N_1/N_2) v_2 \quad (1.6)$$

$$\frac{N_1 v_2 i_1}{N_2} = v_2 i_2$$

que es igual a:

$$\begin{aligned} N_1 i_1 &= N_2 i_2 \\ N_1 i_1 - N_2 i_2 &= 0 \\ i_1/i_2 &= N_2/N_1 \end{aligned} \quad (1.7)$$

o sea que la relación de las corrientes es igual a la relación inversa de las espiras. Concluyendo, cuando una corriente fluye en la segunda bobina, debe haber una corriente que fluya en la primera bobina que compense el efecto magnético de la corriente de la segunda bobina.

Cuando el voltaje aplicado es una senoide de amplitud constante, la ecuación anterior se escribe con letras mayúsculas que denotan fasores.

$$V_1 i_1 = V_2 i_2 \quad \text{volts amperes}$$

Las ecuaciones 1.5 a 1.7 se pueden escribir en la misma forma, además, la relación V_2/i_2 es idéntica a Z_L y, por lo tanto:

$$\frac{V_1}{i_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_L \quad Z_L \text{ (Impedancia de Transformador)}$$

o sea que, cuando una impedancia compleja se conecta a las terminales del secundario, aparece desde la fuente como una impedancia compleja con magnitud $(N_1/N_2)^2$ veces la magnitud de la impedancia de la carga real del secundario, denominada "impedancia referida".

1.3 TRANSFORMADOR IDEAL.

El flujo magnético ϕ de la figura 1.1 es proporcional a i_1 por la ausencia de pérdidas y como:

$$i_1 = i_{\max} \sin \omega t$$

$$\phi_1 = \frac{N_1 i_{\max} \sin \omega t}{R}$$

$$\phi_{\max} = \frac{N_1 i_{\max}}{R}$$

por lo tanto: $\phi_1 = \phi_{\max} \sin \omega t$

$$v = L \frac{di}{dt} \quad v \text{ se adelanta } 90^\circ \text{ a } i$$

$$i_1 = \frac{E_1}{jX_1}$$

Por Ley de Faraday :

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d}{dt} (\phi_{\max} \sin \omega t)$$

entonces: $e_2 = -\omega N_2 \phi_{\max} \cos \omega t$

el valor eficaz es:

$$E_2 = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{-\omega N_2 \phi_{\max}}{\sqrt{2}}$$

la relación de tensión del transformador queda en la siguiente forma:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

esto es:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{e_1}{N_1} \rightarrow \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{e_2}{N_2} \rightarrow \frac{e_1}{N_1} = \frac{e_2}{N_2},$$

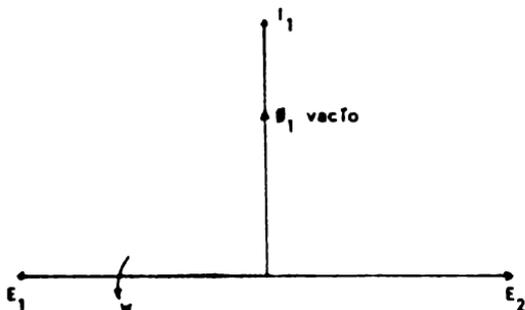
por lo tanto:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

donde:

$$\frac{N_1}{N_2} = a \text{ se conoce como relación de transformación.}$$

1.4 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR



a) transformador ideal, donde

$$\phi = \phi_{\max} \sin \omega t$$

$$e_2 = -\omega N_1 \phi_{\max} \cos \omega t$$

$$e_2 = \omega N_1 \phi_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

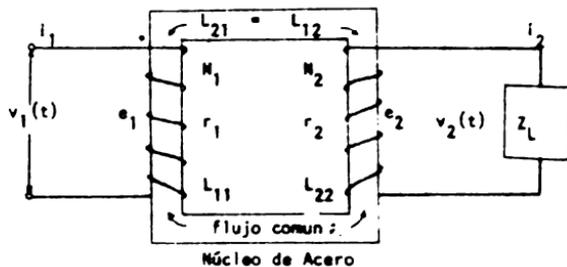


FIG. 1.1 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL TRANSFORMADOR Y LA CARGA.

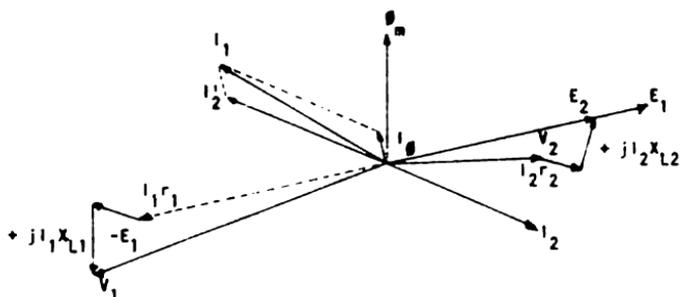


FIG. 2 DIAGRAMA FASORIAL DE UN TRANSFORMADOR CON CARGA (NO A ESCALA)

1.5 CIRCUITO EQUIVALENTE

Para el caso de un transformador ideal la inductancia L_{11} (inductancia propia del primario) es igual a la inductancia del secundario referida al primario, al aplicar los factores $\frac{N_1}{N_2}$ para la inductancia mutua y $\frac{N_1^2}{N_2^2}$ para las autoinductancias secundarias.

$$L'_{22} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 L_{22} \quad L'_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) L_{12}$$

La ecuación de la tensión de entrada y de salida en el dominio del tiempo, queda como sigue:

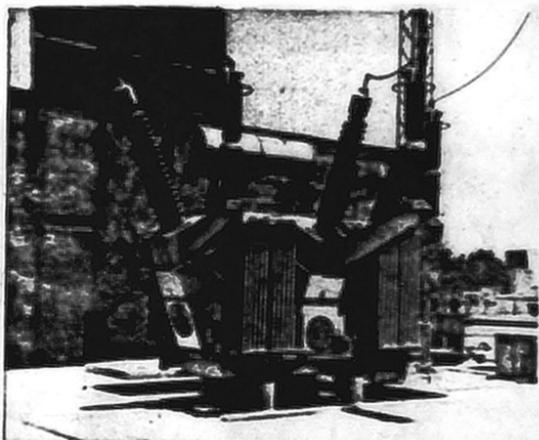
$$v_1 = r_2 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} - L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (1.8)$$

$$v_2 = -L_{12} \frac{di_1}{dt} + r_2 i_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (1.9)$$

transformando por Laplace estas ecuaciones:

$$\begin{aligned} v_2' &= v_2 \frac{N_2}{N_1} & i_2' &= i_2 \frac{N_2}{N_1} \\ i_{12}' &= \frac{N_1}{N_2} L_{12} & i_{22}' &= \frac{N_1}{N_2} L_{22} \\ r_2' &= \left[\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\right] r_2 \end{aligned}$$

de la ecuación (1.8)



TRANSFORMADOR TRIFASICO TIPO ACORAZADO, CLASE FOA, CAPACIDAD CONTINUA, ENFRIADO EN ACEITE, PARA 50/60 Hz, EN CONEXION ESTRELLA Y DELTA 390/430 AMP , -----
236700/235700 VOLTS, PESO 172 TONELADAS.

$$v_1 = (r_1 + sL_{11}) i_1(s) - sL'_{12} i_2'(s)$$

$$v_2' = -sL'_{12} i_1(s) + (r_2' + sL'_{22}) i_2'(s)$$

$$v_1(s) = (r_1 + sL_{11}) i_1(s) - sL'_{12} i_2'(s)$$

$$\begin{aligned} v_1(s) &= i_1(s) (r_1 + sL_{11}) + (sL'_{12} - sL'_{12}) \\ &= i_1(s) (r_1 + s(L_{11} - L'_{12})) + sL'_{12} i_1(s) - sL'_{12} i_2'(s) \end{aligned}$$

$$v_2(s) = -sL'_{12} i_1(s) - sL'_{12} i_2'(s) + (r_2' + s(L'_{22} - L'_{12})) i_2'(s)$$

considerando que:

$$L_{L1} = L_{11} - L'_{12} \quad (1.10)$$

$$L'_{L2} = L'_{22} - L'_{12} \quad (1.11)$$

donde la ecuación (1.10) se denomina inductancia de dispersión del primario, y la ecuación (1.11) se denomina inductancia de dispersión del secundario referida al primario.

entonces:

$$\phi_{11} = \phi_{12} + \phi_{L1} \quad (1.12)$$

$$L_{11} = \frac{N_1 \phi_{11}}{i_1} \quad \text{esto es} \quad L_{11} = \frac{N_1 \phi_{12}}{i_1} + \frac{N_1 \phi_{L1}}{i_1}$$

$$L_{11} = \frac{N_1}{i_1} (\phi_{12} + \phi_{L1})$$

$$L_{11} = \frac{N_1}{i_1} \phi_{12} + \frac{N_1}{i_1} \phi_{L1}$$

como:

$$L_{12} = \frac{N_1 \phi_{12}}{i_2} \quad i_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2$$

$$L_{11} = \frac{N_1}{N_2} \frac{N_1 \phi_{12}}{i_2} + \frac{N_1 \phi_{L1}}{i_1}$$

finalmente:

$$L_{11} = \frac{N_1}{N_2} L_{12} + L_{L1}$$

substituyendo en la ecuación (1.10)

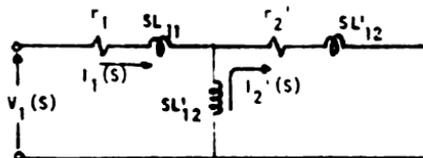
$$L_{11} = L_{12}' + L_{L1}$$

obtenemos la inductancia de dispersión del primario.

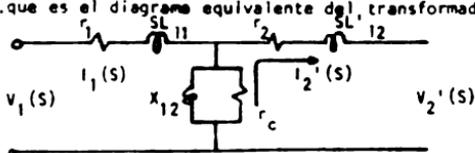
$$v_1(s) = [r_1 + sL_{L1}] i_1(s) - sL_{12}' i_2'(s)$$

$$v_2'(s) = -sL_{12}' i_1(s) + [r_2' + sL_{L2}'] i_2'(s)$$

que son las ecuaciones de una malla



la componente de magnetización sL_{12}' produce características de reactancia inductiva y capacitiva, por lo que la malla queda finalmente en la siguiente forma. que es el diagrama equivalente del transformador.



1.6. DEFINICIONES, ESPECIFICACIONES MECANICAS, ELECTRICAS Y FISICAS.

Estas definiciones están basadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-J-284 Transformadores de Potencia.

(Transformadores que tienen una capacidad mayor de 500 KVA - 400 KW), sumergidos en aceite, monofásicos y polifásicos, con cambiador de derivaciones para operación con el transformador desenergizado.

DEFINICIONES.

CAPACIDAD NOMINAL.

Es un valor convencional de potencia (KVA o MVA) que establece la base del diseño, determinando además un valor definido para la corriente nominal que podrá llevar el devanado cuando se le aplique tensión nominal.

NOTA: Para transformadores de varios devanados debe establecerse el valor de la capacidad nominal de cada uno de ellos. La mitad de la suma aritmética de los valores de capacidad nominal de todos los devanados, permite una estimación aproximada de las dimensiones de un transformador de varios devanados en comparación con uno o más devanados.

CARACTERISTICAS NOMINALES.

Son los valores numéricos asignados a las cantidades que definen la operación del transformador en base a las condiciones del fabricante y prueba del equipo.

CONEXION DELTA.

Es la conexión de devanados en la que los devanados de cada fase de un transformador se conectan en serie para formar un circuito cerrado.

CONEXION EN DELTA ABIERTA O DELTA CORTADA.

Es la conexión de devanados en la que los devanados de fase, o los devanados de la misma tensión nominal de transformadores monofásicos asociados en banco trifásico, se conectan en serie sin cerrar una punta de la --delta.

CONEXION ESTRELLA.

Es la conexión de devanados en las que un extremo de cada uno de los devanados de fase de un transformador polifásico, o de cada uno de los devanados de la misma tensión nominal de transformadores monofásicos asociados en un banco polifásico, se conecta a un punto común (el neutro) y el otro extremo a su terminal de línea apropiada.

CONEXION ZIGZAG O ESTRELLA INTERCONECTADA.

La conexión en estrella de los devanados de fase de un transformador polifásico, cada uno de los cuales está hecho de partes en la que se inducen tensiones con desplazamiento angular.

CORRIENTE DE EXCITACION.

Es la corriente que circula a través de las terminales de un devanado cuando se le aplica tensión nominal a frecuencia normal, manteniéndose los otros devanados en circuito abierto.

CORRIENTE NOMINAL

Es la corriente que fluye a través de una terminal de un devanado calculada dividiendo la capacidad nominal del devanado entre la tensión nominal del mismo y el factor de fase apropiado.

DERIVACION PRINCIPAL.

Es la derivación correspondiente a la tensión nominal.

DESPLAZAMIENTO DE FASES.

La diferencia angular entre las fases representativas de las tensiones entre el punto neutro y las terminales de dos devanados, los fasores giran en sentido contrario al del reloj.

DEVANADO.

Es un conjunto de espiras que forman un circuito eléctrico asociado con una de las tensiones asignadas al transformador.

Para autotransformadores la parte común de los devanados se llama devanado común y la otra parte se lleva devanado serie.

DEVANADO AUXILIAR.

Es un devanado destinado a alimentar una carga pequeña comparada con la capacidad total del transformador.

DEVANADO CON AISLAMIENTO GRADUADO.

Es un devanado en el cual el aislamiento a tierra está graduado en forma creciente desde la terminal de línea hasta la terminal de neutro.

DEVANADO CON AISLAMIENTO UNIFORME.

Es un devanado en el cual el aislamiento a tierra está diseñado para soportar en todos sus puntos la tensión de prueba a frecuencia nominal correspondiente a su terminal de línea.

DEVANADO ESTABILIZADOR.

Es un devanado suplementario conectado en delta, estrella-estrella o estrella-zigzag para reducir la impedancia de secuencia cero del devanado conectado con estrella.

La reducción de esta impedancia puede ser necesaria por ejemplo, para reducir la magnitud de la tensión de tercera armónica o para estabilizar las tensiones a neutro.

Un devanado se considera como estabilizador si sus terminales no son llevadas al exterior para conectarse a un circuito externo. Sin embargo se puede sacar una o dos puntas destinadas a formar la misma esquina de la delta para conectarlas a tierra.

ELEVACION DE TEMPERATURA.

Es la diferencia de temperaturas de los devanados y la del aire de enfriamiento, para transformadores enfriados por agua.

IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO.

Es la impedancia expresada en ohms por fase a corriente nominal, entre las terminales de línea de un devanado en estrella o zigzag y su terminal de neutro.

NIVEL DE AISLAMIENTO.

Es la combinación de valores de tensión (a frecuencia nominal y a impulso) que caracteriza el aislamiento de cada uno de los devanados y sus partes. El nivel de aislamiento agrupa tres valores de tensión, a saber:

- a) Clase de aislamiento, que se define en la tensión que el equipo puede soportar continuamente sin reducción de su vida útil.
- b) Tensión de prueba de aislamiento a frecuencia nominal, que es valor de la tensión de la prueba de impulso a onda completa. (ver tabla 7).

PASO DE TENSION.

Es la diferencia entre las tensiones de dos derivaciones adyacentes, expresadas, generalmente, como un porcentaje, en $2.5\% \pm$ de la tensión nominal.

PERDIDAS DE CARGA (en transformadores de dos devanados)

Es la potencia activa que se consume cuando circula la corriente nominal a frecuencia nominal a través de un devanado estando las terminales de otro devanado en corto circuito.

PERDIDAS DE EXCITACION.

Es la potencia activa que consume al transformador cuando se le aplica tensión nominal a frecuencia nominal en las terminales de un devanado.

PRUEBAS DE ACEPTACION.

Son aquellas pruebas que demuestran, a satisfacción del comprador, que el transformador cumple las especificaciones.

TENSION DE IMPEDANCIA A CORRIENTE NOMINAL (Tensión de la Prueba de Corto Circuito).

En los transformadores de devanados es la tensión que se debe

aplicar a frecuencia nominal, a las terminales de un devanado para que a través de las mismas circule la corriente nominal, cuando las terminales de los otros devanados están en corto circuito; en el caso de devanados múltiples - para una determinada combinación de dos devanados se efectúa el mismo proceso señalado anteriormente, dejando los demás devanados en circuito abierto.

La tensión nominal de impedancia o simplemente impedancia se expresa generalmente como por ciento de dicha tensión.

TENSION DE LAS DERIVACIONES.

Es la tensión en vacío entre las terminales del devanado para la derivación correspondiente, cuando se aplica tensión nominal en otro devanado.

TENSION NOMINAL DEL SISTEMA.

Es la tensión eficaz de línea por el cual se designa al sistema.

TENSION NOMINAL DE UN DEVANADO.

Es la tensión que debe ser aplicada o inducida en vacío, entre las terminales de un transformador.

Para los transformadores monofásicos de un banco trifásico, la tensión de un devanado destinado a conectarse en estrella se calcula por la tensión entre fases sobre raíz de tres volts.

TRANSFORMADOR.

Es un dispositivo eléctrico de dos o más devanados que por inducción electromagnética transforma energía, tensión y corriente alterna de un devanado a diferentes valores de tensión y corriente en otro devanado a la mis

TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

Es un transformador que tiene una capacidad mayor de 500 KVA

Todos los transformadores de potencia deben diseñarse para dar servicio a la Intemperie en instalación expuesta.

TEMPERATURA AMBIENTE.

Los transformadores sujetos a esta Norma deben ser apropiados para operar a su capacidad nominal, siempre que la temperatura del ambiente no exceda de 40°C y la temperatura promedio del ambiente durante un período de 24 horas no exceda de 30°C.

ALTITUD DE OPERACION.

Los transformadores destinados a operar entre 0 y 1000 m, sobre el nivel del mar deben diseñarse para una altitud de 1000 m el comprador deberá indicar la altitud a que deben operar.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire lo cual incrementa la elevación de la temperatura en los transformadores que son enfriados por aire. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta lo anterior para los siguientes casos:

a) Operación a Capacidad Nominal.- Transformadores construídos para altitudes de 1000 m pueden operarse a capacidad nominal a mayores alturas siempre que la temperatura ambiente promedio máxima no exceda los valores indicados en la tabla 1.

b) Operación a Capacidad Reducida - Si la temperatura ambiente promedio máxima excede los valores indicados, pero sin exceder la temperatura promedio de los incrementos relativos se puede operar a capacidad reducida multiplicando por el porcentaje que se indica en la tabla 2 por cada 100 m en exceso de 1000 m.

EFFECTO DE LA ALTITUD EN LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL AIRE.

La rigidez dieléctrica de algunas partes de un transformador, -- que depende totalmente o parcialmente del aire para su aislamiento, disminuye - conforme la altitud aumenta. Para obtener la rigidez dieléctrica a una altitud especificada, para una clase de aislamiento, dada la rigidez dieléctrica a --- 1000 m de altitud, se debe multiplicar por el factor de corrección apropiado de la tabla 3.

OPERACIONES A TENSIONES SUPERIORES A LA NOMINAL.

a) Con 5% arriba de la tensión nominal del secundario a capacidad nominal en KVA, sin exceder los límites de elevación de temperatura y solo cuando el factor de potencia de la carga es mayor del 80%.

b) Con 10% arriba de la tensión nominal del secundario o vacío.

CARACTERISTICAS DEL ACEITE.

La tensión de ruptura dieléctrica del aceite nuevo, de acuerdo al sistema de copa americana, debe ser de 30KV, las pruebas se efectuarán de acuerdo a la norma correspondiente.

CLASIFICACION.

La clasificación de transformadores de potencia se hace en función de los sistemas de disipación de calor, presentando en símbolo de la Comisión Electrónica Internacional.

<u>Medio Enfriante</u>	<u>Símbolo</u>
Aceite Mineral	O
Askarel	L
Gas	G
Agua	W
Aire	A
Aislamiento sólido	S
 <u>Tipo de Circulación.</u>	
Natural	N
Forzada	F

Los transformadores de potencia se clasifican como se indica en los siguientes incisos:

- a) Sumergidos en aceite, enfriados por aire.
Autoenfriados OA
Autoenfriado enfriado por aire forzado OA/FA
Autoenfriado y con dos pesos de enfriamiento por aire forzado OA/FA/FA.
- b) Sumergido en aceite, enfriados por aire y por aceite forzados.
Autoenfriado, enfriado por aire forzado y enfriado por aire y aceite forzados FOA.
- c) Sumergidos en aceite, enfriados por agua.
Enfriado por agua OW
Enfriado por agua, autoenfriado OA, OW
- d) Sumergidos en aceite, enfriados por aceite forzado.
Enfriado por aire y aceite forzados FOA
Enfriados por agua y aceite forzados. FOW

CAPACIDADES NOMINALES PREFERENTES.

Las capacidades nominales preferentes en kilovolts amperes (KVA) para transformadores de una y tres fases son las siguientes: para capacidades preferentes se ubican en la tabla No. 4 y en la tabla No. 5 capacidades para transformadores con peso de enfriamiento forzado.

TENSIONES NOMINALES PREFERENTES

Las tensiones nominales preferentes se encuentran en la tabla

No. 6.

FRECUENCIA NOMINAL.

La frecuencia de operación debe ser 60 a 50/60 Hz según se es
pecifique.

NUMERO Y TENSION DE LAS DERIVACIONES.

Se usarán cuatro derivaciones de 2.5% arriba y abajo de la -
tensión nominal del devanado de alta tensión. Los valores son -----

$$\pm 5\% V_n \pm 2.5\% V_n \text{ y } V_n.$$

Tabla 1. Temperatura ambiente promedio máxima permisible del aire re-
frigerante, para operación a capacidad nominal de transforma-
dores sumergidos en aceite (°C).

Tipo de Enfriamiento	Altitud en metros			
	1000	2000	3000	4000
Auto-enfriados	30	28	35	23
Enfriados con aire forzado	30	26	23	20
Enfriados con aire y aceite forzados.	30	26	23	20

Tabla 2. Factores de corrección de la capacidad nominal para altitudes mayores de 1000 m para transformadores sumergidos en aceite.

Tipo de Enfriamiento	Factor de corrección por cada 1000 m. (%)
Autoenfriados	0.4
Enfriados por Agua	0.0
Enfriados con Aire Forzado	0.5
Enfriados con Aire y Aceite Forzados.	0.5
Enfriados con Agua y Aceite Forzados.	0.0

* La altitud de 4 500 m es considerada la máxima, para los transformadores a que se refiere esta Norma.

Tabla 3. Factor de corrección de rigidez dieléctrica para altitudes mayores de 1000 metros.

Altitud en metros	Factor de corrección
1 000	1.00
1 200	0.98
1 500	0.95
1 800	0.92
2 100	0.89
2 400	0.86
2 700	0.83
3 000	0.80
3 600	0.75
4 200	0.70
4 500*	0.67

* La altitud de 4 500 m es considerada la máxima, para los transformadores a que se refiere esta Norma.

Tabla 4. Capacidades Preferentes.

Monofásicos (KVA)	Trifásicos (KVA)
833	750
1 250	1 000
1 667	1 500
2 500	2 000
3 333	2 500
5 000	3 750
6 667	5 000
8 333	7 500
10 000	10 000
12 500	12 000
16 667	15 000
20 000	20 000
25 000	25 000
33 333	30 000
	37 500
	50 000
	60 000
	75 000
	100 000

PERDIDAS Y TOLERANCIAS.

Las pérdidas especificadas deben ser las de excitación y las pérdidas totales.

Las pérdidas totales incluyen las pérdidas de excitación, las pérdidas de carga y las pérdidas del sistema de enfriamiento forzado, si lo hay.

Las pérdidas obtenidas en los transformadores en una orden dada, no deben exceder a las pérdidas garantizadas en más de los porcentajes dados en la tabla 8.

IMPEDANCIA Y SU TOLERANCIA.

La impedancia se expresa generalmente en por ciento de la ten

sión nominal de impedancia con respecto a la tensión nominal. Si no se especifica de otra manera, se recomienda que la impedancia esté de acuerdo con la tabla 9.

La tolerancia de la impedancia para transformadores debe ser como sigue:

- 1) La impedancia de un transformador de dos devanados debe tener una tolerancia de $\pm 7.5\%$ del valor especificado.
- 2) La diferencia de impedancias entre dos transformadores de dos devanados duplicados, cuando dos o más unidades de una capacidad dada son producidos por el fabricante al mismo tiempo, no debe exceder 7.5% del valor especificado.
- 3) La impedancia de un transformador que tenga tres o más devanados o tenga devanados en zig-zag, debe tener una tolerancia de $\pm 10\%$ del valor especificado.
- 4) La impedancia de un autotransformador debe tener una tolerancia de $\pm 10\%$.
- 5) Los transformadores se consideran apropiados para operar en paralelo si sus impedancias cumplen las limitaciones de los párrafos anteriores además de otras condiciones necesarias para tal operación.

VARIACION DE LA IMPEDANCIA EN LAS DERIVACIONES.

La variación en por ciento de la tensión de impedancia en cualquier derivación, con respecto a la de tensión nominal, no debe ser mayor que el rango de tensión de la derivación, expresada como porcentaje del valor nominal.

Tabla 5.- Capacidades para transformadores con pasos forzados de enfriamiento.

Monofásicos (KVA)			Trifásicos (KVA)		
Autoenfriados	1° Paso	2° Paso	Autoenfriado	1° Paso	2° Paso
833	958		750	862	
1 250	1 437		1 000	1 150	
1 667	1 917		15 000	1 725	
22 500	2 125		2 000	2 300	
33 333	4 167		2 500	3 125	
5 000	6 250		3 750	4 687	
6 667	8 333		5 000	6 250	
88 333	10 417		7 500	93 775	
10 000	13 333	16 667	10 000	12 500	
12 500	16 667	20 833	12 000	16 000	20 000
16 667	22 222	27 777	15 000	20 000	25 000
20 000	26 667	33 333	18 000	24 000	30 000
25 000	33 333	41 666	25 000	33 333	41 667
33 333	44 444	55 555	30 000	40 000	50 000
			37 000	50 000	62 500
			50 000	66 667	83 333
			60 000	80 000	100 000
			75 000	100 000	125 000
			100 000	133 333	166 666

Tabla 6.- Tensiones Nominales (Volts) para transformadores de una y tres fases.

TENSION (VOLTS)
440
2 400
4 160
6 000
13 800
23 000
34 500
69 000
115 000
230 000
400 000

RELACION DE TRANSFORMACION Y SU TOLERANCIA.

La relación de transformación está basada en la relación de vueltas de los devanados. La relación de las tensiones está sujeta al efecto de la regulación a diferentes cargas y factores de potencia.

La tolerancia para la regulación medida cuando el transformador está sin carga debe ser $\pm 0.5\%$ en todas las derivaciones. Si la tensión por vuelta excede 0.5% de la tensión deseada, las tensiones de las derivaciones deben corresponder a la tensión de la vuelta más próxima.

REGULACION Y SU TOLERANCIA.

La regulación de un transformador se expresa en $\%$ de la tensión nominal del secundario, y se calcula de la tensión de impedancia y la medición de las pérdidas de impedancia expresadas en watts, no debe excederse la regulación a un factor de potencia especificado en más de 7.5% del valor especificado para regulación en transformadores de dos devanados o del 10% para transformadores de 3 devanados.

POLARIDAD PARA TRANSFORMADORES MONOFASICOS.

Todos los transformadores monofásicos deben ser de polaridad substractiva.

DESPLAZAMIENTO ANGULAR EN TRANSFORMADORES TRIFASICOS.

El desplazamiento angular entre las terminales de alta y baja tensión en un transformador trifásico con conexión delta-delta o estrella-estrella, debe ser de cero grados como muestra la figura 3.

Tabla 7.- Clase de aislamiento y valores para pruebas dieléctricas en transformadores sumergidos en aceite.

Clase de Aislamiento KV	Prueba a Baja Frecuencia. (KV)	Nivel básico de aislamiento (BIL) y onda completa (KV) Cresta	Onda Cortada	
			KV Cresta	Tiempo mínimo de arqueo microseg.
1.2	10	45	54	1.5
2.5	15	60	70	1.5
5.0	19	75	88	1.6
8.7	26	95	110	1.8
15.0	34	110	130	2.0
18.0	40	125	145	2.25
25.0	50	150	175	3.0
34.51	70	200	230	3.0
46.0	95	250	290	3.0
69.0	140	350	400	3.0
92.0	185	450	520	3.0
115.0	230	550	630	3.0
138.0	275	650	750	3.0
161.0	325	750	865	3.0
196.0	395	900	1035	3.0
215.0	430	975	1120	3.0
230.0	460	1050	1210	3.0
315.0	630	1425	1640	3.0
345.0	690	1550	1780	3.0
3751.0	750	1675	1925	3.0
470.0	800	1800	2070	3.0

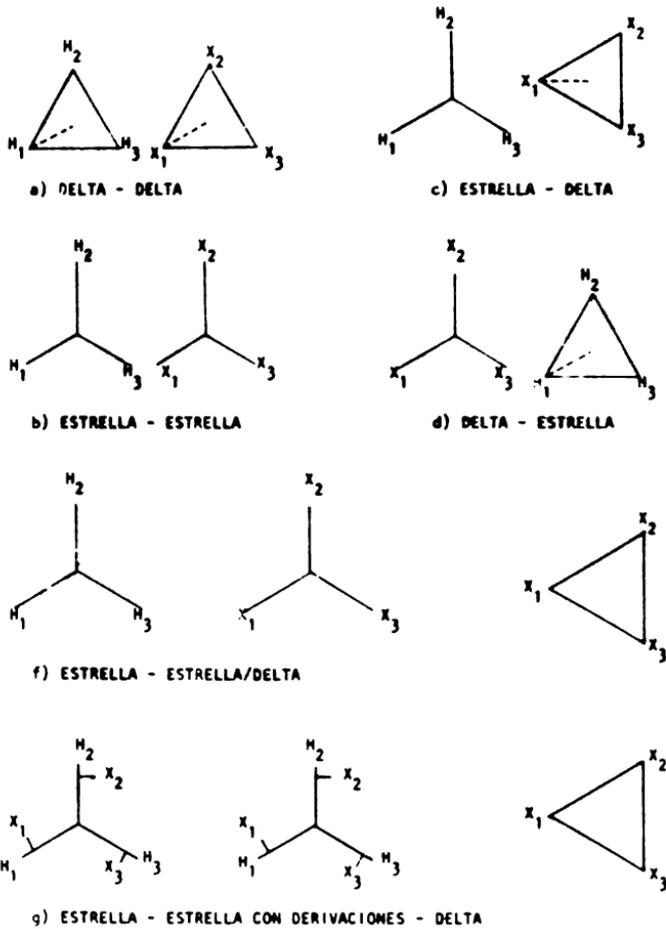


FIG. 1.3 DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTO ANGULAR PARA TRANSFORMADORES DE DOS Y TRES DEVANADOS CON CONEXION DELTA - DELTA O ESTRELLA - ESTRELLA.

El desplazamiento angular entre las terminales de alta y baja tensión en un transformador trifásico con conexiones delta-estrella o estrella-delta, debe ser de 30 grados con la tensión baja atrasada con respecto a la alta tensión como muestran los diagramas C y D, de la figura 3.

SECUENCIA DE FASES.

La secuencia de fases debe ser el orden 1, 2, 3 y en el sentido indicado en la figura 3.

DESIGNACION DE TERMINALES.

En los transformadores de los devanados, al de alta tensión - se designa con la letra H y al de baja tensión con la letra X. Los transformadores con más de dos devanados serán designados con las letras H, X, Y, Z.

CAPITULO II

PRUEBA DE FABRICA Y CAMPO A TRANSFORMADORES.

Los transformadores requieren de una serie de pruebas que se realizan, tanto en fábrica como en el campo, a fin de lograr una buena confiabilidad en el equipo y estar ciertos de la eficacia de su diseño. Las pruebas comunes de fábrica y campo son las tratadas en este capítulo, las pruebas exclusivas de fábrica, se tratarán en el siguiente capítulo.

Las normas utilizadas en el desarrollo de este capítulo son las equivalentes de pruebas a transformadores, la Norma Oficial Mexicana - NOM-J-169, y la Norma ANSI C. 57.12.90, así como de procedimientos de prueba de la Comisión Federal de Electricidad. En su caso, se hará la aclaración correspondiente.

2.1 PRUEBA DE RESISTENCIA OHMICA DE DEVANADOS.

La medición de la resistencia de los devanados tiene fundamental importancia para dos propósitos:

- a).- Para el cálculo de las pérdidas I^2R de los devanados.
- b).- Para cálculos de la temperatura de los devanados en la prueba de temperatura.

Para determinar la temperatura de los devanados al hacer la medición, se deben observar las siguientes precauciones:

- 1.- La medición de la resistencia en frío no debe hacerse cuando el transformador esté localizado en corrientes de aire o en un local donde la temperatura varíe rápidamente.
- 2.- La temperatura de los devanados debe ser el promedio de varios termómetros colocados entre las bobinas, cuidando que los elementos sensibles de los termómetros estén colocados tan cerca como sea posible del conductor de los devanados, sin suponer que los devanados estén a la misma temperatura que el aire que los rodea.
- 3.- La temperatura de los devanados debe suponerse igual a la temperatura promedio del líquido aislante, siempre y cuando el transformador haya estado en reposo de 3 a 8 horas, sin excitación y sin corriente en su devanados antes de hacer la medición de la resistencia en frío.

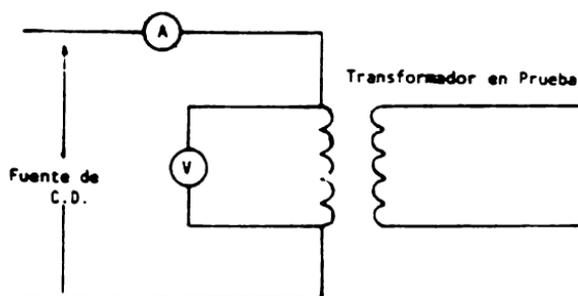
Los métodos para realizar esta medición son los siguientes:

METODO DE LA CAIDA DE POTENCIAL.

Este método debe emplearse solamente si la corriente nominal del devanado del transformador es de por lo menos un ampere.

Las mediciones se efectúan con corriente continua y se toman lecturas simultáneas de corriente y tensión usando las conexiones mostradas en la figura 2.1.. La resistencia se calcula con las lecturas obtenidas de acuerdo con la Ley de Ohm; si la corriente continua es suministrada por una máquina de conmutación, la aguja del voltmetro puede oscilar debido a las variaciones de tensión provocadas por el conmutador, en tales casos, alguno de los devanados del transformador, que no sea el devanado de prueba, debe ponerse en corto circuito para amortiguar las vibraciones de la tensión. La corriente en el devanado que está bajo prueba debe ser --- prácticamente constante antes de poner otro devanado en corto circuito, ya que de otra manera se pueden obtener valores de resistencia erróneos.

FIGURA 2.1. CONEXIONES PARA LA MEDICION DE RESISTENCIA POR EL METCDO DE CAIDA DE POTENCIAL.



El voltmetro debe conectarse directamente a las terminales del devanado por medir con el propósito de no incluir en la lectura las resistencias de contacto. Para proteger el voltmetro de sobretensiones, éste se debe desconectar del circuito antes de conectar o desconectar las corrientes. La corriente no debe exceder del 15% de la corriente nominal del devanado bajo prueba, ya que valores mayores pueden causar inexactitud debido al calentamiento del devanado.

METODO PUENTE.

Este método es generalmente preferido por su precisión y conveniencia y es utilizado para la medición de resistencias de hasta 10,000Ω. Su preferencia se debe a que trabaja con corrientes pequeñas que no alteran el valor de resistencia por cambio de temperatura, éste método es obligatorio en los casos en que la corriente nominal del devanado sea menor de un ampere.

CONVERSION DE LAS MEDIDAS DE RESISTENCIA.

Las lecturas de resistencia del devanado son convertidas a una referencia de temperatura normalizada, a 20°C. Las conversiones son simplificadas por la fórmula siguiente:

$$R_s = R_m \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k}$$

donde:

R_s = Resistencia a la Temperatura T_s

R_m = Valor de la resistencia medida

T_s = Referencia de temperatura

T_m = Temperatura de la resistencia medida

T_k = 234.5 para cobre, 225 para aluminio

2.2 PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACION.

Esta prueba se encuentra detallada en forma idéntica en las Normas Nacional y Americana, por tanto no existen diferencias y las especificaciones se mantienen estables.

La relación de vueltas debe determinarse para todas las derivaciones, así como para todas las posibles conexiones de los devanados del transformador.

La prueba de relación debe hacerse a tensión nominal o menor y a frecuencia nominal o mayor sin carga.

En el caso de transformadores trifásicos, en los cuales cada fase sea independiente y accesible, se recomienda usar de preferencia alimentación monofásica, cuando así convenga se puede usar alimentación trifásica.

Los transformadores en conexión estrella diametral exafásica con el neutro inaccesible se pueden probar con alimentación trifásica. Cualquier diferencia en las características magnéticas de las tres fases - origina un desplazamiento del neutro lo cual cause un desequilibrio en las tensiones diametrales. Cuando dicho desequilibrio ocurre, la conexión diametral se debe cambiar ya sea a una conexión delta ó estrella.

Si se encuentra que las tensiones de línea son iguales y del valor adecuado ($\sqrt{3}$ veces la tensión diametral y está conectado en Y), la relación es correcta.

Se utilizan tres métodos para la prueba de relación.

METODO DE LOS VOLTMETROS.

Se usan dos voltímetros, con transformadores de potencial si es necesario o, uno para medir la tensión del devanado de alta tensión y el otro para la del devanado de baja tensión.

Los dos voltímetros deben leerse simultáneamente. Para compensar errores de los instrumentos se debe tomar un segundo grupo de lecturas con los voltímetros intercambiados. La relación de transformación se determina con el promedio de lecturas.

Se deben hacer cuando menos, cuatro series de pruebas con tensiones - distintas que difieren aproximadamente 10%. Si las relaciones calculadas con los valores anteriores no difieren en más de un 1%.

El promedio de ellas es la relación de transformación. En caso contrario, las pruebas deben repetirse con otros instrumentos.

METODO DEL TRANSFORMADOR PATRON.

Este método es más conveniente para medir con precisión la relación de un transformador.

El transformador que se va a probar se excita en paralelo con un transformador patrón de la misma relación nominal y los otros devanados se conectan en paralelo, intercalándose un voltmetro o un detector entre dos terminales de igual polaridad, según se muestra en la figura 2.2a. El transformador patrón puede ser un transformador de relación variable, por ejemplo el TTR, en cuyo caso se puede obtener directamente la relación de transformación.

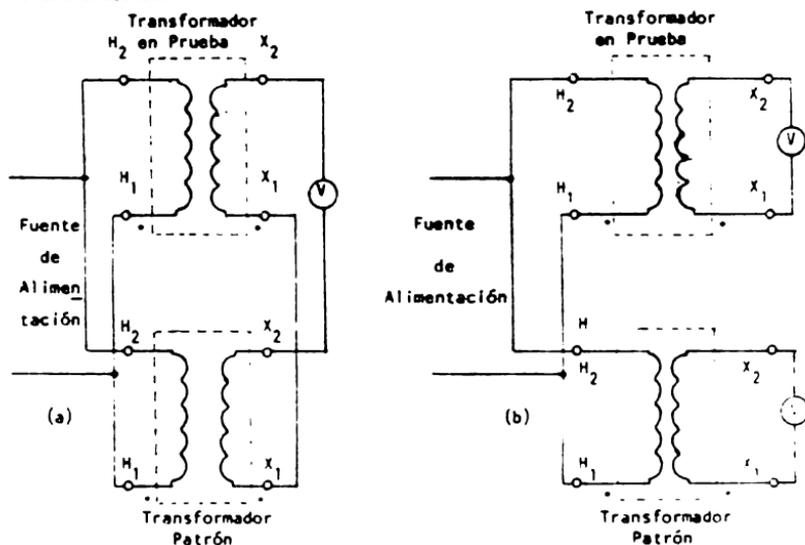


FIG. 2.2 METODO DEL TRANSFORMADOR PATRON PARA LA PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACION (a) CON UN VOLTMETRO (b) CON DOS VOLTMETROS.

Una variante del método del transformador patrón, es la indicada en la figura 2.2b en la cual se utilizan dos voltímetros para medir -- tensiones secundarias. El promedio de los resultados es la relación de transformación.

METODO DE POTENCIOMETRO DE RESISTENCIA.

Para determinar la relación del transformador se puede utilizar un potenciómetro apropiado, preferentemente graduado para dar la lectura de relación de transformación, como se muestra en la figura 2.3.

Para efectuar la prueba, el contacto móvil se desliza a lo largo de la resistencia del potenciómetro hasta que el detector indique cero. Entonces la relación de las resistencias del potenciómetro R/R_1 es igual a la relación del transformador.

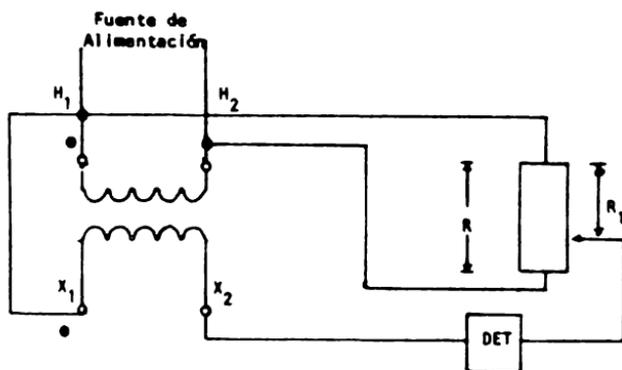


FIGURA 2.3 CIRCUITO CON POTENCIOMETRO DE RESISTENCIA PARA LA PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACION.

2.3 PRUEBA DE POLARIDAD Y SECUENCIA DE FASES.

PRUEBA DE POLARIDAD.

La prueba de polaridad se requiere principalmente para poder efectuar la conexión adecuada de bancos de transformadores. En las figuras 2.4 y 2.5 se muestran los arreglos de los devanados correspondientes a una polaridad sustractiva y a una polaridad aditiva respectivamente

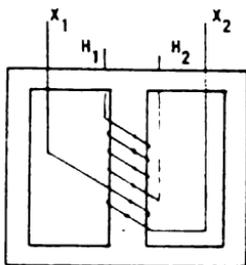


FIGURA 2.4 DEVANADOS EN POLARIDAD SUBSTRACTIVA.

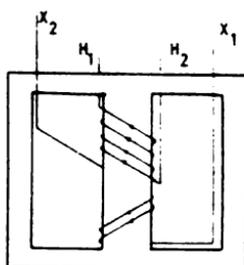


FIGURA 2.5 DEVANADOS EN POLARIDAD ADITIVA.

Los métodos más comúnmente usados para determinar la polaridad son:

METODO DE COMPARACION CON UN TRANSFORMADOR PATRON.

La polaridad de un transformador se puede verificar por comparación con un transformador patrón de polaridad conocida similarmente a la prueba de relación, como lo indica la figura 2.6.

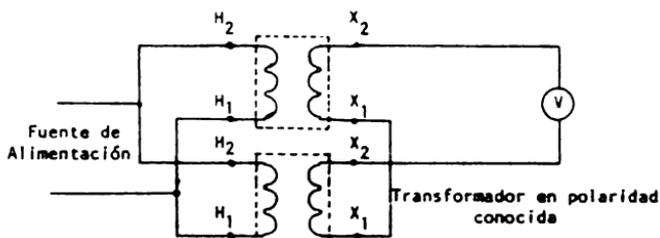


FIGURA 2.6 CONEXIÓN DEL VÓLTMETRO PARA LEER LA DIFERENCIA ENTRE LAS TENSIONES SECUNDARIAS.

Una vez efectuadas las conexiones se aplica una tensión reducida en los devanados de alta tensión. Cuando se utiliza un vóltmetro, éste indica la diferencia de las dos tensiones secundarias, si las polaridades de los dos transformadores son iguales o indica la suma de las mismas si las polaridades son diferentes.

Un método opcional para comprobar las polaridades, en caso de que se carezca de los instrumentos apropiados, es substituir el vóltmetro con un fusible de baja capacidad o una lámpara adecuada.

Se recomienda usar éste método opcional como medida de precaución.

METODO DE IMPULSO INDUCTIVO CON CORRIENTE DIRECTA.

Se conecta una fuente de CD, de potencial adecuado para no exceder la corriente nominal del embobinado y al mismo tiempo se intercala un vóltmetro, de manera que se observe claramente la deflexión de la aguja.

Las terminales del voltmetro se transfieren a las terminales de baja tensión sin desconectar la fuente de C.D., cuidando de conservar a la izquierda la terminal que estaba en esta misma posición en alta tensión y a la derecha igualmente.

Se desconecta rápidamente la fuente de C.D., del devanado de alta tensión y se observa la deflexión de la aguja del voltmetro causada por la descarga inductiva.

Si la aguja se deflexiona en la misma dirección que en el devanado de alta tensión la polaridad es aditiva y si se deflexiona en sentido contrario, la polaridad es substractiva.

METODO CON TENSION ALTERNA.

En este método se conectan dos terminales adyacentes de alta y baja tensión y en las otras dos terminales se conecta un voltmetro como se indica en la figura. 2.7.

Se aplica una tensión alterna conveniente, de valor conocido, en el devanado de alta tensión y se toma la lectura del voltmetro. Si esta lectura es mayor que la tensión aplicada, la polaridad es aditiva y si es menor, la polaridad es substractiva.

Este método se limita a transformadores en los cuales la relación de transformación permite apreciar la diferencia entre las dos lecturas.

La polaridad de cada fase de una unidad trifásica, se determina de la misma manera como se ha descrito para transformadores monofásicos y se aplican las mismas limitaciones. Todas las fases de un transformador trifásico tienen la misma polaridad relativa, si una fase tiene una fuerte polaridad aditiva y otra sustractiva, es indicación de error.

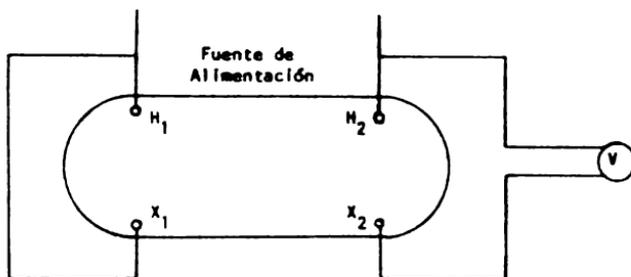
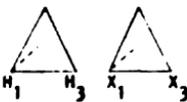
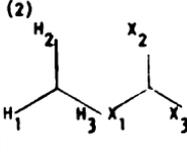
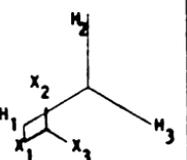
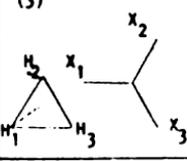
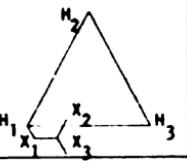
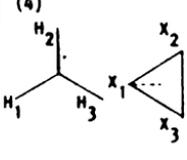
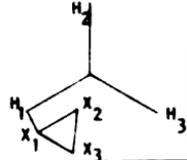
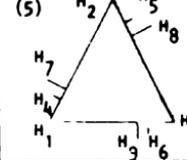
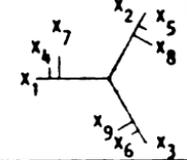


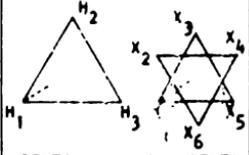
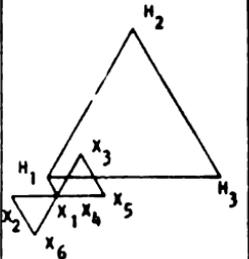
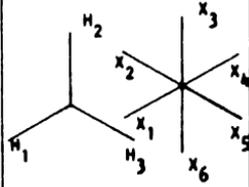
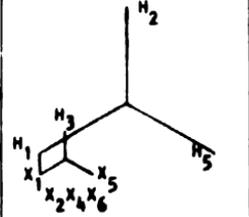
FIGURA 2.7 DIAGRAMA PARA LA PRUEBA DE POLARIDAD POR EL METODO DE TENSION ALTERNA.

SECUENCIA DE FASES.

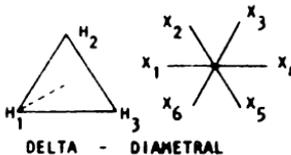
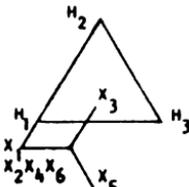
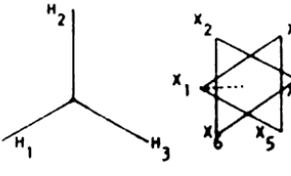
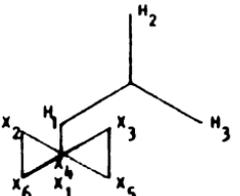
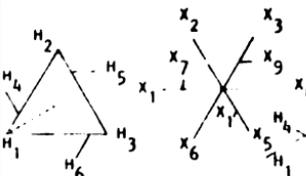
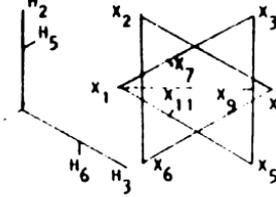
La prueba de secuencia de fases ó relación de fase han sido diseñadas para determinar el desplazamiento angular y la secuencia de fases relativas.

GRUPO	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA PARA MEDICIONES DE PRUEBA.	MEDICIONES DE PRUEBA
GRUPO 1 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 0 GRADOS	(1) 		CONECTAR $H_1 \approx X_1$ MEDIR $H_2 - X_2, H_3 - X_2, H_1 - H_2, H_2 - X_3$ RELACIONES DE TENSION (1) $H_2 - X_3 = H_3 - X_2$
	(2) 		(2) $H_2 - X_2$ $H_1 - H_2$ (3) $H_2 - X_2$ $H_2 - X_3$
GRUPO 2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 30 GRADOS	(3) 		CONECTAR $H_1 \approx X_1$ MEDIR $H_3 - H_2, H_3 - X_3, H_1 - X_3, H_2 - X_2$ $H_2 - X_3$ RELACIONES DE TENSION (1) $H_3 - X_2 = H_3 - X_3$
	(4) 		(2) $H_3 - X_2$ $H_1 - H_3$ (3) $H_2 - X_2$ $H_2 - X_3$ (4) $H_2 - X_2$ $H_1 - H_3$
	(5) 		

MARCADO DE TERMINALES Y DIAGRAMAS DE SECUENCIA DE FASES PARA CONEXION TRIFASICA DE TRANSFORMADORES. (1) CONEXION DELTA-DELTA; (2) CONEXION ESTRELLA-ESTRELLA; (3) CONEXION DELTA-ESTRELLA; (4) CONEXION ESTRELLA-DELTA; (5) TRANSFORMADOR TRIFASICO CON DERIVACIONES.

GRUPO	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA PARA MEDICIONES PARA PRUEBA	MEDICIONES DE PRUEBA
<p>GRUPO I DESPLAZAMIENTO ANGULAR 0 GRADOS</p>	 <p>DELTA - DOFL: DELTA</p>	 <p>DIAGRAMA PARA MEDICIONES PARA PRUEBA</p>	<p>CONECTAR: H_1 a X_1 y X_4</p> <p>MEDIR $H_2-X_3, H_1-H_2, H_2-X_5,$ $H_2-X_6, H_3-X_2, H_2-X_2, H_3-X_3$</p> <p>RELACIONES DE TENSION</p> <p>(1) $H_2-X_5 = H_3-X_3$ (2) $H_2-X_5 = H_1-H_2$ (3) $H_2-X_3 = H_1-X_2$ (4) $H_2-X_6 = H_3-X_2$ (5) $H_2-X_6 = H_1-H_2$ (6) $H_2-X_2 = H_2-X_6$</p>
	 <p>ESTRELLA - DIAMETRAL</p>	 <p>DIAGRAMA PARA MEDICIONES PARA PRUEBA</p>	<p>CONECTAR: X_2 a X_4 y X_6, H_1 a X_1</p> <p>MEDIR $H_2-X_3, H_3-X_5, H_1-H_2, H_2-X_5$</p> <p>RELACIONES DE TENSION</p> <p>(1) $H_2-X_5 = H_3-X_3$ (2) $H_2-X_3 = H_1-H_2$ (3) $H_2-X_3 = H_2-X_5$</p>

MARCAO DE TERMINALES Y DIAGRAMAS DE SECUENCIA DE FASES PARA CONEXION EXAFASICA DE TRANSFORMADORES (PARTE I)

GRUPO	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA PARA MEDICIONES PARA PRUEBA	MEDICIONES DE PRUEBA
GRUPO 2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 30 GRADOS	 <p style="text-align: center;">DELTA - DIAMETRAL</p>		CONECTAR: $X_2 \circ X_4$ y $X_6, H_1 \circ X_1$ MEDIR $H_2-X_3, H_3-X_5, H_1-H_3, H_1-H_3,$ H_2-X_1, H_2-X_5 RELACIONES DE TENSION (1) $H_2-X_3 = H_2-X_5$ (2) $H_2-X_3 = H_2-X_5$ (3) $H_2-X_3 = H_2-X_5$
GRUPO 2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 30 GRADOS	 <p style="text-align: center;">ESTRELLA - DOBLE DELTA</p>		CONECTAR: $H_1 \circ X_1$ y X_4 MEDIR $H_3-X_3, H_3-X_5, H_1-H_3, H_2-X_3,$ $H_2-X_5, H_3-X_2, H_3-X_6, H_2-X_2,$ H_2-X_6 RELACIONES DE TENSION (1) $H_3-X_3 = H_3-X_5$
30 GRADOS	 <p style="text-align: center;">TRANSFORMADORES EXAFASICOS CON DERIVACIONES</p>		(2) $H_3-X_3 = H_1-H_3$ (3) $H_2-X_3 = H_2-X_5$ (4) $H_3-X_2 = H_3-X_6$ (5) $H_3-X_2 = H_1-H_3$ (6) $H_2-X_2 = H_2-X_6$

PRUEBA PARA VERIFICAR EL DIAGRAMA VECTORIAL.

El diagrama vectorial de un transformador trifásico o polifásico, que define el desplazamiento angular y la secuencia de fase, se verifica conectando entre sí por ejemplo, las terminales M_1 y X_1 , excitando el transformador a una tensión trifásica apropiada tomando lecturas de tensión entre pares de terminales y comparándolas como se indica en los diagramas correspondientes a las figuras 2.8 a y b mediante un medidor de ángulo de fase conocido como fasómetro y un transformador de potencial.

No son necesarias pruebas para determinar la secuencia de fases entre la terminal de línea y neutro en un devanado en zig zag, en aquellos otros transformadores, que no tengan conexión de neutro accesible tienen que ser conectados temporalmente en delta o en estrella para verificar su diagrama vectorial.

PRUEBA DE SECUENCIA DE FASES.

Esta prueba puede efectuarse utilizando un indicador de secuencia de fases el cual puede incluir un motor de inducción trifásico o un circuito de fase dividida.

Para efectuar la prueba en un transformador trifásico se conecta el indicador de secuencia de fases a las terminales de alta tensión debiendo excitar el transformador en sus tres fases, a una tensión trifásica apropiada para el indicador y se anota la dirección de rotación que marca el instrumento. Posteriormente se transfiere el indicador al lado de baja tensión, conectando en X_1 , X_2 , X_3 , las terminales que estaban conectadas a H_1 , H_2 y H_3 respectivamente, nuevamente se excita el transformador con una tensión adecuada sin cambiar las conexiones de excitación, anotando otra vez la dirección de rotación indicada por el instrumento, si la indicación del instrumento es la misma en ambos casos, la secuencia de fases del transformador es la normal.

Para la prueba de secuencia de fases en transformadores con secundarios exafásicos que no tengan conexión al neutro, éstos deben conectarse temporalmente en delta o estrella y probarse como transformadores trifásicos.

La polaridad por fase, el desplazamiento angular y la secuencia de fases de un transformador trifásico pueden obtenerse simultáneamente al determinar la relación de transformación por el método del transformador patrón.

2.4 IMPEDANCIA Y PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA.

Dentro de las pruebas que se le efectúan a un transformador están las pruebas de rutina que tienen como objetivo principal verificar si la calidad del transformador se mantiene dentro de las tolerancias permitidas.

Estas pruebas están tomadas de la Norma Oficial Mexicana ---
NOM-J-1978 y de la ANSI C57.12.90-1973, Test Code For Distribution Power -
and Regulating Transformers.

GENERALIDADES.

La tensión de impedancia comprende una componente resistiva efectiva, que corresponde a las pérdidas de carga y una componente reactiva, correspondiente al flujo disperso de los devanados.

No es práctico medir estas componentes separadamente pero - después de medir las pérdidas totales de carga y la tensión total de impedancia, las componentes pueden separarse por cálculo.

La tensión de impedancia de un transformador, visto desde - las terminales del devanado excitado, es la tensión requerida para hacer circular su corriente nominal teniendo el otro devanado en corto circuito.

Este valor generalmente está entre el 1 y el 15% de la tensión nominal del devanado excitado y puede tomarse como guía al planear - la tensión de impedancia requerida en la prueba.

NOTA: (La Norma ANSI, nos dice que el valor de la tensión de impedancia requerida para hacer circular corriente nominal en el devanado excitado es generalmente del 3 al 15%. Sin embargo en la Norma Oficial Mexicana nos dice que éste valor está entre 1 y 15%.)

Las componentes resistiva y reactiva de la tensión de impedancia - son determinadas mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$E_r = \frac{P_z}{I} \quad \text{--- (4.1)}$$

$$E_x = \sqrt{E_z^2 - E_r^2} \quad \text{--- (4.2)}$$

en donde:

E_r = tensión resistiva (componente en fase)

E_x = tensión reactiva (componente en cuadratura)

E_z = Tensión de impedancia medida en la prueba de pérdidas de carga.

P_z = potencia en watts medida en la prueba de pérdidas de carga.

I = corriente nominal en el devanado excitado.

Los valores por unidad de la tensión de resistencia - tensión de reactancia y la tensión de impedancia se obtienen al dividir E_r , E_x y E_z respectivamente, entre la tensión nominal.

Los valores en porcentaje se obtienen multiplicando por 100 los valores por unidad.

Puesto que las pérdidas de carga están constituidas por una componente I^2R , la cual se incrementa con la temperatura y una componente de pérdidas indeterminadas, la cual disminuye al aumentar la temperatura; cuando se requiera referir las pérdidas de carga de una temperatura a otra, se deben calcular separadamente las dos componentes por medio de las siguientes fórmulas:

$$P_r' = Pr \frac{T' + TK}{T + K} \quad P = Pr + Pi$$

$$Pi' = Pi \frac{T + K}{T' + K} \quad Pi' = Pi'$$

$$Pi' = Pi \frac{T + K}{T' + K} \quad P' = Pr' + Pi'$$

en donde:

- T = temperatura a la que se hace la medición.
- T' = temperatura a la que se deben referir las pérdidas
- P = pérdidas de carga a la temperatura t.
- Pr = suma de pérdidas I^2R a la temperatura t.
- Pr' = suma de pérdidas I^2R a la temperatura t'.
- Pi = pérdidas indeterminadas a la temperatura t.
- Pi' = pérdidas de carga a la temperatura t'.
- Pi' = pérdidas indeterminadas a la temperatura t'.
- K = 234.5 para cobre y 225 para aluminio.

Para calcular las pérdidas I^2R de los devanados se debe partir de las corrientes usadas en la prueba de pérdidas de carga y de las ---

mediciones de resistencia corregidas a la temperatura a la que se midieron las pérdidas de carga.

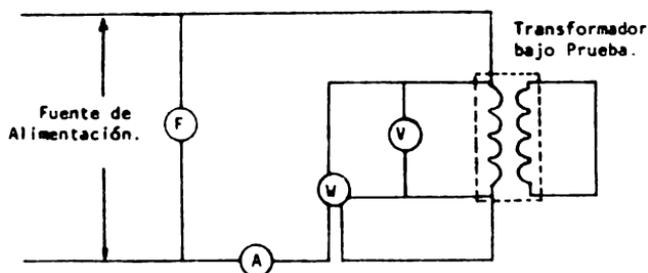
2.5 PRUEBA DE IMPEDANCIA.

METODO DE CORTO CIRCUITO.

En esta prueba se requiere que uno de los devanados del transformador (ya sea el devanado de alto voltaje o el devanado de bajo voltaje) se conecte en corto circuito y el otro devanado se excite a frecuencia nominal, y a una tensión tal que haga circular la corriente nominal en los devanados.

Una vez ajustadas la corriente y la frecuencia a sus valores nominales, se tomarán lecturas simultáneas en el amperímetro, voltímetro, --- wátmetro, frecuencímetro. Las lecturas leídas en el wátmetro, representan las pérdidas del equipo de medición.

FIG. 2.9 DIAGRAMA PARA DETERMINAR PERDIDAS DE CARGA E IMPEDANCIA EN UN --- TRANSFORMADOR MONOFASICO.



Es suficiente medir y ajustar la corriente en el devanado excitado, ya que en el devanado en corto circuito circula también su corriente nominal correspondiente, excepto por un error despreciable debido a la corriente de excitación.

Si en el devanado en corto circuito se conecta un equipo de medición para medir la corriente, se puede introducir un error considerable, por la caída de tensión y las pérdidas de este equipo.

La sección de los conductores usados para poner en corto circuito el transformador, debe ser igual o mayor que la correspondiente a las terminales del mismo. Estos conductores deben ser lo más corto posible y estar alejados de masas magnéticas.

Los contactos deben estar limpios y bien apretados.

Estas precauciones son importantes para evitar errores en tensiones de impedancia y pérdidas que de otra manera pueden introducirse en las mediciones.

Las pérdidas $I^2 R$ de los devanados se calcula a partir de las corrientes que se usan en la medición de pérdidas de carga y las mediciones de resistencia ohmica (corregidas éstas a la temperatura a la que se haga la prueba de pérdidas de carga).

Estas pérdidas $I^2 R$, restadas de las pérdidas de carga medidas en el wattmetro, dan como resultado las pérdidas indeterminadas del transformador a la temperatura de prueba.

2.6 PRUEBA DE AUTOTRANSFORMADORES.

Las pruebas de impedancia y pérdidas de carga se pueden hacer en auto-transformadores sin afectar sus conexiones internas.

Las pruebas se deben hacer poniendo en corto circuito los terminales de alta o baja tensión, y a los terminales que queden libres se aplica una tensión tal, que haga circular la corriente nominal.

La tensión de impedancia medida a través del devanado serie, corresponde a la existente entre los terminales de alta tensión del auto-transformador, en tanto que la tensión de impedancia medida a través del devanado común corresponde a la existente entre los terminales de baja tensión del auto-transformador.

Para este método las conexiones externas deben ser como se indica en la figura 2.10

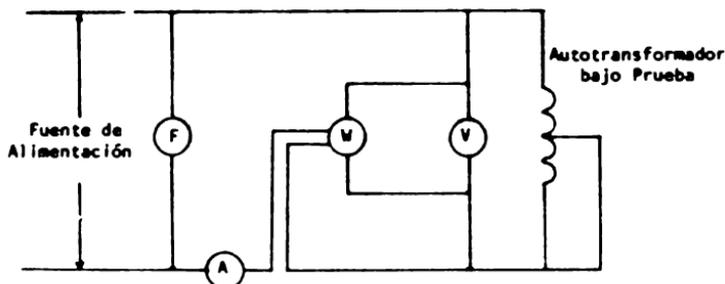


FIG. 2.10 CONEXIONES PARA MEDIR PERDIDAS DE CARGA E IMPEDANCIA EN UN AUTO-TRANSFORMADOR.

Otra forma de efectuar las pruebas de impedancia y pérdidas de carga, consiste en considerar a los devanados serie y común como devanados separados, estando uno en corto circuito y excitado el otro.

Cuando se emplea este procedimiento, la corriente que se haga circular en el devanado excitado debe ser la nominal. Esta corriente puede ser igual o no a la corriente de línea.

El valor de impedancia así obtenido se debe referir a la capacidad del aparato funcionado como auto-transformador.

Las pérdidas de carga activa y reactiva deben ser las mismas por cualquier método.

2.7. PRUEBA DE IMPEDANCIA DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO CON VOLTAJE TRIFASICO.

Las tres terminales ya sea del lado de alta o baja tensión - se pondrán en corto circuito, y se aplicará una tensión trifásica a frecuencia nominal a las terminales del otro devanado de un valor tal que haga circular corriente nominal en los devanados.

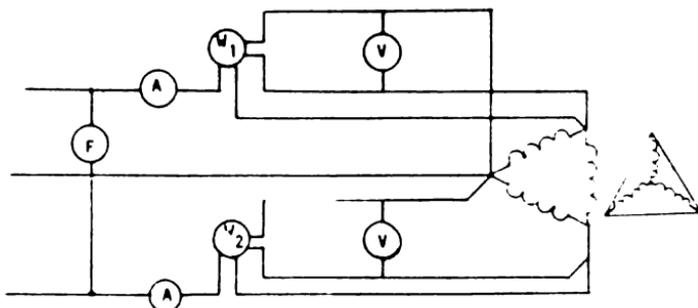


FIG. 2.11 DIAGRAMA PARA LA MEDICION DE PERDIDAS DE CARGA E IMPEDANCIA EN UN TRANSFORMADOR TRIFASICO.

La tensión de impedancia de un transformador trifásico es el promedio de las tres tensiones medidas.

Si las tres corrientes de línea no pueden balancearse, el promedio de sus valores eficaces debe corresponder al valor deseado.

El procedimiento es similar al descrito para transformadores monofásicos, excepto que todas las conexiones y mediciones son trifásicas.

METODO DEL PUENTE DE IMPEDANCIAS.

Este método puede usarse como una alternativa del método - wátmetro, vóltmetro, (ampermetro) usado para la medición de impedancia y - pérdidas de carga. Es muy ventajoso en medición de cargas con bajo factor - de potencia, en las que de ordinario se requiere técnicas y wátmetros espe - ciales.

CIRCUITO DEL PUENTE DE IMPEDANCIAS.

Aunque es posible usar una gran variedad de circuitos de - puente de impedancia, la elección de un circuito depende del problema espe - cífico de medición y de las facilidades de que se dispone.

CIRCUITO DE PUENTE DE IMPEDANCIA PARA MEDICION DE PERDIDAS.

En general, el circuito de un puente de impedancia está dispuesto de tal manera que permita la comparación entre una tensión proporcional a la corriente del transformador bajo prueba y una tensión de prueba --- E_T (Fig. 2.12).

La comparación de las tensiones se hace ajustando los valores de impedancia de uno o más ramales del puente (Z_1 , Z_2 y Z_3) hasta que -- las tensiones aplicadas a Z_2 y Z_3 sean exactamente iguales en magnitud y ángulo de fase.

La condición de equilibrio del puente se obtiene cuando la lectura en el galvanómetro (GAL) sea nula.

Las características de impedancia que representan al transformador bajo prueba se pueden calcular con base a los valores de Z_1 , Z_2 y Z_3 .

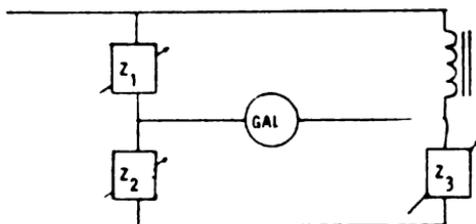


FIG. 2.12 CIRCUITO DE PUENTE DE IMPEDANCIA.

CIRCUITOS TIPO POTENCIOMETRO.

Una forma conveniente del puente de impedancia, para prueba de transformadores, es un circuito tipo potenciómetro doble para corriente alterna combinado con un defasador (Fig. 2.13) Los dos potenciómetros (A y B) se pueden conectar directamente de un transformador de potencial (TP) a las terminales del transformador bajo prueba. La suma vectorial de las caídas de tensión (A y B), en cuadratura, se compara con la caída de tensión (C) del secundario del transformador de corriente (Tc).

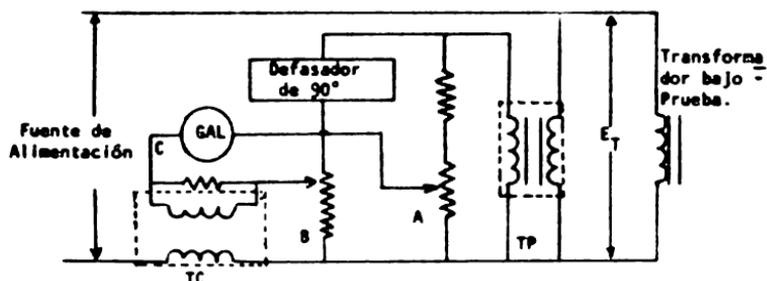


FIG. 2.13 CIRCUITO TIPO POTENCIOMETRO CON DEFASADOR.

Las constantes de este circuito pueden seleccionarse de modo que la posición de equilibrio del potenciómetro (A), sea directamente proporcional a las pérdidas del transformador bajo prueba. Este circuito puede usarse en lugar del wáttmetro tipo dinámómetro normal y se adapta fácilmente a sistemas automáticos de prueba.

Otro circuito tipo potenciómetro doble de corriente alterna emplea un inductor mutuo, con el cual se logra la caída de tensión en cuadratura requerida para el equilibrio (Fig. 2.14).

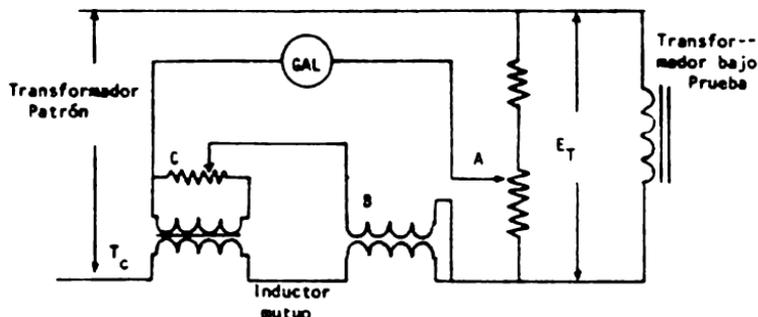


FIG. 2.14 CIRCUITO TIPO POTENCIOMETRO CON INDUCTOR MUTUO.

En este caso la suma vectorial de las caídas de tensión (B) y (C) es comparada con la caída de tensión (A) para operación a frecuencia fija (por ejemplo 60 Hz.). Pueden seleccionarse las constantes del circuito, de modo que la posición de equilibrio del potenciómetro (B) sea directamente proporcional a las pérdidas del transformador bajo prueba. La configuración de un circuito tipo potenciómetro de lectura directa para medición de pérdidas, está normalmente determinado por el parámetro, tensión o corriente que se man tendrá durante la prueba. Para la prueba de pérdidas de excitación, en la que la tensión, es el parámetro de referencia, las caídas de tensión para equilibrio del puente, en fase y en cuadratura, se derivan ventajosamente de la par te del potencial del circuito de prueba.

Para la prueba de pérdidas de carga, donde la corriente es el parámetro de referencia, las caídas de tensión para equilibrar el puente se obtienen ventajosamente de la parte de la corriente del circuito de prueba.

MEDICION TRIFASICA CON PUENTES.

Las mediciones de pérdidas en aparatos trifásicos se efectúan conectando el circuito del puente a cada fase sucesivamente y calculando las pérdidas totales a partir de las tres mediciones monofásicas. Esto es análogo al método de los tres wáttmetros para medir pérdidas, usando un solo wáttmetro.

2.8 PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.

La vida útil de un aislamiento A o B termina cuando el aislamiento se ha vuelto quebradizo, tostado, o cuando al oprimirlo se nota flojo, y al aparecer grietas ocasionadas por esfuerzos mecánicos.

El endurecimiento del aislamiento es ocasionado al operar a elevadas temperaturas por tiempos prolongados.

Los esfuerzos mecánicos son causados por cortos circuitos o por dilataciones y contracciones debidas a los cambios de temperatura y vibraciones.

La resistencia dieléctrica del aislamiento, no se reduce notablemente por el endurecimiento; pero cuando se presentan las grietas ocasionan falla eléctrica, razón por la cual se debe inspeccionar periódicamente.

Desafortunadamente no se puede medir el envejecimiento de los aislamientos por pruebas no destructivas, ya que ni la prueba de resistencia de aislamiento ni la de factor de potencia nos dan indicación del endurecimiento de él. Probablemente sea factible determinar el estado del aislamiento tomando el tiempo y las condiciones de temperaturas con que se ha trabajado.

2.9 FALLAS DE AISLAMIENTO.

La causa en la mayoría de los casos es la humedad la que ocasiona las fallas en el capítulo 5 se presenta el estudio respectivo.

Los aislantes de materiales orgánicos usados en transformadores y generadores son higroscópicos, razón por la cual se debe estar seguro de que la humedad no esté en contacto con el aislamiento a través de empaques defectuosos, fuga de serpentines o aceite contaminado.

DEFINICION.

La resistencia de aislamiento se define como la resistencia (en Megohms) que ofrece un aislamiento al aplicarle un voltaje de corriente directa durante un tiempo dado, medido a partir de la aplicación del mismo, como referencia se utilizan los valores de 1 a 10 minutos.

CORRIENTE DE AISLAMIENTO.

A la corriente resultante de la aplicación del voltaje de corriente directa a un aislamiento se le denomina corriente de aislamiento y consiste de una componente que es la corriente que fluye dentro del volumen de aislamiento y la corriente que fluye sobre la superficie del aislamiento y que se conoce como corriente de fuga. Esta corriente es igual que la de conducción, permanece constante y ambas componentes constituyen el factor primario para juzgar las condiciones de un aislamiento.

ABSORCION DIELECTRICA.

La resistencia varía directamente con el espesor del aislamiento e inversamente el área del mismo; cuando repentinamente se aplica un voltaje de C.D. a un aislamiento, la resistencia se inicia con un valor bajo y gradualmente va aumentando con el tiempo hasta estabilizarse.

A la curva obtenida cuando se grafican valores de resistencia de aislamiento contra tiempo se le denomina curva de absorción dieléctrica y su pendiente indica el grado relativo de secado o suciedad del aislamiento. Si el aislamiento está sucio o húmedo se alcanzará un valor estable en uno o dos minutos después de haber iniciado la prueba y se obtendrá una curva con baja pendiente.

INDICES DE ABSORCION Y POLARIZACION.

La pendiente de la curva de absorción dieléctrica puede expresarse mediante la relación de dos lecturas de resistencia de aislamiento, tomadas a diferentes intervalos de tiempo durante la misma prueba.

A la relación de 60 segundos a 30 segundos se le conoce como Índice de Absorción, y a la relación de 10 minutos a 1 minuto se le conoce como Índice de Polarización.

El Índice de polarización es muy útil para la evaluación del estado del aislamiento de devanados de generados y transformadores, y es indispensable que se obtenga justamente antes de efectuar una prueba de alta tensión.

2.10 POTENCIAL DE PRUEBA APLICADO.

La medición de la resistencia de Aislamiento es en si misma una prueba de potencial y debe por lo tanto restringirse a valores apropiados que dependen de la tensión nominal de operación del equipo que se va a someter a la prueba y de las condiciones en que se encuentre su aislamiento. Esto es importante particularmente para transformadores sin su aceite aislante, que se encuentran húmedos.

Si la tensión de prueba es alta, se puede provocar fatiga en el aislamiento.

Los potenciales de prueba más comúnmente utilizados son tensiones, de corriente directa de 500 a 5,000 volts.

Las lecturas de resistencia disminuyen normalmente al utilizarse potenciales más altos; sin embargo, para aislamientos en buenas condiciones y perfectamente secos, se obtendrán valores muy próximos para diferentes tensiones de prueba, siempre que no pase del valor nominal de operación del equipo al que se está sometiendo a prueba.

Si al aumentar el potencial de prueba se reducen significativamente los valores de resistencia de aislamiento, ésto nos puede indicar que existen imperfecciones o fracturas en el aislamiento, posiblemente agravadas por suciedad o humedad aún cuando también la sola presencia de humedad con suciedad puede ocasionar este fenómeno.

EFEECTO DE LA CARGA RESIDUAL

Un factor que afecta las mediciones de resistencia de aislamiento y absorción dieléctrica es la presencia de carga previa en el aislamiento. Esta carga puede originarse porque el equipo trabaja aislado de tierra o por una aplicación del voltaje de C.D. en una prueba anterior. - Por tanto es necesario que antes de efectuar las pruebas se descarguen los aislamientos mediante una conexión a tierra.

EFEECTO DE ENVEJECIMIENTO.

En el caso de aislamiento con aglutinantes, semisólidos tales como la mica con asfalto, se presenta un proceso de curado con el tiempo, el cual provoca un aumento en la corriente de absorción que toma el aislamiento y por lo mismo un decremento de la resistencia de aislamiento con el aumento de edad,.

2.11 APLICACION DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

GENERALIDADES.

La medición de la resistencia de Aislamiento ha sido utilizado como la prueba más común para determinar las condiciones de los aislamientos de un transformador, y es de gran ayuda para la detección de humedad, condiciones del aceite, y daños en elementos aislantes.

Esta prueba es de gran utilidad para dar una idea rápida y confiable de las condiciones del aislamiento total del transformador - bajo prueba.

Las pruebas se efectúan con Megger, con tensión, mínima de 1,000 volts, operando con motor, rectificador o bien con Megger, - transistorizado. Para transformadores con voltajes mayores de 69 KV ó - capacidades mayores de 10 MVA, utilizar siempre Megger motorizado con - escala máxima de 50,000 megohms.

Para transformadores de 69 KV ó menores se puede utilizar el Megger transistorizado con escala de 200 megohms.

Se debe tener precaución de utilizar siempre el mismo Megger para una determinado equipo, a fin de que los resultados de la prueba puedan ser comparables.

PREPARACION DE TRANSFORMADOR PARA LA PRUEBA.

a) Librar las terminales completamente, desconectando - todas las terminales de boquillas.

En caso de que el transformador tenga salidas con cable subterráneo, se recomienda efectuar la prueba con todo y cables desde - el transformador hasta el interruptor, pero tomando las precauciones necesarias. Y solo en caso necesario desconectar para probar cable y transformador por separado.

- b).- Asegúrese de que el tanque del transformador esté sólidamente aterrizado.
- c).- Drenar todas las cargas estáticas que puedan estar presentes en los devanados al inicio de cada una de las pruebas.
- d).- Desconectar los neutros de los devanados.
- e).- Colocar puentes entre las terminales de las boquillas - del devanado primario, secundario y del terciario, si éste es el caso.
- f).- Limpiar la porcelana de las boquillas quitando el polvo, suciedad, etc.
- g).- Poner especial cuidado en que no haya cambios bruscos - de temperatura mientras dure la prueba.
- h).- Preferentemente efectuar las pruebas si la humedad relativa es menor de 75%.

PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS.

Al efectuar pruebas con Megger en los transformadores hay diferentes criterios en cuanto a la terminal de guarda.

Aquí se incluyen pruebas con y sin guarda, y quedará a juicio de la persona responsable el seleccionar las que sean de utilidad de acuerdo con las pruebas efectuadas con anterioridad al equipo.

Para cada una de las conexiones que se indican a continuación se efectuarán las pruebas con una duración de 10 minutos y se registrarán las lecturas de 15, 30, 45 y 60 segundos.

Así como a. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 minutos. Se usará el máximo voltaje de prueba del Megger tomando en consideración el voltaje nominal del devanado del transformador sometido a prueba. Se tomarán las lecturas de temperatura del aceite, temperatura ambiente y humedad relativa y se registrarán en la hoja de prueba mostrada en la pág. 95 y 96.

Las conexiones para transformadores de 2 y 3 devanados y auto-transformadores se indican en las figuras 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 -- con sus correspondientes hojas de prueba.

INTERPRETACION DE LAS LECTURAS PARA EVALUACION DE RESULTADOS.

A continuación se dan algunas recomendaciones para auxiliar al personal de prueba en la evaluación de los resultados obtenidos en la -- prueba Megger.

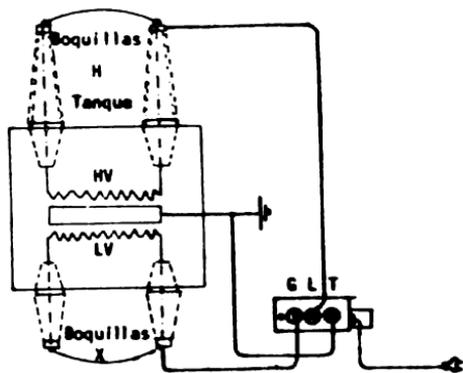
En general las lecturas de resistencia de aislamiento deberán considerarse como relativas a menos que el único interés sea el de comprobar que los valores se mantengan por arriba de los mínimos recomendados.

Como una conformación de la relatividad de una lectura aislada, existen casos en que se obtiene un valor de resistencia de aislamiento y sin embargo existe una deficiencia incipiente en la estructura aislante o en el caso opuesto, en que el valor es bajo y el aislamiento está en buenas condiciones, ya que la causa son fugas uniformemente distribuidas de naturaleza inofensiva.

Tomando en cuenta esta relatividad de las lecturas únicas, es fácil ver que la única forma de evaluar con cierta seguridad las condiciones del aislamiento de devanado, es mediante el análisis de la tendencia de los valores obtenidos en las pruebas periódicas a que se somete.

Para facilitar este análisis se recomienda graficar las lecturas obtenidas en la prueba.

Para que el análisis comparativo sea efectivo todas las pruebas deberán hacerse al mismo potencial, las lecturas deberán corregirse a una misma base (40°C) y en lo posible bajo las mismas condiciones.



PRUEBA	CONEXIONES			MIDE
	L	T	G	
1	H	↓	X	RH
2	H	X	↓	RHX
3	X	↓	H	RX
4	H	X↓	-	RH-RHX
5	X	H↓	-	RX-RHX
6	HX	↓	-	RH-RX

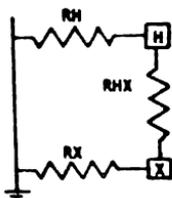


FIG. 2.15 CONEXIONES Y SECUENCIA DE PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS.

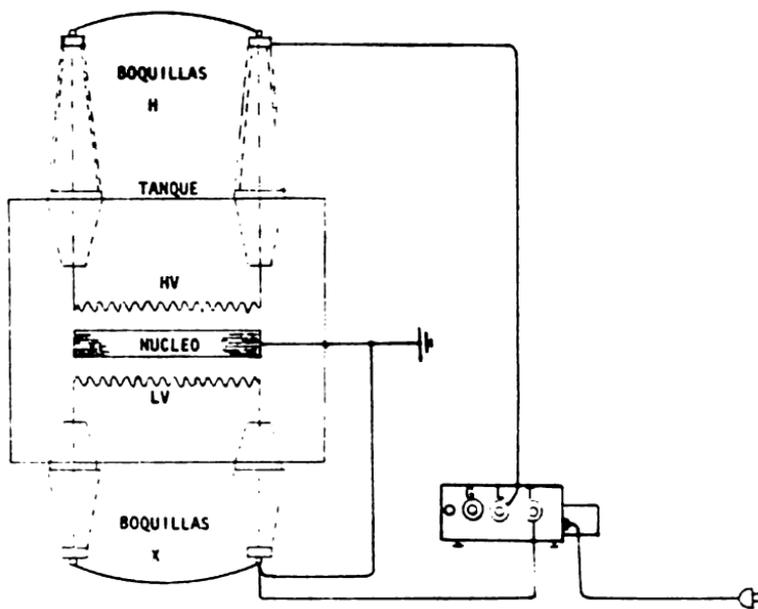
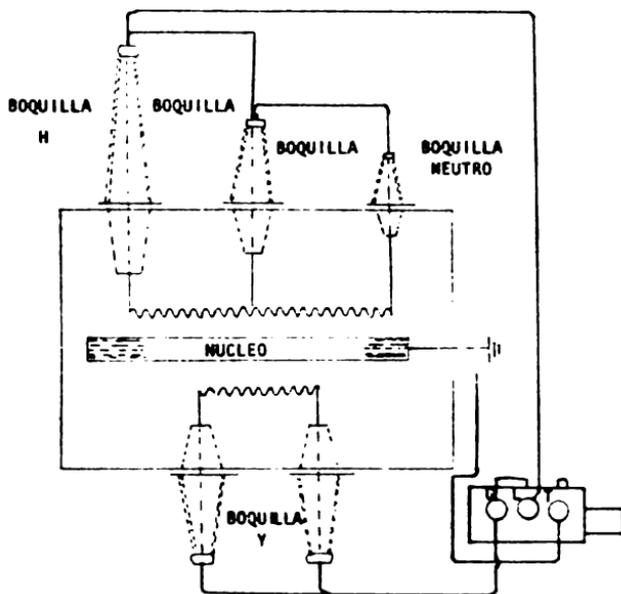


FIG. 2.16 CONEXION DEL MEGGER PARA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.



PRUEBA	CONEXIONES DE PRUEBA			MIDE
	L	T	G	
1	H	\perp	Y	RH
2	H	Y	\perp	RHY
3	Y	\perp	H	RY
4	H	Y	\perp	RH-RHY
5	Y	H	\perp	RY-RHY
6	HX	\perp		RH-RY

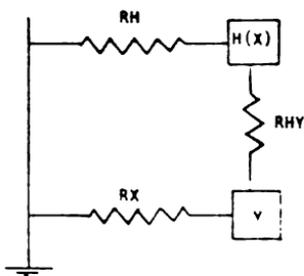
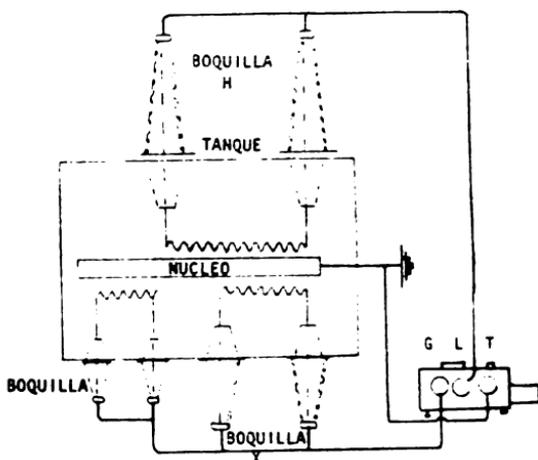


FIG. 2.17 CONEXION DEL MEGGER PARA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO PARA TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS.



PRUEBA	CONEXIONES DE PRUEBA			MIDE
1	H	\equiv	XY	RH
2	H	X	Y \equiv	RHX
3	H	Y	X \equiv	RHY
4	X	\equiv	HY	RX
5	X	Y	H \equiv	RH
6	Y	\equiv	HX	RY
7	H	XY \equiv	—	RH-RHY-RHX
8	X	HY \equiv	—	RX-RXY-RHX
9	Y	HX \equiv	—	RY-RHY-RXY
10	HXY	\equiv	—	RH-RX-RY

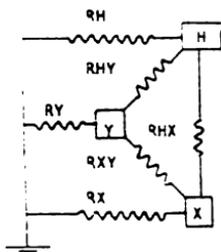


FIG. 2.18 CONEXIÓN DEL MEGGER PARA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO PARA AUTOTRANSFORMADOR.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS

DATOS DEL TRANSFORMADOR

CLAVE DE LA INSTALACION _____
 NOMBRE DE LA INSTALACION _____
 CLAVE DEL BOMBO _____
 TRANSFORMADOR _____
 MARCA _____ NO DE PASOS _____
 No. DE SERIE _____
 DEVANADO _____ AT _____ BT _____ TERCARIO _____
 TENSION _____ KV _____ KV _____ KV _____
 CONECTOR _____
 CIRCUNDA _____ VRA _____ VRA _____

DATOS DE LA PRUEBA

FECHA DE LA PRUEBA _____
 TEMPERATURA TRANSFORMADOR ACEITE _____ °C
 TEMPERATURA AMBIENTE _____ °C HUMEDAD _____ °C
 GRUPO DELAID EN LA PRUEBA (Ver Nota No 7) _____

 NOMBRE OPERARIO No. _____
 MARCA _____
 BOMBO _____

PRUEBA No.	PRUEBA					
ALINEA	AT	BT	TERCARIO	AT	AT	BT
LA BARRA	BT Y TERCARIO	AT Y TERCARIO	AT Y BT	BT	TERCARIO	AT
LA TIERRA	TANQUE	TANQUE	TANQUE	TERCARIO + TANQUE	BT + TANQUE	TERCARIO + TANQUE
TIEMPO MEDIDA	LECTURA 1 y 2 (MOMENTO, SEÑAL Y VALOR) LECTURA 3 y 4 (MOMENTO, SEÑAL Y VALOR) LECTURA 5 y 6 (MOMENTO, SEÑAL Y VALOR) LECTURA 7 y 8 (MOMENTO, SEÑAL Y VALOR)					
1/4						
1/2						
3/4						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
TIEMPO						
SEÑAL						
RESERVA						

INSTRUCCIONES GENERALES

1. PUENTEAR ENTRE SI TODAS LAS TERMINALES DE UN MISMO DEVANADO.
2. LOS DEVANADOS DEBEN DESCARGARSE A TIERRA DURANTE 10 MINUTOS ANTES DE CADA PRUEBA.
3. LA TERMINAL "GROUND" DEL MEDIDOR SE CONECTARA A TIERRA EFECTIVAMENTE.
4. LOS CABLES DE PRUEBA NO DEBERAN TOCARSE ENTRE SI NI TOCAR NINGUN OTRO ELEMENTO DE LA INSTALACION.
5. CUANDO UNA LECTURA SE HAGA MAL O DE TRES VECES CONSECUTIVAS, PUEDE DARSE POR TERMINADA LA PRUEBA.
6. EN CASO DE USAR CABLE DE PRUEBA ALUMINADO, CORAZA DEL MISMO A LA TERMINAL DE GUARDA.
7. EL TRANSFORMADOR SE PROBARA DESCONECTANDO TODAS SUS TERMINALES EN AQUEL LOS CASOS ESPECIALES EN QUE NO SEA POSIBLE, SE PROBARA SIEMPRE EN LAS MEJORES CONDICIONES, REPORTANDO EL EQUIPO QUE INCLUYE EN LA PRUEBA.

OBSERVACIONES

CONDICION DEL AISLAMIENTO
 BUENO _____ MALO _____ DUDOSO _____
 PRUEBA EFECTUADA POR _____

2.12 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA DE AISLAMIENTO EN EQUIPO ELECTRICO.

El factor de potencia es, en el momento actual, la principal herramienta para juzgar con un mayor criterio las condiciones de los aislamientos de los diferentes equipos eléctricos, siendo particularmente recomendada para la detección de degradación, envejecimiento y contaminación de los mismos, pudiéndose afirmar que por estas características es más reveladora que la prueba de aislamiento.

El factor de potencia de un aislamiento se define como el coseno del ángulo entre el vector de la corriente de carga y el vector de voltaje, aplicado, obteniendo los valores directos de éstos factores a través de la medición de los volts-amperes de carga y las pérdidas en watts del dieléctrico bajo prueba, a un voltaje dado, medido con un equipo especial.

El factor de potencia siempre será la relación de los watts de pérdida entre la carga en volts-amperes y el valor obtenido de esta relación será independiente del área o espesor del aislamiento y dependerá únicamente de la humedad, la ionización y la temperatura.

El principio básico de esta prueba no destructiva es la detección de algunos cambios medibles en las características de un aislamiento que pueden asociarse con los efectos de agentes destructivos como el agua, el calor, y el efecto corona y en general un incremento apreciable de las pérdidas dieléctricas en C.A. de Volts-Amperes o factor de potencia de un aislamiento, es una indicación clara de deterioro.

El equipo usado comúnmente en esta prueba son probadores de la marca Doble Engineering en sus dos tipos, el MEV-2500 y el MH-10KV, aunque también los hay de otro tipo y marca.

El uso del equipo "Doble" es el que se ha generalizado da su confiabilidad, está diseñado para usarse tanto en el campo como en pruebas de laboratorio.

Este probador es un instrumento de corriente alterna, diseñado para pruebas de aislamiento, mide los Volts-Amperes y las pérdidas en watts, a un potencial de prueba hasta de 2500 volts, cuando el probador se conecta a una fuente de 60 hz. de éstas mediciones se puede calcular el factor de potencia. El probador tiene un rango máximo de 100,000 milivolt-amp (40 mA), a 2500 volts y sirve para probar equipo eléctrico primario - tal como transformadores, generadores, boquillas, apartarayos, líquidos -- aislantes, cables, transformadores de instrumentos, capacitores, etc.

2.13 APLICACION DE LA PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA A TRANSFORMADORES.

TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS.

Los aislamientos que constituyen transformadores de dos devanados se muestran esquemáticamente en la figura 2.19, representada tan to a un transformador monofásico como trifásico y las consideraciones para ambos son las mismas.

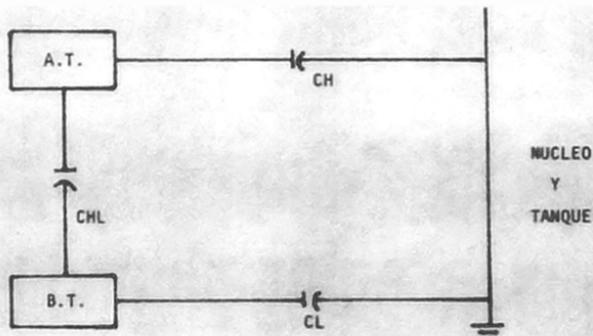
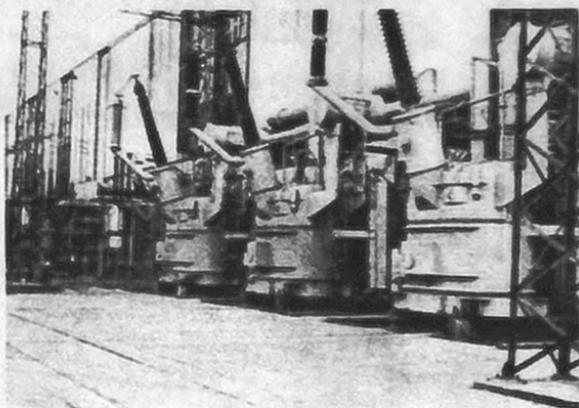


FIG. 219 ESQUEMA DE LOS AISLAMIENTOS DE LOS DEVANADOS, TANTO PARA TRANSFORMADOR MONOFASICO COMO TRIFASICO.



BANCO TRIFASICO DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE 106 MVA, 60 Hz ENFRIAMIENTO FOA, EN ACEITE, $230/\sqrt{3}$ VOLTS, 798 AMP. MARCA PEARSONS PEABLES PESO DE CADA UNO 93 TON.

Los aislamientos representados como CH , CL y CHL , son respectivamente los aislamientos entre el devanado de alta tensión y tierra, entre el devanado de baja tensión y tierra y el aislamiento entre los devanados de alta y baja tensión. Estos aislamientos aunque actúan distribuidos a lo largo de los devanados, se muestra como un solo capacitor para mayor simplicidad. Estos aislamientos no están compuestos de un solo dieléctrico; -- por ejemplo; CH incluye boquillas, el aislamiento entre el devanado de alta y tierra y el aceite entre devanado y tierra. Los valores de CH y CL se -- leen directamente. Cuando el devanado de baja es energizado y el devanado de alta es conectado a guarda, se mide C_L . Con un simple cálculo se puede -- determinar CHL , de acuerdo como se indica en la hoja de prueba.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA.

- 1.- Desenergice y desconecte de sus terminales externas desde las boquillas del transformador.
- 2.- Desconecte los neutros de los devanados que se encuentren aterrizados.
- 3.- Ponga en corto circuito cada devanado en las terminales de sus boquillas.
- 4.- Verifique que el tanque esté bien aterrizado
- 5.- Proceda a efectuar sus conexiones de prueba de acuerdo con la figura 2.20 y los circuitos de prueba de la figura 2.21.

Los valores obtenidos de acuerdo con las conexiones indicadas deben registrarse en la hoja de prueba correspondiente y calcular el valor de CHL con la diferencia de los MVA y MW de las pruebas 1 menos la prueba 2.

Como comprobación de que las pruebas se realizaron correctamente deberá efectuarse la diferencia de MVA y MW de la prueba 3. menos la prueba 4 y comparar estos valores con los obtenidos para el cálculo de CHL. Estas dos diferencias deberán ser aproximadamente iguales. En caso contrario, se procederá a efectuar una prueba en U ST ya sea en el lado de alta o baja, de acuerdo a la conexión que se muestra. Los valores de MVA y MW obtenidos en esta prueba deberán compararse con los resultados que se obtuvieron de las diferencias de las pruebas 1 menos 2 y 3 menos 4.

Los valores que no se aproximen a los obtenidos en esta última prueba deberán repetirse y de persistir los mismos valores obtenidos originalmente deberá investigarse el devanado que los está originando.

CALCULO DEL FACTOR DE POTENCIA AL EQUIPO PROBADO.

El factor de potencia en por ciento del equipo probado, se calcula de la forma siguiente:

$$\% \text{ Factor de Potencia} = \frac{\text{MW}}{\text{MVA}} \times 100$$

PRUEBA	ENERGIZAR DEVANADO	DEVANADO A TIERRA	DEVANADO A GUARDA	AISLA--- MIENTO MEDIDO
1	H	L	-	--
2	H	-	L	CH
3	L	H	-	--
4	L	-	H	CL

FIG. 2.20 SECUENCIA DE PRUEBAS DE FACTOR DE POTENCIA AL AISLAMIENTO.

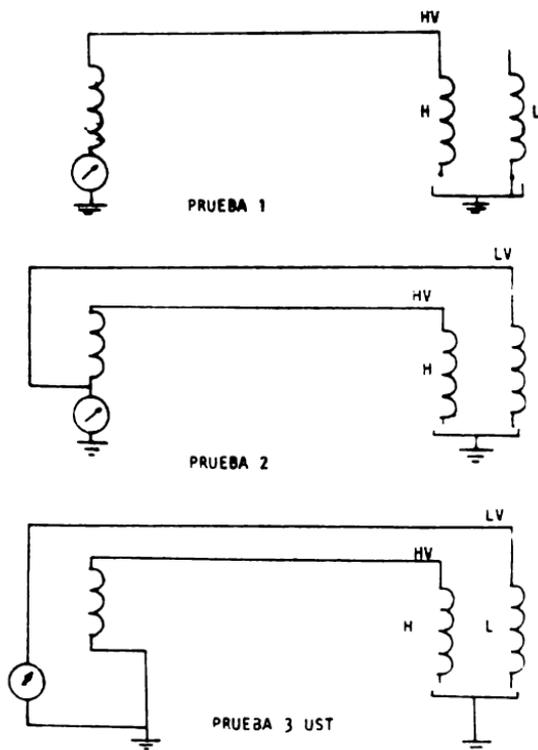


FIG. 2.21 CONEXIONES PARA LA PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA AL AISLAMIENTO A TRANSFORMADORES.

TRANSFORMADORES DE TRES DEVANADOS.

Los aislamientos que constituyen un transformador de tres devanados, se muestra esquemáticamente en la figura 2.22 y representa tanto a un transformador monofásico como trifásico, las consideraciones para ambos son las mismas.

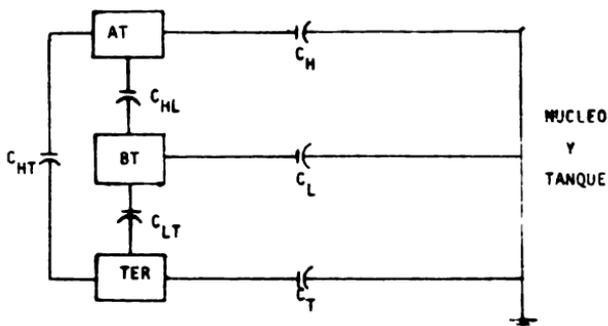


FIG. 2.22

Los aislamientos representados como C_H , C_L y C_T , son respectivamente, los aislamientos, entre el devanado de alta tensión y tierra, el devanado de baja tensión y tierra y el aislamiento entre el terciario y tierra. Los aislamientos representados como C_{HL} , C_{LT} y C_{HT} , son respectivamente los aislamientos entre los devanados. Estos aislamientos no están compuestos de un solo dieléctrico, por ejemplo C_H es el aislamiento entre el devanado de alta y tierra, incluye los bushings, el aislamiento entre el devanado de alta y tierra y el aceite entre el devanado de alta y tanque.

Las lecturas en C_H , C_L y C_T , se leen directamente y se anotan en la hoja de prueba correspondiente.

Cuando el devanado es energizado y los devanados de baja y terciario son conectados a guarda, se mide el aislamiento CH, cuando el devanado de baja es energizado y los de alta y terciario son conectados a guarda, se mide el aislamiento CL. Cuando el devanado terciario es energizado y los devanados de alta y baja son conectados a guarda, se mide el aislamiento C_T. Los aislamientos entre devanados CHL, CMT, CLT, son determinados por un cálculo al obtener las diferencias de los valores de MVA y MW de la siguiente manera:

CHL lo obtendremos sacando la diferencia de los MVA y MW, de la prueba 1 menos la prueba 2.

CLT se obtiene de la diferencia de los MVA y MW, de la prueba 3 menos la prueba 4.

CHT Se obtiene de la diferencia de los MVA y MW de la prueba 6.

La prueba marcada en su hoja de prueba como No. 7, sirve para verificar las pruebas 2, 4 y 6 cuya suma de MVA y MW debe ser igual a los obtenidos en la prueba 7.

RECOMENDACIONES GENERALES PARA EFECTUAR LAS PRUEBAS DE FACTOR DE POTENCIA

1 - TRANSPORTACION.

El equipo de prueba debe ser manejado cuidadosamente, teniendo especial cuidado durante su transporte a las instalaciones donde se utilizará con el objeto de evitar golpes y desajustes en aparatos de medición.

2.- LIMPIEZA.

Es sumamente recomendable al efectuar pruebas a equipo donde se tengan porcelanas, limpiarlas para evitar errores en la medición, esta limpieza se hará preferentemente con algún solvente eléctrico tal como el cloro-thene. Esta limpieza se efectúa con el objeto de retirar de la superficie de dicha porcelana cualquier residuo de depósitos químicos contaminantes, sales, cementos, grasas, silicones, etc.

3.- HUMEDAD.

Se recomienda no efectuar las pruebas cuando las condiciones de humedad relativa en el ambiente sean mayores del 70%, ya que ésta modificará los valores-obtenidos.

Es por esto que se recomienda hacer una medición previa de la humedad relativa mediante un higrómetro, o bien, un sicrómetro.

4.- CORRECCION DEL VALOR DE FACTOR DE POTENCIA POR TEMPERATURA.

Como se sabe, los valores de resistencia de aislamiento se ven afectados por la temperatura, es por esto que se pueden ajustar los valores obtenidos a una temperatura base, la cual deberá ser 20°C.

Esto se hace con el objeto de poder hacer comparaciones y relacionar los valores obtenidos.

C A P Í T U L O I I I

PRUEBAS A TRANSFORMADORES EN FABRICA.

Dentro de las fábricas se efectúa una serie de pruebas a los transformadores para estar seguros de que sus componentes han sido bien instalados y son de la calidad adecuada a fin de que no ocasionen fallos durante servicio. En este capítulo damos las pruebas que se encuentran normalizadas, las cuales corresponden a la Norma Nacional NOM-J-169 Pruebas a Transformadores y de su equivalente americana ANSI C.57.1290 Código de Pruebas a transformadores, en su caso, se hará la aclaración correspondiente.

3.1 PRUEBA DE PERDIDAS DE EXCITACION

Las pérdidas de excitación de un transformador lo constituyen principalmente las pérdidas del núcleo, las cuales son una función de la magnitud, frecuencia y forma de onda de la tensión aplicada. Las pérdidas y la corriente de excitación son particularmente sensibles a las diferencias de forma de onda y por lo tanto, sus valores varían marcadamente con la forma de onda de la tensión de prueba.

La tensión con forma de onda picuda (factor de forma mayor de 1.11) que se produce generalmente por el carácter distorsionante de la corriente de excitación sobre la fuente de alimentación, da por resultado pérdidas de excitación menores que las correspondientes a la onda senoidal.

La tensión con forma de onda achatada (factor de forma menor de 1.11) se encuentra rara vez en esta prueba y da por resultado pérdidas de excitación mayores que las correspondientes a la onda senoidal.

Las variaciones de temperatura del transformador no afectan sensiblemente a las pérdidas de excitación y por lo tanto no se hacen correcciones por este concepto. La determinación de las pérdidas de excitación debe estar basada en una tensión de onda senoidal, a menos que se especifique una forma de onda diferente.

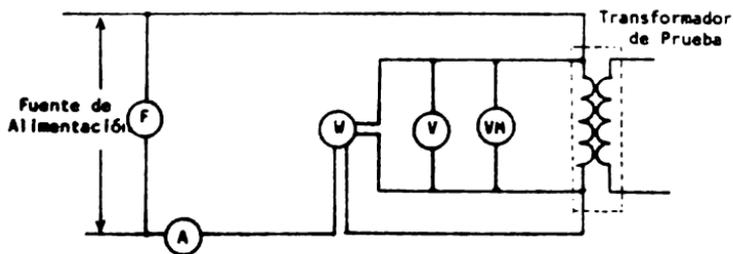
METODO DE VOLTMETRO DE TENSION MEDIA.

Las pérdidas de excitación son en su mayor parte originadas por histéresis y es una función de la densidad de flujo máximo en el núcleo, independientemente de la forma de onda del flujo, ésta densidad de flujo máximo corresponde al promedio absoluto del valor de voltaje (no es el valor de rms) y por consiguiente, si el promedio de voltaje se ajusta al valor deseado de la onda senoidal de voltaje y por las propiedades de la frecuencia, se obtendrán las pérdidas de histéresis según el valor de la onda senoidal. Si la onda de flujo tiene menos de un valor máximo y un mínimo por ciclo las lecturas del voltmetro serán incorrectas, entonces

La onda de voltaje no es la apropiada. El método de voltmetro de tensión media, utiliza un voltmetro D'Arsonval que indica el valor medio teniendo conectado un rectificador de onda completa. Estos instrumentos están graduados para dar la indicación numérica como un voltmetro rms. con voltaje de onda senoidal. En la figura 3.1 se muestra el equipo y las conexiones necesarias, la figura 3.2 lo muestra cuando se utilizan transformadores de medición, en ambos casos el voltmetro debe estar conectado lo más cerca posible de la carga, el ampermetro lo más cerca posible de la alimentación, el wattmetro -- entre ambos con la bobina de potencial hacia el lado de la carga.

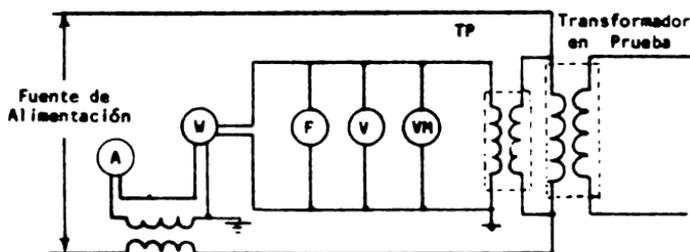
A fin de evitar errores en la medición de las -- pérdidas de excitación se deben utilizar transformadores de medición (transformadores de instrumentos). Se pueden utilizar multiplicadores de resistencia en serie con las bobinas de potencial de los instrumentos, en lugar de transformadores de potencial, tomando las precauciones necesarias, cuando dichos -- multiplicadores se usan deben estar calibrados con los instrumentos.

Para esta prueba se puede usar cualquier devanado del transformador, aunque es más conveniente usar el devanado de más baja tensión. En cualquier caso se debe usar, si es posible, el devanado completo; si por alguna razón es necesario excitar solo una porción del devanado, éste no debe ser menor del 25%.



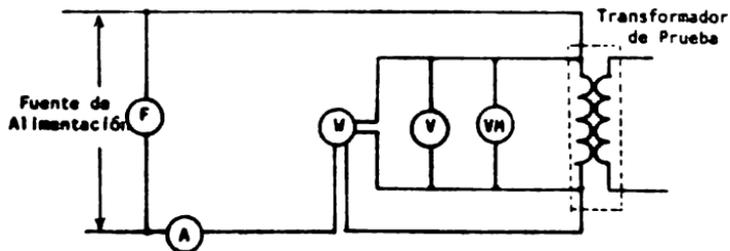
VM VOLTMETRO DE TENSION MEDIA.

Figura 3.1 Diagrama para determinar las pérdidas de excitación por el método de tensión media.



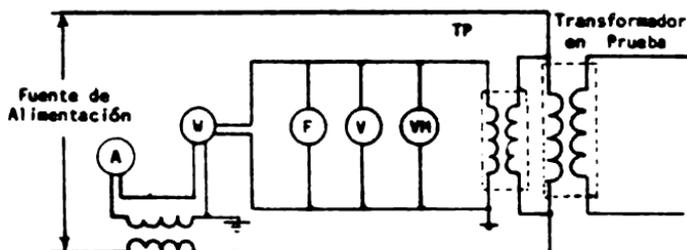
VM VOLTMETRO DE TENSION MEDIA.

Figura 3.2 Diagrama para determinar las pérdidas de excitación por el método de tensión media, empleando transformadores de instrumentos.



VM VOLTMETRO DE TENSION MEDIA.

Figura 3.1 Diagrama para determinar las pérdidas de excitación por el método de tensión media.



VM VOLTMETRO DE TENSION MEDIA.

Figura 3.2 Diagrama para determinar las pérdidas de excitación por el método de tensión media, empleando transformadores de instrumentos.

Se ajusta la frecuencia al valor nominal mediante un frecuencímetro, por medio del voltmetro de tensión media se ajusta la tensión nominal al valor de la tensión eficaz, si la escala del voltmetro de valor medio está corregida por el factor 1.11, al valor eficaz dividido por 1.11 - si la escala no está corregida por dicho valor. Se registran simultáneamente las lecturas del frecuencímetro, voltmetros de tensión media y eficaz, amperímetros y wattímetros; las cuales deben restarse de los watts registradas para obtener las pérdidas de excitación del transformador bajo prueba. Para obtener las pérdidas de excitación correspondientes a una onda senoidal se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$P = \frac{P_m}{\frac{P_1}{P} + \frac{K P_2}{2}}$$

en donde;

P = Pérdidas de excitación a la tensión E_a , corregidas con base a una onda senoidal.

P_m = Pérdidas de excitación medidas durante la prueba.

P_1 = Pérdidas por histéresis por unidad, referidas a P_m .

P_2 = Pérdidas de corriente circulante por unidad, referidas a P_m .

además;

$$K = \left(\frac{E_r}{E_a} \right)^2$$

dónde;

E_r = Tensión de prueba, medida con voltmetro de tensión eficaz.

E_a = Tensión de prueba, medida con voltmetro de tensión media.

Cuando se miden las pérdidas de excitación de transformadores trifásicos con dos wáttmetros, como muestra la figura 3.3, se toman tres grupos de lecturas usando cada una de las tres fases con sucesión como base común; el valor promedio de los tres grupos de lecturas representa las pérdidas de excitación medias.

Es posible obtener mayor exactitud utilizando tres wáttmetros - las conexiones serían las mostradas en la figura 3.4

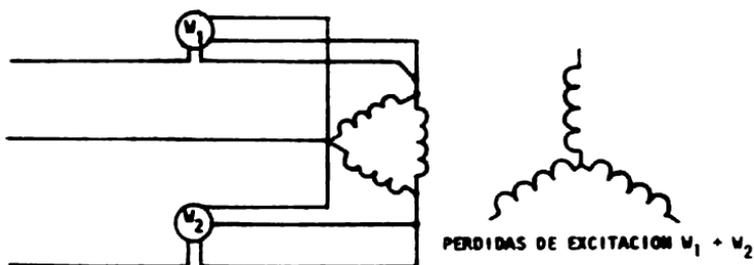


FIGURA 3.3 METODO DE LOS DOS WATTMETROS.

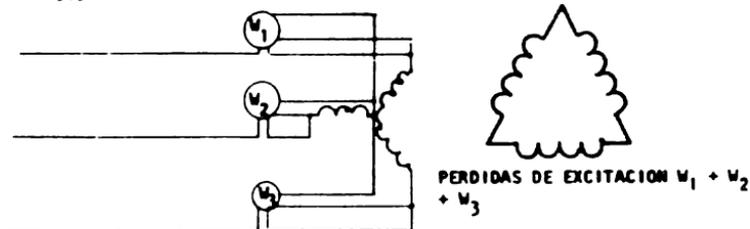


FIGURA 3.4 METODO DE LOS TRES WATTMETROS CON EL NEUTRO DEL TRANSFORMADOR - ACCESIBLE.

METODO DE PUENTE DE IMPEDANCIA.

Este método se puede usar como alternativa al método de tensión media, para la medición de pérdidas por excitación, siempre y cuando la forma de onda de la tensión de excitación aplicada sea suficientemente cercana a una onda senoidal y cada armónica importante no exceda del 0.5% de la fundamental; este método es ventajoso en mediciones de cargas a bajo factor de potencia debido a que no requiere de técnicas especiales.

Los circuitos y diagramas para este método se muestran en la parte correspondiente a impedancia del transformador.

3.2 CORRIENTE DE EXCITACION.

El diagrama de conexiones para medir la corriente de excitación es el mismo que el empleado para conocer las pérdidas de excitación. Los diferentes métodos de medición se basan en los instrumentos utilizados y son los siguientes:

MEDICION CON INSTRUMENTOS DE VALOR EFICAZ.

La medición de la corriente de excitación se hace con voltmetro y ampermetro de valores eficaces. Este método de medición es razonablemente exacto cuando la forma de onda de la tensión aplicada es casi senoidal.

Cuando la forma de onda de la tensión aplicada difiere de la senoidal, la corriente de excitación es de menor valor que la obtenida -- cuando se aplica tensión senoidal, por lo que los valores así obtenidos -- deben ser corregidos en base a una onda senoidal.

MEDICION CON VOLTMETRO DE VALOR MEDIO Y AMPERMETRO DE VALOR MEDIO.

Cuando se usa un vóltmetro de valor medio y un ampermetro de valor eficaz, el valor eficaz de la corriente de excitación medida es generalmente mayor que la obtenida con una tensión senoidal, si la forma -- de onda de la tensión aplicada difiere apreciablemente de la senoidal.

Cuando los valores obtenidos por este método están compren-- didos dentro de los límites especificados, no es necesario hacer ninguna-- corrección.

CORRECCIONES DE LA CORRIENTE DE EXCITACION, EN BASE A UNA ONDA SENOIDAL.

Cuando sea necesario corregir la medición de la corriente de excitación, por causa de la forma de la señal, se puede emplear cualquiera de los siguientes métodos:

METODO DEL FACTOR DE FORMA

Este método se basa en el hecho de que existe una relación -- prácticamente lineal entre el valor eficaz de la corriente de excitación y el factor de forma de la onda de tensión aplicada.

Ver figura 3.5. Este es el método más exacto cuando se pueden aplicar varias ondas de diferentes factores de forma, que permiten una efectiva extrapolación.

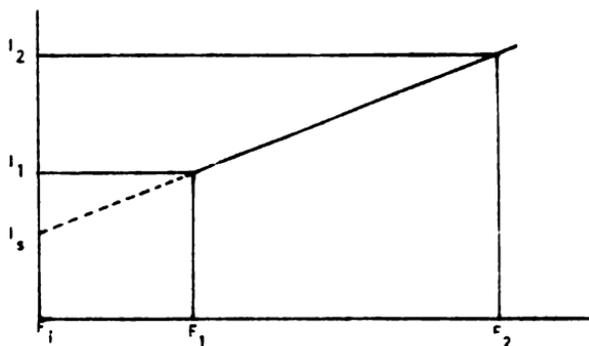


FIGURA 3.5 GRAFICA DE FACTOR DE FORMA PARA CORREGIR CORRIENTES DE EXCITACION EN BASE A UNA ONDA SENOIDAL.

Los factores de forma pueden variarse convenientemente, cambiando la excitación del campo del generador o insertando una impedancia en el circuito de prueba; estos factores de forma pueden ser determinados tomando lecturas simultáneas de tensión con un voltmetro de tensión eficaz y otro de valor medio. Los valores de los factores de forma están indicados por la relación de las lecturas eficaces a las de valor medio. La corriente de excitación (\$I_s\$) correspondiente a una tensión senoidal se determina mediante la ecuación siguiente:

$$I_s = I_2 - \frac{I_2 - I_1}{F_2 - F_1}$$

en donde: I_1 e I_2 son las corrientes eficaces correspondientes a los factores de forma F_1 y F_2 respectivamente.

METODO DEL AMPERMETRO DE CRESTA.

En este método se emplea un voltmetro de valor medio y un ampermetro de cresta para leer los valores máximos instantáneos de las correspondientes corrientes. Se toman lecturas simultáneas de la tensión media y del valor de cresta de corriente correspondiente al 100%, 86.6% y al 50% de la tensión de prueba. Estas lecturas determinan aproximadamente la fundamental, la tercera y quinta armónica de la corriente de excitación, respectivamente.

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2}{6} + \frac{I_2^2}{3} + \frac{I_3^2}{3}}$$

en la que I_1, I_2, I_3 , son los valores de cresta de las corrientes de excitación correspondientes a las tensiones de excitación de 100%, 86.6% y 50% de la tensión de prueba.

Con una pequeña modificación, se aplica también este método a aquellos transformadores trifásicos exentos de grandes tensiones de tercera armónica, o sea, transformadores trifásicos que tienen uno o más devanados conectados en delta o aquellos transformadores trifásicos, con núcleos de tres piernas.

Las lecturas se obtienen como se indicó anteriormente pero en este caso la corriente de línea existe solamente en las componentes fundamental y quinta armónica.

Ya que únicamente dos componentes importantes están presentes, solo son necesarias dos lecturas. I_1 a 100% e I_2 a 86.6% de la tensión de excitación (I_s) correspondiente a la tensión senoidal debe ser determinado de la siguiente ecuación:

$$I_s = \sqrt{0.25 I_1^2 + 0.338 I_2^2}$$

METODO DEL PROMEDIO DE LECTURAS.

Considerando que la lectura de la corriente de excitación es baja, respecto a la real, cuando se usa un voltmetro de tensión eficaz y es alta respecto a la real cuando se usa uno de valor medio, puede emplearse este método de corrección si la onda de tensión no está muy distorsionada.

Primeramente se determina la corriente de excitación con instrumentos de valores eficaces, posteriormente se determina un voltmetro de valor medio y ampermetro de valor eficaz; si ambas lecturas de tensión eficaz no difieren en más del 10%, la corriente de excitación referida a una onda senoidal se puede considerar como el promedio de los valores obtenidos.

Los puntos anteriormente analizados se encuentran asentados en ambas Normas, la Nacional y la Americana, aunque en la segunda, utilizan un lenguaje técnico más apropiado así como las definiciones e introducción a cada tema es mejor abordada, podemos considerar que es ligeramente mejor la Norma de AISI, debido a la forma en que desarrollan sus temas.

A continuación se presentan los procedimientos de prueba para corriente de excitación que efectúa la Comisión Federal de Electricidad, a sus transformadores de potencia, los cuales persiguen el objetivo adicional de detectar fallas incipientes en transformadores en servicio, en base a observar desviaciones de valores originales a lo largo de la vida del equipo.

Se consideró conveniente incluir estos procedimientos de prueba debido a que la institución citada es la que más equipo de esta naturaleza utiliza y ha desarrollado Normas Internas que cubren toda la vida o trabajo, envejecimiento, así como de investigación para corregir fallas de diseño, de construcción y similares.

3.3 PROCEDIMIENTOS PARA PRUEBA DE CORRIENTE DE EXCITACION.

El objeto de este procedimiento es difundir el conocimiento de la prueba de corriente de excitación, tanto en sus métodos como en la interpretación de resultados, los cuales son de importancia para determinar la confiabilidad del equipo desde su puesta en servicio hasta el término de su vida útil.

MÉTODOS DE MEDICIÓN.

RECOMENDACIONES GENERALES.

Desenergizar y desconectar de sus terminales externas todas las boquillas del transformador.

Todas las pruebas de excitación deberán efectuarse en el devanado de más alto voltaje.

Cada devanado deberá medirse en dos direcciones, es decir, primero se energiza una terminal y se toman sus lecturas y posteriormente se energiza la otra terminal tomando también sus lecturas correspondientes.

Desconectar el neutro del devanado que se encuentre bajo prueba, debiendo permanecer aterrizados los neutros de baja tensión. El tanque debe estar perfectamente aterrizado. Los devanados no energizados en la prueba deben estar libres de toda proximidad de personal, cables, etc, debido a que al energizar cualquiera de los devanados, se induce un potencial en el resto de los devanados.

El voltaje de prueba en los transformadores no deberá exceder el valor del voltaje nominal del devanado bajo prueba, tampoco deberá exceder el voltaje de línea a línea en los devanados conectados en delta; así mismo, en los devanados conectados en estrella no deberá exceder el voltaje de línea a neutro.

Por el comportamiento no lineal de la corriente de excitación a bajos voltajes de prueba, es importante que las pruebas se realicen a valores lo más exactos posibles en cuanto a voltaje y lectura de corriente.

Para equipo con cambiador de derivaciones, deberán efectuarse cuando menos dos pruebas, una al potencial más alto y otra al potencial más bajo. De preferencia, efectuar pruebas a cada derivación, incluyendo las posiciones de neutro en cambiadores de carga.

Desmagnetizar el núcleo de acuerdo con el tipo de conexión que se tenga en los devanados.

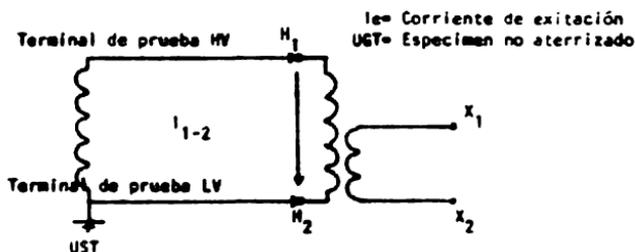
CIRCUITOS Y CONEXIONES DE PRUEBA BASICOS.

Las figuras 3.6 a 3.11 ilustran procedimientos de prueba para mediciones de corriente de excitación en los devanados de un transformador, estos son utilizados básicamente en pruebas de rutina.

RESULTADOS DE PRUEBAS.

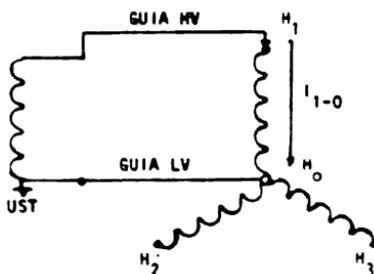
Para conexión estrella, como regla general, se tiene que en 2 fases deben obtenerse resultados similares, pero un valor más alto en la tercera (generalmente es el doble de las anteriores).

FIG. 3.6 MEDICION DE i_e EN UN TRANSFORMADOR MONOFASICO.



i_e	ENERGIZAR	UST	FLOTANDO
$H_1 - H_2$	H_1	H_2	$X_1 X_2$
$H_2 - H_1$	H_2	H_1	$X_1 X_2$

FIG. 3.7 MEDICION DE i_e EN UN TRANSFORMADOR CONECTADO EN ESTRELLA (PRUEBA DE RUTINA)



i_e	ENERGIZAR	UST	FLOTANDO	ATERRIZAR
$H_1 - H_2$	H_1	H_0	$H_2 H_3, X_1 X_2 X_3$	+
$H_2 - H_0$	H_2	H_0	$H_1 H_3, X_1 X_2 X_3$	+
$H_3 - H_0$	H_3	H_0	$H_1 H_2, X_1 X_2 X_3$	+

+ SI BAJA ES ESTRELLA ATERRIZA X_0

MEDICION DE I_0 EN UN TRANSFORMADOR CONECTADO EN ESTRELLA
(PRUEBA CRUZADA)

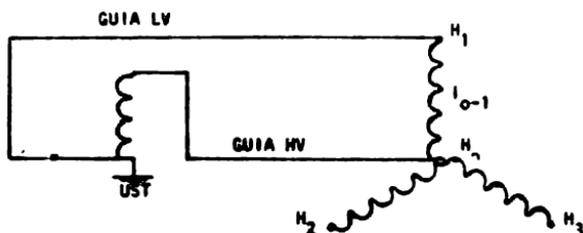


FIG. 3.8

I_0	ENERGIZAR	UST	ATERRRIZAR	FLOTANDO
$H_0 - H_1$	H_0	H_1	+	H_2, H_3, X_1, X_2, X_3
$H_0 - H_2$	H_0	H_2	+	H_1, H_3, X_1, X_2, X_3
$H_0 - H_3$	H_0	H_3	+	H_1, H_2, X_1, X_2, X_3

MEDICION DE I_0 EN UN TRANSFORMADOR CONECTADO EN DELTA
(PRUEBA DE RUTINA)

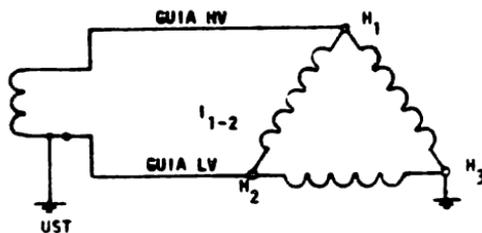


FIG. 3.9

I_0	ENERGIZAR	UST	ATERRRIZAR	FLOTANDO
$H_1 - H_2$	H_1	H_2	H_3 , +	X_1, X_2, X_3
$H_2 - H_3$	H_2	H_3	H_1 , +	X_1, X_2, X_3
$H_3 - H_1$	H_3	H_1	H_2 , +	X_1, X_2, X_3

+ SI BAJA ESTA EN ESTRELLA ATERRRIZAR X_0 .

MEDICION DE I_e EN UN TRANSFORMADOR
 CONECTADO EN DELTA (PRUEBA CRUZADA)

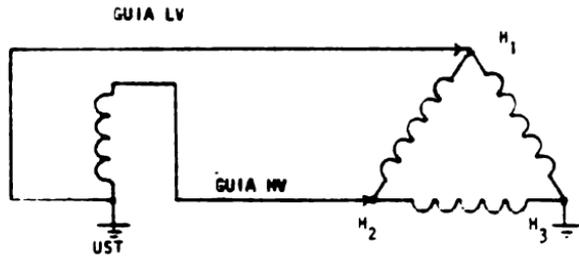


FIG. 3.10

I_e	ENERGIZAR	UST	ATERRIZAR	FLOTANDO
$H_2 - H_1$	H_2	H_1	$H_3, +$	$X_1 X_2 X_3$
$H_3 - H_2$	H_3	H_2	$H_1, +$	$X_1 X_2 X_3$
$H_1 - H_3$	H_1	H_3	$H_2, +$	$X_1 X_2 X_3$

MEDICION DE I_e EN UN TRANSFORMADOR CONECTADO
 EN DELTA (METODO ALTERNADO)

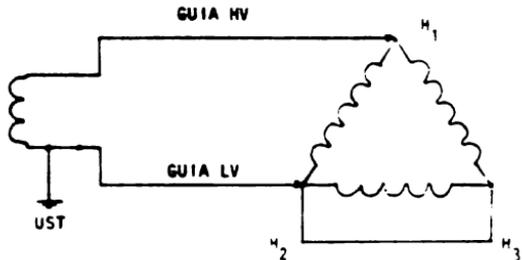


FIG. 3.11

I_e	ENERGIZAR	UST	ATERRIZAR	FLOTANDO
$(H_1 - H_2)$	H_1	H_2, H_3	$+$	$X_1 X_2 X_3$
$(H_2 - H_1) + (H_2 - H_3)$	H_2	H_1, H_3	$+$	$X_1 X_2 X_3$
$(H_3 - H_2) + (H_3 - H_1)$	H_3	H_1, H_2	$+$	$X_1 X_2 X_3$

La mayor parte de los devanados de alta tensión cuentan con una placa estática, llamada devanado estático, va en paralelo con el devanado bajo prueba; dicho devanado representa una pequeña influencia en la medición final. Puede presentarse el fenómeno de que en dos de los devanados la corriente de excitación sea muy alta y en uno de ellos la corriente sea menor, (generalmente la mitad). Esto puede deberse a la placa estática, ya sea que no esté influyendo por estar desoldada o bien que no cuenta con dicha placa el devanado que se sujeta a prueba. Para eliminar el efecto de la placa estática basta paralelar dos de los devanados bajo prueba con lo que se elimina el efecto de la mencionada placa; esto puede dar lugar a que los resultados obtenidos en una de las piernas sea alto o bajo en comparación con las otras dos.

CALCULO DE PRUEBAS.

Para un devanado conectado en delta, la terminal de alta tensión del equipo probador se pondrá primero en H_1 y la primera, la de baja tensión se pondrá en H_2 , se toman las lecturas y se registran, posteriormente la terminal de alta tensión se pondrá en H_2 y la de baja tensión se pondrá en H_1 , se toman lecturas nuevamente y se registran. Esta operación se repite hasta cubrir las seis posibles conexiones. Si la corriente registrada para una fase es la misma al efectuar la prueba en los dos sentidos ---- (H_1-H_2 ; y H_2-H_1), estas lecturas serán la corriente de excitación para esta fase. El mismo procedimiento debe seguirse para devanados en estrella.

La comprobación de la corriente de excitación por fase será comparando las lecturas correspondientes a la misma fase, o sea, la primera contra la segunda medición y así sucesivamente.

METODO DE INVESTIGACION CON PRUEBAS ESPECIALES.

En la actualidad se conocen tres métodos para la investigación con medición de corriente de excitación, para devanados conectados en estrella el análisis es relativamente sencillo, no así en el devanado Delta al que se refieren los tres métodos siguientes:

METODO UST (PRUEBA CON MUESTRA NO ATERORIZADA).

La figura 3.12 muestra el diagrama de tres devanados conectados en delta, se desea medir la corriente de excitación en el devanado 1 - 1' (H1 - H2) La terminal de alto voltaje se aplicará a la terminal H1, conectando la terminal H3 a tierra. Con esto mediremos el devanado 1 - 1' (H1-H2), la corriente que circula por el devanado 3 - 3' (H1 - H3), realmente no se está midiendo ya que tenemos aterrizado H3 y la corriente no pasa por el medidor.

Podría suponerse que la medición es correcta para determinar la corriente de excitación en la fase H1 - H2, pero sucede que prácticamente se están midiendo dos devanados, por lo cual existirá una corriente entre 2' - 2 (H3 - H2) que se induce debido a la estructura del circuito magnético; esta corriente de pequeña magnitud provoca una caída de potencia -

adicional en el medidor, sin embargo, al efectuar la medición poniendo la terminal de alto potencial en H2 se observa que el valor de la corriente medida en este momento, ha tenido un aumento considerable con respecto a la medición anterior.

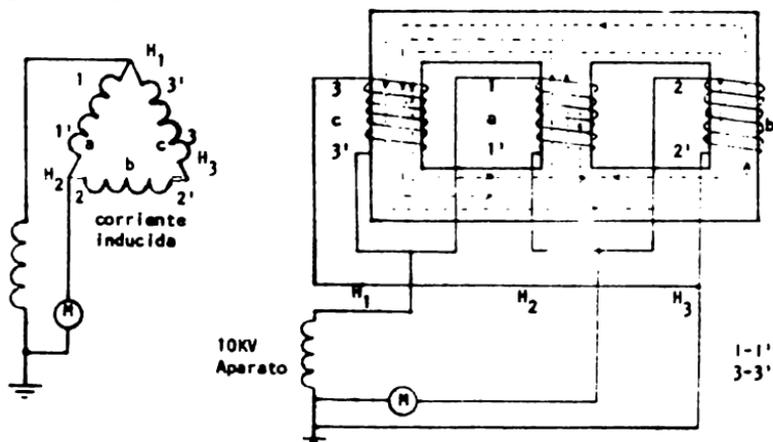


Figura 3.12 Conexión trifásica en delta a) 1 - 1' devanado medido, 3 - 3' devanado energizado; b) núcleo, devanados y flujos correspondientes.

Los demás devanados se miden en la misma forma primero se energiza un lado y luego el otro, procediendo de acuerdo al método de prueba indicado en el punto de cálculo de pruebas.

METODO DE DOS DEVANADOS EN PARALELO CON EL TERCERO EN CORTO CIRCUITO.

El segundo método propuesto para medir corriente de excitación en devanados que estén conectados en Delta, es el de cortocircuitar uno de los devanados, con lo cual la Delta queda con dos devanados en paralelo y uno en cortocircuito, las figuras 3.13 y 3.15 muestran la medición en un sentido, y en sentido contrario en el segundo caso para los mismos devanados. En la figura 3.14 se aprecia la distribución de flujos en el núcleo.

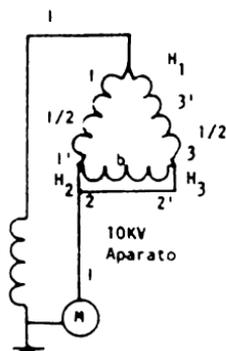


Figura 3.13 Devanados 1-1' y 3-3' Medidos en paralelo.

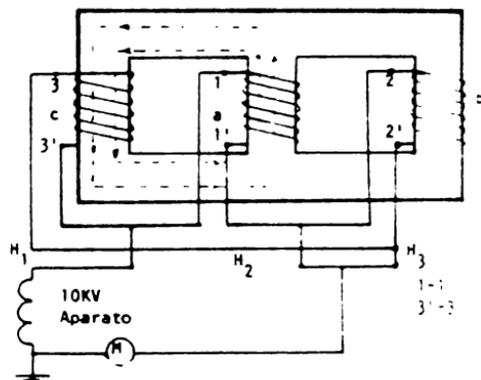


Figura 3.14 Núcleos, devanados y flujos de la fig. 3.

La prueba para la figura 3.13 es energizando con la terminal de MV el punto donde se unen los dos devanados que están en corto-circuito, y poniendo la terminal de baja tensión en el devanado corto-circuitado.

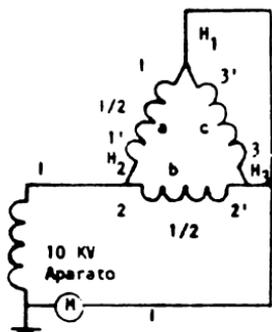


Figura 3.15 Devanados 2-2' y 1' - 1 medidos en paralelo.

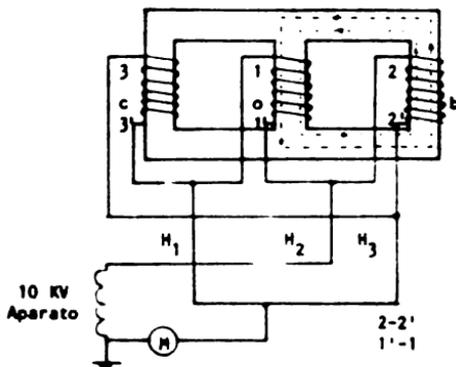


Figura 3.16 Núcleos, devanados y flujos de la fig. -- 3.15

La siguiente prueba para los mismos devanados, es cruzada, se invierten las terminales de alta y baja tensión es decir, la terminal de alta tensión va con el devanado corto-circuitado y la de baja tensión irá en la unión del paralelo de los otros devanados. Los resultados obtenidos se comparan entre sí y se calculan como se indicó en el cálculo de pruebas.

Como ejemplo para la fase 2 podemos realizarla como muestra la figura 3.15, teniendo una distribución de flujos como se muestra en la siguiente figura (3.16), efectuando la prueba con el método UST. Podemos efectuar también las mediciones indicadas en las figuras 3.17 y 3.19, la distribución de los flujos para cada figura serán respectivamente las figuras 3.18 y 3.20.

Existen diferencias entre la medición de corriente de excitación hecha de acuerdo al método UST contra mediciones de los dos métodos en paralelo que hemos propuesto, pero no existen diferencias entre este último método de hacer la prueba cruzada con la directa.

Bajo condiciones normales, las corrientes de cada devanado en paralelo deben ser iguales, y por tanto, la mitad del valor de corriente leída será el valor de la corriente en cada una de las piernas. Los flujos producidos por cada uno de los devanados en paralelo deben ser iguales.

Las mediciones deberán hacerse para cada uno de los devanados, si cualquiera de dos mediciones muestran un valor alto o anormal de corriente, el devanado incluído en las dos mediciones deberá considerarse como dudoso, o bien, que existe un daño en él.

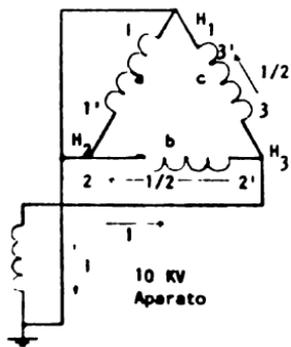


Fig. 3.17

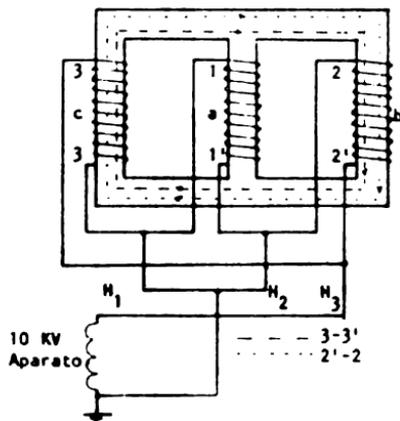


Fig. 3.18

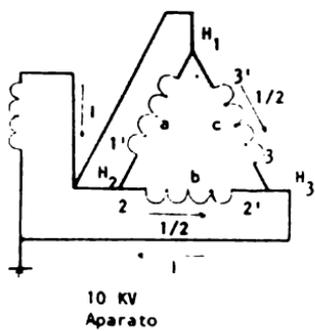


Fig. 3.19

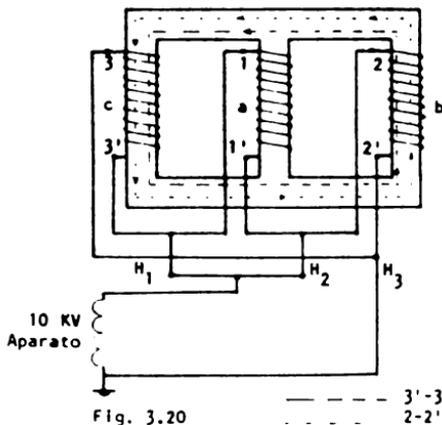


Fig. 3.20

Si dos devanados son los dañados, la corriente puede ser -- grande cuando se efectúan las otras dos mediciones.

METODO SERIE PARALELO.

Un tercer método se puede utilizar para detectar devanados dañados, este método consiste básicamente en conectar un devanado en paralelo con los otros dos que están en serie, tal como se muestra en la figura 3.21. En este método los tres devanados se incluyen en una medición -- simple, ya que de la figura podemos observar que la terminal de alto voltaje se conecta en H_1 y en la terminal H_2 se conecta el ampérmetro; ninguna otra terminal del devanado tiene conexión, ni a tierra ni a ningún otro medio para eliminar corriente. También podemos notar que el potencial está -- plenamente aplicado en el devanado 1 - 1', lo mismo podemos decir para los devanados que quedan en serie que serían el 3' - 2.

En este tipo de prueba se requiere efectuar la prueba cruzada como se indica en la figura 3.23. La distribución de flujo para este -- tipo de prueba se aprecia en la figura 3.22.

En este método el devanado que tiene aplicado todo el potencial (paralelo), constituye el camino de retorno de cada uno de los flujos de los devanados en serie teniendo la misma dirección los tres flujos. Véase figura 3.22

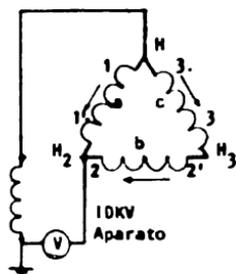


Figura 3.21

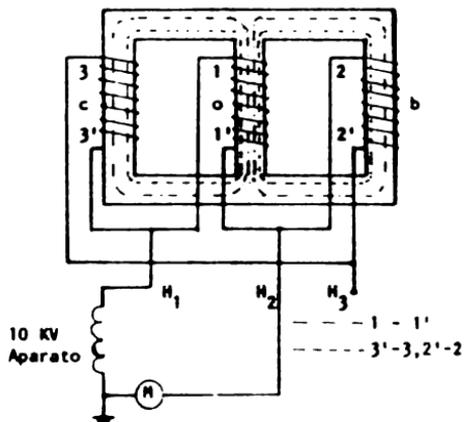


Figura 3.22.

Al efectuar la prueba cruzada el flujo no cambia al aplicar el voltaje, sin embargo, el flujo tiene la misma magnitud pero dirección contraria. La corriente no debe variar en magnitud en la prueba cruzada, en caso que el devanado medido esté bien.

La corriente y el flujo en los devanados en serie debe ser aproximadamente la mitad de los devanados en paralelo.

Una ventaja de este método sobre el de los devanados en paralelo es que la corriente de prueba que se requiere es menor. Esto es importante cuando la corriente de salida del aparato de prueba es limitada. Sin embargo, los tres devanados se incluyen en cada medición.

La detección de devanados dañados por este método puede ser dudosa y complicada por tener que efectuar tres mediciones de corriente de excitación en comparación con los dos métodos vistos con anterioridad.

Si se llegase a encontrar un devanado dañado, la corriente puede llegar a valores muy grandes que podrán sobrepasar la capacidad del medidor, sin embargo, pudiera ser que al existir duda sea necesario efectuar mediciones con los tres métodos a fin de poder detectar los devanados o devanado dañado.

FACTORES QUE AFECTAN LAS PRUEBAS DE CORRIENTE DE EXCITACION.

De acuerdo con experiencias en las pruebas de corriente de excitación, el factor que afecta relevantemente las lecturas es el magnetismo remanente en el núcleo del transformador bajo prueba.

Existen diferentes métodos para la desmagnetización de núcleos de transformadores, ya sean de instrumentos, de distribución, ó de potencia; algunos métodos propuestos para la desmagnetización de núcleos aplicables a transformadores de potencia, han sido desarrollados y probados por diversas personas y empresas.

Al desconectarse un transformador de su fuente de alimentación, se origina un magnetismo remanente en su núcleo, este magnetismo es indeseable por dos razones:

1.- Al volver a conectar un transformador con magnetismo remanente la corriente de INRUSH aumenta considerablemente.

2.- Este magnetismo puede originar valores anormales de corriente de excitación durante pruebas, al analizar las condiciones de los devanados o de uno de ellos en especial.

Por desgracia, no existe un método sencillo para medir el magnetismo remanente. El valor y polaridad cambian en virtud de que dependen del punto de la curva de histéresis, en el cual la corriente se interrumpió. En un transformador monofásico este magnetismo es despreciable. En un transformador trifásico, por lo general, el núcleo queda magnetizado por estar desplazadas las corrientes 120° y por lo tanto, dos de las piernas necesariamente quedarán con magnetismo, en virtud de que si suponemos que una de dichas corrientes está en cero grados, las otras dos corrientes quedarán en 120° y 240° respectivamente, lo que llegará a producir el citado efecto.

MÉTODOS PARA CORRECCION.

Un método que no es muy utilizado debido a su peligrosidad, es el de aplicar un voltaje alto de corriente alterna a uno de los devanados y llevar la corriente de excitación a cero o muy próxima a cero, pero los rangos de flujo necesarios son relativamente altos, lo cual dificulta el control de corrientes de altos a bajos niveles.

Otro método más simple y más seguro es el de aplicar una corriente directamente inversa al devanado, este método se basa en utilizar corrientes altas, las cuales pueden ser obtenidas con acumuladores - aprovechando la baja resistencia óhmica de los devanados del transformador. La corriente desmagnetizante inicial deberá ser igual para las tres fases y de preferencia cercana a la normal.

La ventaja de este método es que podemos aplicar voltajes de 6, 12, ó 24 volts, que normalmente se utilizan en acumuladores de automóvil, remolques (trailer) o equipos de tracción, y por lo tanto estas fuentes de alimentación se consiguen con facilidad.

Además se utiliza un amperímetro, un reóstato y un interruptor de doble polo, doble tiro, para efectuar la desmagnetización del núcleo, de aquí en adelante utilizaremos este tipo de arreglo.

Cabe aclarar que el reóstato tiene por objeto limitar y reducir paulatinamente la corriente desmagnetizante desde el valor deseado hasta próximo a cero. Simultáneamente hay que cambiar polaridad periódicamente lo más rápido posible con el switch de doble polo.

Deberán registrarse las características del equipo empleado y las condiciones y tiempos de desmagnetización a fin de que en el futuro las pruebas se realicen en las mismas condiciones.

El método que se aplique depende del tipo de conexión que tenga el transformador, ya sea delta o bien estrella, en la conexión de alta tensión, recalcando que estos métodos de desmagnetización se efectúan en los devanados de alta tensión.

DESMAGNETIZACION EN CONEXIONES ESTRELLA.

Normalmente es difícil poder desconectar físicamente cada uno de los devanados a fin de poderlos desmagnetizar individualmente, esto es más sencillo, en la conexión estrella. Esto no significa que la desmagnetización de los devanados sea fácil, debido a que el núcleo magnético de las fases restantes queda sujeto a los mismos amper-vueltas de la fase en operación.

Refiriéndonos a las figuras 3.23 y 3.24, donde se aplica el método de corriente directa inversa, es conveniente que el neutro de la estrella se desconecte de tierra, la fuente que se utiliza es una batería de bajo voltaje que puede ser de automóvil en serie con un ampermetro, un reóstato y un interruptor reversible.

Las terminales de la fuente se conectan entre H_1 y H_0 , de tal manera que la terminal H_1 sea el positivo, en la figura se muestra el flujo correspondiente, y aplicando la regla de la mano derecha, los amper-vueltas producen un flujo hacia arriba de la pierna A, regresando la mitad del flujo a través de las piernas B y C respectivamente; con esto las tres

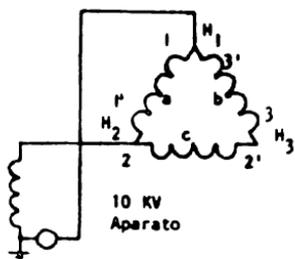


FIG. 3.23

Conexión serie-paralelo
Devanado 1'-1 en paralelo
con devanado 2-2' y 3-3' en
serie método inverso de figuras 3.21 y 3.22

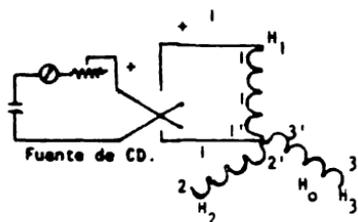


FIG. 3.24

Desmagnetización aplicada
al devanado 1-1'

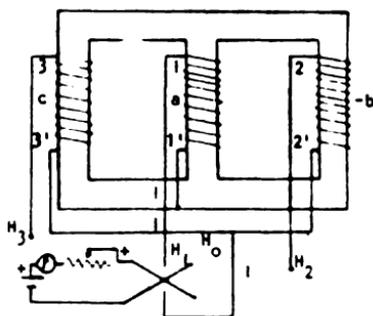


FIG. 3.25

Núcleo, devanados, corrientes
y flujos de figura 3.24

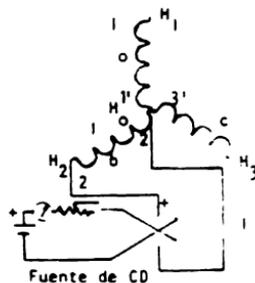


FIG. 3.26

Desmagnetización aplicada al
devanado (2'-2)

piernas se someten a desmagnetización simultánea parcial, siendo más fuerte en la pierna A que en las piernas B y C.

En las figuras 3.25 y 3.26, podemos ver la conexión cuando se desmagnetiza la pierna B, repitiendo el fenómeno antes descrito, se procederá de igual manera con la pierna C.

DESMAGNETIZACION UTILIZANDO UNA CONEXION SERIE PARALELO EN DEVANADOS EN ESTRELLA.

Las figuras 3.27 y 3.28 muestran las conexiones para desmagnetizar con una combinación serie paralelo, en la cual el flujo desmagnetizante circulará totalmente por la pierna A y aproximadamente la mitad del mismo circulará por las piernas B y C respectivamente.

La experiencia ha demostrado la necesidad de desmagnetizar -- las 3 piernas, ya que en la primera de ellas se conectan H_2 y H_3 , siendo positivo H_1 ; en la segunda sería $H_3 - H_1$, siendo positivo H_2 y en la tercera serían conectados $H_1 - H_2$ siendo positivo H_3

DESMAGNETIZACION DE DOS DEVANADOS EN PARALELO EN UNA CONEXION DELTA.

Los esquemas de conexiones se muestran en las figuras 3.30 y 3.31, además de la distribución de flujos para la desmagnetización del núcleo. Podemos ver que se interconectan H_2 con H_3 para formar el polo negativo y H_1 será el polo positivo. La mitad de la corriente aplicada circulará, una por la pierna A y la otra mitad por la pierna C; por la pierna B no circulará ninguna corriente y por tanto, no habrá flujo que circule por ella.

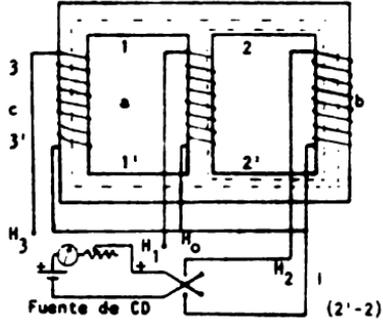


FIG. 3.27 NUCLEO, DEVANADOS, CORRIENTES Y FLUJOS DE FIGURA 3.26

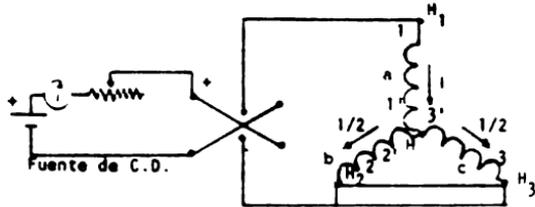


FIG. 3.28 DESMAGNETIZACION APLICADA EN SERIE PARALELO.

las tres piernas.

DETECCION DE FALLAS CON CORRIENTE DE EXCITACION.

Para una mayor seguridad al determinar las fallas, se efectúa también la prueba de factor de potencia. Por los valores obtenidos en ambas pruebas se pueden detectar fallas, tales como corto circuito entre espiras, así como la determinación de los devanados donde se localiza la falla.

Cuando se obtienen valores de corriente de excitación extremamente altos, es necesario desensamblar el transformador o autotransformador a fin de determinar con exactitud cual es la falla.

4.

Una falla común es el encontrar magnetismo residual en alguna de las fases, esta falla es detectada por una corriente, en una de las fases, comparativamente mayor que la corriente obtenida en las otras fases, mientras en estas la magnitud obtenida es similar.

Como podemos observar la Norma de la Comisión Federal de Electricidad es más completa, debido a que describen con mayor precisión las conexiones adecuadas para cada prueba, los diagramas son más amplios, explicativos y completos con respecto a los que muestran la Norma Mexicana y la Norteamericana, además de que incluye los resultados que se pueden obtener y la identificación de fallas.

3.4 REGULACION.

La regulación de un transformador debe ser determinada por cálculos basados en los valores obtenidos de la medición de voltaje de impedancia y potencia de la impedancia, corregida por el efecto de la temperatura.

La regulación exacta está dada por:

$$\sqrt{(r + p)^2 + (x + q)^2} - 1 \text{ para carga atrasada}$$
$$\sqrt{(r + p)^2 + (x - q)^2} - 1 \text{ para carga adelantada}$$

donde:

p = factor de potencia de carga

$$q = \sqrt{1 - p^2}$$

x = reactancia del transformador

r = resistencia del transformador.

Los valores de p, q, x y r son en por unidad y resultan de multiplicar por 100 los valores de regulación, en por ciento, obtenidos.

Una expresión general para el cálculo de la regulación en transformadores la cual permite calcular para todos los grados de precisión deseados es:

$$\text{reg} = a - \frac{1}{2} a^2 + \frac{1}{2} a^3 - \frac{5}{8} a^4 + \frac{7}{8} a^5 - \frac{21}{16} a^6 + \frac{33}{16} a^7$$

donde:

reg = regulación en una base de por unidad.

a = una magnitud que depende de el ángulo y de la impedancia del transformador, el factor de potencia de la carga y el número de devanados del transformador.

El valor de a que se utiliza en la ecuación anterior se determina de la siguiente ecuación:

$$a = Z \cos (\beta + \theta) + \frac{Z^2}{2}$$

donde:

r = resistencia = $\frac{\text{pérdidas de impedancia (KW)}}{\text{relación en KVA}}$

Z = impedancia = $\frac{\text{impedancia (KVA)}}{\text{relación en KVA}}$

x = reactancia = $\sqrt{Z^2 - r^2}$

β = ángulo de impedancia del transformador

$$\cos \beta = \frac{r}{Z}$$

p = factor de potencia de carga = $\cos \theta$

θ = ángulo de fase de corriente de carga, positivo para corriente adelantada, negativo para corriente atrasada.

En el cálculo de la regulación de un transformador de 3 devanados es costumbre utilizar la impedancia equivalente de cada devanado individualmente. La impedancia mutua entre los devanados secundario y terciario es la misma en magnitud y ángulo de fase que el equivalente de impedancia individual del devanado primario, como la determina la ecuación para cálculo de impedancia.

La regulación es calculada desde el devanado secundario a cada uno de los demás, separadamente. El valor de a para el cálculo de la regulación en por unidad de un transformador de 3 devanados es determinado como sigue:

Para la regulación en por unidad, del primario al secundario $a = a_{12}$.

$$a_{12} = z_{12} \cos(\theta_{12} + \theta_g) + z_{12}^2 + m_t \cos(\theta_m + \theta_t) + \frac{m_t^2}{z} \\ + z_{12} m_t \cos(\theta_{12} + \theta_g - \theta_m - \theta_t).$$

donde:

z_{12} = Factor de impedancia en por unidad, devanado primario a secundario en base de carga en el secundario.

θ_{12} = ángulo de impedancia del primario al secundario (z_{12}).

θ_g = ángulo de fase de la corriente del secundario positivo para corriente adelantada, negativo para corriente atrasada.

m_t = factor de impedancia mutua en por unidad, del tercer devanado al secundario, en base a la corriente de carga del devanado terciario

θ_m = ángulo de impedancia de la impedancia mutua.

θ_t = ángulo de fase de la corriente de carga del devanado terciario.

Para el caso de una regulación calculada del primario al terciario la ecuación queda en la forma siguiente:

$$a_{13} = Z_{13} \cos(\theta_{13} + \theta_t) + \frac{Z_{13}^2}{Z} + m_g \cos(\theta_m + \theta_g) + \frac{m_g^2}{Z} \\ + Z_{13} m_g \cos(\theta_{13} + \theta_t - \theta_m - \theta_g)$$

3.5 EFICIENCIA

La eficiencia de un transformador es la relación de la potencia entregada por el transformador (P_2) expresada en unidades de potencia activa, o sea, en watts o kilowatts, entre la potencia aplicada (P_1) al transformador.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{ó bien; } \eta = 1 - \frac{\text{pérdidas}}{\text{Entradas}}$$

Si consideramos las pérdidas en el acero (P_{ac}) del transformador y las pérdidas en el cobre de los devanados (P_{cu}), entonces la ecuación queda en la siguiente forma:

$$P_1 = P_2 + P_{ac} + P_{cu} \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ac} + P_{cu}} = 100\%$$

donde:

P_2 sería la potencia calculada del transformador.

entonces:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{ac} + P_{cu}}{P_2 + P_{ac} + P_{cu}} \right) 100\%$$

3.6 PRUEBA DE TEMPERATURA.

Los transformadores deben ser probados en cada una de sus capacidades, bajo condiciones normales de enfriamiento y completamente ensamblados. Esta parte se condensó de las Normas Mexicanas y Americanas de Pruebas a Transformadores de Potencia, Regulación y Distribución.

METODO DE CARGA REAL.

Este método es el más exacto, pero su aplicación no es práctica por la energía tan grande que requiere. Los transformadores de pequeña capacidad se pueden probar bajo condiciones reales de carga, aplicada por medio de reóstatos, o cualquier carga resistiva.

METODO DE CORTO CIRCUITO.

Esta prueba se realiza poniendo en corto circuito uno de los devanados, según convenga y se alimenta por el otro devanado. Este método requiere una predeterminación precisa de las pérdidas de excitación y de carga, incluyendo las predeterminadas, a la temperatura de operación, permite la medición directa de las pérdidas y de la corriente durante la prueba, requiere de una pequeña cantidad de equipo y de energía.

METODO DE OPOSICION.

Dos transformadores duplicados se conectan en paralelo, se excita a tensión y frecuencia nominales uno de los grupos de devanados puestos en paralelo y en otro grupo de devanados se intercala una fuente de tensión entre terminales de igual designación, que haga circular la corriente nominal por dichos devanados preferentemente a la frecuencia nominal.

DETERMINACION DEL PROMEDIO DE TEMPERATURA EN EL DEVANADO POR EL METODO DE RESISTENCIA CALIENTE.

La temperatura promedio de un devanado puede determinarse por cualquiera de las siguientes fórmulas:

$$T = \frac{R}{R_0} (T_k + T_0) - T_k$$
$$T = \frac{R-R_0}{R_0} (T_k + T_0) + T_0$$

en donde:

T = temperatura en grados celsius correspondientes a la resistencia R.

T₀ = temperatura en grados celsius correspondientes a la temperatura de R₀.

R₀ = resistencia en frío, determinada de acuerdo con esta Norma

R = resistencia en caliente.

TK = 234.5 para conductos de cobre.

225 para conductores de aluminio.

CORRECCION DE ELEVACION DE TEMPERATURA POR ALTITUD.

Quando el transformador se prueba a una altura sobre el nivel del mar diferente a la que va a operar, se aplica una corrección de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Incremento de Temperatura a la altitud de A.} = \text{Temperatura Observada.} \times \frac{(A - A_0)}{0.1A_0} F$$

donde:

F = factor empírico dado a continuación

A₀ = 1 000 metros

TIPO DE ENFRIAMIENTO	FACTOR EMPÍRICO F
Auto-enfriado en aceite (OA)	0.004
Auto-enfriado, tipo seco (AA)	0.005
Enfriamiento auxiliar por aire forzado (OA/FA y AA/FA)	0.006
Enfriamiento forzado tipo seco (AFA)	0.010

Tomado de la Norma Oficial Mexicana NOM-04-J-1969. Métodos de Prueba para Transformadores de Distribución y Potencia.

FACTOR DE CORRECCION DE FRECUENCIA.

Si la frecuencia de prueba es diferente a la nominal, las pérdidas del cobre pueden diferir de las obtenidas bajo frecuencia nominal, por lo que se requiere una corrección para la elevación de temperatura del devanado y del aceite de la parte superior del tanque. La corrección se hace de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A = E_a \left[\left(\frac{W}{W_0} \right)^{0.8} - 1 \right]$$

$$E_{ca} = E_a + A; \quad E_{cd} = E_d + A$$

donde:

A = factor de corrección

E_a = elevación observada en la parte superior del aceite

E_d = elevación del devanado

W = pérdidas a frecuencia nominal

W₀ = pérdidas de frecuencia de prueba

E_{ca} = elevación corregida del aceite

E_{cd} = elevación corregida del devanado

CONSIDERACIONES GENERALES DE LA PRUEBA DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE.

La temperatura del aceite del nivel superior se debe medir con un termopar o un termómetro sumergido aproximadamente 50 mm. debajo de la superficie.

FACTOR DE CORRECCION DE FRECUENCIA.

Si la frecuencia de prueba es diferente a la nominal, las pérdidas del cobre pueden diferir de las obtenidas bajo frecuencia nominal, por lo que se requiere una corrección para la elevación de temperatura del devanado y del aceite de la parte superior del tanque. La corrección se hace de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A = E_a \left[\left(\frac{W}{W_0} \right)^{0.8} - 1 \right]$$

$$E_{ca} = E_a + A; \quad E_{cd} = E_d + A$$

donde:

A = factor de corrección

E_a = elevación observada en la parte superior del aceite

E_d = elevación del devanado

W = pérdidas a frecuencia nominal

W₀ = pérdidas de frecuencia de prueba

E_{ca} = elevación corregida del aceite

E_{cd} = elevación corregida del devanado

CONSIDERACIONES GENERALES DE LA PRUEBA DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE.

La temperatura del aceite del nivel superior se debe medir con un termopar o un termómetro sumergido aproximadamente 50 mm. debajo de la superficie.

La temperatura ambiente, para transformadores auto-enfriados, (clase OA) y enfriados por aire forzado (clase FA) no debe ser menos de 10°C ni mayor de 40°C. En la prueba con enfriamiento por aire forzado, se debe suspender la circulación de aire de enfriamiento al mismo tiempo que se quita la carga para hacer las mediciones de resistencia caliente.

Para transformadores sumergidos en aceite y enfriados por agua se debe determinar el gasto y las temperaturas del agua entrante y saliente de los dispositivos de enfriamiento; la temperatura ambiente debe tomarse como la del agua de entrada, la cual debe estar entre 20°C y 30°C. Para tomar las medidas de resistencia en caliente se debe suspender la circulación de agua de enfriamiento simultáneamente con la carga.

PRUEBA DE TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE.

METODO DE CORTO CIRCUITO.

El aumento de temperatura del nivel superior de aceite sobre la temperatura ambiente producido por las pérdidas totales a la capacidad nominal, se determina de la siguiente forma:

Se pone en corto circuito el devanado de alta o baja tensión y se hace circular una corriente a frecuencia nominal de tal manera que las pérdidas en los devanados sean las requeridas, lo cual es la suma de las pérdidas de carga correspondientes a la derivación que produce las pérdidas más altas, más las pérdidas de excitación a tensión y frecuencia nominal de dicha derivación.

Se mantiene la prueba hasta que se alcance la temperatura de estabilización del nivel superior del aceite, con respecto a la ambiental. El aumento de la temperatura promedio del devanado se determina después de obtener la temperatura del nivel superior del aceite, ajustando las corrientes de los devanados a sus valores nominales y se mantienen constantes durante dos horas. Después de esto se desconecta el transformador, se abre el corto circuito y se mide la resistencia de los devanados, preferentemente en las bobinas que se consideren con mayor disipación de calor. Los aumentos promedio de la temperatura de los devanados se calculan a partir de los valores de las resistencias extrapoladas a ese instante.

La determinación del aumento de la temperatura media del aceite es de la misma manera, solo que deben medir las temperaturas medias del aceite en lugar del nivel superior del aceite. Esta determinación de la elevación media de temperatura de los devanados sobre la temperatura media del aceite permite que las corrientes de los devanados varíen hasta en un 15% de los valores nominales.

PRUEBA DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES DEL TIPO SECO.

Se recomienda el método de oposición para probar transformadores del tipo seco, sobre todo cuando haya más de una unidad sujeta a pruebas.

Cuando solo haya un transformador para prueba se puede emplear el método de auto-oposición.

Para transformadores auto-enfriados (Clase AA), se debe considerar como temperatura ambiente, la del aire alrededor del transformador, para transformadores enfriados por aire forzado (AFA) se debe considerar como temperatura ambiente la del aire de entrada a los ventiladores; en ambos casos, dicha temperatura no debe ser menos de 0°C , ni mayor de 40°C . La parte sensible del termómetro que no esté en contacto con las bobinas debe aislarse por medio de tiras de madera o de otra clase de material aislante térmico.

Cuando se alcance la temperatura de estabilización se debe desconectar el transformador bajo prueba, así como su equipo de enfriamiento forzado y medir las resistencias de los devanados del transformador en prueba. A partir de los valores de las resistencias extrapoladas al instante del corte, se calculan las elevaciones de temperatura de los devanados sobre la temperatura ambiente.

El método de oposición se puede aplicar cuando se dispone de dos transformadores iguales, en cuyo caso se deben conectar en paralelo tanto los devanados de alta tensión como los de baja tensión.

Para conectar los transformadores en paralelo se deben unir - las terminales de igual designación, en lugar de conectar los devanados por simetría.

Se aplican tensión y frecuencia nominales a cualquiera de los grupos de devanados en paralelo y en el otro se hace circular la corriente - de carga, intercalando una fuente de tensión trifásica a frecuencia nominal efectuando la prueba hasta que se restablezcan las condiciones de estabiliza - ción, entonces se suspenden simultáneamente la excitación, la circulación de la corriente y el enfriamiento forzado; inmediatamente después se hacen las lecturas de resistencia de los devanados y se calculan las elevaciones prome - dio de temperatura de los devanados sobre la temperatura ambiente.

METODO DE AUTO-OPOSICION.

Este método requiere que tanto el devanado de alta tensión como el devanado de baja tensión estén conectados en delta. En el caso de un de vanado conectado en estrella, es conveniente que se tome en cuenta esta necesidad cuando se construye el transformador con objeto de facilitar el cambio de conexión. También es necesario prever la necesidad de abrir una de las -- deltas para formar un circuito serie monofásico con la fuente de corriente in tercalada para hacer circular la corriente nominal en el devanado, el punto - de apertura del devanado puede ser el cambiador de derivaciones. Se aplica -- tensión trifásica y frecuencia nominal a uno de los devanados y por el devana do cuya delta se abrió, se hace circular la corriente de fase con una fuente monofásica de aislamiento adecuado. Las conexiones correspondientes se muestran en la figura 3.32 .

METODO DE PERDIDAS SEPARADAS.

La prueba de temperatura de transformadores tipo seco auto-enfriados y ventilados puede efectuarse utilizando las elevaciones de temperatura alcanzadas en dos pruebas separadas, una exclusivamente con las pérdidas del cobre y otra con las pérdidas de excitación.

Una elevación T_c se obtiene inmediatamente después de correr la prueba de temperatura con corriente nominal circulando en un devanado y con el otro devanado en corto circuito. La otra elevación T_e se obtiene inmediatamente en la prueba de temperatura con excitación normal en el núcleo, con tensión nominal en uno de los devanados y el otro en vacío.

La elevación total de temperatura del devanado T , con corriente y excitación nominal se calcula de la fórmula siguiente:

$$T = T_c \left[1 + \left(\frac{T_e}{T_c} \right) 1.25 \right]^{0.80}$$

Cuando la temperatura del aire ambiente sea diferente a 30°C , la elevación de la temperatura del devanado se debe multiplicar por el factor de corrección C dado en la siguiente fórmula:

$$C = \frac{K + 30}{K + T_a}$$

en donde:

K = 234,5 para cobre

= 225 para aluminio

T_a = temperatura ambiente, en °C.

EXTRAPOLACION DE LA RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS.

De una serie de cuatro lecturas de resistencia, como mínimo en una fase de cada devanado, registrando el tiempo transcurrido entre el instante del corte y cada lectura. Las lecturas deben tomarse en tal forma que permitan una extrapolación lo más exacta posible. Con los datos de resistencia obtenidos se traza una gráfica prolongándola hasta el corte.

Si las pérdidas de carga que se obtienen en la prueba difieren de las pérdidas verdaderas, se debe aplicar un factor de corrección a la elevación de temperatura en los devanados, esta corrección se aplica siempre y cuando el valor de la frecuencia, durante la prueba, no varíe en más del 10% del nominal, la corrección se determina en la siguiente ecuación:

$$T = T_0 \left(\frac{W}{W_0} \right)^2$$

donde:

T = elevación corregida de los devanados

T₀ = elevación media de los devanados

W = pérdidas totales requeridas

W_0 = pérdidas aplicadas en la prueba

n = factor 0.80 para transformadores auto-enfriados y 0.07 para transformadores sellados.

Este método se puede aplicar cuando los valores requeridos de las pérdidas de excitación y carga o pérdidas totales no difieran en más del 20% de las nominales.

3.7 PRUEBAS DIELECTRICAS.

Las pruebas dieléctricas de campo son justificadas en la base de detección de gas combustible u otras circunstancias, así mismo, pruebas dieléctricas periódicas se harán de acuerdo al programa de mantenimiento excepto las de impulso.

Cuando las pruebas dieléctricas son necesarias, el potencial de baja frecuencia aplicado o inducido y los esfuerzos impuestos de fase a tierra o de voltaje de fase a fase no deben exceder del 150% del esfuerzo normal de operación o del 85% de la prueba de onda completa.

El propósito de las pruebas dieléctricas es para revisar el aislamiento y la mano de obra, y cuando es necesario, demostrar que el transformador ha sido bien diseñado y construido de acuerdo con las especificaciones de la prueba de aislamiento.

Durante la prueba de baja frecuencia, sea aplicada o inducida, se deberá prestar la mayor atención a la evidencia de posibles fallas las cuales incluye indicaciones de humo, burbujas, un sonido audible y que se pueda describir como un golpe, un súbito incremento de la corriente del circuito de prueba, incremento en el nivel corona, etc. Una indicación de este tipo debe ser cuidadosamente investigada ya sea, por observación o por repetición de la prueba o de otras pruebas, hasta determinar si ha ocurrido una falla.

PRUEBA DE POTENCIAL APLICADO.

En aparatos diseñados para conexión delta, para cualquier terminal de un devanado que se pueda usar como terminal de línea, la prueba de potencial aplicado se debe hacer aplicando la tensión de prueba entre cada devanado con los demás devanados conectados a tierra. En transformadores con aislamiento reducido al neutro, la prueba de potencial aplicado se debe hacer aplicando la tensión de prueba entre cada devanado y con los otros devanados conectados a tierra.

Todas las terminales del devanado bajo prueba que salgan del tanque del transformador se deben conectar entre sí, y a la línea terminal del equipo bajo prueba.

No se debe colocar ninguna resistencia de valor apreciable entre el equipo de prueba y el transformador que se va a probar, se pueden usar bobinas reactivas conectadas a las terminales del equipo de prueba.

Durante las pruebas de potencial aplicado, se puede usar un explosor para una tensión del 10% o más, en exceso de la tensión de prueba especificada.

La aplicación de la tensión de prueba debe iniciarse a un cuarto o menos de su valor total, e incrementándose gradualmente hasta alcanzar su valor total en un tiempo de 15 segundos máximo. Después de el minuto de duración de la prueba, la tensión debe reducirse gradualmente (sin exceder en 5 segundos), hasta un cuarto del valor máximo o menos antes de abrir el circuito.

PRUEBA DE POTENCIAL INDUCIDO.

Consiste básicamente en inducir en los devanados del transformador de prueba una tensión del 200% de la nominal: dado que durante esta prueba se incrementan los volts por vuelta del transformador, la frecuencia de la tensión de prueba debe ser lo suficientemente alta para limitar la densidad de flujo en el núcleo.

La frecuencia mínima para lograr esta condición está dada por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\text{Tensión inducida a través del devanado}}{1,1 \text{ Tensión nominal del devanado}} \times \text{frecuencia nominal}$$

Sin embargo, si se utilizan frecuencias más altas de 120 Hz, la severidad de la prueba se incrementa y por esta razón debe reducirse, dependiendo de la frecuencia como lo indica la siguiente tabla:

FRECUENCIA (Hz)	DURACION (Seg)
120 ó menos	60
180	40
240	30
360	20
400	18

Teniendo en cuenta que en transformadores con aislamiento reducido en el neutro, cuando se prueban como describe en los párrafos anteriores, ni la prueba de potencial aplicado ni la de potencial inducido alcanzan la tensión de prueba entre las terminales de línea y tierra, correspondiente a la clase de aislamiento de la terminal de línea, tal como se especifica en las tablas correspondientes, la prueba de potencial inducido se debe modificar a fin de producir esta tensión.

C A P I T U L O I V

PRUEBAS DE CAMPO A TRANSFORMADORES

Dentro de las pruebas que se aplican a los transformadores después de su fabricación están las pruebas de campo, que se efectúan con el fin de tener amplia confiabilidad en el equipo.

Estas pruebas están tomadas de la Norma Oficial Mexicana DGN-1 123-1977 Aceite Aislante no Inhibido para transformadores.

Estas pruebas tienen como objetivo establecer las características del aceite no inhibido para transformadores obtenido de la destilación fraccionada del petróleo crudo especialmente preparado y refinado para el uso en equipo eléctrico como un medio aislante y refrigerante.

El aceite aislante equi tratado se clasifica en:

TIPO S: Para tensiones hasta de 85 KV

TIPO M: Para tensiones de 115 KV y mayores

4.1 DETERMINACION DE LA TENSION DE RUPTURA DIELECTRICA DEL ACEITE.

La tensión de ruptura dielectrica del aceite aislante es una medida de su habilidad para soportar un esfuerzo eléctrico

ESPECIFICACIONES DEL ACEITE AISLANTE PARA TRANSFORMADORES

CARACTERISTICAS	TIPO DE ACEITE	
	TIPO 'S'	TIPO 'M'
Apariencia visual	Brillante sin sólidos en suspensión	Brillante sin sólidos en suspensión
Densidad relativa a 20°C/4°C	0.870 máx.	0.865 a 0.910
Viscosidad a 37.8°C	10.4 mm ² /s máx --- (60 SU, s)	10.4 mm ² /s máx --- (60 SU, s)
Tensión interfacial a 25=1°C	36 mN/m(dinas/cm) mín	40 mN/m (dinas/cm) mín
Temperatura de inflamación a 760 mm Hg.	145°C mín	145°C mín
Color	Máximo 1	Máximo 1
Temperatura de escurrimiento, °C	-26 máx	-40 máx
Número de neutralización mg KOH/g aceite.	0.03 máx	0.03 máx
Cloruros y sulfatos	Negativos	Negativos
Azufre libre y corrosivo	No corrosivo	No corrosivo
Azufre total	0.40% máx	0.10% máx
Carbonos aromáticos Aceite destinado para equipos hermáticos. Aceite para otros equipos	en estudio 4% mínimo	6% mínimo
Envejecimiento Acelerado Número de neutralización Depósitos en %	0.40 máx 0.10 máx	0.40 máx 0.10 máx
Tensión de Ruptura Dieléctrica Electrodos planos (2.54 mm) Electrodos semiesféricos ---- (1.02 mm)	30 kV mín 20 kV mín	30 kV mín 20 kV mín
Factor de Potencia a 60 Hz a 25°C a 100°C	0.05% máx 0.5 % máx	0.05% máx 0.3 % máx

En este método se establecen dos formas para la determinación de ruptura dieléctrica, una por medio de electrodos planos y otra por medio de electrodos semiesféricos.

METODO CON ELECTRODOS PLANOS

APARATOS Y EQUIPO.

a).- TRANSFORMADOR. La tensión de prueba deseada se obtiene de un transformador excitado por una fuente variable de baja tensión. - El transformador y su equipo de control debe ser de tal capacidad y diseño que con la muestra en el circuito, el factor cresta (relación del valor de cresta a valor eficaz) de la tensión de prueba no difiere en más de un 50% del factor de cresta de la senoide, cuando el valor de la tensión de prueba ha alcanzado el 50% o más de su valor final. El valor cresta puede comprobarse por medio de un osciloscopio, o bien un vóltmetro de esfera o un vóltmetro para valores cresta en conjunto con un vóltmetro para valores eficaces. Cuando la forma de onda no puede ser determinada convenientemente, debe usarse en transformador que tenga una capacidad mínima de 1/2 KVA con relación a la tensión de ruptura usual.

Puede usarse transformadores con más capacidad en KVA, pero en ningún caso la corriente de corto circuito que fluye por la muestra debe quedar fuera de los límites de 1 a 10 mA/KV de tensión aplicada. Esta limitación de corriente se puede obtener por el uso de resistencias adecuadas conectadas en serie o por medio de un transformador con suficiente reactancia inherente.

b) .- INTERRUPTOR. El transformador de prueba debe protegerse por medio de un dispositivo o interruptor automático capaz de abrir como máximo en tres ciclos a partir de la ruptura del espécimen de prueba o como máximo en cinco ciclos si la corriente de ruptura no excede a 200 mA. El elemento sensible a la corriente que dispara el interruptor debe operar cuando la corriente que circula en el espécimen está entre 2 y 20 mA. Un prolongado flujo de corriente en la ruptura causa carbonización del aceite, corrosión y calentamiento de los electrodos, lo que incrementa el mantenimiento de esta parte del equipo.

c) .- EQUIPO DE CONTROL DE TENSION. De preferencia debe usarse un autotransformador accionado a motor, que asegure un incremento de tensión constante de la tensión de prueba de 3 KV/seg \pm 20%.
De no disponer de este equipo puede usarse uno de operación manual.

d) .- MEDIDOR DE TENSION. La tensión puede ser medida por medio de.

1.- Un voltmetro conectado al secundario de un transformador de potencial.

- 2.- Un voltmetro conectado a una bobina terciaria de diseño apropiado en el transformador de -- prueba.
- 3.- Un voltmetro conectado al lado de baja tensión del transformador de prueba si el error en la medición puede ser limitado al especificado.

NOTA: La precisión combinada del voltmetro y el circuito divisor de tensión debe ser tal que el -- error de la medición no exceda del 5% a la rapidez de incremento de tensión especificada.

- e) . - ELECTRODOS.- Los electrodos deben ser discos de bronce pulido de 2.54 cm. de diámetro y cuando menos 0.32 cm. de espesor con aristas de 90°.
- f) . - COPA DE PRUEBA.- La copa de prueba debe satisfacer los siguientes requisitos:

Debe tener los electrodos rígidamente montados - con sus caras paralelas y sus ejes coincidiendo en una misma línea horizontal.

El material debe tener una constante dieléctrica alta, ser impermeable y resistente a los disolventes que se usan en la limpieza de la copa.

la corriente total en la copa cuando esté llena con aceite, debe ser menos de 200 μ Amp. Cuando se energiza a 20KV 60 Hz.

- g).- CALIBRADOR. Un calibrador para verificar la separación entre los electrodos que debe ser de 2.54 ± 0.01 mm.

PREPARACION DE LA MUESTRA.

La muestra debe consistir como mínimo de 2 litros de aceite y ya que la tensión de ruptura dieléctrica puede ser alterada por la presencia de impurezas, al recipiente que contenga la muestra debe ser invertido o agitado suavemente algunas veces antes de llenar la copa de prueba con el objeto de que el espécimen de prueba sea representativo del contenido de impurezas.

PROCEDIMIENTO.

- a).- LLENADO DE LA COPA. Se llena la copa lentamente hasta un nivel de 2 cm. arriba del borde superior de los electrodos evitando la inclusión del aire.
- b).- TEMPERATURA DE PRUEBA. La prueba se debe llevar a cabo a la temperatura ambiente siempre y cuando esta no sea menor de -20° C ya que con temperaturas menores se obtienen resultados erróneos.

- c) .- APLICACION DE TENSION.- Despues de un periodo de 2 o 3 minutos de haber llenado la copa se debe aplicar la tension e incrementar desde cero a una velocidad uniforme de 3KV/seg. hasta que ocurra la ruptura, la cual se produce por una descarga continua entre los electrodos, que hace operar el interruptor.
- d) .- DETERMINACION DE LA RUPTURA.- Para determinar la tension de ruptura dielectrica de la muestra, debe efectuarse una determinacion de ruptura a cada uno de los llenados en la copa de prueba. Si ningun valor esta abajo del valor especificado de aceptacion, el aceite puede considerarse satisfactorio y no requiere ninguna prueba posterior. Si cualquiera de los valores es menor que el valor especificado, debe efectuarse una determinacion de ruptura, en cada uno de tres llenados adicionales y los resultados deben analizarse en la misma forma que para pruebas con proposito de arbitraje

INFORME:

Se debe informar lo siguiente:

- a).- Nombre del método empleado.
- b).- Temperatura del aceite en el momento de la deter -

minación.

- c) Valores individuales y promedio de las tensiones de ruptura.
- d) Indicación de si la muestra presenta evidencia de contener agua libre e impurezas contaminantes.

4.2 CON ELECTRODOS SEMIESFERICOS.

APARATOS Y EQUIPO.

El mismo equipo indicado en 4.1 con las siguientes --
excepciones:

- a).- EQUIPO DE CONTROL PARA LA TENSION: la relación -- de elevación de la tensión debe ser 1/2 KV/seg. --
+ 20 %.
- b).- ELECTRODOS: Los electrodos deben ser semiesféri--
cos de bronce pulido.
- c).- CELDA DE PRUEBA: La celda de prueba debe ser a---
proximadamente cúbica con una capacidad aproxima--
da de 1 litro. Los electrodos deben montarse --
rígidamente y desde lados opuestos con la separa--
ción aproximadamente al centro. Las distancias des
de cualquier lado de la celda, cualquier parte del
dispositivo de agitación debe ser como mínimo de
13 mm. La celda debe estar provista con un motor

que opere a una velocidad entre 200 y 300 rpm. El propulsor debe girar en una dirección tal, que el flujo del líquido se dirija hacia abajo contra el fondo de la celda. La celda prueba debe ser de un material de alta rigidez dieléctrica, debe ser insoluble en los líquidos que se usen para limpieza o para prueba y no ser atacada por estos. Para que pueda observarse la ruptura es deseable que los materiales sean transparentes, pero esto no es indispensable. Para evitar que el aire se mezcle con la muestra, la celda debe estar provista con una cubierta o una protección que evite que éste entre en contacto con el aceite bajo prueba.

- d).- CALIBRADOR: Un calibrador para verificar la separación entre electrodos, que debe ser de 1.02 mm.

PREPARACION DE LA MUESTRA Y EL EQUIPO.

DEBE SER LA MISMA QUE EN EL INCISO 4.1

PROCEDIMIENTO.

Debe ser el mismo que en 4.1 con las siguientes excepciones:

- a).- Relación de elevación de la tensión: se aplica la tensión incrementándola desde cero hasta que ocurra la ruptura, en una relación de aproximadamente 1/2 KV/seg.

- b).- Debe haber un intervalo de por lo menos 3 minutos entre el llenado de la celda y la aplicación de la tensión para la primera ruptura y por lo menos intervalos de 1 minuto entre aplicaciones de tensión para rupturas sucesivas.
- c).- Durante los intervalos mencionados como en el momento de la aplicación de la tensión, el propulsor debe hacer circular el aceite.

INFORME

Debe ser el mismo que con el método de electrodos planos.

La Norma Oficial Mexicana establece que los valores de tensión de ruptura dieléctrica deben ser como se indica a continuación:

TENSION DE RUPTURA DIELECTRICA

TIPO DE PRUEBA	KV MINIMO
Electrodos planos 2.54 mm	30
Electrodos semiesféricos 1.02 mm	20

4.3 DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA Y LA CONSTANTE DIELECTRICA.

Este método se aplica para determinar el factor de potencia y la constante dieléctrica de un aceite aislante a una frecuencia de 50 ó 60 HZ.

TAMARO DE LA MUESTRA.

La cantidad de muestra que se tome debe ser suficiente para hacer por lo menos 3 determinadores del factor de potencia.

APARATOS Y EQUIPO

- a).- CELDA DE PRUEBA.- Esta debe tener un volumen de 185 ml; una capacitancia con aire como dieléctrico de 75 picofarads y capaz de usarse con tensiones hasta de 5 KV y temperatura hasta de 150 ° C. La celda adecuada se muestra la figura 4.1.

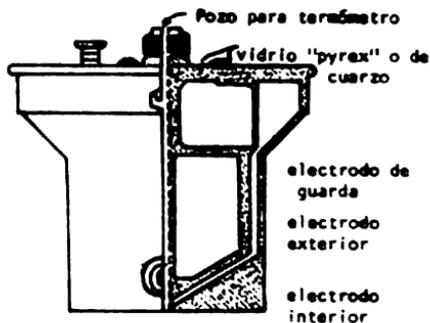


FIGURA 4.1 CELDA DE PRUEBA

- b).- CAMARA DE PRUEBA. Cuando la determinación se haga a una temperatura superior a la ambiente, pero abajo de 300 ° C debe usarse como cámara de prueba un horno con circulación forzada de aire y con control termostático. Cuando la determinación se hace a la temperatura ambiente usese como cámara de prueba, el mismo horno a dicha temperatura. La cámara.

de prueba debe tener una abertura en la pared a través de la cual pasen los cables para hacer conexiones eléctricas con el equipo de medición y con la fuente de tensión. Las conexiones con el equipo de medición se muestran en la figura 4.2

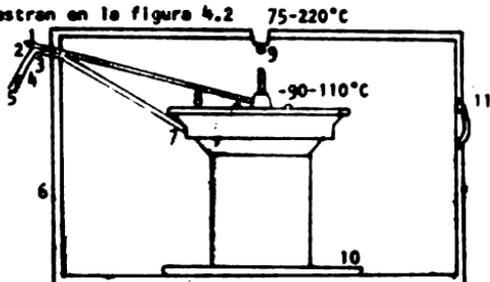


FIGURA 4.2 CELDA Y CONEXIONES PARA LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

- 1.- Cable con aislamiento de teflón para 3 000 V y ultra alta frecuencia.
- 2.- Al puente.
- 3.- Conexión de seguridad al puente y tierra
- 4.- Conexión de seguridad a tierra.
- 5.- Al transformador de A.T.
- 6.- Horno de circulación forzada.
- 7.- Toma de A.T.
- 8.- Electrodo de guarda.

- 9.- Termómetros.
- 10.- Disco de cerámica con perforaciones.
- 11.- Puerta exterior.

- c) .- ELECTRODOS DE GUARDA. Los electrodos de guarda deben ser como los mostrados en la figura 4.1.
- d) .- EQUIPO DE MEDICION. Un puente de Schering u otro equipo adecuado capaz de medir factores de potencia a partir de 0,0196.

CONDICIONES PARA LA PRUEBA.

LAS PRUEBAS DEBEN EFECTUARSE A TEMPERATURAS DE 25 y 100°C.

PROCEDIMIENTO

- 1.- Se ajusta la temperatura del aceite con una aproximación de 0,5°C y se hacen las mediciones del factor de potencia como se indica en el siguiente párrafo.
- 2.- Se aplica un gradiente de potencial no menor de 200 V/mm, ni mayor de 1 200 V/mm, anotando el factor de potencia obtenido.
- 3.- Se efectúan otras dos determinaciones siguiendo el mismo procedimiento que para la primera.

- 4.- Si la diferencia entre los 3 valores obtenidos, es igual o menor que 0.01% el factor de potencia de la muestra es el promedio de las 3 determinaciones. En caso contrario se repite el procedimiento con otra muestra.
- 5.- Para determinar la constante dieléctrica relativa se mide primero la capacitancia de la celda de prueba usando aire como dieléctrico y después con el aceite en prueba.

CALCULOS.

La constante dieléctrica se determina como sigue: $K = \frac{C_x}{C_v}$

donde:

K = constante dieléctrica relativa del aceite.

C_x = capacitancia de la celda de prueba con el aceite como dieléctrico.

C_v = capacitancia de la celda de prueba con aire como dieléctrico.

INFORME

El informe debe incluir lo siguiente:

- a).- Tensión en volts.
- b).- Frecuencia
- c).- Temperatura de la muestra en °C.
- d).- Factor de potencia y constante dieléctrica relativa.

El factor de potencia del aceite debe cumplir con lo establecido en la siguiente tabla y de acuerdo al método que se ha descrito:

FACTOR DE POTENCIA.

TEMPERATURA °C	FACTOR DE POTENCIA EN %	
	TIPO S	TIPO M
25	0.05 máximo	0.05 máximo
100	0.5 máximo	0.5 máximo

4.4. DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD

Este método cubre la determinación de la resistividad de un -- aceite y especifica el procedimiento para hacer la prueba con un potencial de corriente directa.

La resistividad de un aceite es una medida de sus propiedades aislantes eléctricas. Una alta resistividad refleja bajo contenido de los iones libres y partículas formadas de iones e indica una baja concentración de contaminantes conductores.

CONDICIONES GENERALES DE LA PRUEBA.

- a).- Cuando se disponga de un equipo para hacer consecutivamente mediciones del factor de potencia y resistividad en la misma muestra, ambas a temperatura ambiente, la medición del factor de potencia debe hacerse antes de la resistividad.
- b).- La prueba debe efectuarse en un medio ambiente que tenga una humedad relativa menor del 50%

APARATOS Y EQUIPO.

- a).- Un circuito de prueba como el indicado en la figura 4.3 -- con las siguientes características:

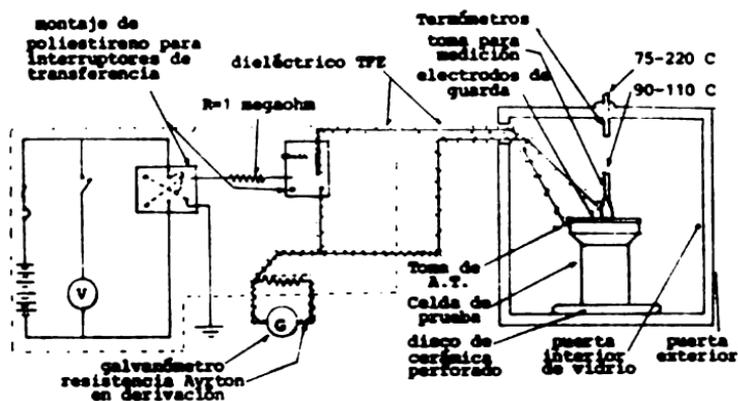


FIGURA 4.3.- CIRCUITO DE PRUEBA PARA MEDICIONES DE RESISTIVIDAD.

- 1.- Debe estar construido de tal forma que las fugas sean mínimas. Esto se logra montando los interruptores de transferencia en un material aislante de suficiente espesor para evitar las pérdidas.
- 2.- Todas las conexiones deben estar soldadas.
- 3.- Debe estar completamente protegido.
- 4.- Las conexiones deben hacerse con terminales protegidas con un material aislante.
 - b).- Un voltmetro con una exactitud de 2% ó mejor;
 - c).- Cronómetro con una exactitud de 0,5 x, en un minuto.
 - d).- Fuente de alimentación de C.D.
 - e).- Galvanómetro. Cualquier tipo de instrumento con sensibilidad y precisión adecuadas y con escala apropiada para la medición de corrientes.

Al usarse este instrumento debe seleccionarse la escala multiplicadora que dé, cuando menos, una deflexión de la mitad del total de la escala del instrumento.

- f).- CELDA DE PRUEBA.- Esta celda es como la indicada en la figura 4.1. Esta debe tener un volúmen de 185 ml; una capacitancia con aire como dieléctrico de 75 picofarads y capaz de usarse con tensiones hasta de 5 KV y temperatura de 150°C.
- g).- ELECTRODOS DE GUARDA. Los electrodos de guarda deben usarse como los mostrados en la figura 4.1
- h).- CAMARA DE PRUEBA. Cuando la determinación se haga a temperatura ambiente o superior, pero abajo de 300°C debe usarse como cámara de prueba, un horno con circulación forzada de aire y control termostático.

CALIBRACION.

Antes de la prueba, el galvanómetro y la constante de la celda deben verificarse:

- a).- La sensibilidad G_s del galvanómetro en amperes por división, que se calcula como sigue:

$$G_s = \frac{E_s}{RD}$$

donde:

E = Tensión de prueba (volts)

S = Factor multiplicador de la resistencia derivadora -
(relación de la corriente del galvanómetro a la co -
rriente de la resistencia derivadora.

R = Resistencia de calibración (Ohms)

D = Deflexión del galvanómetro en número de divisiones.

b).- CONSTANTE DE LA CELDA. La constante K de la Celda es -
proporcionada por el fabricante; en caso contrario y ya -
que es difícil medir el área efectiva y la distancia en -
tre electrodos se calcula por la siguiente ecuación:

$$K = 3.6 C \quad c = 11.21 C$$

donde:

K = Constante de la celda de prueba en cm.

C = Capacitancia en picofaradas del sistema de electro -
dos, usando aire como dieléctrico.

TEMPERATURA DE PRUEBA.

La prueba puede efectuarse a temperatura ambiente, 85 ó -
100°C. El tiempo para obtener la temperatura de prueba no debe ser mayor
de 20 minutos, un tiempo mayor puede causar resultados erróneos.

TAMAÑO DE LA MUESTRA

La muestra debe ser de cantidad suficiente para hacer al menos tres determinaciones.

NOTA: Si a esta muestra se le practicó anteriormente la prueba del factor de potencia, se ponen en corto circuito los electrodos de la celda durante un minuto antes de medir la resistividad.

CALCULOS. La resistividad de un espécimen en $\text{ohm-cm} \times 10^{12}$, se calcula usando una de las siguientes ecuaciones dependiendo si se usa un galvanómetro o un pico ampermetro.

a).- Cuando se usa galvanómetro:

$$P = \frac{EK}{DG_s}$$

b).- Cuando se usa picoampermetro:

$$P = \frac{EK}{I}$$

donde:

P = Resistividad en $\text{ohm-cm} \times 10^{12}$

E = Tensión de prueba, en volts.

K = Constante de la celda en cm.

D = Deflexión de galvanómetro en divisiones

G_s = Sensibilidad del galvanómetro en Amperes $\times 10^{-12}$ / división.

I = Corriente, en amperes $\times 10^{-12}$

INFORME

a).- En el resultado obtenido se aplica el siguiente criterio:

Si la diferencia entre los valores de la resistividad determinada en la muestra está dentro del 20% del mayor de ellos, no es necesario efectuar otra prueba y el promedio de los valores obtenidos debe reportarse como resistividad de la muestra. En caso contrario, - se lava la calda de prueba y se hacen determinaciones en nuevas porciones de la muestra hasta que los valores de la resistividad, entre dos de ellos quede dentro del 20%.

Además, se deben incluir los cálculos del inciso anterior expresando el valor en ohms-cm $\times 10^{-12}$ con dos cifras significativas.

- b).- Temperatura de prueba.
- c).- Humedad relativa.

C A P I T U L O V

PROCEDIMIENTOS PARA SECADO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

5.1 OBJETIVO

El objetivo de secar un transformador es eliminar del embobinado y del núcleo la humedad y los gases que hayan podido quedar dentro de los mismos, y dejarlos dentro de límites aceptables para la operación confiable del transformador.

El objetivo de este procedimiento es proporcionar los elementos necesarios para efectuar secados de transformadores de una forma eficiente --- así como normalizar los procedimientos más adecuados.

5.2 PRINCIPIOS TEORICOS.

Los aislamientos sólidos de los transformadores de potencia están compuestos principalmente por papel, cartón y madera, los cuales llegan a representar el 95% de estos aislamientos; estos materiales en sus diferentes tipos y variantes, son altamente higroscópicos conteniendo de 8 a 10% de su peso en humedad, en condiciones de saturación.

5.3 HUMEDAD

El papel aislante tiene una gran afinidad por agua y mucho menor por el aceite aislante, por lo que generalmente absorberá agua además del aceite; la cantidad de agua en el papel será siempre mayor que el aceite; el papel seco absorbe agua más rápidamente que el papel impregnado en aceite el

cual tiene un rango más bajo de absorción de humedad; el agua dentro del papel afecta la rigidez dieléctrica, el factor de potencia, envejecimiento y rigidez mecánica; el efecto sobre la rigidez dieléctrica del papel impregnado en aceite se muestra en la fig. 5.1

5.4 ELIMINACION DE HUMEDAD

Para eliminar el agua presente en los aislamientos, es necesario transformarla en vapor y expulsarla a la atmósfera, lo anterior se puede lograr con calor, aumentando la temperatura hasta el punto de ebullición del agua o disminuir la presión atmosférica, hasta el punto de lograr la ebullición de la misma, a la temperatura ambiente.

La aplicación del vacío tiene dos propósitos:

a) Expandir y extraer el gas (en su mayoría aire) contenido dentro de un espacio cerrado.

Esta expansión de gas ayuda a la expulsión de la humedad presente.

En la fig. 5.2 se muestra la expansión del gas, al reducirse la presión a la que se encuentra sujeto; esta curva está basada en un volumen unitario de gas a 760 mm Hg., o sea la presión atmosférica a nivel del mar.

b) Reducir el punto de ebullición del agua contenida en forma de humedad dentro de los aislamientos, con lo cual su evaporación se acelera; al convertirse el agua en vapor, éste puede ser evacuado rápidamente junto con los gases por medio de la bomba de vacío.

En la fig. 5.3 se muestra el punto de ebullición del agua en ---

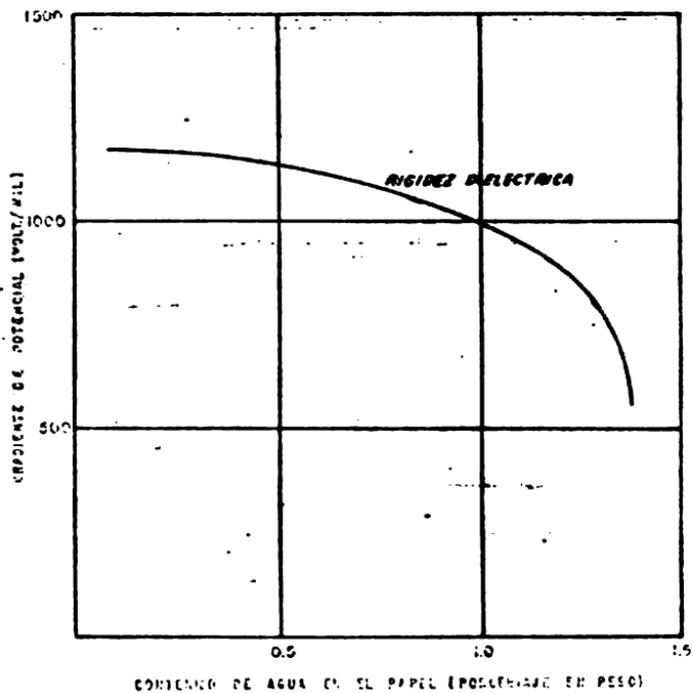


FIG. 5.11- VARIACION DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL PAPEL IMPREGNADO DE ACEITE, CON SU CONTENIDO DE AGUA.

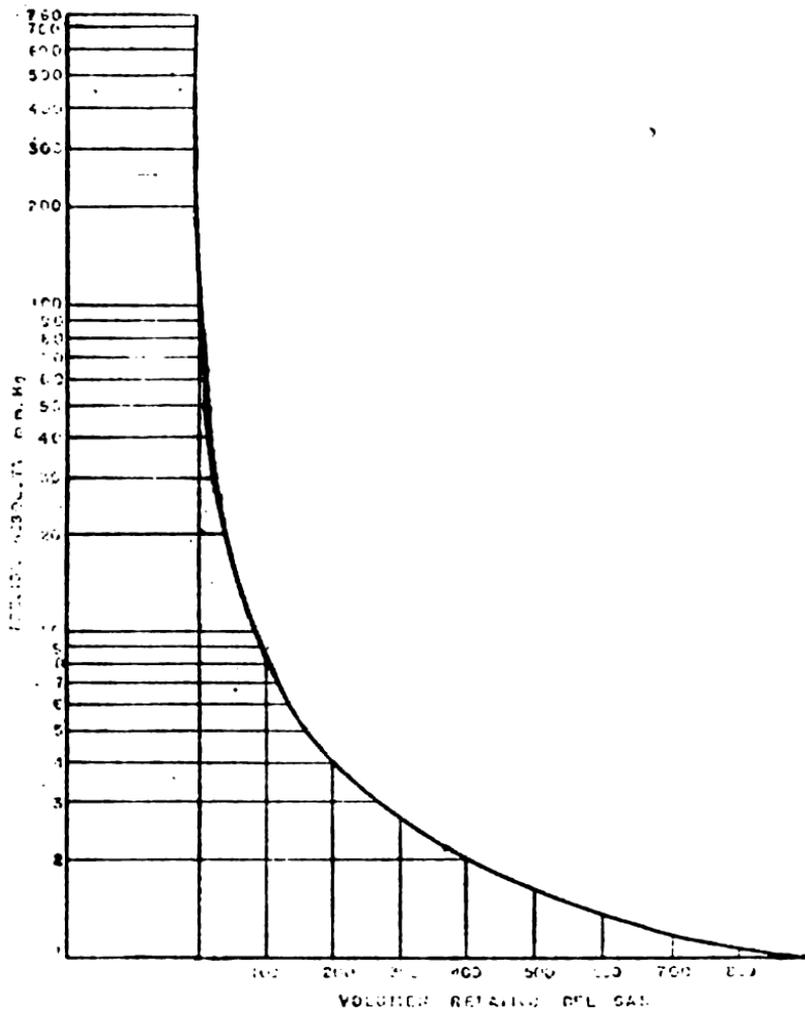
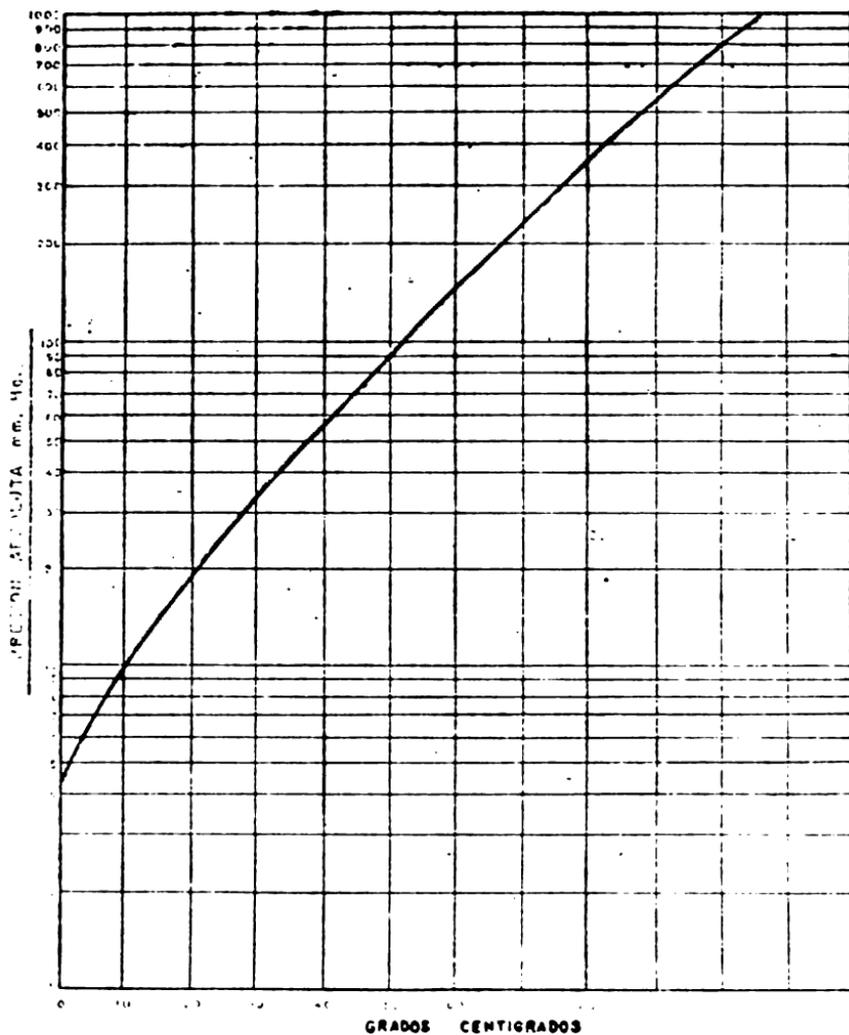


FIG. 1. VARIACION RELATIVA DEL GAS EN FUNCION DE PRESION RELATIVA

FIG. 5.3 — PUNTO DE EBULLICION DEL AGUA
EN FUNCION DE PRESION ABSOLUTA



función de la presión absoluta.

5.5 GRADOS DE SECADO

Puesto que la humedad presente en los aislamientos, afecta grandemente las características dieléctricas de los mismos, es necesario determinar los límites máximos permisibles, de acuerdo con los niveles de voltaje de los transformadores.

Para transformadores de nivel de voltaje de 69 KV y menores se deberá alcanzar una humedad residual de 0.7%.

Para transformadores de nivel de voltaje de 115 KV y hasta 161 KV, se deberá alcanzar una humedad residual de 0.5%.

Para transformadores de nivel de voltaje de 230 KV y 400 KV, se deberá alcanzar una humedad residual de 0.3%.

5.6 METODO CON ALTO VACIO.

Uno de los métodos para secar un transformador dentro de su tanque, consiste de sujetarlo a vacíos muy altos a la temperatura ambiente, durante largos periodos de tiempo, de acuerdo con la expansión y extracción de su humedad a los límites establecidos.

Para lograr los vacíos muy altos requeridos, es necesario utilizar bombas de vacío, del tipo rotatorio de un solo paso selladas con aceite, capaces de alcanzar vacíos del orden de 50 micrones (0.050 mm Hg.) y en algunos casos complementar estas bombas con un soplador (Booster) en serie con las mismas, con lo que es posible alcanzar hasta un micrón (0.001 mm Hg.); los valores anteriores son logrados a brida ciega y los alcanzados dentro del transformador.

mador dependerán de las fugas que se tengan.

Para aplicación del método de secado con alto vacío continuo, deberá seguirse el siguiente procedimiento. (Ver fig. 5.4).

Desconectar y dejar fuera de servicio el transformador que se va a secar.

Extracción de su aceite aislante (completo) e inyección de nitrógeno seco. (punto de rocío -40°C).

Eliminar radiadores y tanque conservador por medio de sus válvulas en cuanto sea posible, así como válvulas o dispositivos de sobrepresión.

Medición de humedad residual.

Verificación de fugas, aumentando presión del nitrógeno hasta 10 lbs/Plg^2 , y localizándolas con espuma de jabón.

Instalación de bomba de vacío, conectada al tanque del transformador, en su parte superior, ya sea en el registro-hombre o en el tubo de aii-vio; la tubería de conexión especial para alto vacío deberá ser de un diámetro de 2 a 4 plg., dependiendo de la capacidad de la bomba, la longitud deberá ser la más corta posible.

Entre la bomba de vacío y el tanque del transformador, se instalará en cuanto sea posible, una trampa de hielo seco, para atrapar la humedad condensada por la bomba.

Expulsar el nitrógeno del tanque hasta tener una presión manométrica, de aproximadamente cero.

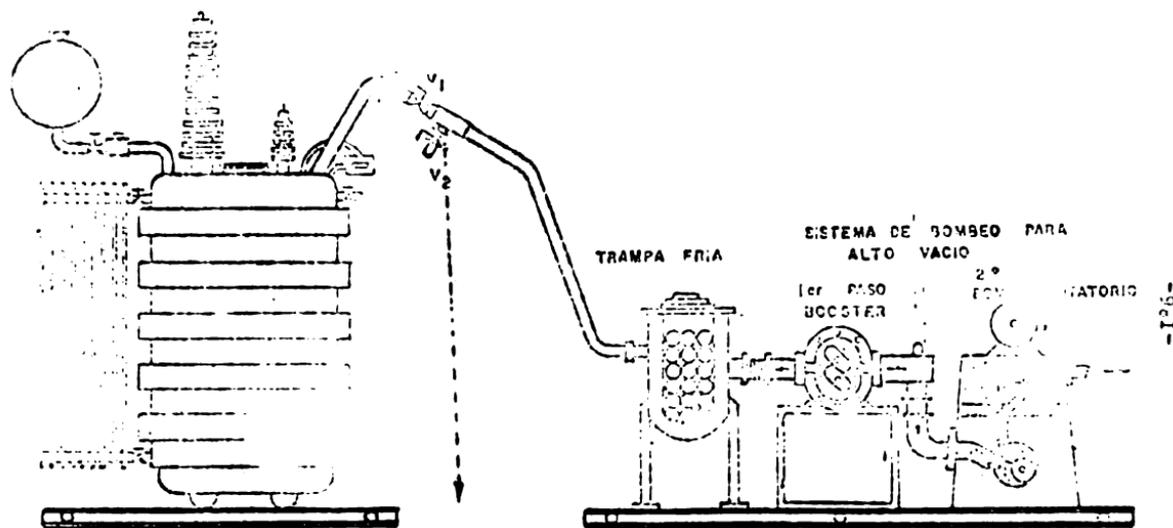


FIG. 5.4 — METODO CONTINUO DE ALTO VACIO

Poner en servicio bomba de vacío y dejarlo operando continuamente hasta alcanzar un vacío correspondiente a la humedad residual.

Cerrar válvula principal de vacío y parar bomba; checar abatimiento de vacío para detectar fugas en el tanque, al tenerse una tendencia --- "lineal" pronunciada en la pérdida de vacío.

En caso de haber fugas, sería necesario detectarlas y corregirlas en caso de ser grandes y no puedan ser compensadas con la capacidad de la bomba.

Continuar con el proceso, vigilando el progreso en el alto vacío, y por otro lado la colección de agua en la trampa, cuando se use; y de acuerdo con estos parámetros determinar tentativamente el punto en que se alcanza el grado de secado esperado.

5.7 METODO CON ALTO VACIO Y CALOR.

El método de secado con Alto Vacío y Calor aplicado, tiene por objeto acelerar la ebullición, expansión y extracción del agua en forma de vapor, obteniéndose secados de transformadores en tiempos muy cortos.

El alto vacío se logra de la misma manera que en el método anterior y el calor es proporcionado por aceite previamente calentado por circulación a través de un grupo de resistencias, y a su vez circulado dentro del tanque del transformador por un rociador (regadera o boquillas) bañando los devanados.

Este método se puede aplicar en dos variantes, dependiendo del equipo disponible en sitio y de acuerdo con los siguientes procedimientos.

METODO CON ALTO VACIO Y CALOR APLICADO (VER FIG. 5.5)

Desconectar y dejar fuera de servicio el transformador que se va a secar.

Extracción de su aceite aislante (completo) e inyección de nitrógeno seco. (punto de rocío -40°C).

Eliminar radiadores y tanque conservador por medio de sus válvulas en cuanto sea posible, así como válvulas o dispositivos de sobrepresión.

Medición de humedad residual.

Instalación dentro del transformador del sistema de regaderas o boquillas; al efectuar este trabajo se expulsará el nitrógeno, por lo que se deberán tomar las medidas de seguridad necesarias.

Instalación de la tubería y bomba para aceite, así como del grupo de resistencias para su calentamiento. (Ver fig. 5.5).

Instalación de bomba de vacío, conectada al tanque del transformador, en su parte superior, ya sea en el registro-hombre o en el tubo de alivio; la tubería de conexión especial para alto vacío deberá ser de un diámetro de 2 a 4 pulg.

Entre la bomba de vacío y el tanque del transformador, se instalará en cuanto sea posible, una trampa de hielo seco, para atrapar la humedad extraída por la bomba.

Verificación de fugas, aumentando la presión del nitrógeno hasta 10 lbs/plg^2 , y localizándolas con espuma de jabón (incluyendo el sistema de aceite).

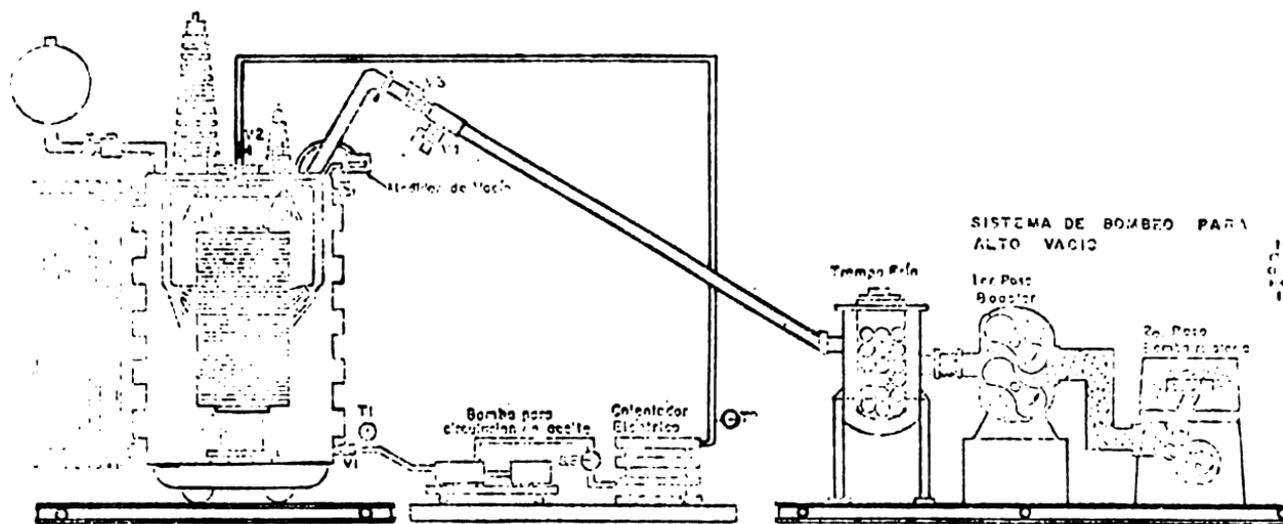
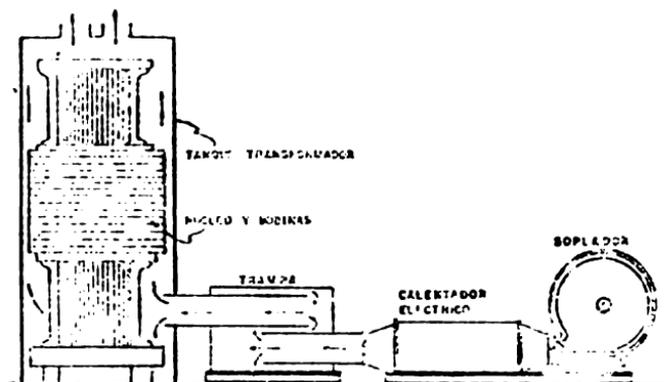
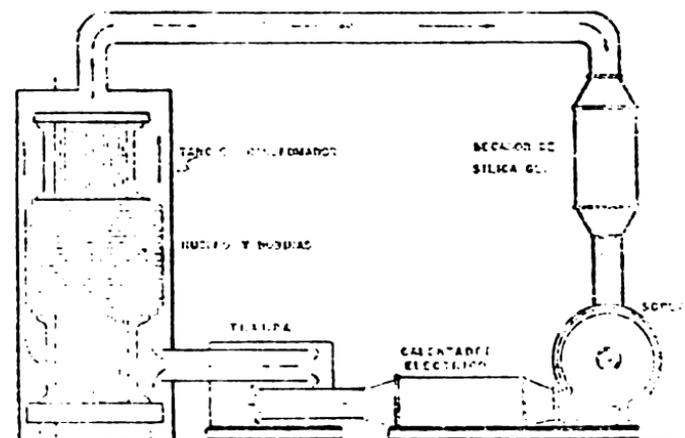


FIG. 5.- METODO CONTINUO CON ALTO VACÍO Y CALOR APLICADO



METODO CON AIRE CALIENTE CIRCUITO ABIERTO.



METODO CON AIRE CALIENTE DE CIRCUITO CERRADO.

Poner en servicio la bomba de vacío y dejarla operando continuamente hasta alcanzar un vacío correspondiente a la humedad residual.

Cerrar la válvula principal de vacío y parar la bomba; checar el abatimiento de vacío para detectar fugas en el tanque, al tenerse una tendencia "lineal" pronunciada en la pérdida de vacío.

En caso de haber fugas, sería necesario detectarlas y corregirlas, en caso de ser grandes y no pueden ser compensadas con la capacidad de la bomba.

Introducir aceite al transformador, en una cantidad entre el 10 y 20% del volumen de aceite total, procurando que el nivel se mantenga a la altura de la parte inferior de las bobinas y que tenga como mínimo una altura de un metro.

Poner en servicio el sistema o circuito de aceite, circulando y calentándolo hasta alcanzar una temperatura máxima estabilizada de 90°C en el aceite.

Poner en servicio la bomba de vacío y continuar con el proceso, vigilando el progreso en el alto vacío y por otro lado la colección de agua en la trampa, cuando se use; y de acuerdo con estos parámetros determinar tentativamente el punto en que se alcance el grado de secado esperado.

Parar el proceso y determinar la humedad residual alcanzada. Si se ha logrado el grado deseado se da por terminado el proceso de secado.

PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINACION DE HUMEDAD RESIDUAL EN AISLAMIENTOS SOLIDOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

5.8 AISLAMIENTOS SOLIDOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Los aislamientos sólidos de los transformadores de potencia es tán compuestos principalmente por papel, cartón y madera; generalmente un 95% de estos aislamientos son papel "Kraft" y cartón ("Press Board").

Los tipos de papel utilizados en transformadores son el Kraft y Crepé con sus variantes, dependiendo del fabricante; el cual los somete a diferentes tratamientos a fin de reforzar determinadas caracterfísticas; entre ellas están la resistencia dieléctrica, resistencia al desgarre, temperaturas de utilización, envejecimiento, etc.

La función principal de los aislamientos sólidos en transformadores es formar una barrera dieléctrica, capaz de soportar la diferencia de potencial a que están sujetas las diferentes partes del equipo, así como mantener el flujo de corriente principal por una trayectoria predeterminada, con el objeto de evitar trayectorias de corriente no deseadas (circuito corto). Para ésto es necesario mantener en óptimas condiciones de operación los aislamientos.

5.9 HUMEDAD EN LOS AISLAMIENTOS SOLIDOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Con los nuevos voltajes de transmisión cada vez más elevados, el secado casi perfecto de los transformadores ha tomado una importancia vital para la instalación y operación de los mismos. El factor importante en el proceso de secado de transformadores es el agua residual permisible en los aislamientos.

El método de secado en fábrica varía según el constructor, siendo los más comunes aire caliente y vacío, vapores calientes y vacío y aceite caliente y vacío. Todos los métodos tienden a reducir la humedad a 0.2% o menos por peso de los aislamientos secos.

La temperatura del transformador se mantiene entre 85 y 95°C no excediendo los 100°C y se aplica un alto vacío de fracciones de mm de Hg, hasta que la humedad que se extrae diariamente (colectada en una trampa de hielo seco a -20°C) es insignificante en relación al agua remanente en el transformador.

Para transformadores de 150 a 300 MVA la cantidad de aislamiento puede alcanzar 10 toneladas, teniendo 15 litros más o menos de agua para una humedad residual de 0.15%; en el proceso final de secado las cantidades de agua extraídas tendrán que ser solo una fracción mínima comparada con los 15 litros residuales.

A continuación se ilustra un método de secado de un transformador moderno en fábrica.

En la primera etapa o presecado se colocan las bobinas previamente prensadas en un tanque especial al cual se le hace un vacío de 20 mm Hg., para prueba de fugas y desalojo de aire, a continuación se inyecta vapor de un solvente especial a una temperatura de 140°C y una presión absoluta entre los 70 y 140 mm Hg., después de estar circulando el vapor y ya que se uniformiza la temperatura entre 120 y 130°C se extrae el vapor disolvente y se hace un vacío de 2 mm de Hg., posteriormente se inyecta aceite aislante hasta cubrir totalmente las bobinas para su impregnación, se desaloja el aceite, se extraen bobinas y se

prensa para dimensiones finales, se procede a ensamblar núcleo-bobinas herraje de sujeción cambiador de taps etc., se introduce en su tanque y se efectúa el secado final dentro de su propio tanque, con circulación de aceite caliente entre 90 y 100°C, y un vacío menor de 1 mm de Hg., como paso final se determina la humedad residual.

La presencia de agua afecta considerablemente la rigidez dieléctrica, tanto del papel como del aceite, disminuyendo ésta hasta límites peligrosos dentro de los esfuerzos a que están sometidos estos materiales, originados por las tensiones de operación de los equipos de que forma parte.

Los efectos sobre las características eléctricas del papel y del aceite se muestran en las gráficas 1 y 2; en la fig. 5.7 se ve la afectación -- del factor de potencia del papel de acuerdo a su contenido de humedad y variación de temperatura; en la fig. 5.6 se ve como varía la rigidez dieléctrica del aceite según el contenido de agua.

Para conocer el estado de los aislamientos se efectúan pruebas eléctricas como medición de resistencia de aislamiento y de factor de potencia y de acuerdo con estos resultados y las tensiones de operación del equipo, se concluye si están en buenas condiciones; estas pruebas dan cierta seguridad en la actuación de los aislamientos ante esfuerzos eléctricos, no siendo así en lo referente a la degradación térmica de los mismos ya que ésta depende de la humedad continua en ellos.

5.10 DETERMINACION DE HUMEDAD RESIDUAL.

Se entiende por humedad residual, la cantidad de agua expresada en % del peso total de los aislamientos sólidos que permanece en ellos al final

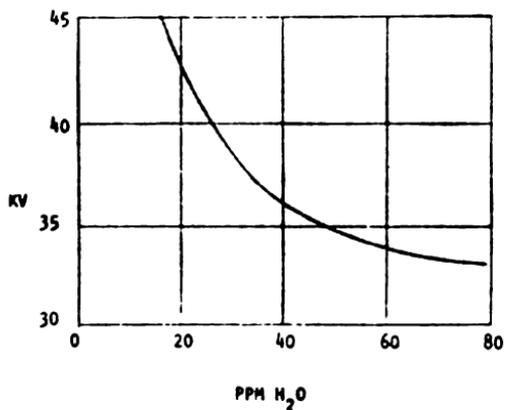


FIG. 5.6 VARIACION DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE AISLANTE CON SU CONTENIDO DE AGUA.

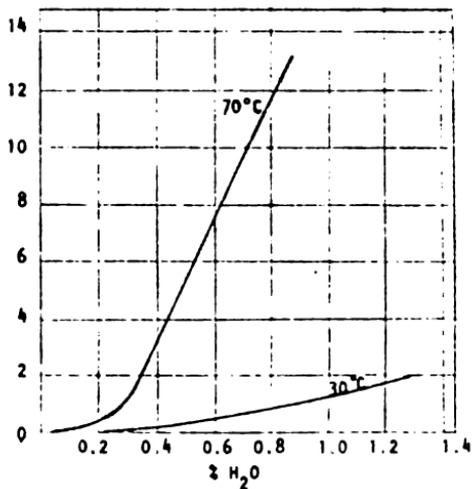


FIG. 5.7 VARIACION DEL FACTOR DE POTENCIA DEL PAPEL KRAFT CON SU CONTENIDO DE AGUA.

de un proceso de secado; actualmente se usan dos métodos: el que determina la humedad residual a partir de la presión de vapor producida por ésta en un medio al vacío (el propio tanque del transformador), y últimamente, la medición del punto de rocío de un gas en contacto con los aislamientos.

METODO DEL ABATIMIENTO DE VACIO.

La presión absoluta dentro de un transformador es originada por el movimiento molecular de un gas, en este caso vapor de agua desprendido por los aislamientos, con la medición de esta presión y la temperatura de los devanados podremos determinar el % de humedad residual contenido en los aislamientos.

PROCEDIMIENTO.

Al terminar el armado total del transformador ya debidamente sellado y comunicados tanque conservador y radiadores, se le extrae todo el aceite y se hace una prueba de presión positiva con nitrógeno a 10 lbs/plg^2 durante 24 horas, de no haber problemas de fugas, se deja a una presión cero.

Se conecta el equipo de vacío y el vacuómetro de mercurio y se procede a efectuar vacío hasta alcanzar un valor estable, durante 4 horas o más.

Con este valor máximo estable se toma una última lectura de vacío, se procede a cerrar la válvula entre el tanque del transformador y el equipo de vacío; se toman lecturas de vacío cada 5 minutos por un lapso de una hora como máximo.

Cuando tres lecturas sucesivas tengan el mismo valor, ésta será la presión de vapor producida por la humedad residual, a la temperatura que se encuentran los devanados del transformador.

En el caso de que las lecturas de vacfo no se estabilicen y se salgan del rango del vacuómetro, tendremos el transformador húmedo o en su defecto con fugas.

Se determina la temperatura de los devanados, preferentemente - por el método de medición de resistencia óhmica.

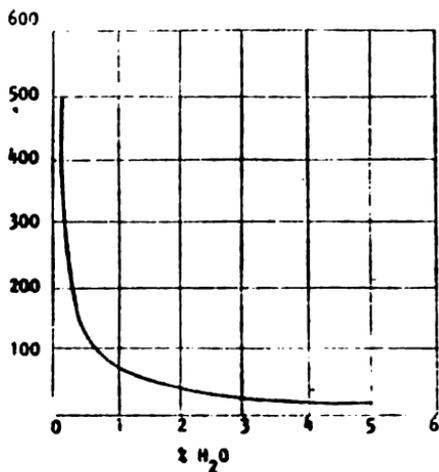
Con los valores de presión de vapor y temperatura se determina - la "HUMEDAD RESIDUAL" de los aislamientos sólidos del transformador, utilizando la fig. 5.8 .

5.11 VALORES MAXIMOS ACEPTABLES DE HUMEDAD RESIDUAL EN AISLAMIENTOS SOLIDOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

La experiencia de grandes fabricantes de transformadores recomien da la necesidad de que el secado de este equipo sea menor de 0.5% de humedad residual. El contenido de humedad de 0.2 a 0.3% es un buen valor de trabajo, humedad residual abajo de 0.1% además de ser una condición difícil de obtener, no es recomendable por los efectos en el papel mismo y la posible pérdida debida del - aislamiento. Se ha demostrado por varios investigadores que el contenido de agua de aislamiento fibroso se equilibra a un nivel gobernado por la presión de vapor y la temperatura del medio aislante la carta de equilibrio de la fig. 5.9 muestra esta relación. Concluyendo tomaremos como norma los siguientes valores de % Hume dad Residual en Transformadores.

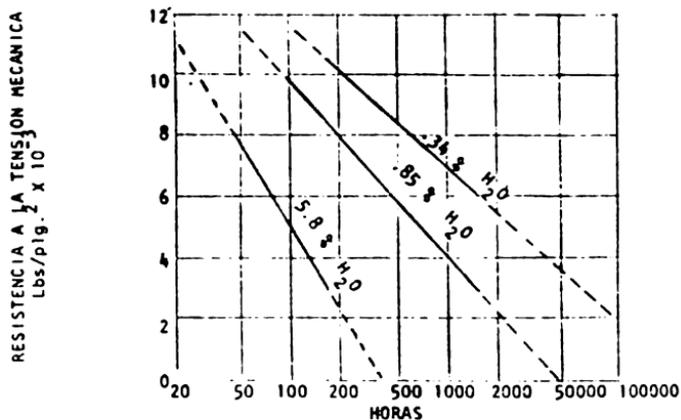
CLASE	HUMEDAD RESIDUAL EN %	
	MINIMO	MAXIMO
69 a 86 KV	0.40	0.50
115 a 151 KV	0.30	0.40
230 a 400 KV	0.20	0.30

HORAS NECESARIAS PARA REDUCIR A 25% LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN MECÁNICA



EFFECTO DE LA HUMEDAD EN EL PAPEL SOMETIDO A ENVEJECIMIENTO A UNA TEMPERATURA DE 150°C

FIG. 5.8



ENVEJECIMIENTO DE PAPEL IMPREGNADO EN ACEITE A UNA TEMPERATURA DE 130°C

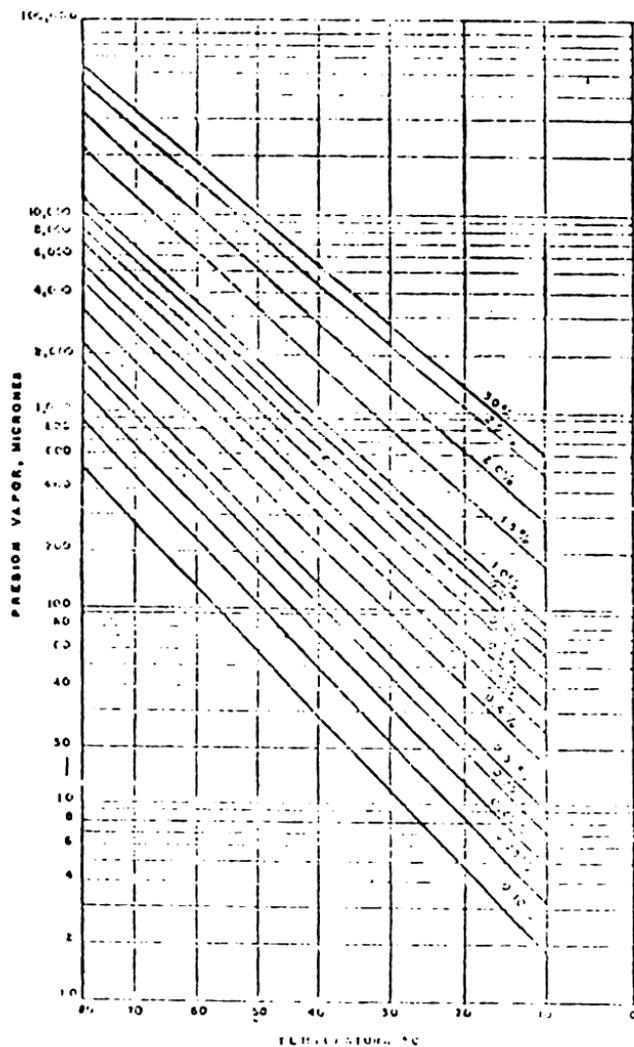


FIG. 5.9 GRÁFICA DE LA RELACION DE TEMPERATURA Y PRESION VAPOR, MICROMERES

5.12 METODO DEL PUNTO DE ROCÍO DEL GAS (NITROGENO O AIRE).

El punto de rocío de un gas es por definición, la temperatura a la cual la humedad presente (vapor de agua contenido en el gas) comienza a condensarse sobre la superficie en contacto con el gas; en base a este valor se puede determinar sobre un volumen conocido la cantidad total de agua contenida en él, así como su humedad relativa. La cantidad de agua en el papel (impregnado) se determina como una función de la humedad relativa del gas con el cual está en contacto cuando está expuesto, hasta alcanzar condiciones de equilibrio.

El procedimiento general consiste en llenar el transformador con un gas seco (aire nitrógeno) de tal manera que después de cierto tiempo se alcance el estado de equilibrio en humedad, se mida el punto de rocío del gas y con este valor determinar la humedad residual en los aislamientos.

Al terminar el armado total del transformador ya debidamente sellado y comunicados tanque sellador y radiadores, se le saca todo el aceite y se procede a efectuar vacío hasta alcanzar 1 mm Hg ó menos y se mantiene en estas condiciones 4 horas.

Al término del tiempo fijado se rompe el vacío con aire ó nitrógeno seco, teniendo cualquiera de ellos un punto de rocío de 45°C ó menos y se presuriza el transformador de 1 a 51b/Pulg² y se -

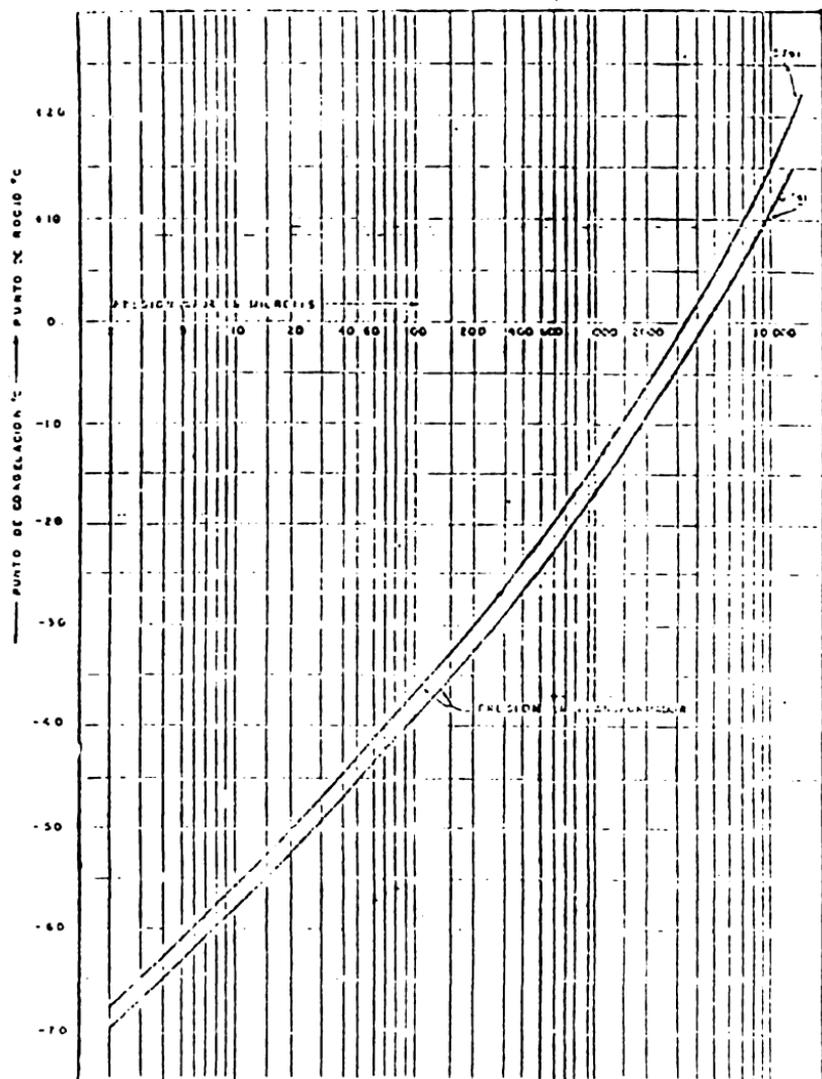
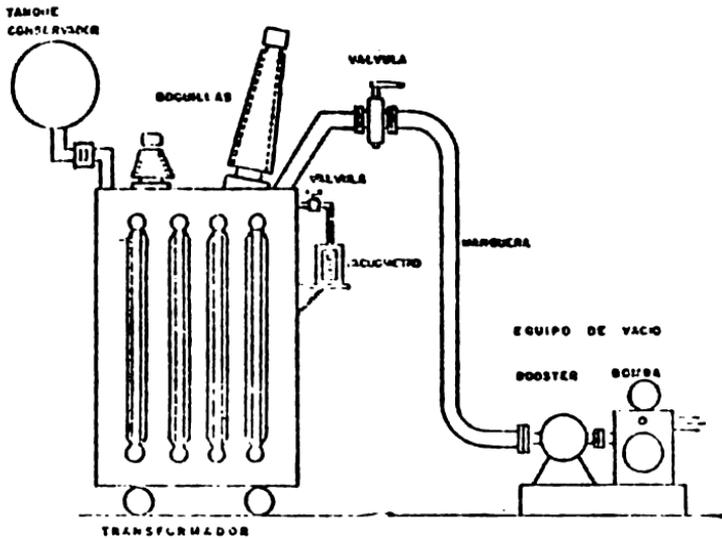


FIG. 5.10 CONVERSION DE PUNTO DE ROCIO A HEDSON VAPOR

mantiene por 24 horas, tiempo suficiente para alcanzar el punto de equilibrio; una vez conseguido se efectúa la medición del punto de rocío del aire o nitrógeno y se determina la temperatura de los devanados preferentemente por el método de medición de resistencia óhmica.

Con el valor del punto de rocío medido y la presión del gas dentro del transformador, se determina la presión de vapor en la gráfica 5.5; asimismo, con la presión de vapor y la temperatura de devanados se determina la humedad residual con la gráfica.

FIGURA 5,11



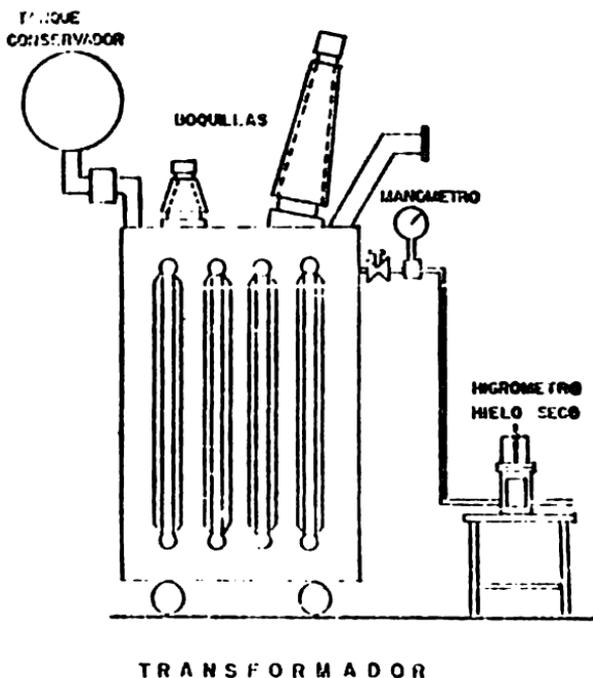


FIG. 5.12 METODO DEL HIGROMETRO DE HIELO SECO.

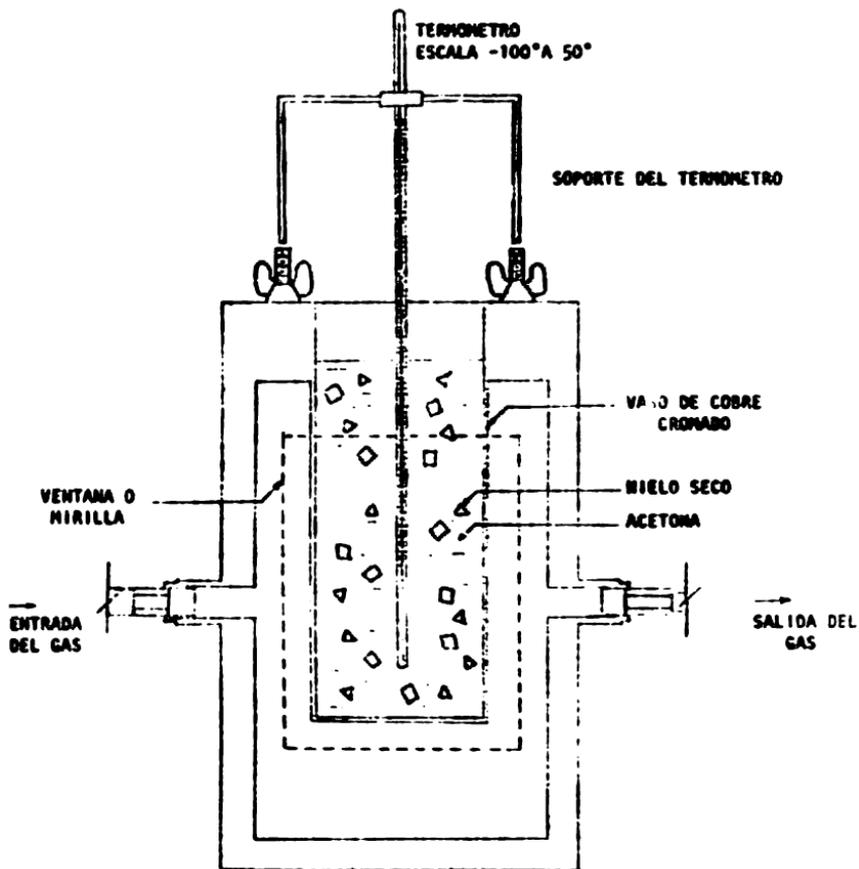


FIG. 5.13 HIGROMETRO DE HIELO SECO.

C A P I T U L O V I

ESTUDIO DE PRUEBAS DE IMPULSO

6.1 ANALISIS DE RESPUESTA A SISTEMAS DE 1er. Y 2do. ORDEN.

El generador de impulsos es considerado como una fuente para producir ondas normalizadas similares a las de $1.2/50 \mu\text{seg}$; los arreglos del circuito para producir una onda de frente oblicuo de $100/1\ 000 \mu\text{seg}$ se pueden hacer a partir de un generador de impulso de multipasos, usando un circuito convencional RC, pero con valores de resistencia más grandes de los que se aplicarían para una onda de $1/50 \mu\text{seg}$.

Los voltajes oscilatorios amortiguados requieren también, simulación de condiciones de conmutación y para generar estas ondas se requiere agregar una inductancia al circuito.

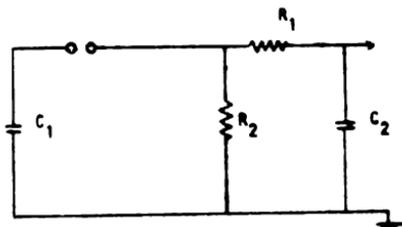


FIG. 6.1

Un caso típico de ondas oscilatorias es el mostrado en la figura siguiente, con el cual se producen oscilaciones amortiguadas de 835 ----

ciclos/seg con voltaje cresta hasta de 300 KV.

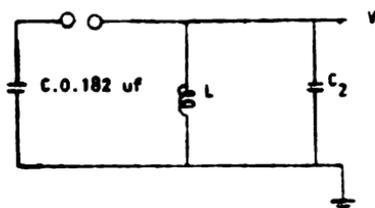


FIG. 6.2

Este circuito tiene la desventaja de que el voltaje de prueba se eleva a su valor de cresta muy rápido y únicamente, hasta entonces, inicia el cambio a una forma oscilatoria; para suavizar el elevamiento inicial, se inserta una resistencia adicional y aunque la onda de salida no es la ideal $V = E_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t)$ esto hace una aproximación mejor y el circuito queda de esta manera:

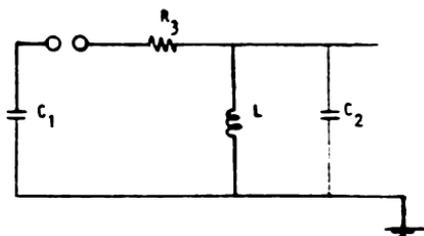


FIG. 6.3

La onda normalizada de prueba de $1.2/50 \mu sec$ ha sido utilizada considerando que la principal causa de sobrevoltaje en el equipo eléctrico son las descargas atmosféricas, sin embargo, en los últimos años los sobrevoltajes por operaciones de maniobra se han incrementado. No ha sido normalizada una

forma de onda que determine la capacidad de un equipo para soportar sobrevoltajes por conmutación, en este caso la prueba se basa en una onda de 1.2/50 μ seg y la capacidad para soportar sobrevoltajes se ha estimado entre el 75 y el 85% del 1.2/50 μ seg antes mencionadas.

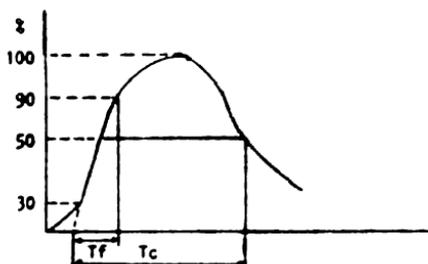


FIG. 6.4 Onda normalizada de 1.2/50 μ seg.

La onda de descarga atmosférica, es casi siempre unidireccional y su forma puede ser representada como:

$$e = e_0 (e^{-at} - e^{-bt})$$

de esta ecuación se puede deducir que también es una onda de impulso y está formada por dos componentes V_1 y V_2 como se muestra en la figura siguiente.

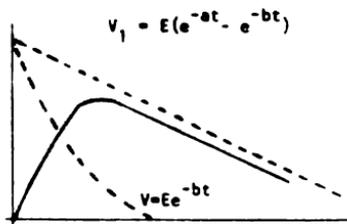
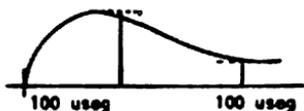


FIG. 6.5

La componente $V_1 = Ee^{-at}$ se puede obtener fácilmente descargando un condensador cargado a un voltaje E , a través de una resistencia por medio de unos explosores al producir el arco entre ellos.



$$V_1 = E e^{-at}$$

donde:

$$a = \frac{1}{C_1 R_1}$$

y la cola de la onda está dada por:

$$V_1 = \frac{1}{2} = e^{-at_c}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-t_c / C_1 R_2}$$

o también

$$\ln \frac{1}{2} = -t_c / C_1 R_2$$

$$-0.69 = -t_c / C_1 R_2$$

$$t_c = 0.69 C_1 R_2$$

Para obtener la componente $V_2 = E e^{-bt}$ se procede de manera similar y la resta de la primera componente puede ser innecesaria. Añadiendo un circuito RC, el frente de la onda puede ser disminuido obteniendo la onda deseada. Fig. 6.6 a

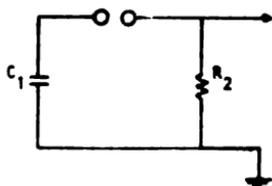


FIG. 6.6 a

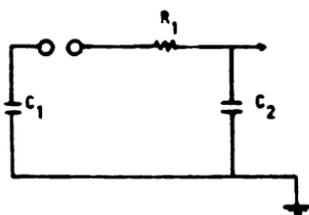


FIG. 6.6 b

El tiempo del frente de onda se obtiene considerando la resis-

tencia de la cola de onda R_2 que produce un pequeño efecto en el periodo inicial y el circuito equivalente se muestra en la Fig. 6.6 b.

Si el condensador C_2 está inicialmente descargado el voltaje V es:

$$V = E \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 - e^{-\left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R_1}\right)t} \right]$$

V se eleva con el valor asintótico de $E \frac{C_1}{C_1 + C_2}$ con una constante de tiempo $\frac{C_1 C_2 R_1}{C_1 + C_2}$

En generadores de impulso contruifdos con frente de onda resistiva es común observar que la cola de la resistencia ha sido reemplazada sobre el otro lado de R_1 , como muestra la figura:

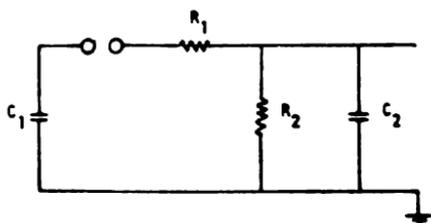


FIG. 6.7

podemos sustituir el circuito anterior por su equivalente:

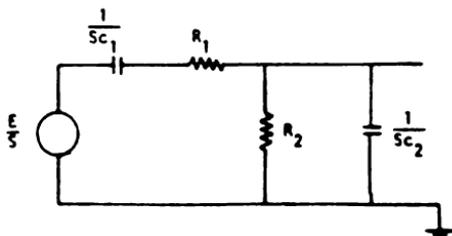


FIG. 6.8

La ecuación del circuito es de la forma:

$$V(s) = \frac{E}{S} \frac{(R_2 / SC_2) / (R_2 + 1/SC_1)}{(R_2/SC_2) / (R_2 + 1/SC_2) + R_1 + 1/SC_1}$$

$$= \frac{E}{S} \frac{R_2 / SC_2}{R_2 / SC_2 + (R_1 + 1/SC_1) R_2 + 1/SC_2}$$

$$= \frac{E}{S} \frac{R_2}{R_2 + R_1 R_2 SC_2 + R_1 + \frac{R_2 SC_2}{SC_1} + \frac{1}{SC_1}}$$

$$V(S) = E \frac{R_2 C_1}{S^2 (R_1 C_1 R_2 C_2) + S (R_1 C_1) + R_2 (2 + R_2 C_1 + 1)}$$

Para resolver esta ecuación consideramos:

$$B = \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \quad \text{y} \quad C = \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}$$

entonces:

$$V(S) = \frac{E}{R_1 C_2 + S_2 + bs C}$$

Si las raíces de $S^2 + Bs + C$ son $-a$ y $-b$, entonces.

$$\frac{1}{S^2 + bs + C} = \frac{A}{(S + a)} + \frac{B}{s + b}$$

->I^-

por lo tanto, aplicando Laplace:

$$A = \frac{1}{b-a} \quad \text{y} \quad B = -\frac{1}{b-a}$$

quedando la ecuación de la forma siguiente:

$$V(s) = \frac{E}{R_1 R_2} \left[\frac{1}{(s+a)(b-a)} - \frac{1}{(s+b)(b-a)} \right]$$

obteniendo la transformada inversa:

$$V(t) = \frac{E}{(R_1 R_2)(b-a)} \left[e^{-at} - e^{-bt} \right]$$

el voltaje de cresta ocurre cuando:

$$\frac{dV(t)}{dt} = 0$$

y ello sucede, cuando:

$$ae^{-atc} = be^{-btc}$$

$$\frac{a}{b} = e^{(a-b)tc} \quad \text{o sea,} \quad \ln \frac{a}{b} = (a-b)tc$$

es decir:

$$tc = \frac{\ln a/b}{a-b}$$

la eficiencia del voltaje en el circuito la podemos definir como:

$$\eta = \frac{V_{\text{cresta}}}{E}$$

$$= \frac{1}{E} \frac{E}{(R_1 R_2)(b-a)} \left[e^{-atc} - e^{-btc} \right]$$

esto es:

$$\eta = \frac{1}{(R_1 R_2)(b-a)} \left[e^{-atc} - e^{-btc} \right]$$

6.2 ESTUDIO DE LA 3a. Y 5a. ARMONICA.

De acuerdo con la Ley del Circuito Eléctrico $\phi = i_{ou} N_1 / R_u$, -- donde $i_{ou} N_1$ es la fuerza magnetizante creada por la corriente de magnetización i_{ou} y R_u es la reluctancia del núcleo formado por la resistencia del -- acero y la resistencia en las juntas del núcleo, la forma de la curva de la -- corriente y su amplitud dependen del grado de saturación del acero. En la figura 6.9 se traza la curva de la corriente de magnetización $i_{ou} = f(t)$ según -- la curva magnetizante media para el acero al silicio; en la curva sinusoidal de inducción abcd el punto b corresponde a la inducción $B_m = 1$ henry y el punto c a la inducción máxima ($B_m = 1.45$ My).

Cuando el flujo es senoidal la corriente en vacío del transformador con núcleo saturado no es senoidal y puede ser descompuesta en una serie de armónicos, como la curva es simétrica respecto al eje de las abscisas esta serie solo contiene armónicos de orden impar: primero, tercero, quinto, etc. El primer armónico de la corriente de magnetización coincide en fase con el flujo principal y, por lo tanto, está retrazada 90° de la tensión primaria; el armónico superior más notable es el tercero. La influencia de armónicos superiores, no se toma en cuenta pues son más débiles que el tercero.

Conociendo las amplitudes de los armónicos de la curva de corriente en vacío podemos determinar el valor eficaz de esta corriente por la siguiente fórmula:

$$i_{ou} = \sqrt{\frac{(I_m 1)^2}{2} + \frac{(I_m 2)^2}{2} + \frac{(I_m 3)^2}{2} + \dots}$$

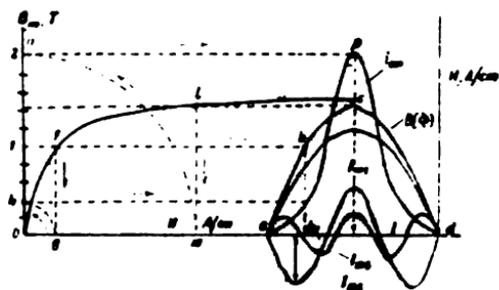


FIG. 6.9 TRAZADO DE LA CURVA $i_{cu}=f(t)$ Y SU DESCOMPOSICION EN ARMONICOS FUNDAMENTALES Y SUPERIORES.

La presencia del tercer armónico en la curva de la corriente en vacío deforma la curva de flujo magnético. La figura 6.10 representa las curvas de flujo Φ y de la corriente i_0 en el caso de que exista el tercer armónico (a) y sin él (b), en el primer caso la curva es senoidal: la desaparición del tercer armónico puede ser representada como la superposición de la curva de este armónico sobre la curva de corriente pero en dirección con traria. Como cada fase del transformador tiene un sistema magnético individual, el flujo magnético Φ_3 se cierra por el mismo trayecto que el flujo Φ_1 , es decir, por el camino que tiene poca reluctancia, por eso en un grupo trifásico la magnitud del flujo Φ_3 constituye, en ciertos casos, del 15 al 20% del flujo Φ_1 , cuando el tercer armónico del flujo Φ_3 está bruscamente expresado, la curva del flujo resultante Φ adquiere la forma de silla.

El flujo Φ_3 induce las fuerzas electromotrices e_{13} y e_{23} en el primario y secundario del transformador y debido a que varía con una frecuencia $F_3 = 3f$, las fuerzas electromotrices de triple frecuencia inducidas por éste alcanzan del 45 al 60% de las fuerzas electromotrices e_1 y e_2 , como se observa al comparar las curvas de estas fuerzas, las amplitudes de los ar mónicos se adicionan, elevando en el mismo desde el 45 al 60% del valor máxi

mo de la fuerza electromotriz de fase y del 10 al 17% su valor eficaz, lo cual es indeseable y hasta peligroso, por ello en los transformadores de gran potencial y tensión elevada la conexión Y - Y no se utiliza.

A pesar de la brusca variación que sufren las curvas de tensión de fase, las tensiones de línea permanecen senoidales ya que al conectar en estrella los devanados, desaparecen los terceros armónicos de las fuerzas electromotrices en las tensiones de línea.

Los flujos de tercer armónico, cerrándose por el aire, pulsan con una frecuencia de $3f$ y tienden a circular por el camino de menor resistencia, o sea, a través de las paredes de la cuba, como resultado de ello aparecen en los componentes las corrientes parásitas que provocan calentamientos locales y reducen la eficiencia del transformador.

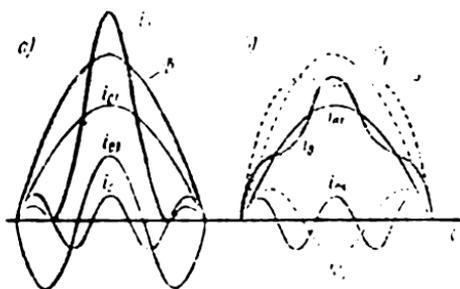


FIG. 6.10

Curvas de corriente i_0 y flujo Φ , (a) con presencia del tercer armónico en la curva de corriente i_0 , (b) con ausencia del tercer armónico.

6.3 PRUEBAS DE IMPULSO A TRANSFORMADORES.

Se reconoce que el aislamiento es una de las partes más importantes de construcción en los elementos de un transformador. Es una función que determina o confina la corriente a las partes útiles, previniendo sobrecargas en las líneas. Una debilidad en el aislamiento pueden ocasionar fallas en el transformador, una medida efectiva es que el aislamiento soporte esfuerzos dieléctricos, es entonces cuando las pruebas de baja frecuencia se aceptan como las adecuadas para demostrar el esfuerzo dieléctrico del transformador. Entonces la distribución de esfuerzos de voltaje de impulso a través de los embobinados del transformador es muy diferente de la distribución de voltaje de baja frecuencia.

La distribución de voltaje de baja frecuencia dentro del mismo devanado en un voltaje por vuelta uniforme, tiene el voltaje de impulso inicialmente distribuido en la base capacitiva del devanado, si esta distribución inicial difiere de la final por la distribución inductiva de baja frecuencia, el impulso de energía oscilará entre estas dos distribuciones hasta que la energía sea disipada y la distribución inductiva se desvanezca. En casos severos esta oscilación interna puede producir voltajes a tierra al doble del voltaje aplicado.

Los niveles de impulso, nominados como Niveles Básicos de aislamiento (BIL) fueron establecidos en 1937 por AIEE-NEMA. A través del uso de estos BIL's, han sido especificados aparatos, en la base de demostrar que el esfuerzo de aislamiento en el equipo debe ser igual o mayor al nivel básico seleccionado y el equipo protector puede seleccionarse provisto de una proteg

ción adecuada.

FORMA DE ONDA DE IMPULSO.

Las pruebas de impulso se llevan a cabo con formas de ondas - similares a las que están sometidos los transformadores en servicio.

De los datos compilados por AIEE-NEMA, se concluyó que las -- perturbaciones de los sistemas de iluminación puede representarse por tres - formas básicas de onda, la figura 6.11 representa estas tres ondas en su mag nitud aproximada y tiempo.

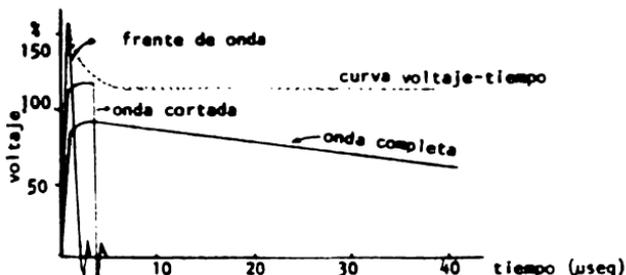


FIG. 6.11

Se aclara que las perturbaciones atmosféricas no siempre ten-- drán estas formas básicas de onda. De cualquier modo, para definir la amplitud y la forma de estas ondas, es posible establecer un esfuerzo mínimo de impulso dieléctrico adecuado al transformador. Una curva puede graficarse a través de los puntos establecidos por la amplitud y la duración normal de cada onda. Para los frentes de onda y onda cortada, los puntos deben ser localizados en la intersección de una línea vertical dibujada en el tiempo de corte y una línea

horizontal dibujada atravesando la cresta en su pico, para la onda completa, la línea vertical puede ser localizada en el tiempo evaluado. Esta curva se refiere a la curva de voltaje-tiempo de la composición de la estructura de aislamiento del transformador.

Las pruebas demostrarán que el aislamiento deberá soportar los impulsos, los cuales estarán bajo la curva voltaje-tiempo. Si una perturbación atmosférica viaja alguna distancia a través de la línea, alcanzará al transformador con una forma de onda aproximada a la mostrada en la curva "a" de la figura, esta es una onda que parte de cero y alcanza su valor de cresta en 1.2 μ seg y entonces decae de la cresta de 50 μ seg, generalmente se refiere como onda de 1.2×50 . La parte de la onda entre cero y la cresta se llama el frente y la parte posterior a la cresta se llama cola.

Una onda que viaja a través de la línea y ocasiona un fuerte arqueo (descarga) en el aislamiento, la cresta de la onda será alcanzada después. Esta onda es simulada por la onda cortada la cual se corta al 15% de la máxima magnitud de la onda completa y se muestra en la curva "b" de la figura.

Si una severa descarga golpea directamente en o muy cerca a una terminal, el voltaje crece súbitamente hasta alcanzar su pico donde es liberado por un arqueo, causando un corte súbito de voltaje, lo cual se presenta por la curva "c" en su frente de onda.

Como puede verse en la figura 6.11 las tres ondas son diferentes en duración y relación de voltaje de pico y caída de voltaje, y consecuentemente producen diferentes reacciones en el devanado del transformador. La onda ---

completa, porque es de larga duración, causa mayores oscilaciones que afectarán al devanado y consecuentes esfuerzos no solo de vuelta a vuelta y sección a sección - del aislamiento, sino a través y fuera del embobinado, pero desarrollará relativamente altos voltajes comparados al esfuerzo de la potencia de la frecuencia, a través de varias secciones del devanado y entre devanado y tierra (núcleo o devanados adyacentes).

La onda cortada, como es de corta duración no permite mayor oscilación para desarrollarse completamente y no se produce como alto voltaje a través de grandes porciones de los devanados o entre el devanado y tierra. Sin embargo, estas grandes amplitudes producen altos voltajes al final de la línea del devanado y debido al rápido cambio de voltaje sigue el arqueado produciendo esfuerzos de vuelta a vuelta y de sección a sección.

El frente de onda es pequeño en duración y produce bajos voltajes de devanado a tierra, dentro del devanado. Cerca de la terminal de línea, sin embargo, la mayor amplitud produce altos voltajes del devanado a tierra y ésta combinación con el cambio rápido de voltaje y siguiendo el arqueado produce altos voltajes de vuelta a vuelta y sección a sección, cerca del fin de la línea.

CIRCUITO DE PRUEBAS DE IMPULSO.

Las ondas de impulso están generadas por un dispositivo que carga a un grupo de capacitores en paralelo, y entonces se descargan en serie. La magnitud del voltaje está determinada por la carga inicial del voltaje, el número de capacitores en serie a la descarga y la regulación de circuito. La forma de onda está determinada en su mayor parte por la constante del generador y la impedancia de la carga.

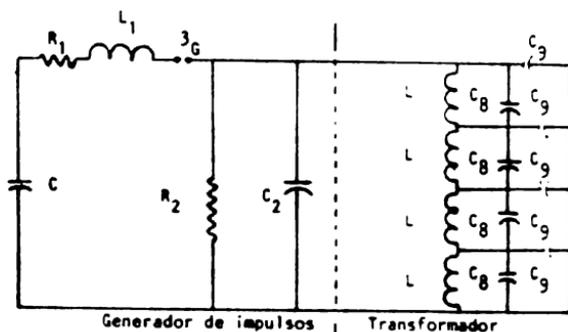


FIG. 6.12 CIRCUITO DE IMPULSO.

La impedancia del transformador puede ser representada por una malla de inductancias e impedancias. La figura 6.13 representa el circuito equivalente de un transformador y de un generador de impulsos típico. La impedancia total entre la terminal impulsada del transformador y tierra, se llamará impedancia efectiva.

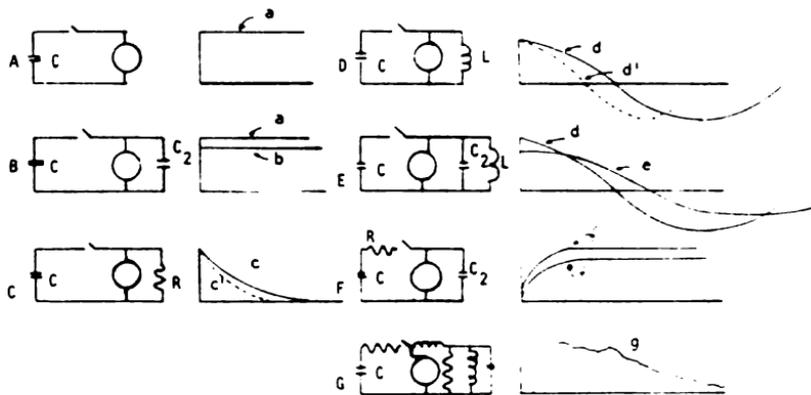


FIG. 6.13 ONDAS DE IMPULSO DESDE CIRCUITOS SIMPLES.

MEDIDAS DE VOLTAJE DE IMPULSO

Para medir la amplitud y forma de la onda aplicada, la cual tiene un rango de valores de 30 a más de 2000 KV de cresta y 1.2 a 250 μ seg de duración, un equipo especial se deberá usar, oscilógrafos con alta velocidad de escritura y buena exactitud y respuesta adecuada de extremadamente rápidos transitorios requeridos. Un circuito típico de prueba de impulso incluyendo divisor y oscilógrafo se muestra en la figura 6.14 .

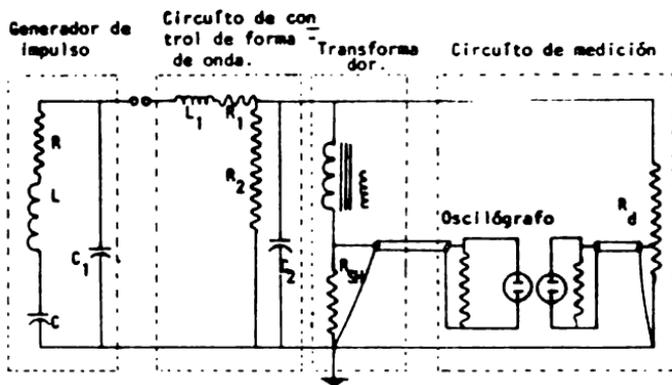


FIG. 6.14 CIRCUITO DE IMPULSO Y TRANSFORMADOR.

Porque el oscilógrafo normalmente usado tiene una relación de voltaje de pocos cientos de volts se deben usar divisores para reducir los impulsos altos de voltaje a valores que puedan aplicarse al oscilógrafo, la amplitud de la onda resultante deberá ser lo suficientemente grande y el foco del trazado lo más fino posible tal que la desviación de forma de onda de dos o tres % del valor de cresta sea discernible.

Generalmente hay tres tipos básicos de divisores que están disponibles para pruebas de impulso. Ellos son resistencias, capacitancias y compensadores. Como el nombre implica, el divisor de resistencia utiliza el principio de que el voltaje a través de un resistor varía directamente como la resistencia, mientras que el divisor de capacitancia, el voltaje varía inversamente como la capacitancia. Los divisores compensados son una combinación de resistencias, capacitancias y algunas veces inductancias.

El divisor, el cual debe estar localizado cerca del dispositivo bajo prueba, está conectado por un cable blindado al oscilógrafo, el cual está alejado. Cuando el cable está propiamente terminado al oscilógrafo, el voltaje aplicado al cable está reproducido exactamente en tiempo y magnitud por el oscilógrafo. -- Cuando son usados cables largos de altas pérdidas hay atenuaciones.

El oscilógrafo utiliza un haz de electrones que es deflexionado por dos pares de placas. El total de deflexión es proporcional al voltaje aplicado a las placas y la dirección de deflexión está controlado por la polaridad del voltaje aplicado. Un par de placas es usado por el barrido del haz en la dirección por la cual está asociada generalmente con el tiempo del oscilograma. La figura 6.15 muestra dos placas deflectoras. El haz de polaridad negativa barrerá de la posición cero a la derecha cuando un voltaje con polaridad indicada se aplica a las placas X. Cuando el voltaje indicado es aplicado a las placas Y, el haz se moverá de 0 a la parte superior de las placas de la figura. Este par de placas está asociado con el voltaje a medir, la relación a la cual el barrido del haz en la dirección del tiempo es una función de la forma de onda de voltaje aplicada a las placas X. Esta relación es generalmente lineal o logarítmica y depende del diseño del oscilógrafo.

La consistencia de la velocidad del barrido es importante, tal que fuera de la cola de la onda una comparación entre ondas puede asociarse. A este respecto los oscilógrafos con barridos lineales se prefieren, puesto que las ondas empiezan en varias posiciones en el oscilograma, donde tendrán la misma separación horizontal. Debido a las diferentes formas de onda de impulso que deben ser grabadas, un número de velocidades de barrido están contruidos dentro del oscilógrafo.

Los barridos recomendados dentro de las diferentes formas de onda son:

	RANGO DE BARRIDO	IDENTIFICACION
Voltaje de frente de onda	2 a 5 us	FOWV
Voltaje de onda cortada	5 a 10 us	CWV
Voltaje de onda completa reducida	50 a 70 us	RFWV
Voltaje de onda completa	50 a 70 us	FWV
Corriente de onda completa reducida	150 a 300 us	RFWV
Corriente de onda completa	150 a 300 us	FWC

En párrafos anteriores se ha establecido que en la tensión de onda completa de vuelta a vuelta y el aislamiento del devanado, el esfuerzo está afectado por la pendiente del frente de onda y no necesariamente por el tiempo de cresta. La figura 6.16 muestra una onda completa, el tiempo $t_2 - t_0$ es el tiempo a la cresta pero la relación de elevación de la onda que causa el esfuerzo es $E/(t_1 - t_0)$, donde E es determinado por el diagrama a través del promedio de la curva de la onda irregular.

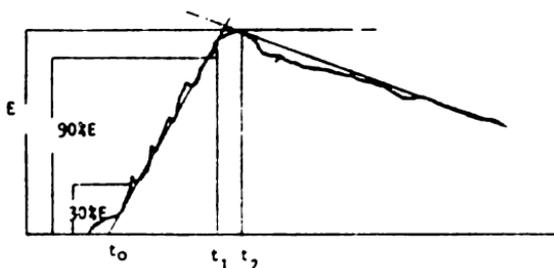


FIG. 6.16 MEDICION DE FRENTE DE ONDA COMPLETA.

El mismo razonamiento aplicado a la escala de las pruebas de frente de onda es derivado de la pendiente de la onda. En la figura 6.17 la relación de elevación es $E/(t_1 - t_0)$ y no $E/(t_2 - t_0)$. El tiempo de corte o de arqueo es $t_2 - t_0$. En casos donde la capacitancia del transformador es grande la onda se acercará a la cresta y se efectuará el corte de la onda.

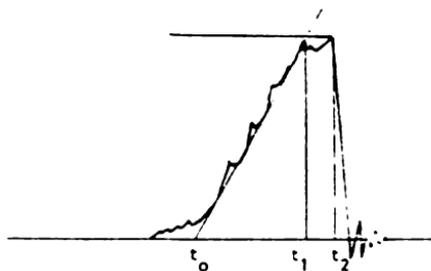


FIG. 6.17 MEDICION DE FRENTE DE ONDA.

Los flujos de corriente en el circuito de impulso generalmente son un poco grandes y tienen altas relaciones de cambio (d_i/d_t), consecuentemente exist

te una caída de voltaje entre los puntos conectados por un conductor a través del cual fluye una corriente de impulso, porque es difícil abarcar dos puntos diferentes al mismo potencial o, establecer otra forma para tener dos puntos diferentes a potencial tierra.

La diferencia en voltaje entre dos puntos dependerá de la longitud de la guía interconectada y la relación de cambio de la corriente fluyente en la misma. La diferencia de voltaje puede ser sustancial por ejemplo, si un cambio de corriente a una relación de 1000 amp/ μ seg, fluye a través de un alambre de 3 m de largo las dos terminales del alambre difieren en voltaje por 3000 o 4000 volts. - Esto no es del todo usual para el circuito ordinario. Debido a esto los circuitos de impulso deben ser cuidadosamente arreglados. Esto es particularmente válido en los circuitos usados por las pruebas de frente de onda.

En la figura 6.18, el voltaje medido por el divisor es entre los puntos A y B. La trayectoria de la corriente principal está indicada por líneas gruesas. En los frentes de onda completa y de onda cortada, la caída de voltaje entre B y C es generalmente imperceptible y la corriente capacitiva al cuarto de control es también pequeña. En los frentes de onda la caída a través de BC depende de la corriente capacitiva que fluye a través del transformador y la inductancia de la guía BC. La corriente capacitiva para grandes KVA, en devanados de bajo voltaje pueden producir una caída de voltaje a través de la inductancia principal que deberá ser casi del 25% del voltaje total medido por el divisor de voltaje. Para eliminar la caída de voltaje BC deberá conectarse al punto C como se indica en la figura 6.19 y el conductor de regreso del transformador deberá dirigirse directamente al fondo del generador de impulso. La diferencia de potencial entre el

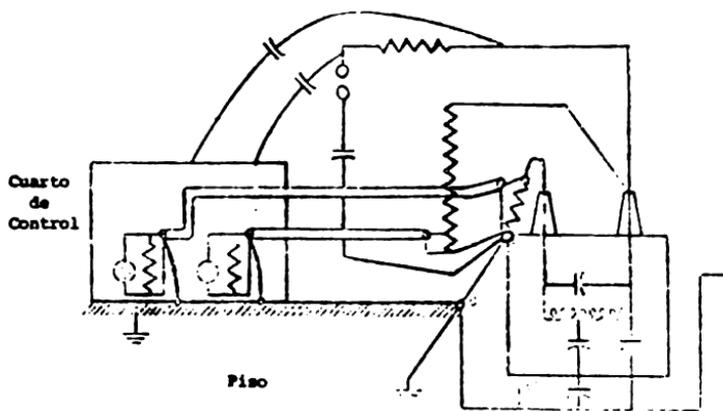


FIG. 6.18 METODO DE ATERRIZAJE.

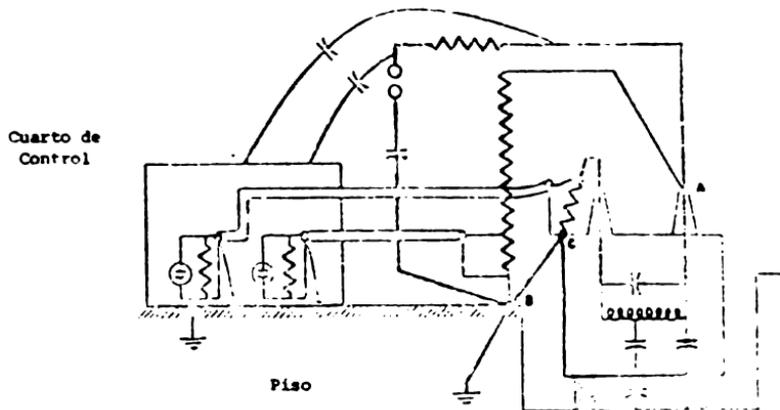
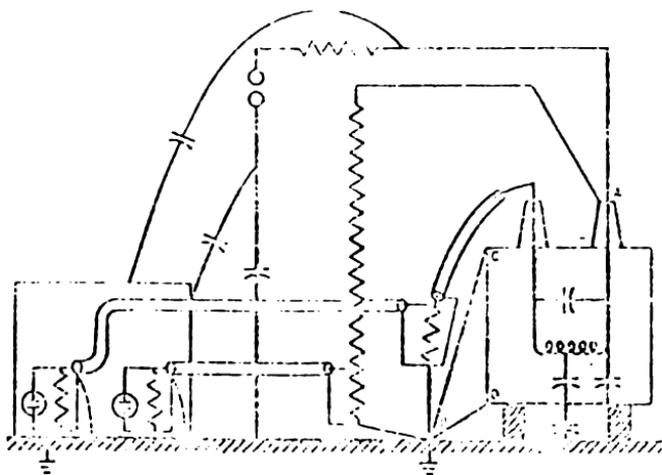
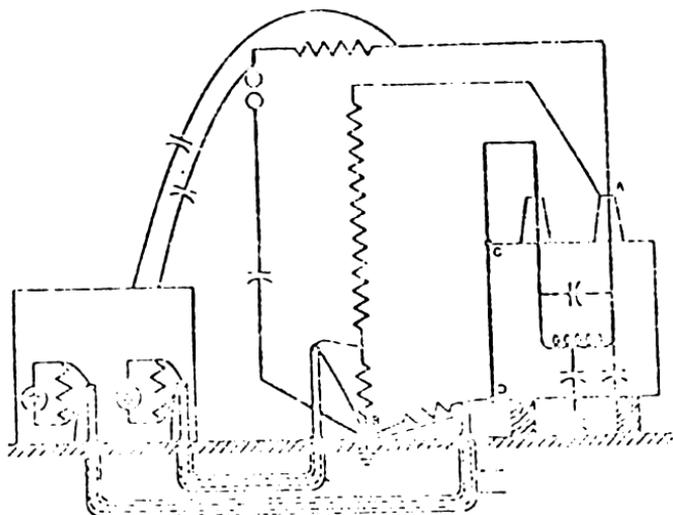


FIG. 6.19 METODO DE ATERRIZAJE PREFERIDO.



Aterrizando con el generador a tierra.



Aterrizando con el método "Línea de corriente".

cuarto de control y el oscilógrafo depende de la magnitud y relación de cambio de la corriente, sin embargo, es práctica común aterrizar el oscilógrafo al cuarto de control para seguridad personal y no causar disturbios. Para minimizar estos efectos el conductor BC deberá ser lo más corto posible. En casos severos una multiplicidad de conductores deberá ir de B a C.

DETECCION DE FALLAS.

Una de las fases más importantes de la prueba de impulso es la detección de fallas, no hay un método definido y disponible, pero la experiencia de operación en unidades probadas han demostrado que una combinación de todos los métodos, la detección de fallas es segura, de todos esos métodos el oscilograma de rayos catódicos es el más efectivo.

La detección por oscilogramas de rayos catódicos están basados en la premisa de que una falla de aislamiento cambiará la impedancia. Este cambio -- causará variaciones en flujo de corriente impulsada a lo largo del devanado y en el voltaje medido a través del devanado. Para detectar las variaciones de corriente es necesario tener los oscilogramas de corriente, estos son obtenidos por la medición de caída de voltaje a través de una derivación conectada entre la terminal de tierra del embobinado impulsado y tierra.

Hay tres técnicas principales de prueba, ellas son:

- 1.- Conexión de terminales no impulsadas.
- 2.- Devanados de baja impedancia.
- 3.- Uso de capacitores a través de corrientes derivadas.

CONEXION DE TERMINALES NO IMPULSADAS.

Las terminales del devanado que no será probado, deberán conectarse a tierra o a través de una resistencia a fin de limitar el voltaje inducido en estos devanados. Es deseable que los voltajes en las terminales que no están bajo prueba no excedan del 80% del voltaje de onda completa para esta clase de voltaje. Tres alternativas se usan para complementar este párrafo.

Alternativa 1.- Todas las terminales de los embobinados, excepto las que serán probadas están aterrizadas.

Alternativa 2.- Una terminal de cada devanado que no será probado, está aterrizada a través de una resistencia. La otra terminal está aterrizada directamente o a través de una resistencia o bien aislada.

Alternativa 3.- Todas las terminales de los devanados, excepto la terminal bajo prueba, están aterrizadas a menos que la cola de onda obtenible sea menor de 50 μ seg. En este caso, resistencias en serie se conectarán en alguno o todos los conductores de los devanados que no sean probados.

La alternativa 1 es la más simple y se reduce el tiempo y labor requerido por la prueba de impulso y elimina cuestiones de valor de resistencia a usarse. La alternativa 2 provee una longitud máxima de cola de onda debido a efectos de los devanados en corto circuito y reduce la impedancia efectiva del transformador cuando se utiliza la alternativa 1. Sin embargo, para transformadores con baja impedancia la diferencia en cola de onda es solo de unos pocos μ segs.

La experiencia ha demostrado que la detección sensible de fallas se obtiene con cualquiera de las 3 alternativas.

EMBOBINADOS DE BAJA IMPEDANCIA.

Los métodos son:

- a) Conectar juntas todas las terminales del mismo BIL en el embobinado.
- b) Insertar una resistencia de no más de 500 Ω en la terminal de tierra.
- c) Aceptando la menor longitud de la cola de la onda.

Método 1.- Conectando las terminales juntas se produce un gran esfuerzo en el aislamiento del embobinado a tierra, y un esfuerzo continuo bastante bajo de vuelta a vuelta es primeramente una función de la capacitancia desde una terminal del embobinado a la otra y la capacitancia a tierra, esto se puede visualizar mejor con un ejemplo.

Representando las constantes de un transformador por medio del circuito de la figura 6.20 a. La capacitancia (capacitancias desde una terminal del embobinado a la otra) a través del transformador, es representada por C_1 y C_2 y la capacitancia a tierra por C_3 , L_1 y L_2 son la inductancia del transformador. Si las capacitancias C_1 y C_2 son grandes con respecto a la capacitancia de tierra una distribución inicial similar a la curva X de la figura 6.20 b resultará. Entonces la distribución final es la línea X el desarrollo de la oscilación será entre las curvas XX'. Este ejemplo demuestra un bajo esfuerzo de vuelta a vuelta y grande a través del embobinado. Si la capacitancia es pequeña comparada con la capacitancia

a tierra una distribución inicial similar a la curva Z de la misma figura. La -- misma línea de distribución final será la Y y entonces el desarrollo de la oscilación será entre las curvas Z y Z'. Esto produce un gran esfuerzo vuelta a vuelta y del aislamiento a tierra. Las objeciones para usar este método de prueba para transformadores teniendo el parámetro y las relaciones entre sí asumidas es que las partes del embobinado puedan oscilar al 200% del voltaje aplicado. Probando - en esta forma para relaciones entre sí de capacitancia en particular no se justifica ya que en servicio una variación es raramente aplicada en ambas terminales.

Este método de prueba no es aplicable a mediciones de corriente a tierra, ya que solo la corriente capacitiva del embobinado bajo prueba al tanque y otros embobinados pueden ser medidos.

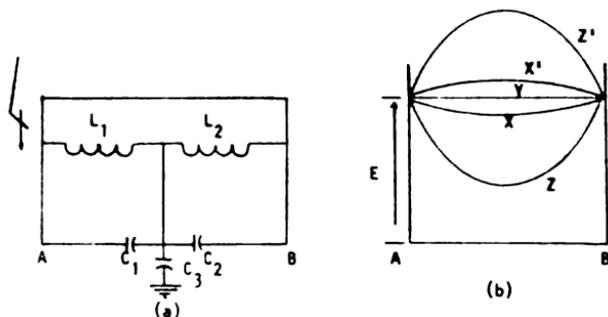


FIG. 6.20 DEVANADOS DE BAJA IMPEDANCIA CON TERMINALES CONECTADAS JUNTAS.

Método 2.- Insertando una resistencia en la terminal de tierra del embobinado lo cual producirá diferentes esfuerzos de vuelta a vuelta que en el método 1. El cambio en esfuerzos es una función de la constante del embobinado. En la figura 6.21 a, el diagrama equivalente típico del transformador con una terminal del embobinado aterrizada a través de una resistencia como se muestra. Si las capacitancias son extremadamente grandes comparada con la capacitancia de tierra, resulta una distribución similar a la curva P en la figura 6.21 b. La distribución final debe ser similar a la línea Q donde todo o casi todo el voltaje pasa a través de la resistencia. Cuando la capacitancia de tierra es grande comparada con la capacitancia del circuito existe una distribución similar a la curva S de la figura 6.21 b. La oscilación se produce entre S y S'. Siempre que esto sea posible para producir un voltaje excesivamente alto a tierra en los componentes del embobinado. Es práctica general insertar una sola resistencia para producir una cola de 50 μ seg y la aparición de voltaje a través de la resistencia es usualmente limitado a no más del 80% del BIL de la terminal a tierra del embobinado. Si en el último ejemplo la resistencia requerida para producir la cola de 50 μ seg, es pequeña, la línea de distribución final es la curva Q y la envolvente de la oscilación está entre S y S'. Obviamente la longitud de la cola y el voltaje a través de la resistencia debe medirse para determinar el valor de la resistencia que debe usarse.

Este método de prueba aplicado a ondas de 50 μ seg al aislamiento de la terminal de línea es aplicable para medición de corriente de tierra, pero la resistencia puede reducir la sensibilidad para detectar fallas significativamente.

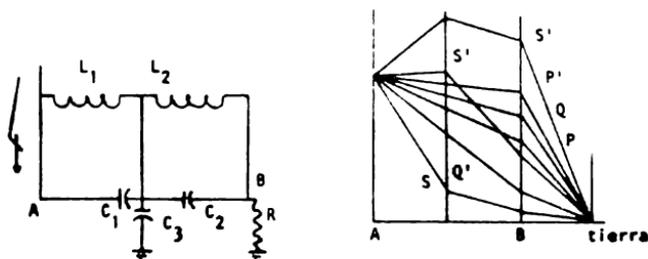


FIG. 6.21 DEVANADOS DE BAJA IMPEDANCIA ATERRIZADOS POR RESISTENCIA.

Método 3.- Por aplicación total del voltaje a través del embobinado siempre y cuando una onda de cola corta sea usada, produciendo grandes esfuerzos del aislamiento entre porciones del embobinado. Los esfuerzos a tierra en la mitad del devanado pueden no ser grandes como las dos alternativas antes mencionadas, entonces la cola corta puede no obtenerse debido a un largo tiempo.

La figura 6.22 a muestra el circuito equivalente de un transformador con una terminal de devanado aterrizada sólidamente. Si la capacitancia es grande comparada con la capacitancia de tierra, entonces, la distribución similar a la curva M resulta. La distribución final se representa por la línea M, cuando baja la envolvente de la oscilación se encuentre M y M'. Cuando los valores de las capacitancias del circuito son extremadamente pequeñas comparadas con la capacitancia de tierra entonces la distribución toma una curva similar a la curva O de la figura 6.22 b y resulta una oscilación entre O y O'. Además, con estos métodos de prueba algunas porciones del embobinado pueden excederse del potencial aplicado en las terminales de línea, por lo general estos devanados tienen grandes constantes de tiempo y el tiempo para el punto T para que oscile a lo máximo es

usualmente lo bastante grande, tal que el voltaje aplicado en la terminal decrece al 50% del valor de cresta. Este método de prueba no produce un esfuerzo sostenido en el aislamiento a tierra como en los otros métodos 1 ó 2 donde el esfuerzo de aislamiento es a través del embobinado. La prueba de baja frecuencia generalmente proporciona suficiente esfuerzo de prueba al aislamiento a tierra.

Este método de prueba es conveniente para medición de corriente -- siendo que ésta no se incrementa en la resistencia del circuito y el circuito proporciona una buena respuesta a las perturbaciones de alta frecuencia. La prueba de no distribución es necesario para determinar el valor de la resistencia.

Desde este ejemplo podemos ver que la construcción del transformador es un factor de control en la selección del método de prueba de devanados de baja impedancia. Cada fabricante es familiar con la respuesta de su tipo de transformador que construye y usa el método para aplicar la mejor prueba del devanado.

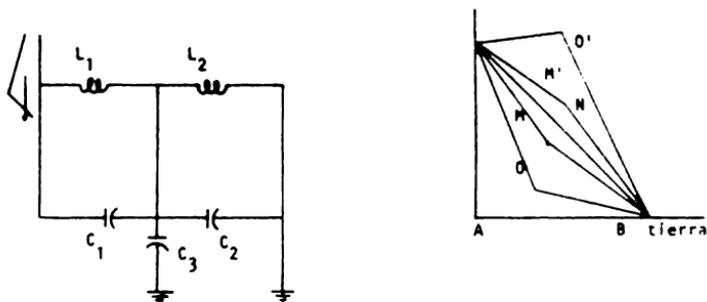


FIG. 6.22 DEVANADOS DE BAJA IMPEDANCIA, EFECTO DEBIDO AL TAMAÑO DE COLA DE ONDA.

TAMARO DEL GENERADOR DE IMPULSOS.

Los factores que afectan la longitud de la cola de onda durante las pruebas de fábrica merecen una previa discusión, abreviadas son.

- 1.- Capacitancia del generador de impulsos.
- 2.- Carga resistiva del generador de impulsos (circuito de impulso).
- 3.- Inductancia efectiva y capacitancia del devanado que será impulsado.
- 4.- Terminación en los devanados no impulsados como si fueran circuitos abiertos, corto circuitados o terminados con resistencias, capacitores, o pararrayos. En general, la inductancia efectiva debe ser grande y la cola larga si el devanado no impulsado está en circuito abierto y debe ser pequeño cuando el devanado está corto circuitado.

Los factores que determinan la longitud de la cola de onda en servicio, brevemente, son:

- 1.- Características del impulso en el punto de origen.
- 2.- Fuente de impedancia del circuito bajo la cual el impulso es propagado.
- 3.- Parámetros del circuito como las terminales del transformador para el exclusivo impulso de la fuente del circuito propagador incluyendo inductancia y capacitancia en todos los aparatos conectados incluyendo el transformador.
4. Características de apartarrayos.
- 5.- Terminales de otros devanados del transformador.

Es lógico que el propósito del transformador por probarse será para usarse en el campo. El ambiente de un transformador de cambios frecuentes con los años, si es movido, equipado o le son adicionadas líneas en paralelo, son dificultades para la aplicación de las pruebas al duplicar los efectos de líneas, cables,

generadores, apartarrayos, etc. Aún más difícil es la determinación de que clase de descarga eléctrica podemos esperar y justamente como entra al sistema de transmisión.

Ondas generalmente de iluminación varían considerablemente, para uniformidad en ciertas pruebas, ciertas muestras de onda han sido normalizadas. Desde 1930 los transformadores han sido probados para impulso con ondas de 1.5 x 40, con muy pocas excepciones éstas han demostrado que el transformador cuando está protegido contra rayos, por prácticas usualmente aceptadas proporcionará un largo y satisfactorio servicio. Los fabricantes han equipado sus laboratorios con generadores de impulso con capacidad de 1.5 x 40 μ seg esta onda ha sido cambiada por la nueva de 1.2 x 50. Sin embargo, con la tendencia hacia mayores capacidades algunas veces se dificultará obtener una cola de 50 μ seg. En estos casos es imperativo que se use la máxima capacitancia del generador. Por facilidad, el generador de impulso deberá arreglarse para que los pasos sean conectados en pasos paralelo-serie para obtener la capacitancia máxima del generador para el voltaje requerido. Se sugieren las siguientes capacitancias como mínimo para los BIL cuando se dificulta obtener una cola de 40 μ seg.

BIL (KV)	Capacitancia Mfínima sugerida (ufd).
110 (y menos)	0.6
150	0.5
200	0.4
250	0.16
350	0.12
450	0.10
550	0.08

BIL (KV)	Capacitancia Mfínima sugerida (ufd).
650	0.05
750	0.05
825	0.018
900	0.018
1 050	0.018
1 175	0.015
1 300	0.015
1 425	0.012
1 550	0.012

INTERPRETACION DE OSCILAGRAMAS DE VOLTAJE DE ONDA COMPLETA Y CORRIENTE.

De acuerdo con los requerimientos de la norma, la prueba de vol
taje a impulso nominal consistirá de una onda completa reducida, dos ondas cortadas y una onda completa aplicada en tal orden a cada terminal de todos los devanados del transformador especificado, excepto la terminal del neutro, usando el circu
to y los métodos de medición cubiertos por las normas de frente de onda y cuando éstas requieran una más completa o más compleja secuencia de prueba de impulso, sea proporcionada. La secuencia de pruebas combinadas comprende entonces una onda com
pleta reducida dos o más frentes de onda, dos ondas cortadas y finalmente, una on
da completa, efectuándolo en tal orden.

Estos tres tipos de ondas de voltaje de impulso han sido definidos en la parte 1 anterior.

DETECCION DE FALLAS DE OSCILOGRAMAS DE VOLTAJE DE ONDA COMPLETA.

El oscilograma de voltaje de onda completa reducida es tomado prime

ro porque representa la forma de onda característica de la combinación del devanado del transformador y generador de impulso como un esfuerzo de voltaje y tiempo donde el transformador es considerado sólido. Esta es una referencia con la que deben compararse los subsecuentes oscilogramas de onda completa. Cada devanado de transformador en combinación con un generador de impulsos tendrá su característica propia de impulso de onda completa de oscilación. Estas oscilaciones quedarán fijadas en períodos por una magnitud de voltaje de impulso producida por un circuito generador de impulsos dado arriba del punto del límite del aislamiento del transformador. Si obtenemos una máquina perfecta donde la onda completa reducida es superpuesta al 100% de la onda completa tomada inmediatamente después de la onda cortada, el devanado es considerado sólido.

El circuito combinado usado para pruebas de impulso es generalmente complicado, y algunas variaciones menores pueden ocurrir debido a ello. La posición de fase de algunas oscilaciones en el frente y cresta de la onda pueden variar. Si el acompañamiento de la onda completa reducida superpuesta al 100% de la onda completa dentro de las condiciones descritas por encima de lo obtenido, el bobinado se considerará también sólido. Las desviaciones en la forma de onda sin consideraciones de suciedad o cuando ocurran pequeñas oscilaciones al azar en la cola de la onda deben ser investigadas por que pueden indicar fallas dentro del transformador.

La comparación metódica de las ondas de voltaje completo y reducido una a otra es un criterio significativo en la detección de fallas. El hecho de que sean generalmente de carácter oscilatorio y su no aparición como ondas idealmente lisas no es significativo. Las formas de onda de voltaje idéntico para la onda completa reducida y onda completa de la figura 6.23 son iguales indicando

adecuaciones de esfuerzos dieléctricos de transformadores, las cuales se reconocen como la versión de salón de 1.2×50 μ seg de onda de impulso. Los oscilogramas deberán tomarse en forma que puedan ser comparados en tiempo y magnitud del trazo para asegurar una comparación.

La figura 6.24 muestra el oscilograma del devanado de alto voltaje de transformadores construidos por cuatro diferentes fabricantes. Todos se encontraron sólidos después de la prueba.

Si ocurren fallas, ellas serán reflejadas en cambios en el dieléctrico los cuales causan alteraciones en la forma de onda a : ivés de cambios en la impedancia del transformador o de descargas corona.

Fallas obvias son fácilmente detectadas por humo, burbujas, ruido y mayores oscilaciones. Una diferencia en la comparación denota fallas en el embobinado excepto para ciertas desviaciones mínimas. Fallas mayores aparecerán el -- lapsos completos o parciales de la onda completa, generalmente aparecen durante un intervalo de 50 μ seg y simultáneamente registradas por un oscilograma de corriente de onda completa el cual ayudará a la verificación por variación substancial -- desde el oscilograma de corriente de onda completa reducida. En caso de fallas mayores, tales como fallas internas del embobinado o del aislamiento, esfuerzos internos, desajustes internos, en aceite a tierra, cortos de la línea de carga a tierra en un devanado adyacente y fallas de un casquillo, la impedancia en el transformador tiene una substancial alteración. La figura 6.25 muestra el tipo clásico de cambio producido por una falla desde cerca de la terminal de línea a tierra. -- Estos cortos circuitos de parte del embobinado reducen la impedancia efectiva y -- corta la cola de la onda.

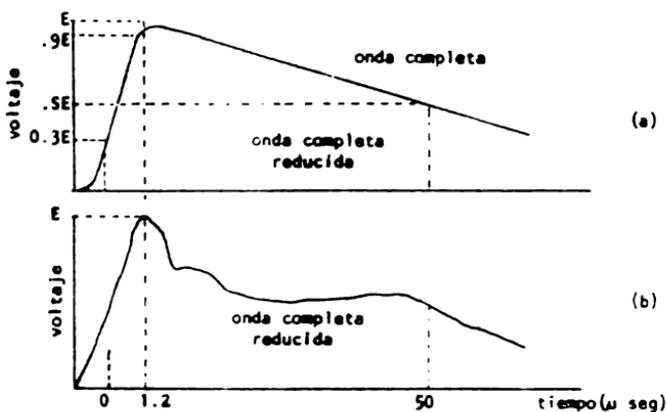


FIG. 6.23 OSCILOGRAMAS DE FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE COMPLETO Y REDUCIDO, (a) CONSIDERADA NORMAL, (b) OBTENIDA DEL CIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR CON PERDIDAS.

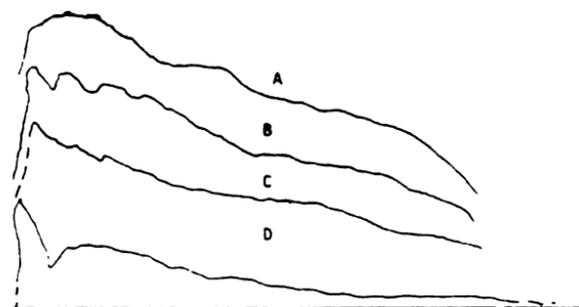


FIG. 6.24 OSCILOGRAMAS DE ONDA COMPLETA DE LOS DEVANADOS DE 4 DIFERENTES TRANSFORMADORES ILUSTRANDO PERFECTAMENTE LA VARIACION DE FORMAS DE ONDA POR LAS CARACTERISTICAS DE CADA TRANSFORMADOR.

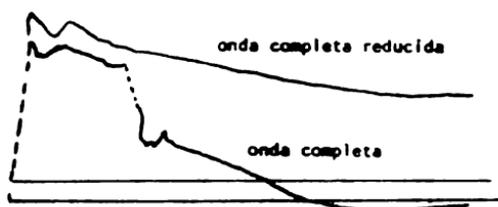


FIG. 6.25 FALLA DE LÍNEA DE CARGA A TIERRA A TRAVÉS DEL ACEITE

Otro ejemplo de falla interna puede ser representado por una línea debajo del trazo de voltaje de onda completa justo al paso del pico de la onda; - esta disminución no aparecerá en el curso del trazo de la onda completa reducida. Una causa posible de este cambio en la forma de onda puede ser un severo efecto corona interno, podría ser una indicación también de falla de vuelta a vuelta del devanado. Cuando la línea bajo la curva no es pronunciada en la onda de voltaje, una comparación de los trazos de corriente puede mostrar desviación pronunciada.

Puede sospecharse de fallas de vuelta a vuelta cuando la desviación sustancial aparece entre la onda completa reducida y la onda completa. Cuando la desviación aparece cerca de la cresta, la falla debe esperarse cerca de la terminal de línea del devanado. Una desviación detectada más tarde en el tiempo en el trazo puede indicar una falla lejana dentro del embobinado.

Una falla representativa de un ducto de aceite entre la terminal impulsada del núcleo de alto voltaje y la terminal de línea de bajo voltaje, en el núcleo de un transformador altera la forma de la onda completa después de los 20 o 30 μ seg.

Deben realizarse análisis cuidadosos de oscilogramas porque esos trazos pueden revelar desviaciones menores que requerirán mayor investigación. - Esas desviaciones pueden ser causadas por factores externos del transformador y por tanto ocasionar problemas de diverso índole. La fuente de esas desviaciones puede ser determinada y explicada satisfactoriamente.

PROCEDIMIENTOS ESPECIALES DE DIAGNOSTICO.

En caso de indicación de falla, un procedimiento usual de diagnóstico es la aplicación de series de ondas completas, reducidas al 50, 60, 70, 80 y 90% del nivel de voltaje de onda completa y una onda completa al 100% a continuación por una repetición de frentes de onda y secuencias de onda cortada y finalmente una serie al 100% de onda completa.

EFFECTOS DE MAGNETIZACION DEL NUCLEO EN DETECCION DE FALLAS.

Se ha encontrado que en algunos transformadores de potencia y de distribución en clases de voltaje menor, impulsos sucesivos de onda completa pueden causar una acumulación de magnetización residual. En tales casos, sucesivas ondas de voltaje y corriente muestran progresivos cambios como se muestra en la figura 6.26. También el ruido emanado del transformador se incrementa con impulsos sucesivos.

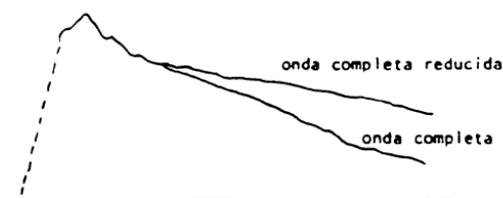


FIG. 6.26 FALLA EN EL DEVANADO AL 8.5% POR MATERIAL EXTRARO.

Ya sea que tales efectos ocurran o no en un transformador depende grandemente de la relación de voltaje de impulso al voltaje de operación del devanado bajo prueba.

Esta relación es mayor a los niveles de voltaje menor, tal que los efectos magnéticos de una onda de impulso llegan a ser mucho más pronunciadas.

Para demostrar la presencia de estos efectos de magnetización residual se pueden aplicar varias ondas completas mostrando un progresivo incremento en la corriente. Entonces invirtiendo la polaridad de la onda impulsada o por medio de impulsar la onda del otro extremo del devanado, la dirección del flujo magnético puede invertirse y la corriente empezará de nuevo a tomar valores bajos e incrementarse con disparos sucesivos.

Si este proceso puede repetirse, será obvio que el incremento en la onda de corriente o el acortamiento en la onda de voltaje son debidos al efecto magnético y no debidos a la falla.

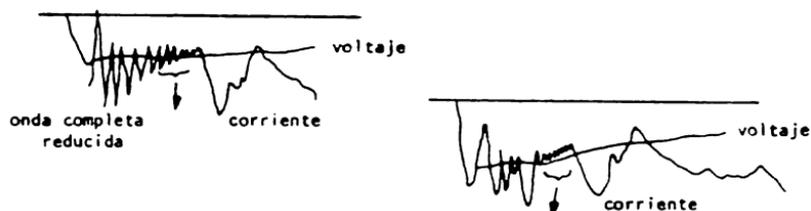


FIG. 6.27 OSCILOGRAMAS DEL DEVANADO H_1 DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO GRANDE PRESENTANDO UNA FALLA DESPUES DE CINCO MESES DE SERVICIO.

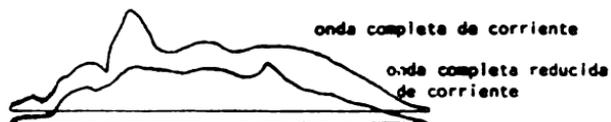
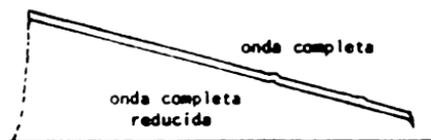


FIG. 6.28 ONDAS DE VOLTAJE DANDO PEQUERA INDICACION DE FALLA, ASI COMO ONDAS DE CORRIENTE MOSTRANDO CLARAMENTE LAS FALLAS ELECTROSTATICAS.

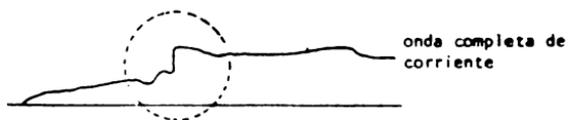


FIG. 6.29 FALLAS OBTENIDAS EN ONDAS DE CORRIENTE REVELAN DAÑOS EN EL 15 VUELTA A VUELTA DEL DEVANADO.

Este efecto puede minimizarse por medio de un realmacenamiento de un nivel de magnetización conocido antes de la aplicación de cada impulso.

Un método es desmagnetizar el núcleo usando excitación de 60 Hz. - Otro método es el de llevar el núcleo a la máxima magnetización residual de polaridad opuesta por medio de colas largas de 50% de onda completa. Este puede ser de polaridad opuesta a la prueba de onda actual o de la misma polaridad pero aplicado al extremo opuesto de el devanado. Aún entonces, si el efecto de magnetización es pronunciado, habrá una pequeña diferencia entre el 50% y el 100% de onda.

DETECCION DE FALLAS POR OSCILOGRAMAS DE CORRIENTE.

El método de detección de fallas por oscilogramas de corriente es un indicador muy sensitivo.

Tal onda de corriente merece consideración en el diagnóstico de problemas asociados con pequeñas irregularidades, debido a que esos disturbios y fallas momentáneas representan el mayor problema remanente en la detección de fallas de impulso. Este método ha probado ser efectivo en la detección de impulsos corona en transformadores. La figura 6.27 muestra la onda completa reducida y el voltaje de onda completa y los oscilogramas de corriente del devanado de alto voltaje de un transformador.

El transformador es en realidad una red muy compleja de capacitancias distribuidas, auto-inductancia e inductancia mutua, con alguna resistencia inherente. El efecto de la capacitancia es muy pequeña para ser considerada en la frecuencia, pero es predominante cuando los efectos transitorios de alta frecuen-

cia, como tales, son encontrados en una prueba de impulso.

FALLAS PEQUERAS.

Cuando ha ocurrido un rompimiento entre puntos adyacentes del devanado, las diferencias entre los oscilogramas de onda de voltaje aplicado son muy tenues o imperceptibles (dependiendo del generador). Las ondas de corriente, tomadas simultáneamente, dan clara indicación de un corto circuito si estas fallas no involucran más de una vuelta en un millar del número total de vueltas.

La forma y amplitud de la onda de corriente a través de los devanados, depende de la inductancia en ellos y de la resistencia de tierra si se usa.

Un corto circuito significa un decremento en la inductancia, lo cual origina un cambio en la corriente a través de la derivación neutral.

A causa de las impedancias en serie (resistencias e inductancias), entre el transformador y el generador de impulsos, originará cambios en la corriente del devanado, que producirán a su vez cambios en la onda de voltaje aplicado al devanado.

La magnitud del cambio de voltaje dependerá de la impedancia del devanado del transformador, en relación al circuito principal de impulso. Si la impedancia del circuito de impulso es tan baja que ésta representa una fuente de voltaje, grandes cambios en la corriente del devanado se requerirán para causar un cambio de voltaje. En este caso la detección de la falla de voltaje será imperceptible.

Contrariamente, si el circuito de impulso es de alta impedancia - comparada a la del devanado, la detección de falla de voltaje será buena. El método de corriente tiene sus ventajas que no dependerán de la rigidez del circuito de impulso.

Sin embargo, cuando una resistencia de tierra se emplea para mantener una cola de 50 μ seg en los devanados de alta impedancia, la sensibilidad en el método de corriente puede decrementarse.

El incremento de la corriente es más discernible debido a que el voltaje aplicado está influenciado solamente por un corto circuito en el devanado, cuando la corriente a través del devanado es comparable o mayor que la corriente a través de la resistencia derivada R_z y R_d . La cola de la onda aplicada entonces dependerá en gran parte de la impedancia del devanado bajo prueba.

SELECCION DEL DERIVADOR DE CORRIENTE.

La corriente de impulso a través del devanado del transformador produce una caída de voltaje a través de una impedancia conectada en serie con el devanado bajo prueba.

La forma de onda de esta caída de voltaje es una función de las características del transformador; la forma de onda del voltaje aplicado al transformador, el tipo de impedancia conectada en serie con el transformador produciendo la caída de voltaje, así como también la impedancia en conductores como los de tierra y conductores conectados. Un resistor no inductivo es usado a menudo como impedancia para producir la caída de voltaje

La corriente contiene tres componentes: capacitiva, oscilatoria, e inductiva. La aparición de estos tres componentes en una onda típica de corriente está ilustrada en la figura 6.30 donde una resistencia en derivación se usa en serie con el devanado. En el instante en que la onda de voltaje se aplica al devanado, una corriente capacitiva precipitada fluye a través de la capacitancia en serie entre la línea y la terminal aterrizada del devanado. Porción A de la figura 6.30.

Esta corriente es seguida por una pequeña amplitud duradera de 5 a 10 μ seg donde la componente oscilatoria es más prominente (Porción B de la figura 6.30). Como la capacitancia se carga, ésta empieza a oscilar con la inductancia del devanado produciendo así, una componente oscilatoria. Al mismo tiempo, las oscilaciones extinguidas y la componente inductiva con la corriente fluyendo por el devanado mismo, predominan como se muestra en el tercer período C. El tercer período está caracterizado por la repentina elevación en la componente inductiva de la corriente al instante en que la onda llega al punto neutro.



FIG 6.30 COMPONENTES DE CORRIENTE NEUTRAL: (a) CAPACITIVA, (b) OSCILATORIA, (c) INDUCTIVA.

En general, las fallas de los devanados no son detectables en el primer pico de corriente.

Bajo condiciones favorables, por ejemplo, fuertes acoplamientos ca pacitivos entre el punto neutro y la falla, giros de alta frecuencia debidos a la falla, son perceptibles como un cambio en la componente oscilatoria de la onda de corriente.

Una falla en el devanado causará un cambio en la componente inductil va de la corriente, el efecto depende de el por ciento del número total de vueltas corto-circuitadas.

Puesto que las componentes oscilatoria e inductiva son importantes para la detección de fallas, la impedancia de la derivación debe ser tal que la - caída de potencial debido a esas componentes de la corriente estén grabadas por el oscilógrafo de rayos catódicos con una amplitud considerable.

En algunos tipos de devanados la componente capacitiva es pequeña y la corriente tiene una forma de onda tal como se muestra en la figura 6.30. En - otros devanados la componente capacitiva es grande como está mostrada por a en la figura 6.31 y una resistencia de derivación baja, se requerirá para limitar la com ponente capacitiva. El resultado de la deflexión de las componentes inductiva y capacitiva podría ser tan pequeña como para impedir satisfactoriamente la detección de fallas. En tales casos, es necesario conectar un capacitor en paralelo con la - corriente derivada para mantener la componente capacitiva en una deflexión razonable. Entonces la resistencia de la derivación puede ser incrementada para dar una deflexión satisfactoria en la componente inductiva como se muestra en b de la figura 6.31



FIG. 6.31 APLICACION DE CORRIENTE CAPACITIVA NEUTRAL, (a) X ohms, (b) 10X ohms.

Establecido en forma Inversa, para óptima detección de fallas, primeramente es necesario usar una resistencia derivada que produzca una deflexión - de las componentes inductiva y oscilatoria, tales que una desviación de forma de onda de 2 ó 3 por ciento es discernible, y entonces, si es necesario, para adic_onar en paralelo con la derivación una capacitancia de tamaño mínimo que mantenga la porción de capacitancia de la onda a un valor razonable.

En orden para asegurar una detección sensitiva de fallas, el valor de la capacitancia en derivación con el resistor derivado, incluyendo la capacitancia de el cable medido y placas del oscilógrafo deberán mantenerse a un mínimo, -- tal que el oscilógrafo grabará señales de alta frecuencia causada por una falla en un devanado. El procedimiento proveerá de una indicación de todos los cambios en la onda de corriente, ambos, alta frecuencia y los cambios menores tienen lugar en -- cualquier porción de la onda.

INTERPRETACION DE LOS OSCILOGRAMAS DE ONDA CORTADA Y FRENTE DE ONDA.

La prueba de impulso, hecha en devanados de transformadores con for_ ma de onda en las cuales se simula encontrarse en servicio cuando los devanados se

ven afectados por relampagueos o disturbios de voltajes transitorios, fueron descritos al principio del capítulo.

Las ondas completas se discutieron e ilustraron de igual forma anteriormente. Ellos representan ondas que alcanzan al devanado por viajes de larga distancia en las líneas de transmisión.

A continuación se consideran las ondas cortadas y frentes de onda -- las cuales simulan los efectos a que están expuestos los transformadores en forma indirecta o bien directa por los golpes de las descargas eléctricas.

La onda cortada resulta cuando el golpe de una descarga causa arqueo en el aislamiento (gaps) o equipo cercano después de que la descarga a viajado a lo largo de la línea, a corta distancia del transformador. Altas tensiones se desarrollan en la porción de línea del devanado debido a la magnitud de voltaje y al rápido cambio que resulta del arqueo. Los investigadores han demostrado que cortando o produciendo arqueo después de casi 2.5 a 5.0 μ seg de duración generalmente se producen severas tensiones en las terminales de línea en el devanado del transformador.

En tanto que la onda cortada tiene permitido alcanzar un valor de -- cresta y entonces cortarse en intervalos especificados de tiempo, la frente de onda está identificada por un alta relación de levantamiento de voltaje y es cortada --- mientras permanece levantada, cuando un mínimo valor de voltaje de cresta asignado se alcanza. Esta última onda simula el golpe de una descarga eléctrica directa o -- cerca de la estación, la cual causa el voltaje de impulso a la terminal del trans--

formador para levantar rápidamente hasta que el equipo de protección opera. Si la descarga le resta protección se prevé que el voltaje será considerablemente menor. Las normas especifican voltaje de cresta, tiempo de chisporroteo y relación mínima de levantamiento, aunque una tentativa está hecha actualmente para llevar a cabo pruebas de frente de onda a los 1 000 KV nominales establecidos por microsegundos, la relación mínima efectiva de elevación permitida y normalizada para clases de voltaje de 350 KV BIL y superiores es de 850 KV por microsegundo. Para clases de voltaje de menos de 350 KV BIL, la relación de elevación es una cantidad que decrece desde 0.5 useg de tiempo de arco está designada para cada caso.

Los primeros investigadores de la frente de onda acordaron que un valor de 1000 KV por microsegundo podría representar aproximadamente cualquiera de los efectos de penetración de relampagueo en los devanados del transformador. Consideraciones para relaciones superiores de elevación, algo neutralizadas por el hecho de que el relampagueo surge con relaciones medidas de elevación de 2000 KV (y superiores) por microsegundo atenuadas rápidamente conforme viajan a lo largo de la línea.

También, bancos de capacitores particularmente donde hay muchas líneas conectadas a buses, contribuyen a reducir tales ondas.

DETECCION DE FALLAS MEDIANTE ONDAS CORTADAS.

La discusión anterior de ondas completas enfatiza que la comparación de la onda completa con la onda reducida es el criterio fundamental en la evaluación de la integridad dieléctrica de los devanados a los cuales se les aplicará

los impulsos. En adición, la onda cortada podría compararse una a otra, y a la onda completa reducida y al 100% de onda completa al tiempo de corte para proporcionar una completa determinación de la solidez del aislamiento.

Los esfuerzos establecidos en los devanados por ondas cortadas pueden ser un poco diferentes a los establecidos por ondas completas. Las ondas completas ejercen grandes esfuerzos a lo largo de todo el devanado. Las ondas cortadas generalmente aplican grandes esfuerzos a la porción de línea del devanado.

Esta penetración no es tan profunda ni larga como las de onda completa, pero, debido a los efectos inducidos, pueden afectar a otros devanados.

Puede demostrarse que si la onda es cortada en un instante desfavorable, en el cual las oscilaciones electromagnéticas están inducidas, los esfuerzos entre los devanados en la entrada son más altos que aquellos debidos a una onda completa del mismo.

Durante la prueba de onda cortada, la máxima tensión o esfuerzo en ese devanado puede alcanzar valores de varios tiempos con ondas de $1.2 \times 50 \mu\text{seg}$.

Esto es debido a la relación a la cual la onda de entrada es cortada y al hecho de que las oscilaciones electromagnéticas se producen por la línea de cero. (Ver figura 6.32). En servicio actual, un transformador puede estar sujeto a las condiciones de onda cortada, tanto como una boquilla, una línea, o un bus aislador, una terminal o cualquier otra estación aisladora de arcos a tierra.

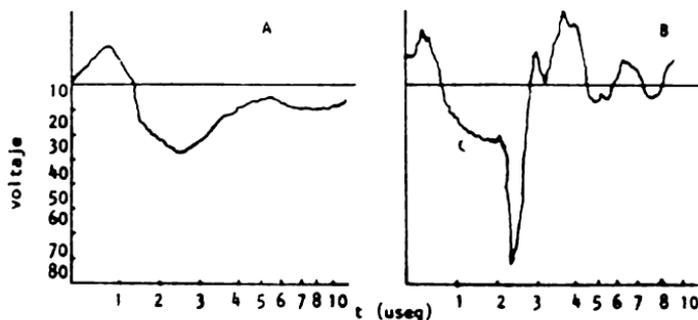
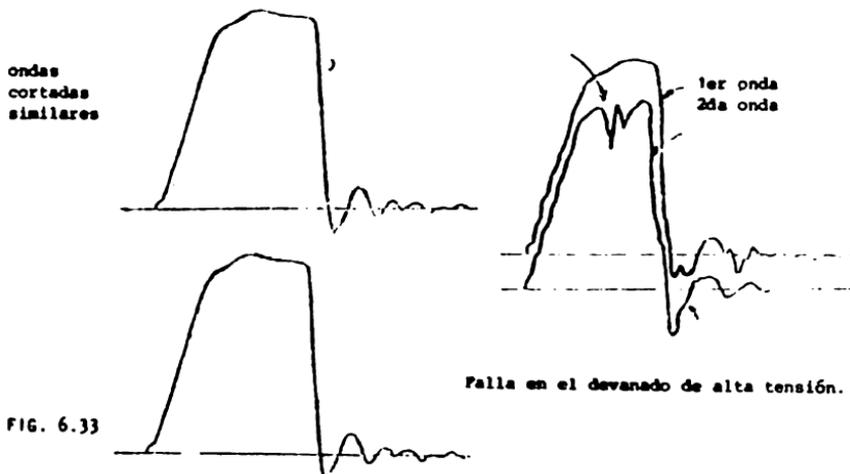


FIG. 6.32 (a) DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE EXTREMIDADES DE 2 NUCLEOS PARA UNA ONDA COMPLETA DE 2.2 μ s DE FRENTE (b) LA MISMA SERIAL PARA UNA ONDA - CORTADA A 2.5 μ s.

La detección de fallas durante la prueba de onda cortada es más difícil que con ondas completas. En las pruebas de impulso de onda cortada no se puede esperar que dé oscilaciones idénticas después de cortada a menos que el tiempo para cortar sea idéntico. Hay instantes en los cuales se considera que un devanado ha pasado la prueba de onda cortada aunque las oscilaciones producidas cerca de la línea de cero después de cortar sean algo similares pero no idénticas, sobre la comparación de una onda cortada a otra. La interpretación e importancia de cualquier desacuerdo en las oscilaciones alrededor de la línea cero en el oscilograma de la onda cortada, es motivo de análisis teórico y práctico balanceado y una experiencia más familiar con el grado de precisión del equipo de impulso usado en la prueba de onda cortada. Cuando la comparación de las oscilaciones cerca de la línea cero indican obvia desviación, esta puede indicar una clara falla.

La figura 6.33 ilustra que está considerado un perfecto acoplamiento entre dos ondas cortadas tomadas de un devanado. La figura 6.33 muestra el ---

Instante de obvia desviación en los oscilogramas de onda cortada indicando fallas.



DETECCION DE FALLAS MEDIANTE PRUEBAS DE FRENTE DE ONDA.

La prueba de frente de onda sujeta al devanado a mayores magnitudes de voltaje y la terminal del devanado a mayores esfuerzos en la mayoría de los casos, que hace más grande la onda cortada y permanece uniforme la onda completa. La prueba de frente de onda verifica lo adecuado del diseño y construcción de la porción de línea del devanado resistente a una gran relación de elevación de voltaje. Dos o más frentes de onda aparecen después de la aplicación del oscilograma de onda completa reducida, antes de la onda cortada, y del 100% de onda completa. --- Cuando se comparan esas ondas, una a otra, hay una perfecta superposición excepto para variaciones en tiempo o magnitud o pequeños rizados, etc., las series de onda cortadas pueden aplicarse. La figura 6.34 muestra un devanado en el cual los frentes de onda son comparados y han pasado la prueba de frente de onda.

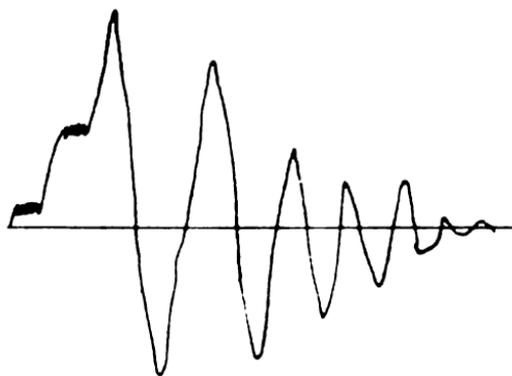
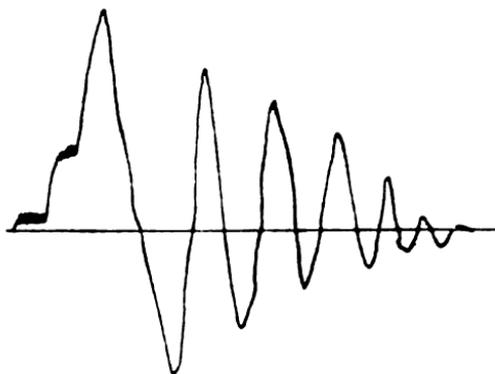


FIG. 6.34 COMPARACION DE FRENTES DE ONDA APLICADAS A UN DEVANADO CON RESULTADOS SATISFACTORIOS.

Las desviaciones detectadas sobre la comparación de frentes de ondas puede indicar que alguna superficie de un extremo de la línea, esquina o borde está contribuyendo a la formación de ionización dentro del transformador.

Esas desviaciones pueden revelar la presencia de efecto corona o *dashino*, el cual no será progresivo bajo condiciones de esfuerzos de frente de onda, o pueden pronosticar falla completa en el devanado, en las subsecuentes aplicaciones de ondas cortadas de mayor duración y mayores ondas completas.

Estas desviaciones pueden indicar también defectos externos en el circuito de impulso, el cual requiere aclaración. Cualquier duda en cuanto a que el devanado ha resistido la prueba de frente de onda deberá resolverse para determinar la fuente y el origen de las desviaciones, o en el caso de desviaciones menores, por aplicación adicional de frentes de onda para demostrar si las desviaciones permanecen o son peores progresivamente. La figura 6.35 ilustra la falla en la prueba de frente de onda.

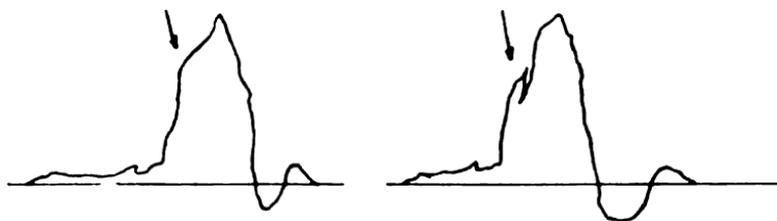


FIG. 6.35. COMPARACION DE CRESTAS EN FRENTES DE ONDA.

Una desventaja en la prueba de frente de onda es que ésta requiere cambio en el circuito de prueba de ondas de 1.2 x 50 micro-segundos. Esos cambios de circuitos retardan la aplicación de ondas cortadas y completas, las cuales seguirían inmediatamente la secuencia. El retardo puede permitir algunos tipos de falla desarrolladas en el frente de onda para no ser detectados por las ondas siguientes.

Las pruebas de onda cortada y frente de onda permiten frecuentemente la determinación del tipo y localización de la falla detectada cuando se estudian junto con las ondas completas y teniendo un cuidado particular se puede asegurar que las discrepancias no son debidas a diferentes tiempos de corte.

Para ser útiles, los resultados de las pruebas deberán incluir como mínimo los datos siguientes:

- 1.- Información general, por ejemplo, tipo y clases de equipo probado, número de serie, día de la prueba, testigos de las pruebas, etc.
- 2.- Una tabulación mostrando las pruebas de impulso conducidas en cada terminal incluyendo tipo y magnitud de las ondas de prueba. La conexión de terminales no probadas de todos los devanados ocdrían describirse como se muestra.
- 3.- La reproducción de los oscilogramas pertinentes tomados durante la prueba son una parte importante en el reporte. Cuando se requiere de esos oscilogramas deberán ser tal que la comparación necesaria entre las ondas cortada y completa y la pendiente de

frente de onda se puede hacer de una manera fácil. Las copias - de los oscilogramas grabados en película de 35 mm deberán amplificarse a un tamaño que permita la inspección visual directa.

4.- Se prefiere que la película del oscilógrafo de ondas al ser comparado sea sobrepuesta como se muestra en la figura 6.26

5.- Los oscilogramas para demostrar que el transformador ha resistido sucesivamente todas las pruebas de impulso requeridas generalmente se incluyen al final de reporte. Donde el fabricante ha dirigido pruebas adicionales para explicar discrepancias, etc., -- los oscilogramas pertinentes también se deberán incluir en el reporte.

CAPITULO VII

MOTORES ELECTRICOS

MOTORES DE INDUCCION.

El motor de inducción es una máquina en la que se aprovecha la inducción de corriente en el rotor por el campo rotatorio que inducen las corrientes del Estator, estructuralmente se compone de armadura y campo, donde éste es excitado por corriente alterna de baja frecuencia producida en el interior del motor mismo, por inducción, por lo tanto, debe estar construída para operar de manera eficiente como transformador al mismo tiempo que como motor.

7.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

EL CAMPO GIRATORIO.

Los motores de inducción cuentan con devanados trifásicos balanceados, es decir, que tienen igual número de vueltas en cada fase, estando estas desplazadas 120° entre sí; los devanados son simétricos o sea que tienen el máximo número de bobinas cada 180° . Si las bobinas de las tres fases son alimentadas por corrientes trifásicas, las cuales son:

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t - 240^\circ)$$

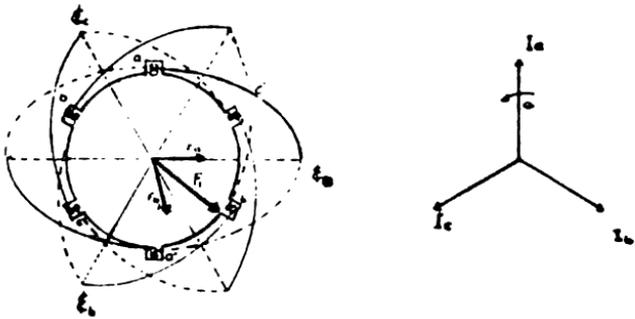


FIG. 7.1

Las 3 corrientes producen 3 fuerzas magnetomotrices que se aplican sobre cada uno de sus ejes respectivos (ver fig. 7.1)

$F_a = N a i_m \cos \omega t$	sobre	\downarrow a
$F_b = N b i_m \cos (\omega t - 120^\circ)$	sobre	\downarrow b
$F_c = N c i_m \cos (\omega t - 240^\circ)$	sobre	\downarrow c

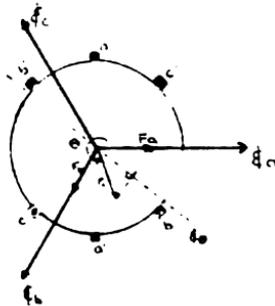


FIG. 7.2.

Normalmente $N a = N b = N c$ y el producto $N a i_m = F$ máxima.

entonces las fuerzas magnetomotrices quedan en la forma siguiente:

$$F_a = F_{\text{máx}} \cos \omega t$$

$$F_b = F_{\text{máx}} \cos (\omega t - 120^\circ)$$

$$F_c = F_{\text{máx}} \cos (\omega t - 240^\circ)$$

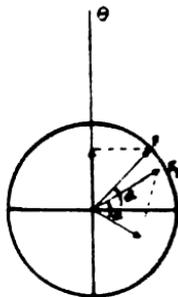


FIG. 7.3 DISTRIBUCION ESPACIAL DEL FLUJO F.

de la figura 7.3 se observa que:

$$F_{\theta} = F_{\alpha} \cos (\theta - \alpha)$$

$$F(\theta, t) = F_a \cos \theta + F_b \cos (\theta - 240^\circ) + F_c \cos (\theta - 120^\circ)$$

$$F(\theta, t) = F_m \cos \omega t \cos \theta + F_m \cos (\omega t - 120^\circ) \cos (\theta - 240^\circ) + F_m \cos (\omega t - 240^\circ) \cos (\theta - 120^\circ)$$

aplicando la ecuación:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos (\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos (\alpha - \beta)$$

$$\begin{aligned}
 \text{siendo:} \quad \alpha &= \omega t & \alpha &= \omega t - 120^\circ \\
 \beta &= \theta & \beta &= \theta - 120^\circ \\
 \alpha &= \omega t - 240^\circ \\
 \beta &= \theta - 240^\circ
 \end{aligned}$$

substituyendo en la ecuación de flujo:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}(\theta, t) &= \frac{F_m}{2} \left[\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta) \right] + \\
 &+ \frac{F_m}{2} \left[\cos(\omega t - 120^\circ + \theta - 120^\circ) + \cos(\omega t - 120^\circ - \theta + 120^\circ) \right] + \\
 &+ \frac{F_m}{2} \left[\cos(\omega t - 240^\circ + \theta - 240^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ - \theta + 240^\circ) \right]
 \end{aligned}$$

finalmente:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}(\theta, t) &= \frac{F_m}{2} \left[3 \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos(\omega t + \theta - 120^\circ) \right]
 \end{aligned}$$

como:

$$\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) + \cos(\omega t - 120^\circ) = 0$$

es la ecuación de un sistema trifásico equilibrado.

obtenemos que:

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta)$$

que es la ecuación del flujo rotatorio resultante, y va a ser igual a $\frac{3}{2}$ del flujo máximo, su amplitud será constante y girará sobre la máquina dependiendo del sentido de las corrientes.

7.2. DIAGRAMA FASORIAL

Para el análisis de la obtención del diagrama fasorial consideraremos solo una fase del estator (a-a') y que denominaremos 1-1' y una sola fase del rotor, denominada 2-2' (ver figura 7.4).

De la ecuación desarrollada en el punto anterior:

$$F_T = \frac{3}{2} F_a \cos(\omega t - \theta)$$

donde F_T es un flujo magnético rotatorio de amplitud uniforme que gira a la velocidad síncrona ω_s y es producido por las corrientes I_a , I_b e I_c del estator.

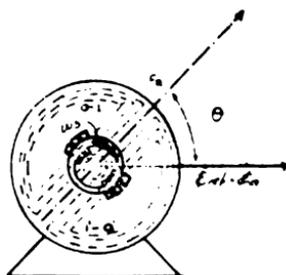


FIG. 7.4 CAMPOS MAGNETICOS DE UN MOTOR.

ya conocemos las ecuaciones:

$$e_1 = e_a = -N \frac{d}{dt} (F \max \cos wt)$$

$$\theta = F_T = \frac{3}{2} F_a \cos (wt - \theta)$$

$$\theta = F_T = F_{\max} \cos (wt - \theta)$$

La función de la proyección de F_T sobre el eje a ($\frac{3}{2} a$), o sea cuando $\theta = 0$

$$\theta = F \max \cos wt$$

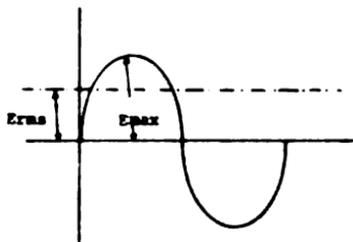
$$e_1 = e_a = -N \frac{d}{dt} (F \max \cos wt)$$

$$e_1 = e_a = Nw F \max \sin wt$$

$$e_1 = E \max_1 \sin wt$$

$$E \max_1 = Nw F_{\max}$$

Generalizando a una máquina con devanado distribuido y paso acortado:



$$E_{\max} = k_{p1} k_{b1} N_1 W_1 F_{\max}$$

donde:

$$\theta \max = F_{\max} \text{ (webers)}$$

$$E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{rms_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} k_{p1} k_{b1} N_1 W_1 \theta \max$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Si el motor está parado

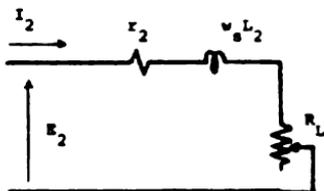
$$\omega_r = 0$$

$$s = 1$$

Si aplicamos esto a la ecuación de corriente:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + (\omega L)^2}} = \frac{E_2}{\frac{1}{s} \sqrt{r_2^2 + (s\omega L)^2}}$$

se observa que la corriente del rotor cuando este está girando es igual a la que se produciría con una fuerza electromotriz igual a la del rotor parado, con la diferencia de que al empezar a girar el rotor, la resistencia de este aumenta ficticiamente, en otras palabras, la impedancia del rotor se altera, al girar éste.



$$\frac{r_2}{s} = \frac{r_2}{s} + r_2 - r_2 = \left(\frac{r_2}{s} - r_2\right) + r_2$$

$$= \left[r_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \right] + r_2$$

$$R_L = r_2 \frac{1-s}{s}$$

substituyendo en la ecuación de corriente:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(r_2 + r_2 \frac{1-s}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

por otra parte como:

$$\theta = F \text{ máx} \cos \omega t$$

$$e = -N \frac{d\theta}{dt}$$

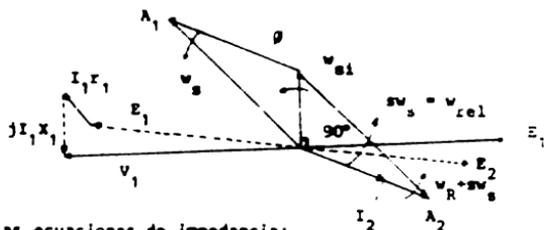
$$e = N F \text{ máx} \omega \sin \omega t$$

derivando:

$$e = N F \text{ máx} \cos (\omega t - 90^\circ)$$

$$\omega_{\text{rel}} = \omega_{\text{sinc}} - \omega_{\text{rot}} = s\omega_{\text{sinc}}$$

aplicando todo al diagrama fasorial correspondiente obtenemos:



de las ecuaciones de impedancia:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad \text{o sea que} \quad Z_1 = \frac{a V_2}{\frac{I_2}{a}}$$

donde a para motores de inducción se obtiene de:

$$\frac{E_{m1}}{E_{m2}} = \frac{4.44 k_{b1} k_{p1} N_1 f_1 \Phi}{4.44 k_{b2} k_{p2} N_2 f_2 \Phi}$$

o sea que:

$$a = \frac{k_{b1} k_{p2} N_1}{k_{b2} k_{p2} N_2}$$

además del diagrama fasorial se obtiene que:

$$A_1 + A_2 = \frac{I}{2}$$

regresando a las ecuaciones de impedancia:

$$Z_1 = a^2 \frac{V_2}{I_2} \quad \text{como} \quad Z_1 = \frac{E_1}{I_1}$$

sustituyendo:

$$Z_1 = \frac{a E_2}{\frac{N_2}{N_1 a} I_2}$$

por lo que un transformador se puede considerar como un caso particular de la máquina de inducción.

CIRCUITO EQUIVALENTE.

Para obtener el diagrama del circuito equivalente del motor de

Inducción se requiere efectuar varias pruebas a fin de determinar los parámetros correspondientes.

a) PRUEBA EN VACIO.

El motor se arranca a tensión y corriente normales, sin ninguna carga aplicada al mismo, por tanto, la resistencia del rotor es muy grande porque el deslizamiento tiene un valor cercano a cero, se miden los parámetros i_{nom} , w_{nom} , V_L y efectuando se procede a los cálculos siguientes:

$$Z_{vac} = \frac{V_L}{i_{vac}} \quad \text{----- 1}$$

$$R_{vac} = \frac{W_{vac}}{i_{vac}^2} \quad \text{----- 2}$$

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

$$X_m = X_{vac} - X_1$$

b) PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO

El motor se arranca a tensión y corriente nominales, bloqueando el rotor por medios mecánicos a fin de evitar su movimiento, en estas condiciones se toman los datos de los parámetros i_{RB} , w_{RB} , V_{RB} y procede a los cálculos siguientes:

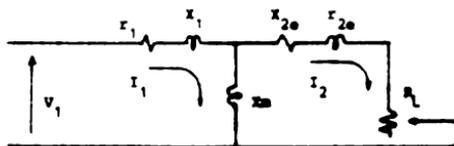
$$Z_{RB} = \frac{V_{RB}}{i_{RB}}$$

$$R_{RB} = \frac{W_{RB}}{n_1^2 \cdot R_B}$$

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

$$x_1 = x_2 = \frac{1}{2} X_{RB}$$

quedando el circuito equivalente en la siguiente forma:



$$R_L = r_{2e} \frac{1-s}{s}$$

C A P Í T U L O VIII

CLASIFICACION DE MOTORES

Los motores eléctricos poseen características mecánicas y eléctricas que los convierten en equipo esencial especializado para determinadas aplicaciones. En este capítulo definiremos estas características a fin de complementar la información técnica del capítulo precedente y tener un panorama más completo de los motores de inducción.

La información de este capítulo ha sido extraída básicamente de la Norma Nacional NOM-J-75-1977 y la Norma Americana ANSI-MG.1-1978. En caso de que utilice otra referencia se hará la aclaración correspondiente.

8.1 CLASIFICACION DE LOS MOTORES DE ACUERDO A SU PROTECCION MECANICA Y TIPO DE ENFRIAMIENTO.

MOTOR ABIERTO.

Es un motor que tiene aberturas para ventilación que permiten el paso de aire externo de enfriamiento, sobre y a través del embobinado del motor.

MOTOR A PRUEBA DE GOTEO.

Es un motor que tiene sus aberturas de ventilación dispuestas de

tal manera que evitan la entrada de cualquier gota de líquido o sólido que caiga en un ángulo de 0 a 15° de la vertical. Cuando las aberturas de ventilación están protegidas por una cubierta se denominan a prueba de goteo, y si carecen de ellas se denominan abiertas a prueba de goteo.

MOTOR A PRUEBA DE SALPICADURA.

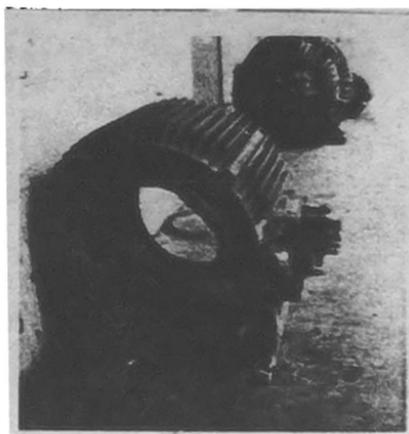
Este motor tiene una carcasa de tipo abierto, con aberturas de -- ventilación dispuestas de tal manera que las partículas sólidas o gotas de líquido que caigan sobre él, o dirigiéndose a éste en línea recta, a cualquier ángulo no mayor de 100° respecto a la vertical no pueden penetrar en el motor, ya sea directamente o pegando en él y resbalando hacia adentro.

MOTOR CON GUARNICION

Es un motor en que todas las aberturas que dan acceso a partes - vivas o rotatorias (excepto ejes lisos), están limitadas en tamaño por el diseño estructural de las partes o por mallas cubiertas, telas expandidas o materiales equivalentes, con el propósito de evitar accidentes al ponerse en contacto con - dichas partes, estas aberturas no deben permitir el paso de una barra cilíndrica de 13 mm de diámetro; cuando la distancia de protección sea mayor de 100 mm. no - deberán permitir el paso de una barra cilíndrica de 19 mm. de diámetro.

MOTOR SEMIGUARNECIDO.

Es un motor a prueba de goteo en el cual las aberturas de venti-



VISTAS DEL ROTOR Y ESTATOR DE UN MOTOR DE INDUCCION TRIFASICO, 60 Hz, -----
440 VOLTS.

lación están protegidas en la misma forma que el motor con guarnición, en su mi tad superior.

MOTOR A PRUEBA DE GOTEO CON GUARNICION.

Es un motor a prueba de goteo en el cual las aberturas de ventilación están protegidas en la misma forma que el motor con guarnición.

MOTOR A PRUEBA DE INTEMPERIE.

Es un motor con aberturas de ventilación que reducen al mínimo la entrada de nieve, lluvia, partículas suspendidas en el aire, a las partes eléctricas del mismo. su construcción requiere que una barra cilíndrica de 20 mm. de diámetro, como máximo, no pueda penetrar por las aberturas de ventilación.

MOTOR TOTALMENTE CERRADO.

Es aquel cuya armazón impide el libre cambio de aire entre el interior y exterior del motor, sin llegar a ser hermético.

MOTOR TOTALMENTE CERRADO NO VENTILADO.

Es aquel que no está equipado con medios mecánicos de enfriamiento externo para partes internas del motor.

MOTOR TOTALMENTE CERRADO, ENFRIADO POR VENTILADORES.

Motor con uno o más ventiladores, formando partes integrantes de él pero externos al armazón, provistos de cubiertas.

MOTOR A PRUEBA DE EXPLOSION.

Motor totalmente cerrado, cuya armazón está diseñada y construída para soportar una explosión de gas o vapor especificados, que puede ocurrir dentro de ella por diversas causas y para prevenir la ignición de gas o vapor que rodea el motor.

MOTOR A PRUEBA DE POLVO FLAMEABLE.

Es un motor totalmente cerrado, con el motor diseñado y construído de tal manera que excluye la posibilidad de ignición debida a un ambiente de polvo flameable.

MOTOR A PRUEBA DE AGUA.

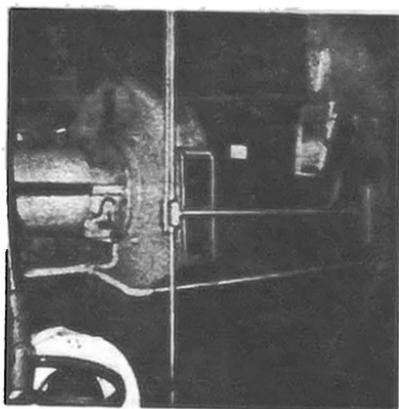
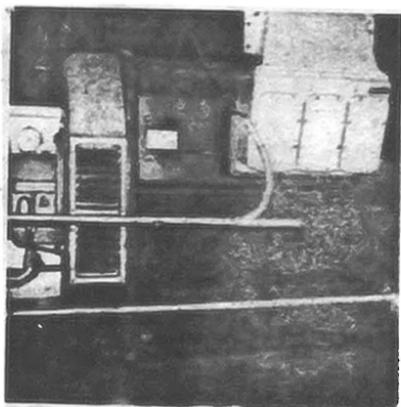
Motor totalmente cerrado, construído en forma tal que un chorro de agua no haga contacto con lubricante, chumaceras y embobinados.

MOTOR TOTALMENTE CERRADO CON VENTILADOR.

Es una máquina con abertura arreglada para que la entrada o salida de los tubos o ductos estén conectados a ella para el intercambio del aire interno. También pueden ser autoventilados (circulación de aire por medios integrales con la máquina) o de ventilación forzada (circulación de aire por medios externos).

MOTOR TOTALMENTE CERRADO ENFRIADO POR AIRE Y AGUA.

Es una máquina totalmente cerrada enfriada por aire y agua ----



MOTOR DE INDUCCION TRIFASICO TIPO TIKE, 4 POLOS, 4000 VOLTS, 310 AMP. 60 Hz.
RELACION CONTINUA, TEMPERATURA AMBIENTE 40°C ARRANQUE A TENSION PLENA, AISLA-
MIENTO DEL ESTATOR TIPO B. TOKIO, SHIBAWARA TOSHIBA ELECTRIC, JAPON.

circulantes. Está provista de un intercambiador de calor de agua fría para el aire interno y un ventilador o ventiladores, integrados o separados a la flecha del motor, para recircular el aire interno.

MOTOR TOTALMENTE CERRADO ENFRIADO POR AIRE - AIRE.

Es una máquina totalmente cerrada enfriada por circulación de - aire interno a través de un intercambiador de calor, envolviéndolo, es enfriado por aire externo circulante.

Está provisto con un intercambiador de aire-aire para enfriamiento del mismo y ventiladores integrados a la flecha del motor o separados.

MOTOR TOTALMENTE CERRADO Y SOBREENFRIADOS.

Son máquinas totalmente cerradas y con ventilación y enfriamiento por medios externos.

8.2 CLASIFICACION DE ACUERDO A SU VELOCIDAD.

MOTOR DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Es un motor cuya velocidad de operación normal es constante o -- prácticamente constante, como es el caso de un motor síncrono.

MOTOR DE VARIAS VELOCIDADES.

Es un motor cuya velocidad varía de acuerdo a la carga, ordinariamente se decrementa cuando la carga se incrementa.

MOTOR DE VELOCIDAD AJUSTABLE.

Es un motor que tiene varias velocidades las cuales pueden ser graduadas en un rango considerable, por lo cual, casi no es afectado por la carga.

MOTOR DE VARIAS VELOCIDADES.

Este motor puede ser operado en una o dos o más velocidades definidas, cada una prácticamente independiente de la carga como es el caso de un motor de inducción con capas de devanados de varios grupos de polos.

La parte inicial de este tema fue extraída de la Norma Mexicana, a partir de las máquinas totalmente cerradas hasta el motor de varias velocidades, se extrajo de la Norma ANSI-NEMA, observando que ésta última se aprecia -- más completa y con un lenguaje más técnico.

8.3 DISEÑOS ELECTRICOS DE LOS MOTORES.

La normalización de la característica par-velocidad de los motores de inducción del tipo jaula de ardilla arrojó cinco tipos de diseño del par-velocidad, los cuales son presentados tanto en la Norma Nacional como en la -- equivalente Americana en forma confusa debido a explicaciones sobre tabulacion-- nes gráficas y otras referencias, por lo que éstos diseños fueron extraídos del libro: Máquinas Eléctricas J. Thaler y Wilcox Capítulo II. Aspectos sobre las -- aplicaciones de Máquinas Eléctricas.

DISERO A.

Es un diseño con par de arranque normal, pequeño deslizamiento, corriente de arranque normal, con un solo devanado de Jaula de Ardilla de baja resistencia. Su deslizamiento a plena carga es menor del 5%, tiene un par máximo de más de 200%, el % del par de plena carga y su par de arranque es normalmente igual o mayor que el par nominal, ocurriendo los valores menores de par de arranque en los motores de mayor tamaño; en estos casos el deslizamiento es de aproximadamente 2% y aumenta hasta aproximadamente 4% en los tamaños más pequeños. Cuando se aplica voltaje nominal, el % de la corriente nominal varía desde 500, para motores pequeños, hasta 800 para los motores grandes. Una de las principales desventajas de este diseño consiste en sus grandes corrientes de arranque para motores de 10 hp o mayores y los sistemas de distribución que alimentan a los motores tienen limitaciones para la magnitud de las corrientes de arranque. Esta clase de diseños da preferencia al funcionamiento normal de trabajo a expensas de la corriente de arranque.

DISERO B.

Este diseño proporciona pares de arranque normal, bajas corrientes de arranque y deslizamiento similares a los motores de diseño A. De esta manera mantiene buen funcionamiento de trabajo con el mismo par de arranque pero con un consumo de corriente del 70 y 80% de la que consume el diseño A. Este funcionamiento se obtiene por medio de un devanado de rotor especial como el de la construcción de doble jaula de ardilla o del tipo de barras profundas. Comparado con el diseño A el factor de potencia a plena carga y el par máximo se reducen ligeramente.

DISEÑO C.

Es un diseño con elevado par de arranque y baja corriente de arranque; usan un devanado de doble jaula con mayor resistencia en el devanado. La alta resistencia del rotor que en el diseño B., como resultado de esto, el deslizamiento a plena carga es mayor llegando al 5%. El par de arranque es de 2.5 veces el par a plena carga y el par máximo es de 2 veces el par de plena carga. Solamente se usa en motores de más de 3 Hp.

DISEÑO F.

Es un diseño que tiene bajo par de arranque, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento, para motores de 30 hp. y mayores. Da preferencia al funcionamiento de trabajo a expensas del par de arranque.

El deslizamiento a plena carga tiende hacia un valor del 2% y 4% con deslizamientos mayores para motores de bajas velocidades. El par de arranque puede ser excepcionalmente bajo como es el 130% del nominal y un par máximo del 14% del nominal.

DISEÑO D.

Es un diseño con pares de arranques excepcionalmente altos (hasta 300%) y bajas corrientes de arranque. Las normas NEMA especifican 3 rangos de deslizamiento que cubren del 5 al 20%, por el contrario, esta máquina es de baja eficiencia.

Se usa en cargas intermitentes con frecuentes inversiones del sentido que requieran aceleraciones rápidas para cargas de impacto donde el motor debe disminuir su velocidad para que un volante ceda energía cinética.

Todos estos diseños fueron desarrollados por la National Electrical Manufacturing Association (NEMA), por lo que al marcar en una placa de datos el diseño se hace referencia a las normas NEMA.

8.4 CLASIFICACION DE LOS MOTORES POR SU POTENCIA.

MOTOR FRACCIONARIO.

Es un motor cuya potencia es menor de 0.746 KW de potencia continua a plena carga, pero mayor de 0.37 KW de potencia, es decir entre 0.5 y 1 HP.

MOTOR INTEGRAL.

Es un motor cuya potencia es igual o mayor a 0.746 KW (1 HP) de potencia continua a plena carga.

8.5 AISLAMIENTO.

La vida útil de una máquina eléctrica dura mientras el aislamiento protege a los conductores, cuando el aislamiento falla la vida útil de la máquina termina pues el costo por reemplazo de embobinados sería aproximadamente la mitad del costo de la máquina. La duración normal, de acuerdo al diseño de un motor con carcasa a prueba de goteo, operado en una atmósfera limpia y a tempera

tura normal será de 20 años; si se incrementa la temperatura en 10°C tendrá una vida útil de 10 años, aproximadamente. Para un motor con aislamiento clase A -- significa que un 10% de aumento de temperatura reducirá la vida útil en un 50%. Las clases de aislamiento, de acuerdo a la Norma No. 1, de la IEEE, son los siguientes:

CLASE A.

Los materiales de esta clase son: algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares, ya sea que se utilicen por separado o una combinación de ellos impregnándolos adecuadamente; materiales moldeados o laminados con rellenos de celulosa, resinas fenólicas, láminas, películas de acetato de celulosa y barnices orgánicos cuando se aplican a conductores. Se pueden incluir otros materiales si son capaces de soportar 105°C de temperatura certificada por pruebas o por experiencia.

Este tipo de aislamiento es de fines generales en máquinas de carcasa tipo abierto.

CLASE B.

Son materiales inorgánicos como la mica, fibra de vidrio asbesto y sus combinaciones de fibras aglutinantes y otros materiales orgánicos e inorgánicos capaces de soportar una temperatura de operación de 130°C.

Esta clase de aislamiento se usa con frecuencia en motores que van a dar servicio con mayores elevaciones de temperatura o en ambientes con temperaturas más altas.

CLASE F.

Son los materiales inorgánicos que se mencionaron en la clase B y otros materiales inorgánicos u orgánicos con sustancias aglutinantes apropiadas, con una capacidad para soportar una temperatura de operación de 155°C.

CLASE H.

Son materiales inorgánicos o sus combinaciones, incluyendo al elastómero de Silicio con sustancias aglutinantes como las resinas de silicio y otros materiales capaces de soportar una temperatura de operación de 180°C.

Algunos autores consideran dos clases más de aislamientos.

CLASE O.

Son los materiales de la clase A (algodón, seda, papel), y los materiales orgánicos similares, cuando no están impregnados y son capaces de soportar temperaturas de 90°C en operación.

CLASE C.

Esta clase de aislamientos se compone solamente de mica, porcelana, cristal de cuarzo y materiales inorgánicos similares, así como aquellos que pueden soportar temperaturas de más de 220°C . Los materiales de esta clase se usan en situaciones especiales y no son considerados como artículos normales de producción.

En la gráfica No. 8.1 se observan las curvas de vida promedio --- aproximada de los devanados de un motor, en función de la clase de aislamiento y la temperatura de operación. En dicha gráfica se plantea que cuando la temperatura de operación es mayor a la correspondiente a la clase de aislamiento, la vida promedio se reduce.

8.6 PROTECCION TERMICA

Un protector térmico es un mecanismo de protección para montaje - como parte integral ue la máquina y la protege de daños por sobrecalentamientos debidos a sobrecargas y, en un motor, de fallas en el arranque.

Cuando los motores tienen una relación de más de 1 HP son provistos con mecanismos de protección de sobretemperatura en los devanados o sistemas que no se incluyen en la definición "protección térmica" y se marcan con la frase PROT. SOBREM. y a continuación se anota el número 1, 2, ó 3 que indica el tipo de protección a sobretemperatura en devanados que tienen el motor. Para cada tipo el protector debe limitar la temperatura del embobinado como sigue.

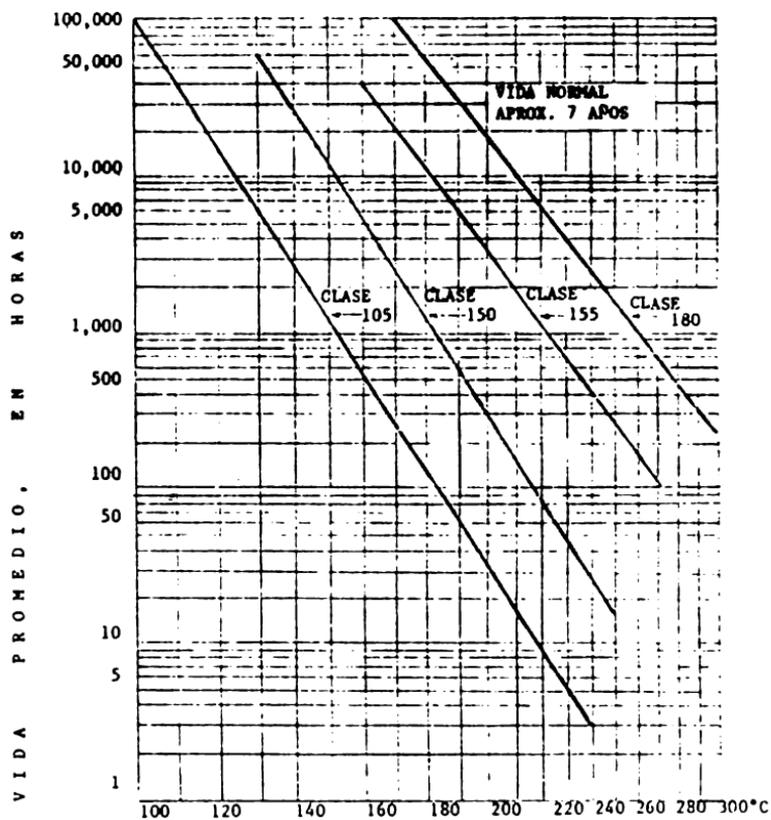


FIG. 8.1 VIDA PROMEDIO APROXIMADA DE LOS DEVANADOS DE UN MOTOR.

TIPO I.- PROTECCION DE SOBRETENPERATURA EN ROTOR BLOQUEADO Y CIRCUITO ABIERTO.

A) DEVANADO ABIERTO.

Cuando el motor es marcado con el número I es operado a la máxima carga continúa sin llegar al límite para que opere el protector térmico, la temperatura en los devanados no debe exceder de los siguientes valores.

T A B L A I

TIPO DE AISLAMIENTO	TEMP. MAX. EN DEVANADOS (°C)
A	140 (107)
B	165 (132)
F	190 (155)
H	215 (180)

La temperatura del embobinado debe ser medida por el método de resistencia, excepto en motores de 15 HP y menores, la temperatura puede también ser medida por el método del termopar.

B) ROTOR BLOQUEADO.

Cuando el rotor es marcado con el numero I y está bajo condiciones de rotor bloqueado, el protector de sobretemperatura debe limitar la temperatura del devanado de acuerdo a la siguiente tabla.

T A B L A II

TEMPERATURA DEL DEVANADO BAJO CONDICIONES DE ROTOR BLOQUEADO.

TIPO DE PROTECTOR	TEMP. °C MAX.				PROMEDIO DE TEMP.			
	TIPO DE AISLAMIENTO.				TIPO DE AISLAMIENTO.			
	A	B	F	H	A	B	F	H
DISPARO AUTOMATICO								
DURANTE PRIMER HORA	200	225	250	275	-	-	-	-
DESPUES PRIMER HORA	175	200	225	250	150	175	200	225
DISPARO MANUAL								
DURANTE PRIMER HORA	200	225	250	275	-	-	-	-
DESPUES PRIMER HORA	175	200	225	250				

Considerando como base la temperatura ambiental a 25°C .

TIPO 2 PROTECCION A SOBRETENSIONES CON DEVANADO EN OPERACION.

Quando el motor es marcado con el número 2 y es operado a la máxi
ma carga contfnua sin llegar al límite en que opera el protector térmico, la tem
peratura del embobinado no debe exceder los valores de la tabla 1.

Quando el motor es marcado así, la protección de rotor bloqueado
no es cubierta por el protector de sobretension del devanado.

TIPO 3 PROTECCION DE SOBRETENSIONES A DEVANADO, TIPO NO ESPECIFICADO.

Quando el motor es marcado con el tipo 3, el fabricante del motor

debe ser consultado para pormenores de las condiciones de protección y/o tempe raturas del devanado.

8.7 ARMADURAS O CARCASAS.

Los diferentes tipos de carcasas de los motores fueron tratados al principio de este capítulo. Su función es proteger la máquina del medio ambiente en que se instala. Estas componentes tienen características físicas plie namente definidas, como es el tipo de motor que se debe utilizar para determinadas aplicaciones.

Para los motores de potencia integral, en la armadura los dos primeros dígitos corresponden a cuatro tiempos de la dimensión del reborde de montaje, en pulgadas, utilizando para ello números enteros; el tercer dígito se obtiene del valor de 2F, distancia entre los centros de las perforaciones de la base de montaje.

8.8 DIMENSIONAMIENTO POR LETRAS.

Cada dimensión de un motor eléctrico ha sido identificado por medio de una letra del alfabeto, las cuales fueron prefijadas por las Normas NEMA, en las figuras 1, 2, 3 y 4 se observa la concordancia entre la dimensión y la letra.

LETRA NEMA	DIMENSION INDICADA
A	Distancia entre centros de barrenos de base (vista frontal a la flecha).
B	Distancia total entre terminales de la base (vista lateral)
C	Longitud total del motor, de la punta de la flecha al extremo opuesto del motor.
D	Altura del eje de la flecha, con respecto a la base del motor.
E	Distancia del centro de la flecha al centro del barreno de la base (vista frontal).
2F	Distancia entre centros de barrenos de la base (vista lateral)
G	Altura de la base de montaje.
H	Diámetro del barreno para fijar la base.
J	Tamaño de la base de montaje (vista frontal).
K	Tamaño de base de montaje (vista lateral).
M	Longitud de la flecha, de la carcasa al final de la flecha.
O	Altura total del motor.
P	Diámetro externo del motor.
R	Diámetro de la flecha sin uñero.
S	Tamaño del uñero o del muñón de la flecha.
T	Altura del ojo del anillo superior de la máquina.
U	Diámetro de la extensión de la flecha
V	Longitud de flecha (mínima) útil para acoplamiento, montaje de engrane o polea motriz.
W	Terminal entre la flecha y la carcasa.
X	Longitud del canal del uñero.
Y	Distancia de la terminal de la flecha a la terminal del otro - acoplamiento.

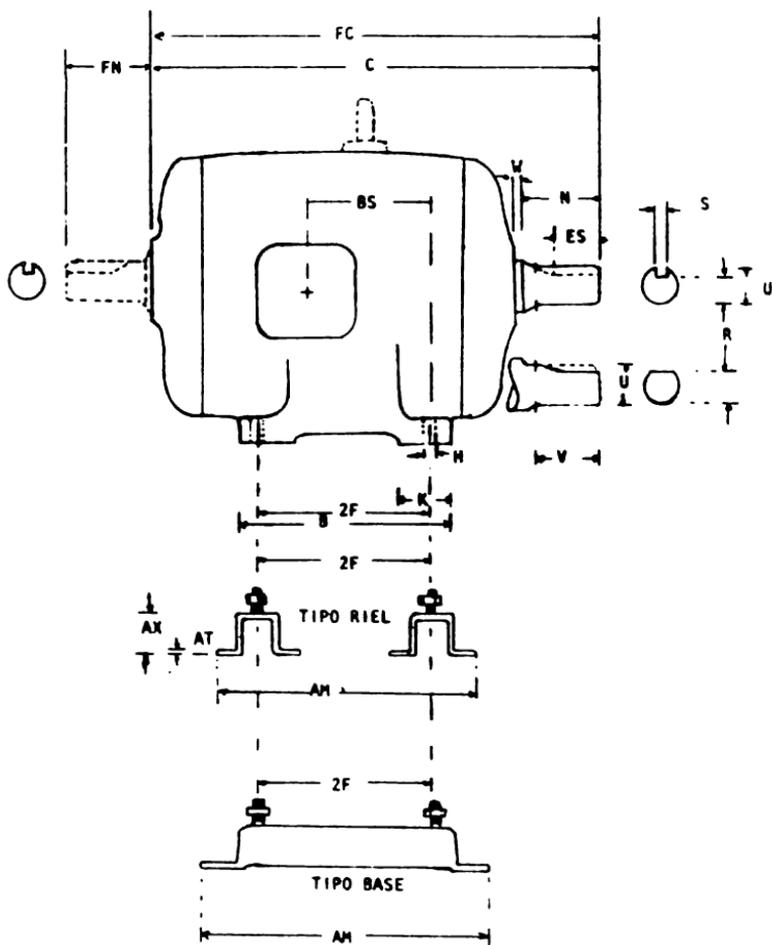


FIG. 8 2 DIMENSIONAMIENTO POR LETRAS PARA MAQUINAS MONTADAS AL PISO, VISTA LATERAL.

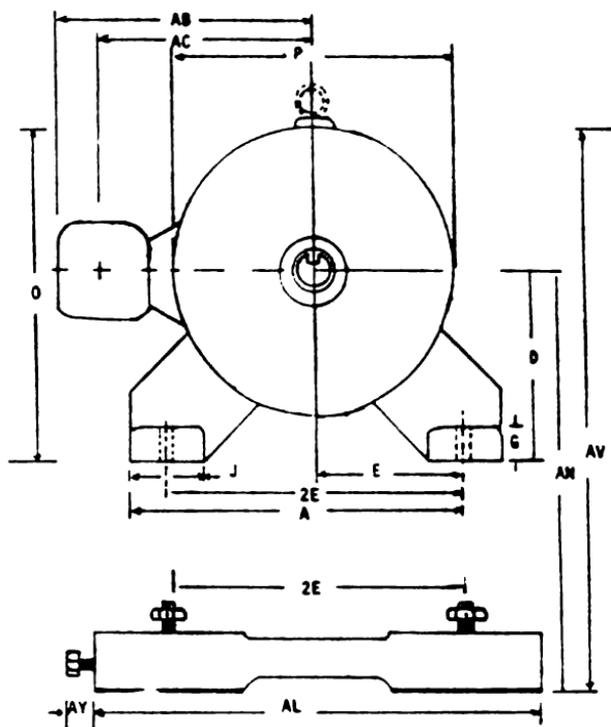


FIG. 8.3 DIMENSIONAMIENTO POR LETRAS PARA MAQUINAS MONTADAS AL PISO, VISTA FRONTAL.

Z	Diámetro acoplamiento
AA	Entrada a la caja de conexiones del motor.

8.9 MONTAJE DEL MOTOR Y LOCALIZACION DE LA CAJA DE CONEXIONES.

El montaje del motor y la localización de la caja de conexiones debe ser de acuerdo a los montajes mostrados, según símbolos, en el párrafo siguiente. Cuando otros montajes de motores y localización de caja de terminales sea requerida, debe ser designada de acuerdo con los símbolos mostrados en la figura 8.5

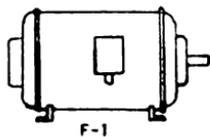
Los símbolos de montaje F-1, W-2, W-3, W-6, W-8 y C-2 muestran la caja de terminales en la misma posición relativa con respecto al montaje de pie y la extensión de la flecha.

8.10 DIMENSIONES DE LA CAJA DE TERMINALES.

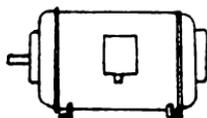
A) La caja de terminales debe ser de metal y de construcción sólida. Para motores de 18 cm. de diámetro, la caja de terminales debe ser capaz de soportar sin fallas una carga vertical en su superficie vertical de 1.4 Kg/cm^2 (20 lb/in^2) hasta un máximo de 108.93 Kg (240 lb).

La carga debe ser aplicada a través de 5 cm (2 pulgadas), de diámetro en la superficie del metal plano. No debe considerarse como fallas las curvaturas o deformaciones a menos que resulten en espacios entre la caja y un montaje rígido de las terminales menor que aquellos dados en el inciso C.

MONTAJES AL PISO

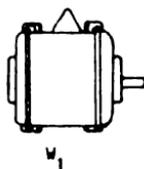


F-1

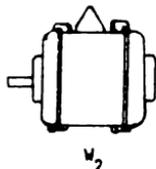


F-2

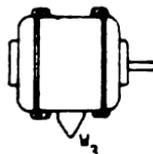
MONTAJE SOBRE PARED



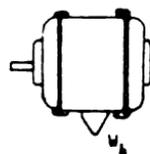
W₁



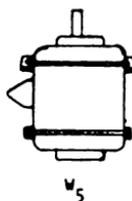
W₂



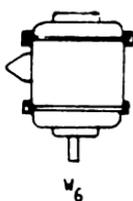
W₃



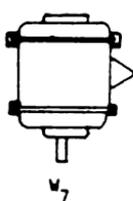
W₄



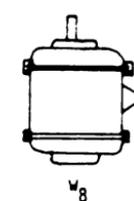
W₅



W₆

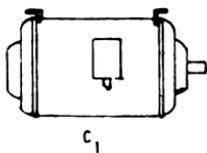


W₇

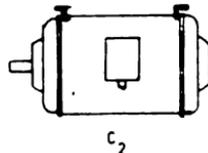


W₈

MONTAJE A TECHO



C₁



C₂

FIG. 8.5 MONTAJE DE LOS MOTORES SEGUN NORMA NEMA MG.1

B) Cuando la caja de terminales contiene conexiones de conductores debe tener un mínimo de dimensiones donde puedan caber las guías auxiliares para cada pieza de frenos, termostatos, espacios para calentadores o caloríficos, campos de excitación, etc. pueden ser descuidados en su área de porta-corriente mientras no exceda en 25% del área de porta-corriente de la guía de potencia de la máquina.

C) Cuando la caja de terminales cubra rígidamente las terminales de motor montado, la caja de terminales debe ser de tamaño suficiente para proporcionar espacio mínimo entre terminales.

C A P I T U L O IX

CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES ELECTRICOS

Por las diferentes características de los motores de inducción debidas a su diseño estos presentan diferentes niveles de eficiencia, los cuales se marcan a través de parámetros como son su potencia de arranque, de trabajo, velocidad, así como su consumo de voltaje-corriente en sus diferentes niveles de trabajo; para ello es necesario determinar inicialmente estos puntos, los cuales fueron extraídos de las Normas MG.1. ANSI/NEEA y NEMA-J-75-1977.

9.1. EFICIENCIA.

La eficiencia de un motor es la relación entre la potencia útil de salida y la potencia total de entrada, expresada normalmente en por ciento.

La eficiencia de los diseños A y B, en motores de potencia integral polifásicos de jaula de ardilla y una sola velocidad, en el rango de 1 a - 125 HP, para armazones asignados de acuerdo con Norma NEMA MG.13 y el equivalente para diseño C deben identificarse por una letra de Código en la Placa de datos. La eficiencia a plena carga cuando opera a tensión y frecuencia nominal no será menor del valor mínimo indicado por cada letra de código. En la tabla siguiente se especifican, de acuerdo al código la eficiencia que deben tener los motores.

9.2 FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia de un motor o generador de corriente alterna

TABLA No. 1

LETRA DE CODIGO	EFICIENCIA NOMINAL	EFICIENCIA MINIMA
A	-	>95.0
B	95.0	90.1
C	94.1	93.0
D	93.0	91.7
E	91.7	90.2
F	90.2	88.5
G	88.5	86.5
H	86.5	84.0
K	84.0	81.5
L	81.5	78.5
M	78.5	75.5
N	75.5	72.0
P	72.0	68.0
R	68.0	64.0
S	64.0	59.5
T	59.5	55.0
U	55.0	50.5
V	50.5	46.0
W	-	46.0

TABLA No. 2

HP	VELOCIDAD, RPM						
	3600	1800	1200	900	720	600	514
CARGA WR^2 (EXCLUSIVA DE MOTORES WR^2), LB-FC^2							
1	..	5.8	15	31	53	82	118
1 1/2	1.8	8.6	23	45	77	120	174
	2.4	11	30	60	102	158	228
3	3.5	17	44	87	149	231	335
5	5.7	27	71	142	242	375	544
7 1/2	8.3	39	104	208	356	551	798
10	11	51	137	273	467	723	1048
15	16	75	200	408	685	1061	1538
20	21	99	262	525	898	1393	2018
25	26	122	324	647	1108	1719	2490
30	31	144	384	769	1316	2042	2959
40	40	189	503	1007	1725	2677	3881
50	49	232	620	1241	2127	3302	4788
60	58	275	735	1473	2524	3819	5680
75	71	338	904	1814	3111	4831	7010
100	92	441	1181	2372	4070	6320	9380
125	113	542	1452	2919	5010	7790	11310
150	133	640	1719	3454	5940	9230	...
200	172	831	2238	4508	7750	...	...
250	210	1017	2744	5540	...	...	...
300	246	1197	3239	...	...	...	...
350	281	1373	3723	...	...	...	...
400	315	1546	...	...	...	...	...
450	343	1714	...	...	...	...	...
500	381	1880	...	...	...	...	...

es la relación de los kilowatts de entrada (o salida) entre los kilovolts-Amperes de entrada (o salida), expresada usualmente en por ciento; para una máquina trifásica:

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{KWATTS}}{\text{KVA de Línea} \sqrt{3}} \times 100$$

para máquinas trifásicas el factor de potencia puede comprobarse por la siguiente ecuación.

$$\text{F.P.} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1 + w_2} \right)^2}}$$

donde w_1 es la lectura mayor y w_2 es la lectura menor. Si w_2 da una lectura negativa, se debe considerar una cantidad negativa. Si se usa un wattmetro polifásico, los valores del wattmetro monofásico se deben obtener separadamente abriendo cada uno de los circuitos voltaje-devanado de el wattmetro polifásico. Con cargas pulsantes, el factor de potencia obtenido puede ser ligeramente mayor, debiendo tomarse éste como el valor correcto. La diferencia es debida a la inclusión en volts-amperes de la componente pulsante de corriente que es una función de la carga y de la misma máquina.

9.3 FACTOR DE SERVICIO.

Es un factor que aplicado a la potencia nominal indica la sobrecarga continua máxima permisible, que puede soportar la máquina sin que exceda los límites de temperatura de aislamiento especificado en la placa.

CARGA WK² PARA MOTORES DE INDUCCION POLIFASICOS JAULA DE ARDILLA (MOMENTO POLAR DE INERCIA)

HP	VELOCIDAD RPM											
	3600	1800	1200	900	720	600	514	450	400	360	327	300
	CARGA WK ² (1b-F12)											
100	...	...	...	...	...	...	...	12670	16830	21700	27310	33690
125	...	...	...	...	...	...	...	15610	20750	26760	33680	41550
150	...	...	...	...	...	...	13410	18520	24610	31750	39960	49300
200	...	...	...	...	...	12060	17530	24220	32200	41540	52300	64500
250	...	...	...	...	9530	14830	21540	29800	39640	51200	64400	79500
300	...	...	...	6540	11270	17550	25530	35300	46960	60600	76400	94300
350	...	...	...	7530	12980	20230	29430	40710	54200	69900	88100	108800
400	...	...	4199	8500	14670	22870	33280	46050	61300	79200	99800	123200
450	...	...	4666	9460	16320	25470	37090	51390	68300	88300	111300	137400
500	...	...	5130	10400	17970	28050	40850	56600	75300	97300	122600	151500
600	443	2202	6030	12250	21190	33110	48260	66800	89100	115100	145100	175300
700	503	2514	6900	14060	24340	38080	55500	76900	102600	132600	167200	206700
800	560	2815	7740	15830	27440	42950	62700	86900	115900	149300	189000	233700
900	615	3108	8590	17560	30480	47740	69700	95700	129000	166900	210600	263000
1000	668	3393	9410	19260	33470	52500	76600	106400	141900	183700	231800	287000
1250	790	4073	11380	23390	40740	64060	93600	130900	173600	224800	283900	353000
1500	902	4712	13260	27350	47750	75100	110900	153000	204500	265000	334800	414000
1750	1004	5310	15060	31170	54500	85900	126000	175400	236600	304200	384500	472000
2000	1096	5880	16780	34860	61100	96500	141600	197300	264100	342600	433300	537000
2.50	1180	6420	18440	38300	67600	106800	156900	218700	293000	380300	481200	596000
2500	1256	6930	20030	41900	73900	116800	171800	239700	321300	417300	528000	655000
3000	1397	7860	23040	48520	85900	135200	200700	280500	375500	489400	620000	765000
3500	1491	8700	25850	54800	97300	154800	228600	319900	429800	559000	709000	883000
4000	1570	9460	28460	60700	108200	172600	255400	358000	481600	627000	796000	990000
4500	1627	10120	30930	66300	118700	189200	281400	395000	532000	693000	890000	1050000
5000	1662	10720	33160	71700	128700	206400	306500	430800	580000	750000	963000	1192000
5500	1677	11240	35280	76700	138300	223300	330800	465600	628000	821000	1044000	1293000
6000	...	11690	37250	81500	147500	237800	354400	499500	675000	882000	1123000	1398000
7000	...	12400	40770	90500	164900	267100	399500	565000	760000	1001000	1275000	1590000
8000	...	12870	43790	98500	181000	294500	442100	626000	850000	1114000	1422000	1775000
9000	...	13120	46330	105700	195800	320200	482300	685000	931000	1230000	1563000	1950000
10000	...	13170	48300	112200	209400	344200	520000	740000	1009000	1327000	1699000	2120000
11000	...	...	50100	117500	220000	367000	562000	750000	1065000	1428000	1810000	2291000
12000	...	...	51400	123000	233500	387000	590200	804800	1105000	1524000	1956000	2450000
13000	...	...	52300	127500	244000	407400	622400	893100	1224000	1617000	2078000	2608000
14000	...	...	52900	131300	253600	425800	652800	934200	1280000	1707000	2195000	2758000
15000	...	...	53100	134500	262400	442900	681500	983100	1352000	1793000	2300000	2904000

Los valores de WK^2 de la carga conectada dados en la tabla se calculan de la siguiente ecuación.

$$\text{Carga } WK^2 = A \frac{\text{HP}^{.95}}{\text{RPM}} 2.4 - 0.0685 \frac{\text{HP}^{1.5}}{\text{RPM}} 1.8$$

donde:

- A = 24 para motores de 300 a 1800 RPM
- = 27 para motores de 3600 RPM

SOBRE VELOCIDAD

VELOCIDAD SINCRONA RPM	SOBRE VELOCIDAD, POR CIENTO VELOCIDAD -- SINCRONA.
1801 y mayores	20
1800 y menores	25

TABLA No. 3

HP	FACTOR DE SERVICIO						
	3600	1800	1200	VELOCIDAD SINCRONA, RPM			
				900	720	600	514
1/20	1.4	1.4	1.4	1.4	...	...	...
1/12	1.4	1.4	1.4	1.4	...	...	...
1/8	1.4	1.4	1.4	1.4	...	...	...
1/6	1.35	1.35	1.35	1.35	...	...	...
1/4	1.35	1.35	1.35	1.35	...	...	...
1/3	1.35	1.35	1.35	1.35	...	...	...
1/2	1.25	1.25	1.25	1.15*	...	...	...
3/4	1.25	1.25	1.15*	1.15*	...	...	...
1	1.25	1.15*	1.15*	1.15*	...	...	...
1 1/2-125	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*
150	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	...
200	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	1.15*	...	...

*Solo aplicable a motores con Diseño A, B y C.

Como propósito general, un motor o generador de corriente alterna, teniendo un factor de servicio de acuerdo a la tabla 9.3 es adecuado para operación continua bajo las siguientes condiciones de servicio:

A.- CONDICIONES AMBIENTALES.

- a) Expuestas a una temperatura ambiente en el rango de 0 - 40°C, o cuando se use enfriamiento por agua, en el rango de 10°C - 40°C.
- b) Expuestas a una altitud, la cual no exceda los 1000 mts. sobre el nivel del mar.
- c) Instaladas en una superficie rígida.
- d) Instaladas en áreas cerradas, las cuales no interfieren la ventilación de la máquina.

B.- CONDICIONES DE OPERACION.

- a) Cuando se use bandas V normalizadas.
- b) Cuando se use bandas planas, engranes y cadenas normalizadas.
- c) Cuando el voltaje y frecuencia se mantienen a los valores especificados en la placa, la máquina puede sobrecargarse arriba de -- los H.P. obtenidos de multiplicar los H.P. nominales por el factor de servicio indicado en la placa.

Cuando un motor o generador es operado a cualquier factor de servicio mayor de 1, puede tener variaciones en los valores de eficiencia, factor de potencia, y velocidad con respecto a los especificados a carga nominal, pero el par y corriente a rotor bloqueado, así como el par de arranque se mantienen invariables.

RELACION DE POTENCIA (H.P.)					
100	600	2500	9000	19000	45000
125	700	3000	10000	20000	50000
150	800	3500	11000	22500	55000
200	900	4000	12000	25000	60000
250	1000	4500	13000	27500	65000
300	1250	5000	14000	30000	70000
350	1500	5500	15000	32500	75000
400	1750	6000	16000	35000	80000
450	2000	7000	17000	37500	90000
500	2250	8000	18000	40000	100000

RELACION DE VELOCIDAD SINCRONA RPM A 60 Hz*			
3600	720	400	277
1800	600	360	257
1200	514	327	240
900	450	300	225

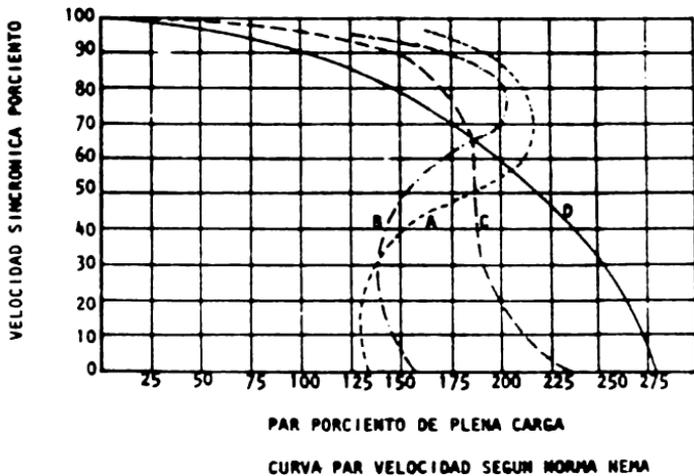
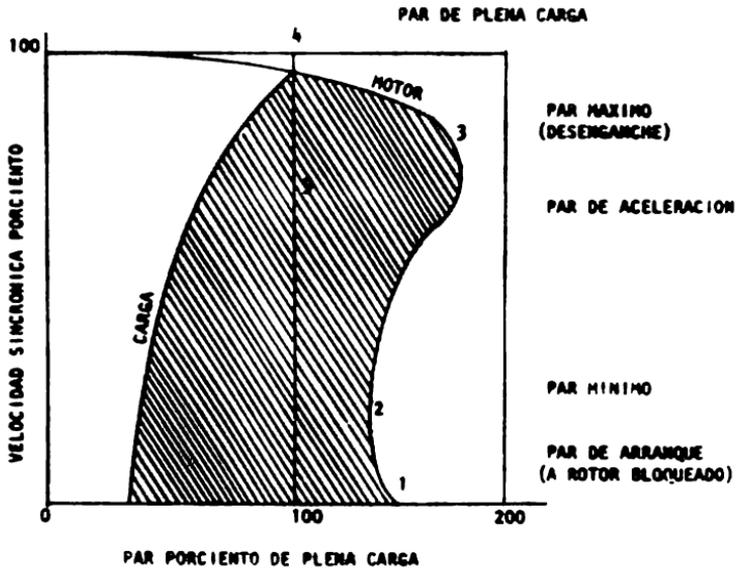
* A 50 Hertz, la velocidad es 5/6 de la velocidad de 60 Hz.

PAR	% DE LA RELACION DE PAR A PLENA CARGA
Rotor Bloqueado	60
Arranque	60
Máximo	175

RELACION DE VELOCIDAD SINCRONA Y POTENCIA PARA MOTORES
POLIFASICOS DE INDUCCION, POTENCIA INTEGRAL.

HP	60 HERTZ							50 HERTZ			
	RPM							RPM			
1/2	...	...	...	900	720	600	514	...	...	...	750
3/4	...	...	1200	900	720	600	514	...	...	1000	750
1	...	1800	1200	900	720	600	514	...	1500	1000	750
1 1/2	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
2	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
3	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
5	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
7 1/2	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
10	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
15	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
20	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
25	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
30	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
40	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
50	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
60	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
75	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
100	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
125	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
150	3600*	1800	1200	900	720	600	514	3000*	1500	1000	750
200	3600*	1800	1200	900	720	...	...	3000*	1500	1000	750
250	3600*	1800	1200	900	...	...	...	3000*	1500	1000	750
300	3600*	1800	1200	...	...	...	...	3000*	1500	1000	...
350	3600*	1800	1200	...	...	...	...	3000*	1500	1000	...
400	3600*	1800	...	...	...	...	...	3000*	1500	...	...
450	3600*	1800	...	...	...	...	...	3000*	1500	...	...
500	3600*	1800	...	...	...	...	...	3000*	1500	...	...

*Aplicable solo a motores tipo Jaula de Ardilla.



9.4 PAR A PLENA CARGA.

El par a plena carga es el necesario para producir la potencia nominal a su velocidad especificada en la placa con carga completa.

9.5 PAR DE ARRANQUE.

Es el par que debe desarrollar un motor para arrancar y corresponde al par mínimo con el rotor frenado a velocidad cero, para varias posiciones angulares del mismo, aplicando tensión y frecuencia nominales.

9.6 PAR DE ROTOR BLOQUEADO.

El par de rotor bloqueado de un motor es el par mínimo, que corresponde al motor cuando el rotor tiene velocidad cero en cualquier posición angular con voltaje y frecuencia nominales.

9.7 PAR MÁXIMO.

El par máximo es el que desarrolla la máquina a tensión y frecuencia nominales sin que ocurra disminución en la velocidad del motor.

9.8 CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO.

Es la corriente que toma el motor al arrancar y que corresponde a la del motor cuando el rotor está a velocidad cero, baja tensión y frecuencia nominales.

Todos los pares de la máquina de inducción se observan, de acuerdo al diseño, en la figura 9.1

CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO PARA MOTORES DE INDUCCION, TRIFASICOS,
TIPO JAULA DE ARDILLA, POTENCIA INTEGRAL CON RELACION DE 230 VOLT-60 HERTZ

TABLA No. 5

HP	CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO (AMP)	LETRAS DE CODIGO
1/2	20	B, D
3/4	25	B, D
1	30	B, D
1 1/2	40	B, D
2	50	B, D
3	64	B, C, D
5	92	B, C, D
7 1/2	127	B, C, D
10	162	B, C, D
15	232	B, C, D
20	290	B, C, D
25	365	B, C, D
30	435	B, C, D
40	580	B, C, D
50	725	B, C, D
60	870	B, C, D
75	1085	B, C, D
90	1450	B, C, D
125	1815	B, C, D
150	2170	B, C, D
200	2900	B, C
250	3650	B
300	4600	B
350	5100	B
400	5800	B
450	6500	B
500	7250	B

COLUMNA 1 PAR DE ROTOR BLOQUEADO DE LA TABLA 8	COLUMNA 2 PAR DE ARRANQUE, EN POR CIENTO
110 por ciento o menos	90% de columna 1
más de 110% pero menos de 145%	100% de par de plena carga
145% o más	70% de columna 1

PAR MAXIMO PARA MOTORES DE POTENCIA INTEGRAL, POLIFASICOS CON MOTOR DEVANADO.

TABLA No. 7

HP	PAR MAXIMO, EN POR CIENTO DEL PAR A PLENA CARGA.		
	VELOCIDAD, RPM		
	1800	1200	900
1	...	...	250
1 1/2	...	...	250
2	275	275	250
3	275	275	250
5	275	275	250
7 1/2	275	250	225
10	275	250	225
15	250	225	225
20-200, incl.	225	225	225

PAR DE ROTOR BLOQUEADO PARA MOTORES POLIFASICOS JARILLA DE ARDILLA POTENCIA INTEGRAL DE UNA VELOCIDAD CON RELACION CONTINUA.

TABLA No. 8

HP	VELOCIDAD SINCRONIA, RPM						
	60 hertz	1800	1200	900	720	600	516
	50 hertz	1350	1500	1000	750	...	...
1/2	...	...	...	140	140	115	110
3/4	...	...	...	175	135	135	110
1	...	275	170	135	135	115	110
1 1/2	175	250	165	130	130	115	110
2	170	235	160	130	125	115	110
3	160	215	155	130	125	115	110
5	150	185	150	130	125	115	110
7 1/2	140	175	150	125	120	115	110
10	135	165	150	125	120	115	110
15	130	160	140	125	120	115	110
20	130	150	135	125	120	115	110
25	130	150	135	125	120	115	110
30	130	150	135	125	120	115	110
40	125	140	135	125	120	115	110
50	120	140	135	125	120	115	110
60	120	140	135	125	120	115	110
75	105	140	135	125	120	115	110
100	105	125	125	125	120	115	110
125	100	110	125	120	115	115	110
150	100	110	120	120	115	115	...
200	100	100	120	120	115	...	...
250	70	80	100	100	...	...	...
300	70	80	100	...	...	...	...
350	70	80	100	...	...	...	...
400	70	80	...	...	...	...	...
450	70	80	...	...	...	...	...
500	70	80	...	...	...	...	...

TABLA No. 9

PAR DE ARRANQUE DE MOTORES JARILLA DE ARDILLA POTENCIA INTEGRAL.

HP	VELOCIDAD SINCRONIA, RPM						
	60 hertz	1800	1200	900	720	600	516
	50 hertz	1350	1500	1000	750	...	...
1/2	...	...	...	225	200	200	200
3/4	...	...	275	220	200	200	200
1	...	300	265	215	200	200	200
1 1/2	250	280	250	210	200	200	200
2	240	270	240	210	200	200	200
3	230	250	230	205	200	200	200
5	215	225	215	205	200	200	200
7 1/2	200	215	205	200	200	200	200
10-125 inclusive	200	200	200	200	200	200	200
150	200	200	200	200	200	200	...
200	200	200	200	200	200	...	...
250	175	175	175	175	...	...	...
300-350	175	175	175	...	...	...	...
400-500 inclusive	175	175	...	...	...	...	...

9.9 CODIGO DE LETRAS.

Las letras de código son las letras que aparecen en la placa de - datos de motores de corriente alterna y se refieren a los KVA de rotor bloqueado por H.P. de la máquina, las letras de código son las siguientes; exceptuando los motores polifásicos de rotor devanado.

Código	KVA POR H.P.	Código	KVA POR H.P.
A	0 - 3.15	K	8.0 - 9.0
B	3.15 - 3.55	L	9.0 - 10.0
C	3.55 - 4.0	M	10.0 - 11.2
D	4.0 - 4.5	N	11.2 - 12.5
E	4.5 - 5.0	P	12.5 - 14.0
F	5.0 - 5.6	R	14.0 - 16.0
G	5.6 - 6.3	S	16.0 - 18.0
H	6.3 - 7.1	T	18.0 - 20.0
J	7.1 - 8.0	U	20.0 - 22.4
		V	22.4 - y superiores

9.10 SECUENCIA DE FASES

La secuencia de fases es el orden al cual los voltajes alcanzan - sucesivamente su máximo valor positivo entre terminales.

El orden de los numerales en las guías de terminales no requieren indicar necesariamente la secuencia de fases, pero ésta es determinada por la dirección relativa de rotación de la flecha a las terminales de conexiones.

El diagrama vectorial deberá ser de tal manera que el avance de fa se de un vector con respecto a otro sea en el sentido de las manecillas del reloj,

tal como lo muestra la figura 9.2, donde el vector 1 esté a 120° adelante del vector 2 y la secuencia de fases es 1.2.3.

La dirección normal de rotación para todos los motores monofásicos de corriente alterna, síncronos y universales debe ser con contador y en el sentido de las manecillas del reloj.

9.11 MARCAS PARA MOTORES Y GENERADORES.

Cuando se usan abreviaciones para marcar, las cuales son pegadas al motor o generador (placas, clasificaciones, conexiones, etc.) deben consistir de - letras mayúsculas.

Las marcas de terminales se deben poner en, o directamente adyacentes a las terminales en las cuales se deben hacer conexiones; ya sea en circuitos exteriores o dispositivos auxiliares, las cuales se deben desconectar con motivos de embarque.

MARCAS DE TERMINALES.

Una combinación de letras mayúsculas o símbolos y números arábigos, se deberán usar para indicar el carácter o función de los devanados los cuales deben llevar a las terminales.

Las siguientes letras y símbolos se deben usar para motores y generadores y sus dispositivos auxiliares cuando se incluyen dentro de o montados en - la máquina.

Armadura - A1, A2, A3, A4, etc.

Freno (Brake) - B1, B2, B3, B4, etc.

Rotor Devanado de Corriente Alterna (anillos colectores) -R1, R2, R3, R4, etc.

Capacitor - J1, J2, J3, J4, etc.

Señales de Control al devanado de conmutación - e .

Freno Dinámico de resistor (Dynamic braking resistor) - BR1, BR2, BR3, BR4, etc.

Campo Serie (Field) - S1, S2, S3, S4, etc.

Campo Shunt (Field) - F1, F2, F3, F4, etc.

Línea (Line) - L1, L2, L3, L4, etc.

Devanado Magnetizante (para inicial y magnetización mantenida y desmagnetización de campos magnéticos permanentes) - E1, E2, E3, E4, etc.

Resistencia (armadura y varias) - R1, R2, R3, R4, etc.

Resistencia (campo shunt ajustable) - V1, V2, V3, V4, etc.

Freno de resistor shunt (shunt braking resistor) - BR1, BR2, BR3, BR4, etc.

Calentadores - H1, H2, H3, H4, etc.

Estator - T1, T2, T3, T4, etc.

Interruptor de arranque - K

Protector Térmico - P1, P2, P3, P4, etc.

Gufa de Ecuilización - = (signo igual)

Conexión Neutra - Letra terminal con el número o números en terminales de máquinas polifásicas de C.A.

MAQUINAS SINCRONAS.

Los números 1, 2, 3, etc., indican el orden en el cual los voltajes a las terminales alcanzan su máximo valor positivo (secuencia de fase).

Hp	VELOCIDAD SINCRONA, RPM			
	60 hertz	1800	1200	900
	50 hertz	1500	1000	750
3	...	250	225	225
5	250	250	225	200
7.5	250	225	200	200
10	225	200	200	200
15	200	200	200	200
20-200, inclusive	200	200	200	200

MAQUINAS DE INDUCCION.

En las marcas de terminales de máquinas de inducción polifásicas, no están relacionadas con la dirección de rotación de la flecha.

PRINCIPIOS GENERALES PARA TERMINALES DE MARCAS DE MOTORES DE INDUCCION POLIFASICOS.

Las marcas de terminales de un motor, sirven mejor para sus propósitos si indican la relación eléctrica de los circuitos dentro del motor. Los devanados de un motor, raramente son accesibles, y el arreglo del número de terminales varía con la combinación de conexiones de que se requiere. Sin embargo, si un sistema definido de enumeración se usa, las marcas de las terminales puede hacerse para indicar con exactitud la relación de los devanados dentro del motor.

Para motores trifásicos que tengan una sola velocidad, las marcas de terminales deberán ser como se indica en las figuras posteriores.

Esas marcas de terminales se desarrollaron de acuerdo con el procedimiento siguiente, el cual se deberá usar en el desarrollo de las marcas de terminales para otras combinaciones de circuitos de estator de una máquina.

PRIMERO:

A.- En un diagrama vectorial se deberá mostrar una conexión Υ invertida con los circuitos individuales de cada fase arreglados para conexiones serie con la relación de polaridad correcta de los circuitos.

El diagrama para dos circuitos por fase, por ejemplo, se muestran en la figura 9.3 .

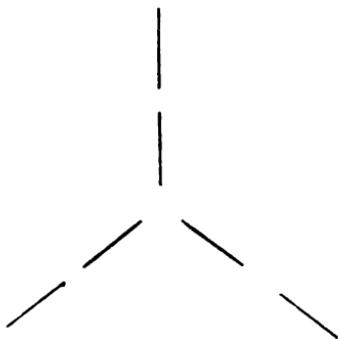


FIG. 9.3 DIAGRAMA PARA DOS CIRCUITOS POR FASE.

SEGUNDO:

B.- Empiece con T1 a la salida y parte superior del diagrama, las terminales del circuito se deberán numerar consecutivamente en dirección de las manecillas del reloj, procediendo en una espiral hacia el centro del diagrama. Para dos circuitos por fase, por ejemplo, las terminales son marcadas como se indica en la figura 9.4

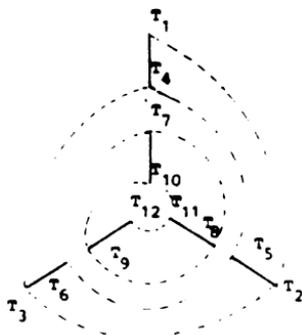


FIG. 9.4 MARCAS DE TERMINALES PARA DOS CIRCUITOS POR FASE.

TERCERO:

C.- Un diagrama vectorial se deberá hacer para mostrar las interconexiones particulares de los circuitos del motor bajo consideración, y las marcas de terminales, determinadas de acuerdo con el par A y B se deberán determinar para dar la relación de polaridad correcta de los circuitos. Por ejemplo, si el devanado mostrado en la figura 9.4 se va a conectar con dos circuitos en múltiple por fase, el diagrama y las marcas se deberán hacer como se muestra en la fig. 9.5

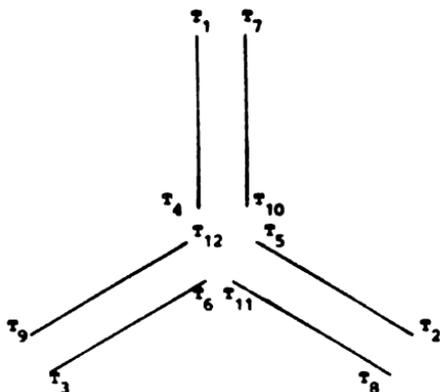


FIG. 9.5 MARCAS DE TERMINALES PARA DOS CIRCUITOS EN MULTIPLE POR FASE.

CUARTO:

D.- Los números menores deberán mantenerse donde dos o más terminales estén conectados conjuntamente. Por ejemplo, si el devanado mostrado en la figura 9.5 tiene dos circuitos en cada fase conectados permanentemente con tres líneas neutras, las marcas de terminales deberán ser como se muestra en la figura 9.6

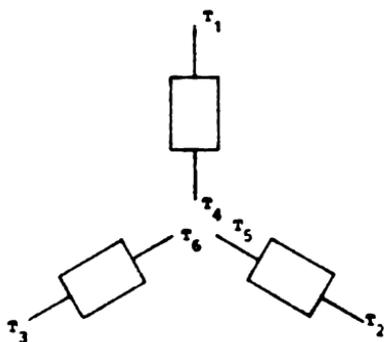


FIG. 9.6 MARCAS DE TERMINALES PARA DOS CIRCUITOS EN MULTIPLE POR FASE, PERMANENTEMENTE CONECTADOS.

o, si el devanado mostrado en la Fig. 9.4 se arreglara para ser conectado, ya sea en serie en conexión múltiple, con el neutro externo, el diagrama vectorial deberá ser como se muestra en la figura 9.7

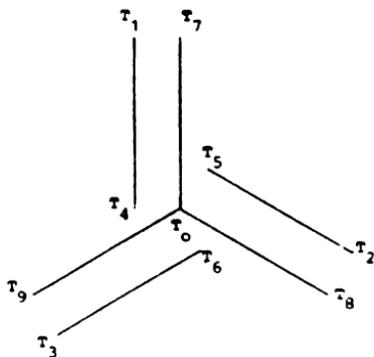


FIG. 9.7 MARCAS DE TERMINALES EN CONECCIONES CON EL NEUTRO EXTERNO.

QUINTO:

Cuando las terminales de los 3 devanados se conectan conjuntamente para formar un neutro permanente, el marcado de terminales de las 3 líneas se conectará. Si el neutro es externo deberá marcarse con T0, como indica la figura 9.7

9.12 FRECUENCIA.

Las frecuencias nominales deben ser 50/60 ó 60 Hz.

Los motores de corriente alterna deben operar correctamente a su carga y tensión nominales bajo una variación de frecuencia de $\pm 5\%$ de su valor nominal.

VARIACION COMBINADA DE TENSION Y FRECUENCIA.

Los motores de corriente alterna deben operar correctamente con su carga nominal, bajo una variación combinada de tensión y frecuencia de tal manera que la suma de ambos por cientos no exceda del $\pm 10\%$ de sus valores nominales, con tal que la variación de frecuencia no exceda del 5%.

9.6 DATOS DE PLACA PARA MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA Y MOTORES UNIVERSALES.

La siguiente información o datos son los mínimos que debe llevar la placa de características, de cualquier motor de corriente alterna monofásico o trifásico de jaula, en forma indeleble y en lugar visible.

Nombre o marca registrada del fabricante.

Modelo y designación de armazón.

Potencia en KW

Tensión nominal en Volts

Corriente a carga plena en Amperes

Frecuencia en Hertz

Número de Fases

Diagrama de conexiones.

Letras de clave para KVA a rotor bloqueado por KW (opcional)

Letra de diseño

Factor de servicio

Tiempo de operación.

Clase de aislamiento

Velocidad a carga plena, en R.P.M.

Temperatura ambiente máxima

Características de lubricación

Designación de rodamientos

Número de autorización (Norma)

La leyenda del país de fabricación.

C A P I T U L O X

METODOS DE PRUEBA.

En este capítulo se enumeran las pruebas que se aplican a los motores para verificar su correcto ensamble y adecuado diseño; en su mayor parte son las mismas pruebas que se aplican a los transformadores o equivalentes.

Las pruebas que se mencionan a continuación son extraídas de - las Normas siguientes: NEMA-Mg 1-1978 Capítulo 12, NOM-J-175 Motores de Inducción y la Norma ANSI/IEEE-112-1978- Pruebas para Motores Polifásicos de Inducción.

10.1 PRUEBA DE ALTO POTENCIAL

La prueba de alto potencial consiste en la aplicación de grandes voltajes con respecto a la relación de voltaje, durante un tiempo especificado - con el propósito de determinar el grado de averías contra el material aislante y espaciamentos bajo condiciones normales. El método más comunmente usado es el - del voltmetro.

El voltaje de prueba de alto potencial debe ser aplicado sucesivamente entre cada circuito eléctrico y la armadura, con el devanado que no está bajo prueba y las otras partes de metal conectadas al armazón. Los devanados polifásicos interconectados se consideran un circuito. Todos los accesorios como - capacitores, apartarrayos, transformadores de corriente y aquellos que estén lo-

calizados en las terminales de la máquina deben ser conectados durante la prueba. Los conductores no deberán conectarse debido a que pueden sufrir un esfuerzo extremadamente severo en algún punto del devanado.

La prueba debe efectuarse aplicando voltajes de prueba llegando al máximo en el menor tiempo posible durante 1 minuto. La frecuencia debe ser de 50 a 60 Hertz y el valor efectivo de voltaje debe ser el valor de cresta dividido entre la raíz cuadrada de dos. La forma de onda puede tener un factor de desviación no mayor de 0.1

El voltaje de la prueba de alto potencial debe ser aplicado sucesivamente entre cada circuito eléctrico y el armazón (o núcleo). Los devanados que no estén bajo prueba y todas las demás partes de metal deberán conectarse a la armadura durante la prueba. Un circuito eléctrico consiste de todos los embobinados y otras partes cargadas que son conectadas conductivamente a la misma -- fuente de poder o líneas de carga.

Los componentes del circuito de escobillas (diodos, tiristores, etc.) en un excitador de escobillas ensamblado y el campo del devanado en una máquina síncrona deben ser cortocircuitados (no aterrizados durante la prueba). Los componentes del tipo calentadores, termostatos, coples térmicos, termistores, detectores de temperatura por resistencia (RTD) que son conectados en otra línea del circuito, deben ser probados al doble de su relación de voltaje más 1000 volts con todos los otros devanados y componentes conectados juntos al armazón. La relación de voltaje de termostatos, acopladores térmicos y RTD deben tomarse como sigue:

Termostatos 600 V
Acopladores Térmicos RTD.
Y Termistores 50 V.

La ruptura de aislamiento durante la aplicación de la prueba debe ser considerada como evidencia de falla dieléctrica, excepto en el desarrollo de la prueba en motores de potencia fraccionaria, en tal caso, la falla dieléctrica debe consistir en corrientes resistivas de fuga en exceso de un valor especificado.

Cuando una prueba de alto potencial es efectuada después de su instalación en una nueva máquina la cual ha pasado previamente su prueba en la factoría y cuyos embobinados no han sido perturbados, la prueba de voltaje debe ser de 75% en lo anotado anteriormente.

La prueba de alto potencial para motores de 1/2 HP (ó 373 watts) y mayores debe ser por la aplicación de un voltaje igual a 1000 volts, más el doble de la relación de voltaje del motor. Para motores de rotor con devanado aislado no conectado a la línea y de 1/2 HP ó 373 watts y mayores se debe aplicar un voltaje de 1000 volts.

La prueba de voltaje para devanados secundarios de motores de inducción con rotor de fase partida debe ser de 1000 volts más el doble del máximo voltaje inducido entre anillos rozantes, tanto en circuito abierto como a rotor bloqueado con el voltaje primario aplicado tanto a las terminales del estator como en servicio. Entonces el voltaje inducido en el rotor es una función de ambos:

la velocidad del rotor y el voltaje impreso en el estator la prueba de voltaje aplicado en el rotor debe ser determinada desde la combinación de estas dos -- condiciones, las cuales proporcionan el mayor voltaje inducido en el rotor.

Para motores reversibles, la prueba debe tener un voltaje de -- 1000 volts. más 4 períodos al máximo voltaje inducido entre anillos rozantes -- tanto en circuito abierto como a rotor bloqueado con la relación de voltaje -- aplicado a las terminales del estator.

En los motores de menos de 0.5 HP el voltaje aplicado durante -- la prueba debe ser de 1000 V efectivos.

10.2 PRUEBA DE POTENCIAL UTIL Y CORRIENTE DE PLENA CARGA.

El motor bajo prueba se acopla a un electrodinamómetro y se aumenta gradualmente la carga mediante un reóstato, hasta que en el tacómetro tengamos la velocidad nominal indicada en la placa, obteniendo el par por cálculos. La tensión y frecuencia deben ser las nominales, controladas por un voltmetro y frecuencímetro, respectivamente; la corriente nominal de plena carga se determina por un ampérmetro directamente. La potencia útil se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$P_u = \frac{T_n \cdot N}{K}$$

donde:

P_u = potencia útil en KW.

T_n = par de carga medido en Kg-m, correspondiente al par nominal de plena carga.

N = Velocidad en RPM, correspondiente a la velocidad nominal.

K = 4500 (constante de conversión).

10.3 EFICIENCIA.

La eficiencia es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada. La potencia eléctrica es medida directamente al igual que la mecánica. La eficiencia debe ser determinada para un determinado voltaje y frecuencia.

Para determinar esta característica de un motor existen dos métodos: el de dinamómetro y el de freno, el primero para máquinas de 500 HP a 1800 RPM o equivalentes de la relación de par con otras velocidades. Para máquinas -- grandes el método de rebombao puede ser utilizado siempre que se obtengan las máquinas por duplicado.

Algunos motores pueden experimentar un cambio en la eficiencia - hasta que los cojinetes alcanzan unas condiciones de operación estabilizadas, las cuales, puede considerarse que ocurren siempre que la potencia de entrada sin carga (o acoplada a un dinamómetro desenergizado) no varíe más de 3% bajo alguna de las siguientes condiciones.

- 1.- Dos lecturas sucesivas en intervalos de media hora.
- 2.- Una lectura antes y otra durante la prueba de eficiencia.

Las lecturas de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, deslizamiento, par, temperatura ambiental, temperatura del devanado del estator, deben ser obtenidas en seis puntos de carga substanciales igualmente espaciados.

METODO DEL FRENO

El motor es cargado por medio de un freno mecánico el cual es capaz de ser ajustado al par de carga deseado. Deberá tenerse cuidado en la construcción y uso del freno y polea del freno. La "tara", si está presente, deberá ser cuidadosamente determinada y compensada.

METODO DEL DINAMOMETRO.

El otro método de medición mecánica de la potencia de una máquina de inducción es cargando la misma con un dinamómetro. La potencia en watts es obtenida de la siguiente ecuación:

$$P = K. N. T.$$

donde;

P= potencia en watts.

N= velocidad angular en rpm

$k = 0.1047$ si T está en N.M

$k = 0.1420$ si T está en Lb-ft.

Para obtener resultados exactos, la capacidad del dinamómetro no debe exceder en tres veces la capacidad del motor, y su sensibilidad a un par debe ser del 0.25 por ciento del mismo par.

METODO DE MAQUINAS DUPLICADAS.

Este método solo puede ser aplicado cuando se dispone de máquinas duplicadas. Las dos máquinas son acopladas juntas y conectadas eléctricamente a dos fuentes de poder, la frecuencia de una será ajustable. Una máquina se opera como motor a su relación de voltaje y frecuencia y la otra es manejada como un generador a una relación de tensión por Hertz, pero a baja frecuencia para producir la carga deseada.

Se debe tomar lecturas de la magnitud eléctrica de entrada y salida, temperatura de devanados del estator o resistencia del devanado del estator y deslizamiento; se debe repetir la prueba con el flujo en sentido contrario. La frecuencia de la primera máquina permanecerá intercambiada mientras que la de la segunda se aumentará para producir la carga deseada, la posición de los instrumentos no debe ser cambiada.

Las pérdidas de la máquina se obtienen de la siguiente manera:

a).- Las pérdidas del estator I^2R a la temperatura de la prueba es calculada para cada máquina, utilizando la corriente observada.

b).- Las pérdidas del rotor I^2R son:

Deslizamiento del motor X (Entrada del Motor - Pérdidas I^2R - Pérdidas del núcleo)

Se debe utilizar el deslizamiento del motor en por unidad de la velocidad síncrona.

c).- Las pérdidas del rotor del generador I^2R son:

Deslizamiento del generador X (salida del generador + Pérdidas I^2R del estator + Pérdidas del núcleo).

Se debe utilizar el deslizamiento del generador en por unidad de la velocidad síncrona.

d).- La combinación de pérdidas indeterminadas se calculan por resta de las pérdidas totales medidas (la diferencia entre la entrada y la salida) la suma de las pérdidas I^2R del estator, pérdidas I^2R del rotor, pérdidas del núcleo, pérdidas por fricción y blindaje de las dos máquinas.

e).- Se asume que las pérdidas indeterminadas deben ser proporcionales al cuadrado de la corriente del rotor y se toma como sigue:

$$\text{Pérdidas Indeter-} = \frac{\text{Pérdidas } I^2R \text{ del rotor del Motor} \times \text{Pérdidas In-}}{\text{minadas del Motor}} = \frac{\text{determinadas Combinadas.}}{\text{Pérdidas } I^2R \text{ del rotor del Motor} \times \text{Pérdidas } I^2R \text{ del Rotor del Generador.}}$$

$$\text{Pérdidas Indeter-} \\ \text{minadas del Geng} = \text{Pérdidas Indeterminadas Combinadas- Pérdidas Inde-} \\ \text{rador.} \quad \text{terminadas del motor.}$$

El promedio de los resultados contenidos en las dos direcciones del flujo debe tomarse como el valor correcto de las pérdidas Indeterminadas:

Por lo tanto, la eficiencia se considera como:

$$\text{Eficiencia del Motor} = \frac{\text{entrada eléctrica} - \text{Pérdidas totales del Motor}}{\text{entrada eléctrica}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia del Genera-} \\ \text{dor (\%)} = \frac{\text{salida eléctrica}}{\text{salida eléctrica} + \text{Pérdidas totales del Gene-}} \times 100 \\ \text{rador.}$$

Las pérdidas totales son iguales a la suma de pérdidas I^2R del rotor y del estator corregidas a la temperatura especificada para corrección - por resistencia, pérdidas del núcleo, pérdidas de fricción y blindaje y pérdidas indeterminadas.

Cuando la relación carga-temperatura se incrementa no ha sido bien medida, la resistencia del devanado debe ser corregida a la siguiente temperatura:

CLASE DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA (°C)
A	75
B	95
F	115
H	130

Esta referencia de temperatura debe ser usada para determinar - las pérdidas I^2R y la carga.

MEDICIONES INICIALES

Para obtener ciertos datos, es necesario acoplar, sujetar o engranar la máquina a una carga variable, los datos requeridos son:

Resistencia del estator

Corriente sin carga y

Pérdidas sin carga

Deslizamiento del rotor

Potencia de entrada

Corriente de línea
 Voltaje
 Pérdidas Indeterminadas

- METODO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.

Cuando no se efectúan las pruebas con carga, las características de operación (eficiencia, par, factor de potencia, etc.) son calculadas en vacío y la impedancia se calcula mediante el circuito equivalente. Las constantes requeridas se calculan utilizando las ecuaciones de las formas F-1, F-2 y F-3 que influyen en el caso de un motor típico. Los resultados de los cálculos de la forma F-3 pueden ser trazados en forma de curva. La exactitud en la predicción de las características de la máquina por el circuito equivalente dependerá de la cercanía a la cual r_2 represente la actual resistencia del rotor a corrientes de baja frecuencia.

Un procedimiento más cuidadoso durante la prueba de impedancia a baja temperatura es imperativo; una alternativa del método se describe más adelante.

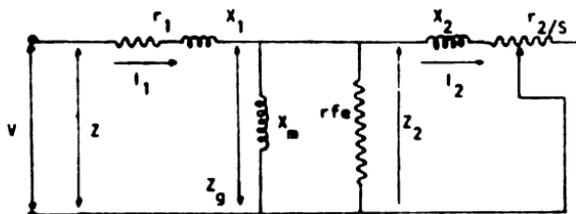


FIG. 1 CIRCUITO EQUIVALENTE.

La forma F-1 está dispuesta sobre la base de que X_1 y X_2 permanecen constantes durante la operación de la máquina. La curva de corriente contra voltaje parte como una línea bajo el rango de corriente en consideración, - en cada columna de cálculos en la forma F-3 deben usarse los valores de reactancia obtenidos de esta curva para el valor de I_1 obtenido en la columna.

El valor del deslizamiento se obtiene de la siguiente ecuación:

$$s = \frac{r^2}{\sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

10.4 PERDIDAS

Las pérdidas de una máquina de inducción

TIPO DE PERDIDAS	DESCRIPCION
a) Fricción y blindaje	Pérdidas mecánicas debidas a los cojinetes, fricción y blindaje.
b) Núcleo	Pérdidas en el hierro sin carga.
c) I^2R del estator	Pérdida en el devanado del estator.
d) I^2R del rotor	Pérdidas en el devanado del rotor (y delgas por contacto de la máquina del rotor devanado)
e) Indeterminados	En el acero y corrientes parásitas en conductores.

PERDIDAS I^2R DEL ESTATOR.

Estas pérdidas son equivalentes a:

1.5 I^2R para 3 fases

2.0 I^2R para 2 fases

Cuando I es medida o calculada por corriente media a la terminal de carga especificada y R es la resistencia de corriente directa entre sólo dos líneas terminales a una temperatura específica.

PERDIDAS DEL ROTOR.

Las pérdidas del rotor incluyen las de anillos rozantes para máquinas de rotor devanado y deben ser determinadas a partir del deslizamiento, entonces se pueden determinar con exactitud usando la siguiente ecuación:

Pérdidas del Rotor = (Entradas al estator-pérdidas del estator-pérdidas del núcleo) x deslizamiento.

Cuando el deslizamiento es en por unidad de velocidad síncrona.

PERDIDAS POR BLINDAJE, FRICCIÓN Y DEL NUCLEO.

Una curva de potencia de entrada contra voltaje es trazada y la curva obtenida se prolonga hasta la tensión cero. La intersección con el eje de

voltaje cero serán las pérdidas por fricción y blindaje. La intersección puede ser determinada con mayor precisión si la entrada es prolongada con el voltaje al cuadrado para valores en un bajo rango de voltaje.

Un ejemplo es la línea curva mostrada a continuación:

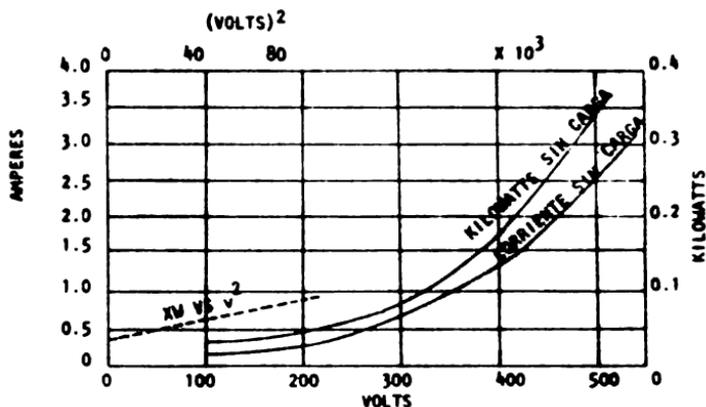


FIG. 2 EXTRAPOLACION DE KILOWATTS SIN CARGA A VOLTAJE CERO.

PERDIDAS INDETERMINADAS.

Las pérdidas indeterminadas son una porción de las pérdidas totales de una máquina no estando consideradas en la suma de las pérdidas por fricción y blindaje del estator y del rotor.

El total de las pérdidas indeterminadas pueden ser calculadas por medición de las pérdidas totales y restando de ellas la suma de las pérdidas anotadas en el párrafo anterior.

Las pérdidas indeterminadas cuando ocurren a frecuencia nominal pueden ser determinadas por aplicación de corrientes polifásicas balanceadas en las terminales del devanado del estator con el rotor distante. La entrada eléctrica menos las pérdidas del estator (I^2R) a la resistencia de prueba es igual a las pérdidas indeterminadas a la frecuencia fundamental.

Las pérdidas indeterminadas que ocurren a altas frecuencias pueden ser determinadas por una prueba de rotación inversa; con el motor completamente armado se le aplica un voltaje polifásico balanceado en las terminales de los devanados del estator, el rotor es conducido por medios externos a su exacta velocidad síncrona en dirección contraria al campo de rotación del estator. La potencia mecánica requerida para mover el rotor debe ser medida con y sin corriente aplicado a las terminales del estator. Para motores de rotor devanado las terminales del rotor deben corto circuitarse.

Las pérdidas indeterminadas deben ser calculadas como sigue:

$$\text{Pérdidas indeterminadas} = LL_s + LL_r$$

Los valores de LL_s y LL_r son para el mismo valor de la corriente I_t del devanado del estator donde:

- $LL_s = W_s - \text{pérdidas } I^2R \text{ del devanado del estator}$
- $LL_r = (Pr - Pf) - (Wr - LL_s - \text{pérdidas } I^2R \text{ del devanado del estator})$
- $LL_s = \text{Pérdidas indeterminadas a frecuencia fundamental}$
- $LL_r = \text{Pérdidas indeterminadas a altas frecuencias.}$

- Pr = Potencia mecánica requerida para mover el rotor con voltaje aplicado a la terminal del estator.
- Pf = Potencia mecánica requerida para mover el rotor sin voltaje aplicada a las terminales del devanado del estator.
- Ws = Potencia eléctrica de entrada al estator con rotor distante.
- Wr = Potencia eléctrica de entrada al estator durante la prueba de rotación en reverse.

Para motores con rotor devanado, el rotor se excita con corriente directa y las terminales del estator son corto circuitadas con ampérmetros para tomar lecturas de corriente. El rotor es accionado por medios externos a la velocidad síncrona; la excitación del rotor es ajustada hasta que la corriente circulante en el estator tiene el valor deseado correspondiente a las pérdidas indeterminadas, de acuerdo a lo anterior, la corriente de una máquina operando normalmente es:

$$I_t = \sqrt{I^2 - I_o^2}$$

- I_t = Valor de la corriente del devanado del estator durante la prueba de pérdidas indeterminadas.
- I_o = Valor de corriente sin carga.
- I = Valor de operación de corriente de línea del estator para las cuales se han determinado las pérdidas indeterminadas.

10.5 DESLIZAMIENTO

El deslizamiento debe ser medido para el rango de carga para el cual se determina la eficiencia, los contadores de velocidad o tacómetro no son

suficientemente precisos para medir el deslizamiento, se recomiendan los tacómetros digitales o estroboscopios, debiendo corregir a la temperatura específica del estator como sigue:

$$S = s \left(\frac{T_s + k}{T_t + k} \right)$$

k = 234.5 para cobre

= 225 para aluminio basado en un volumen conductivo del 62%

S = deslizamiento corregido a la temperatura T_t normalizada.

s = deslizamiento medido a la temperatura T_t del devanado del estator.

T_s = temperatura específica para corrección de resistencia.

T_t = temperatura del devanado del estator durante la prueba con carga.

10.6 PAR Y CORRIENTE DE ARRANQUE.

El motor se bloquea por medio de una palanca mecánica en posición horizontal y se le aplica tensión nominal a frecuencia nominal durante un tiempo máximo de 5 segundos, el par de arranque se obtendrá de la ecuación siguiente:

$$T_a = L \times P$$

donde:

L = Longitud del brazo de palanca, en metros.

P = fuerza ejercida por el brazo de palanca sobre un dinamómetro en Kgs.

Ta = par de arranque.

10.7 PAR MAXIMO

Se arranca el motor sin carga, acoplado a un electrodinamómetro a tensión y frecuencia nominales y se suministra la carga, aumentándola en incrementos no mayores del 25% de la carga plena, se mide la velocidad y el par a diferentes cargas, el par máximo corresponde al punto más alto de la curva en que la velocidad decrece súbitamente.

10.8 FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia es la relación de watts por volt-amper.

Factor de potencia para:

$$\text{Tres fases} = \frac{\text{watts}}{\text{volts de línea} \times \text{amper de línea} \times 1.732}$$

$$\text{Dos fases} = \frac{\text{watts}}{\text{volts de fase} \times \text{amper de fase} \times 2}$$

Para máquinas de tres fases el factor de potencia puede ser checado por la ecuación siguiente cuando se utilizan dos voltímetros.

$$\text{Factor de potencia (fp.)} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}\right)}}$$

10.9 PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO.

Las pruebas a máquinas de inducción bajo condiciones de rotor bloqueado involucran grandes esfuerzos mecánicos y desarrollan mucho calor, por consiguiente es necesario que los medios mecánicos para bloquear el rotor proporcionen el esfuerzo adecuado para prevenir daños al personal y al equipo y que la dirección de rotación se defina antes de la prueba.

Cuando la prueba se efectúa para revisar la calidad de una máquina -- jaula de ardilla, la corriente de línea debe ser aproximadamente 86% y la potencia de entrada será del 50% de los valores correspondientes obtenidos con potencia polifásica. El par de rotor bloqueado es considerado como el par mínimo desarrollado del reposo en toda posición angular del rotor, puede ser medido con cuerda y polea o con un freno o vigueta: Los motores de rotor devanado y la reluctancia en motores síncronos están siempre sujetos a variaciones en el par -- del rotor bloqueado dependiendo de la posición angular del rotor con respecto -- al estator.

Para máquinas jaula de ardilla es común situar el rotor en una posición conveniente, si este par no es medido directamente, puede calcularse como sigue:

$$T = K \frac{(P_{si} - P_{cu} - P_c) C_1}{n_s}$$

donde:

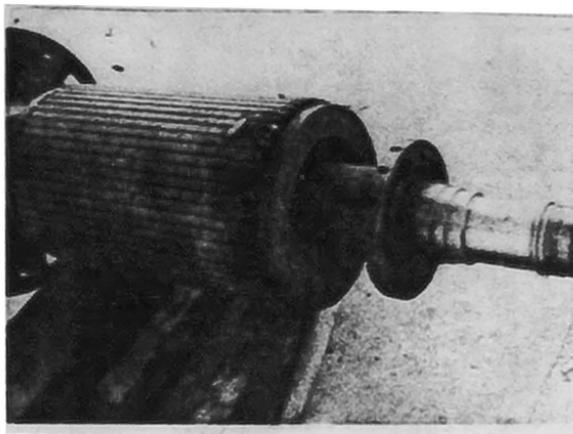
- Psi = potencia de entrada al estator, en Kw.
- Pcu = pérdidas I^2R del estator en Kw de la prueba de corriente.
- Pc = pérdidas de núcleo en Kw.
- ns = velocidad síncrona, r/min.
- C₁ = Factor de reducción (varía entre 0.9 y 1) para pérdidas no fundamentales.
- k = 9549 para T en N.m
- = 7043 para T en Lb-ft.

Cuando la representación del motor está determinada por el método del circuito equivalente se requieren las curvas de impedancia, que consisten en lecturas de voltaje, corriente y potencia de entrada, con el rotor bloqueado y -- corto-circuitado, con voltaje y frecuencia constantes.

10.10 PRUEBA DE PAR-VELOCIDAD Y CORRIENTE-VELOCIDAD.

La característica par-velocidad es la relación entre ejes coordenados en par y velocidad, abarcando desde cero hasta la velocidad síncrona, cuando esta relación se expresa como una curva, deberá incluir el par máximo ----- (breakdown), par de arranque (pull-up) y el par de rotor bloqueado.

Las características velocidad-corriente es la relación entre amperios, la curva es considerada en la misma forma que la curva de par-velocidad, --- usando una escala común de velocidad para ambas curvas.



METODO DE MEDICIONES FINALES.

Un generador de corriente directa del que previamente se han determinado sus pérdidas se acopla al motor bajo prueba, una fuente de poder de corriente alterna con frecuencia nominal se conecta a las terminales del motor, el voltaje debe ser tan grande que pueda imprimirse sobre las terminales del motor sin excesivo calentamiento: La medición de la velocidad debe ser particularmente exacta a bajo deslizamiento. La potencia total de salida del motor es la suma de la salida y las pérdidas del generador de corriente directa. El par (T) es calculado, para cada velocidad con la siguiente ecuación:

$$T = k \frac{(P_{GO} + P_{GL})}{n}$$

donde:

- P_{GO} = salida del generador de corriente directa, en Kw.
- P_{GL} = pérdidas del generador de corriente directa, en Kw.
- n = velocidad de prueba del motor, r/min.
- k = 7043 para T en Lb - ft
- = 9549 para T en N - m

METODO DE ACELERACION.

En este método el motor es arrancado sin carga y el valor de la aceleración es determinado a varias velocidades. El par a cada velocidad es determinado a partir de la aceleración de la masa de las partes rotatorias, siendo

esencial la exactitud en la medición de aceleración y velocidad: el motor debe ser operado a la frecuencia de una fuente de potencia de corriente alterna.

El par T a cada velocidad es calculado de la aceleración por medio de la ecuación:

$$T = \frac{J}{k} \left(\frac{dn}{dt} \right)$$

que expresada en el sistema internacional significa:

T : par en N.m

J - momento de inercia de las partes rotatorias, en $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$

$\frac{dn}{dt}$ = aceleración a cada velocidad, r/min/seg.

k = 9.549

METODO DE LECTURAS INICIALES.

En este método el par se determina por la resta de las pérdidas de la potencia de entrada de la máquina, prácticamente este método es aproximado, porque las pérdidas del estator determinadas bajo condiciones de operación son - aproximadas y está sujeto a error en el caso de máquinas especiales, las cuales pueden estar sujetas a pares armónicos positivos o negativos, las líneas de voltaje, corriente, potencia y velocidad deben trazarse contra tiempo.

El par T en cada velocidad es determinado de la potencia de entrada por la ecuación:

$$T = k \left(\frac{P_{si} - P_{cu} - P_c - LL_s - LL_r}{ns} \left(\frac{n}{ns} \right)^{0.5} \right) - T_{FW}$$

donde:

P_{si} = potencia de entrada al estator, KW

P_{cu} = pérdidas I^2R del estator en Kw

P_c = pérdidas del núcleo en Kw.

LL_s = pérdidas indeterminadas a frecuencia fundamental en Kw.

LL_r = pérdidas indeterminadas a alta frecuencia.

n = velocidad de prueba r/min.

ns = velocidad síncrona r/min.

k = 7043 para T en lb-ft

k = 9549 para T en N-m

T_{FW} = fricción del motor y par de blindaje a velocidad de prueba, en lb-ft ó N-m.

10.11 PRUEBA DE TEMPERATURA.

El propósito de esta prueba es determinar el incremento de temperatura en ciertas partes de la máquina sobre la temperatura ambiente cuando funciona bajo condiciones de carga específicas.

La máquina debe ser resguardada de corrientes de aire, la temperatura de rotores y otras partes de máquinas totalmente cerradas, usando el método del termómetro, debe obtenerse cerrando la máquina y por aplicación del termómetro a las partes más calientes lo cual puede hacerse accesible removiendo la cubierta.

En el método de carga para desarrollar esta prueba existen dos opciones, primeramente, con el sistema de carga real la máquina es cargada como un motor o generador bajo las condiciones deseadas; en la segunda opción, llamado método de carga equivalente sobrepuesto, la máquina se conecta como lo indica la figura 3, siendo operada sin carga desde una fuente de poder principal y se sobrepone una fuente auxiliar de bajo voltaje a diferente frecuencia. Generalmente, el incremento de temperatura se determina por operación con las fuentes de poder sobrepuestas a una frecuencia de 10 Hz abajo de la frecuencia de operación normal y con el voltaje ajustado tal que la corriente primaria es igual al valor nominal.

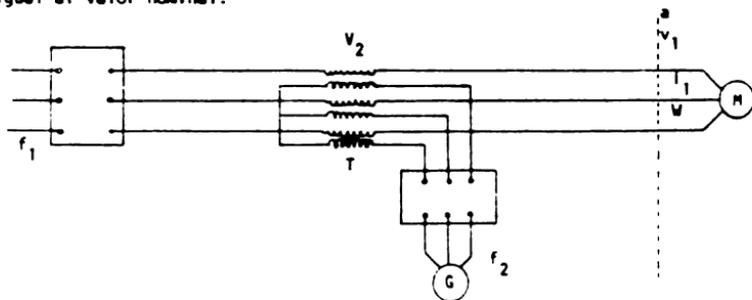


FIG. 3 CONEXION TIPICA PARA CARGA EQUIVALENTE SOBREPUESTA.

M = motor bajo prueba

T = transformador en serie

a = conexión de voltmetro
ampermetro y wattmetro.

G = generador auxiliar

V_1 = terminal de voltaje

f_1 = frecuencia

i_1 = corriente primaria

V_2 = voltaje auxiliar

f_2 = frecuencia auxiliar

W = potencia de entrada.

METODO DEL TERMOMETRO.

En este método se determina la temperatura por termómetro de alcohol o mercurio, por termómetros de resistencia o por acoplamientos térmicos; con uno de estos instrumentos aplicados a las partes calientes de la máquina se obtiene directamente la temperatura.

METODO DEL DETECTOR EMBEBIDO.

Este método determina la temperatura por termocoples o termómetros de resistencia dentro de la estructura de la máquina. Se deben usar instrumentos especialmente diseñados con termómetros de resistencia para prevenir la introducción de errores significativos o daños debidos al calor durante la medición.

METODO DE LA RESISTENCIA.

La determinación de temperatura se efectúa por comparación de la resistencia del devanado a temperatura normal contra la resistencia a la nueva -

temperatura. La temperatura del devanado se calcula por la siguiente ecuación:

$$t_t = t_b + \frac{(R_t - R_b)}{R_b} (t_b + k)$$

donde:

- t_t = temperatura total del devanado cuando R_t fue medida ($^{\circ}\text{C}$)
- R_t = resistencia medida durante la prueba, en ohms
- R_b = referencia de resistencia previamente medida a la nueva temperatura t_b en ohms.
- t_b = temperatura del devanado al valor referente de resistencia ($^{\circ}\text{C}$)
- k = 234.5 para cobre puro.
= 225 para aluminio basado en una conductividad del 62%.

Entonces un pequeño error en la medición de resistencia produce un error comparativamente grande en la determinación de temperatura, la resistencia del devanado debe ser medida por un puente doble u otro método exacto equivalente.

En una máquina jaula de ardilla, el cambio de resistencia en el rotor debido al calor produce un cambio en el deslizamiento.

Para un valor de par, la temperatura del rotor puede ser determinada indirectamente por el deslizamiento en caliente (S_h) y lecturas de deslizamiento en frío, S_c , substituyendo S_h por R_t y S_c por R_b en la ecuación anterior. El deslizamiento debe determinarse con precisión para ambas condiciones, pudiendo

presentarse el mismo error que en las lecturas de resistencia.

METODO DE LOS DETECTORES LOCALES DE TEMPERATURA.

La temperatura local de varias partes de la máquina puede ser determinada usando detectores locales de temperatura, los cuales no deben ser mayores de 5 cm. El elemento detector es colocado en la proximidad de la parte cuya temperatura local se desea medir; estos detectores pueden ser termocoples, termómetros de pequeño resistencia y termistores, los cuales son frecuentemente instalados como partes permanentes de una máquina en lugares no accesibles a termómetros de alcohol o mercurio, como son los conductores de los devanados, laminación del núcleo dentro de un paquete y temperatura de devanados a los lados -- del núcleo.

Las temperaturas tomadas por el método del termómetro pueden ser medidas en las siguientes partes: las dos últimas piezas del núcleo del estator y del rotor, armazón, ambiente, rodamientos, descarga de aire desde el armazón o ductos de descarga de aire.

INCREMENTO DE TEMPERATURA.

En los motores marcados con un sistema diseñado de aislamiento y temperatura ambiente, el incremento de la temperatura sobre el enfriamiento medio, para cada una de las partes del motor no debe exceder los valores dados en la siguiente tabla, excepto cuando tienen un factor de servicio mayor de 1.

MAXIMO INCREMENTO DE TEMPERATURA

CLASE DE AISLAMIENTO	A	B	F	H
DEVANADOS				
Motor Abierto (resistencia de)	60	80	105	125
Motor abierto con factor de servicio de 1.15 ó mayor (resistencia de)	70	90	115	
Motor cerrado enfriado por ventilador (resistencia de)	60	80	105	125
Motor cerrado no ventilado (resistencia de).	65	85	110	135
Motor con devanado encapsulado y factor de servicio de 1.0 (resistencia de).	65	85	110	

Las temperaturas obtenidas en núcleo y partes mecánicas no deben dañar la máquina en algún aspecto.

Magnitudes en °C; basado en una temperatura ambiente máxima de 40°C.

FORMA A1

REPORTE TÍPICO DE FORMA DE PRUEBA PARA PRUEBAS DE RUTINA EN MOTORES DE INDUCCIÓN.

Nombre del Fabricante _____

Dirección del Fabricante _____

Comprador _____

Fecha de prueba _____

No. de orden del fabricante _____

No. de orden del comprador _____

DATOS DE PLACA

N.P. NOMINAL	FACTOR DE SERVICIO	VELOCIDAD NOMINAL (rpm)	FASES	FRECUENCIA Hz	VOLTS	AMPERES

TIPO ARMADURA	ELEVACION DE TEMPERATURA POR EL MÉTODO INDICADO.	TEMPERATURA AMBIENTE Y CLASE DE AISLAMIENTO.	RELACION DE TIEMPO.	DISEÑO DE LETRAS.	CODIGO DE LETRAS KVA/HP

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

SERIE No.	SIN CARGA					CON CARGA				
	VOLTS	FRECUENCIA Hz	VELOCIDAD rpm	AMPERES	KILO WATTS	VOLTS	FRECUENCIA Hz	VELOCIDAD rpm	AMPERES	KILO WATTS

FORMA A 2

REPORTE TÍPICO DE FORMA DE PRUEBA PARA MOTORES DE INDUCCIÓN

Nombre del Fabricante _____	Número de orden del Fabricante _____
Dirección del Fabricante _____	Fecha de prueba _____
Número de serie _____	Número de orden del comprador. _____
Número de modelo _____	
Comprador _____	

DATOS DE PLACA

N.P. NOMINALES	FACTOR DE SERVICIO	VELOCIDAD NOMINAL (r.p.m.)	FASES	FRECUENCIA Hz	VOLTS	AMPERES	TIPO	ARMADURA

ELEVACION DE TEMPERATURA

CONDICIONES DE LA PRUEBA			ELEVACION DE TEMPERATURA °C	
			ESTATOR	ROTOR
			DEVANADOS a Por	DEVANADOS b Por
			Método	Método

CARACTERISTICAS

RELACION DE DESLIZAMIENTO	CORRIENTE DE LINEA, SIM - CARGA, AMPERES.	VOLTS EN EL SECUNDARIO (MOTOR PARADO)	AMPERES EN EL SECUNDARIO POR ANILLO A CARGA NOMINAL.	RESISTENCIA A 25°C (ENTRE LINEAS) --- ohms
				PRIMARIO
				SECUNDARIO

PAR Y CORRIENTE DE ARRANQUE

PAR DE ARRANQUE IN _____ **	PAR A ROTOR BLOQUEADO EN _____ ** CON _____ % VOLTA- JE APLICADO	CORRIENTE DE ARRANQUE AMPERES (ROTOR BLOQUEA- DO) CON _____ % VOL- TAJE APLICADO.

PRUEBA DE ALTO POTENCIAL

VOLTS AC PARA _____	SEC.
ESTATOR	ROTOR

EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA

EFICIENCIA EN POR CIENTO		FACTOR DE POTENCIA EN POR CIENTO			
CARGA NOMINAL	75% DE CARGA	50% DE CARGA	CARGA NOMINAL	75% DE CARGA	50% DE CARGA

Notas

Fecha de la prueba en _____ motor
(este o duplicado)

*Indique Método como:

Termómetro

Termocople

Resistencia

Detector Embebido

Aprobado por _____ fecha _____

*Indique las unidades de par como: N-m ó Lb-pie

DATOS OBTENIDOS DE LA CURVA DE FUNCIONAMIENTO

CARGA, POR CIENTO NOMINAL	25	50	75	100	125	150
FACTOR DE POTENCIA, POR CIENTO						
VELOCIDAD, rpm						
CORRIENTE DE LINEA, AMPERES						

t_t = temperatura del devanado del estator determinada de la resistencia del estator o por detector de temperatura durante la prueba.

t_s = temperatura especificada por corrección de la resistencia.

- (1) Correcciones para devanados y pérdidas de par por rodamiento del dinámómetro y es igual a:

$$\frac{(A - B)}{K_n} - C$$

donde:

A = potencia, en watts, requeridos para manejar la máquina cuando se acople la máquina a un dinámómetro con la armadura del dinámómetro en circuito abierto.

B = potencia, en watts, requeridos para manejar la máquina en rodamiento libre y desacoplada

C = par de salida, registrado por un dinámómetro durante la prueba "A".

K = 0.1047 para par en N-m

K = 0.1420 para par en Lb-ft.

n = velocidad en rpm

- (2) Par corregido, es igual al par observado más correcciones (1)
 (5) Este valor es igual a la potencia observada en watts más la corrección (4)
 (6) Eficiencia en por ciento = $\frac{(3)}{(5)} \times 74570$

FORMA B

METODO B: PRUEBA ENTRADA-SALIDA DE MAQUINAS DE INDUCCION

Tipo _____ Diseño _____ Armadura _____ HP _____ Fases _____

Frecuencia _____ Volts _____ Velocidad Síncrona rpm _____ No. de serie _____

Elevación de Temperatura _____ °C Relación de Tiempo _____ No. de Modelo _____

PUNTO DE PRUEBA	1	2	3	4	5	6
(t_s) Temperatura del devanado del Estator °C						
Temperatura Ambiente, °C						
Frecuencia, Hz						
Deslizamiento observado, rpm						
*Deslizamiento correcto, rpm						
Velocidad, rpm						
Par _____ **						
(1) Corrección por Dinamómetro _____ **						
(2) Par corregido						
(3) Potencia de salida, H.P.						
Corriente de línea, Amperes						
Factor de Potencia, por ciento						
Potencia de entrada observada, watts						
(b) Pérdidas I^2R de estator, watts a (t_s) °C						
(c) Pérdidas I^2R de estator, watts a t_t						
(4) Corrección de Entrada = (b) - (c)						
(5) Potencia de Entrada corregida, watts						
(6) Eficiencia en por ciento						

Curvas de Funcionamiento _____

** Indique las unidades de Par como: N-m ó Lb-ft

FORMA E

METODO C: DESARROLLO DE MAQUINA DUPLICADA DE MAQUINAS DE INDUCCION.

METODO E: DESARROLLO DE PERDIDAS SEGREGADAS DE MAQUINAS DE INDUCCION.

Tipo _____ Diseño _____ Armadura _____ HP _____ Fase _____
 Frecuencia _____ Volts _____ Velocidad Síncrona rpm _____ No. de serie _____
 Grados Centígrados de Elevación _____
 de Temperatura _____ Relación de Tiempo _____ No. de Modelo _____

PUNTO DE PRUEBA				
Temperatura del devanado del Estator, t_t °C				
Temperatura ambiente, °C				
Frecuencia, Mz				
Deslizamiento observado, rpm				
(1) Deslizamiento corregido, rpm				
(2) Velocidad, rpm				
Corriente de línea, Amperes				
Factor de Potencia, por ciento				
(3) Potencia de entrada observada, watts				
Pérdidas I^2R del Estator a t_t , watts				
Pérdidas del núcleo, watts				
(4) Potencia de entrada al Rotor, watts				
(5) Pérdidas I^2R del Rotor, watts				
Fricción y Pérdidas al devanar, watts				
Pérdidas de carga indeterminadas, watts				
(6) Pérdidas totales, watts				
(7) Potencia de salida, watts				
Potencia de salida, H.P.				
(8) Eficiencia, en por ciento				

Desarrollo de la Curva _____

SUMARIO DE CARACTERISTICAS

CARGA POR CIENTO NOMINAL	0	25	50	75	100	125
FACTOR DE POTENCIA, POR CIENTO						
EFICIENCIA, POR CIENTO						
VELOCIDAD, r.p.m.						
CORRIENTE DE LINEA, AMPERES						

t_t = temperatura del devanado del estator determinadas de la resistencia del estator o por detector de temperatura durante la prueba.

t_s = temperatura especificada por corrección de la resistencia.

(2) Calculadas como la velocidad síncrona menos velocidad de deslizamiento corregida, rpm.

(4) Es igual a los watts de entrada observados menos pérdidas I^2R del estator, menos pérdidas del núcleo.

(5) Es igual al producto de la entrada del rotor y deslizamiento corregido como una fracción de la velocidad síncrona.

(6) Es igual a la suma de las pérdidas del estator y pérdidas I^2R del rotor, - fricción al devanado y pérdidas de núcleo y pérdidas indeterminadas.

(7) Es igual a los watts de entrada menos pérdidas totales.

(8) Eficiencia en por ciento = $100 - \frac{(6)}{(3)} \times 100$

FORMA F 1

METODO F: NOMENCLATURA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE Y ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS CONSTANTES DE LA MAQUINA.

NOTA: A menos que otra cosa se especifique, todas las impedancias, admitancias y voltajes están por fase para motores de dos fases y por fase para motores trifásicos. Potencia y volt-amperes son por motor completo.

NOMENCLATURA

- V = voltaje de fase, volts
- f = frecuencia, Hertz
- I_1 = línea o corriente de estator, amperes
- I_2 = corriente del rotor, amperes
- s = deslizamiento en por unidad de velocidad síncrona
- m = número de fases
- r_1 = resistencia del estator, corregida para temperatura especificada t_s , ohms.
- r_1' = resistencia del estator a temperatura durante prueba sin carga, ohms.
- r_1'' = resistencia del estator a temperatura durante prueba de impedancia, ohms.
- r_2 = resistencia del rotor referida al estator a temperatura especificada t_s , ohms.
- r_2'' = resistencia del rotor referida al estator a temperatura durante prueba de impedancia, ohms.
- X_1 = fugas de reactancia en el estator, ohms.
- X_2 = fugas de reactancia del rotor referidas al estator, ohms.
- X_m = reactancia magnetizante en ohms.
- b_m = susceptancia magnetizante, ohms⁻¹
- r_{fe} = resistencia del núcleo, ohms.
- g_{fe} = conductancia en el núcleo, ohms⁻¹

VAR = reactancia volt-ampere, vars

W = potencia en watts.

W_h = pérdidas del núcleo, watts

W_f = pérdidas por fricción y al devanado, watts

W_{LL} = pérdidas de carga-desvío, watts

$$= LL_s + LL_r$$

SUBSCRIPCIONES

L = cantidades pertenecientes a la prueba de impedancia

o = cantidades pertenecientes a la prueba sin carga > en operación.

PROCEDIMIENTO

Se debe asumir la relación entre X_1 y X_2 . Cuando se disponga de los detalles de diseño, use la relación (X_1/X_2)

de otro modo use:

$$\frac{X_1}{X_2} = 1.0 \text{ para motores de Diseños A, D y motores de rotor devanado.}$$

$$\frac{X_1}{X_2} = 0.67 \text{ para motores de Diseño B}$$

$$\frac{X_1}{X_2} = 0.43 \text{ para motores de Diseño C}$$

$$VAR = (m V I_1)^2 - W^2$$

$$X_M = \frac{m V_o^2}{VAR_o - m I_o^2} \frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_M}} \quad (1)$$

$$X_{1L} = \frac{VAR_L}{m I_{1L}^2} \frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_M}} + \frac{X_1}{X_M} \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{f}{f_L} x_{1L} \quad \text{-----} \quad (3)$$

Las Ecuaciones (1), (2) y (3) se pueden resolver como sigue:

- (1) Resuelva la ecuación (1) para x_M , asumiendo un valor de $\frac{x_1}{x_M}$
- (2) Resuelva la ecuación (2) para x_{1L} , usando x_M del paso (1)
- (3) Resuelva la ecuación (3) para x_1
- (4) Resuelva la ecuación (1) para x_M , usando x_1 de el paso (3)
- (5) Continúe la solución iterativa hasta que los valores de x_1 y x_M se estabilicen dentro de 0.1%

$$b_M = \frac{1}{x_M} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{x_1}{\frac{x_1}{x_2}} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$w_h = w_o - w_f - m \cdot 10^2 r_1 \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$g_{fe} = \frac{w_h}{m v_o^2} \left(1 + \frac{x_1}{x_M} \right)^2 \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$r_{fe} = \frac{1}{g_{fe}} \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$r_2'' = \frac{w_L}{m \cdot 10^2} - r_1'' \left(1 + \frac{x_2}{x_2} \frac{x_1}{x_M} \right)^2 - \frac{x_2^2}{x_1^2} (x_{1L}^2 g_{fe}) \quad \text{---} \quad (9)$$

$$x_1 = \frac{f}{f_L} x_{1L} \quad \text{-----} \quad (3)$$

Las Ecuaciones (1), (2) y (3) se pueden resolver como sigue:

- (1) Resuelva la ecuación (1) para x_M , asumiendo un valor de $\frac{x_1}{x_M}$
- (2) Resuelva la ecuación (2) para x_{1L} , usando x_M del paso (1)
- (3) Resuelva la ecuación (3) para x_1
- (4) Resuelva la ecuación (1) para x_M , usando x_1 de el paso (3)
- (5) Continúe la solución iterativa hasta que los valores de x_1 y x_M se estabilicen dentro de 0.1%

$$b_M = \frac{1}{x_M} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{x_1}{\frac{x_1}{x_2}} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$W_h = W_0 - Wf - m \cdot 10^2 \cdot r_1 \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$gfe = \frac{W_h}{mVo^2} \cdot \left(1 + \frac{x_1}{x_M} \right)^2 \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$rfe = \frac{1}{gfe} \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$r_2'' = \frac{W_L}{m \cdot 10^2 \cdot 1L} - r'' \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_2} \cdot \frac{x_1}{x_M} \right)^2 - \frac{x_2}{x_1} \cdot \left(x_{1L}^2 \cdot gfe \right) \quad \text{---} \quad (9)$$

FORMA F 3

MÉTODO F: SOLUCION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.

Motor Serie No. _____ Modelo No. _____
 Tipo _____ H.P. _____ Voltaje _____ Velocidad Síncrona _____ Frecuencia _____ ω -fase _____

Antes de iniciar los cálculos, ponga los datos obtenidos de pruebas previas.

r_2 _____ Volts de fase _____ $I_c =$ _____ y W'_{LL} _____ de la forma F-2

también todos los que se piden en la tabla, que están marcados con asterisco.

Asuma un valor de S a velocidad a carga plena para un punto a carga plena y valores proporcionales para otras cargas. Para el motor en operación S es positiva, como con todos los valores numéricos de la lista. Los números en paréntesis representan a los mismos en la lista.

	DESCRIPCION	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$S =$ DESLIZAMIENTO, POR UNIDAD								
2	r_2/S								
*3	x_2								
4	$Z_2^4 = (2)^2 + (3)^2$								
5	$g_2 = (2)/(4)$								
*6	g_{fe}								
7	$g = (5) + (6)$								
8	$-b_2 = (3)/(4)$								
*9	$-b_M =$								
10	$-b = (8) + (9)$								
11	$Y^2 = (7)^2 + (10)^2$								
12	$r_g = (7)/(11)$								
*13	$r_1 =$ resistencia por fase								
14	$k = (12) + (13)$								

15	$x_g = (10) (11)$		
16	$x_1 =$		
17	$x = (15) + (16)$		
18	$Z = (14)^2 + (17)^2$		
19	$I_1 = V/(18)$		
20	$I_2 = I_1 V(4) \times (11)$		
21	watts de entrada = $m \times (19)^2 \times (14)$		
22	Sec. entrada; $m \times (20)^2 \times (2)$		
23	Estator $I^2R = m \times (19)^2 \times (13)$		
24	Pérdidas del núcleo = $m \times (19)^2 \times (6)/(11)$		
25	Sec. $I^2R = (1) \times (22)$		
26	Fricción y pérdidas al devanado		
27	$W_{LL} = W'_{LL} \times (2.22) \times 10^{-2}$		
28	Pérdidas = del (23) a través de (27)		
29	watts de salida = (21) - (28)		
30	Eficiencia (%) = $100 \times 1 - (28) / (21)$		
31	F.P. (%) = $100 \times (14) / (18)$		
32	M.P. salida = (29) / 746		
33	velocidad = $1 - (1) \times$ velocidad síncrona		
34	Par = $x_T \times (29) / (33)$		

Para par en	$K_T =$
Lbf-ft	7.043
ozf-ft	112.69
Nw - mt	9.549

CONCLUSIONES

Por los alcances de la Normalización como disciplina que regula el desarrollo tecnológico y adecua las aplicaciones técnicas para los sistemas económicamente productivos consideramos que es necesario estimular esta actividad para orientar nuestro desarrollo, aprovechando el actual despliegue industrial del país, produciendo artículos que cubran la demanda nacional garantizando una calidad que otorgue competitividad en los mercados internacionales.

Las Normas elaboradas por organismos de consumo o empresas particulares cubren en la forma más amplia, las especificaciones y requisitos que deben cumplir: la materia prima, procesos y producto terminado, así como los equipos de producción, detallan los diferentes métodos de calibración y verificación de los mismos, simplificando los pasos para establecer un sistema de control, de tal manera que cada uno de los elementos llene los requisitos fijados para que el conjunto cumpla con los fines para los que fue diseñado.

De los organismos de normalización existentes en el mundo, los que elaboran Normas con mayor contenido técnico, de amplio alcance y cubriendo en su mayor parte el objetivo de la Norma, son aquellos que no forman parte directa del Gobierno respectivo, es decir, son agrupaciones de tipo industrial que elaboran un mismo producto, la libre competencia estimula hacia una mayor producción con mayor calidad, lo cual induce a las grandes empresas a la investigación de nuevas tecnologías, casos típicos de esta situación son Japón, Gran Bretaña y Estados Unidos de América.

El desarrollo de la Normalización en México muestra un lento -- avance debido a la insuficiente investigación y aplicación al respecto por parte de los organismos oficiales encargados, lo cual se refleja en el escaso número de Normas Nacionales publicadas, un lenguaje técnico deficientemente aplicado y corto alcance en sus objetivos.

La necesidad de la Industria de contar con especificaciones que definan las características de su producto y le permitan mejorarlo ha propiciado que recurran a Normas extranjeras y las tomen como base para su producción, generalmente son de Estados Unidos de Norteamérica y por la diferencia de nivel tecnológico no las aplican en forma adecuada.

Podemos agregar a lo anterior una masiva importación de maquinaria, que funcionará bajo las mismas características, lo cual incrementará la dependencia tecnológica del país.

Para finalizar, es nuestra opinión que se requiere un vigoroso -- esfuerzo por parte del gobierno federal para instrumentar y aplicar un programa que impulse la investigación aplicada a la normalización, desarrolle y edite -- más normas, de amplio alcance y para todas y cada una de las ramas de la industria, regule la importación de maquinaria, productos y subproductos industriales que se producen en nuestro país y fomente a la pequeña y mediana industria para que alcance niveles satisfactorios de producción y de calidad.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ANSI c.57.12.00-1973. General Requirements for distribution, power and -- regulating transformers.-American National Standards, U.S.A.
- 2.- ANSI c.57.12.10-1969. Requirements for Transformers 138 KV and Below, -- 501 Through 10000/13 300/16 667 KVA, Single-phase, sor Through 30 000/ 4,0000/50 000 KVA, Three Phase. American National Standards. U.S.A.
- 3.- ANSI c.57.12.20-1971. Requirements for overhead-tipo-Distribution Trans--- formers, 67 KV and Below; 500 KVA and Smaller. U.S.A.
- 4.- ANSI c.57.98/IEEE No. 93 June 1968, Guide for Transformer Impulse tests - U.S.A.
- 5.- ANSI c.57.12.90/IEEE-262-1973 Tests Code for Distribution, Power and Re--- gulating Transformers, American National Standards. U.S.A.
- 6.- ASA c.50.2-1955. Alternating-Current Induction Motors, Induction Machines in General, and Universal Motors-American Standards Association. U.S.A.
- 7.- ANSI c.57.12.25-1975. American National Standar Requirements for Pad- ---- Mounted Compartmental-type Single phase Distribution Transformers with --- Separable Insulated High Voltaje Connectors.
- 8.- ANSI c.50.21-1972/IEEE 114-1969. Test Procedure for Single Phase Induction Motors-American National Standards Institute. U.S.A.
- 9.- ANSI c.50.21-1972/IEEE 112-1978 Test Procedure for Poliphase Induction -- Motors and Generators - American National Standards Institute. U.S.A.
- 10.- Cálculo de Circuitos de Regulación- AEG - Telefunken Selecciones Técnicas- Arne Buxbaum y Klaus Schieran. Ed. Paraninfo. Madrid España.
- 11.- Conversión de Energía Electromecánica -Bambu Gourishankar Ed. Representacio nes y Servicios de Ingeniería. México.
- 12.- DGM-J-123-1973 Norma Oficial Mexicana de Aceite Aislante no-Inhibido para Transformadores. Dirección General de Normas -Secretaría de Patrimonio y - Fomento Industrial. México.
- 13.- DGM-J-168-1977 Norma Oficial Mexicana de Transformadores de Potencial. Di--- rección General de Normas.-Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.- México.

- 14.- DGN-J-169-1978 Norma Oficial Mexicana.-Métodos de Prueba para Transformadores de Distribución y Potencia.-Dirección General de Normas.-Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. México.
- 15.- DGN-J-175-1977 Norma Oficial Mexicana de Motores de Inducción, de Corriente Alterna del tipo de Rotor en Circuito Corto o de Jaula.-Dirección General de Normas. México.
- 16.- DGN-J-271-1977 Norma Oficial Mexicana de Técnicas de Prueba en Alta Tensión Dirección General de Normas.-Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. México.
- 17.- DGN-J-284-1977 Norma Oficial Mexicana de Transformadores de Potencia.-Dirección General de Normas.-Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. --- México.
- 18.- DGN-J-285-1977 Norma Oficial Mexicana de Transformadores de Distribución -- Subterránea Tipo Pedestal Trifásicos. Dirección General de Normas.-Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. México.
- 19.- Electrotecnología. Transformadores y Máquinas de C.A. Tomo 7 D.L. Carr.-Ed. Continental S.A. España.
- 20.- Física Partes I y II. Robert Resnick y David Holliday. Compañía Editorial - Continental, S.A. México.
- 21.- Fundamentos de Electricidad. Tomo II. Chester L. Dawes. Ed. Gustavo Gili.- México.
- 22.- Máquinas Eléctricas. George J. Thaler y Milton L. Wilcox. Ed Limusa Willey. México.
- 23.- Máquinas Eléctricas Tercera Parte. Carlos Luca Marín. Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería. México 1976.
- 24.- Máquinas Eléctricas.- Tomos I y II. M.P. Kostenko y L.M. Piotrousky, Ed. -- MIR-Moscú-URSS-1978.
- 25.- Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas.- Leander W. Matsch. Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería. México.
- 26.- MG. I-1978 Motors and Generators ANSI/NEMA Publications. American National Standards Instituto, Inc. National Electrical Manufacturers Association. -- U.S.A.
- 27.- Power and Distribution Transformers Topics - Bruce Peebles and Co. Limited. England.

- 28.- Power, Distribution Transformers and Auto-Transformers Topics Parsons --- Peebles LTD. England.
- 29.- Procedimientos para Determinación de Humedad Residual en Aislamientos Sólidos de Transformadores de Potencia.- Comisión Federal de Electricidad.- Gerencia de Operación. México 1979.
- 30.- Procedimiento SGP-A0035 Procedimientos para Pruebas de Factor de Potencia de Aislamientos en Equipo Eléctrico. Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Operación. México 1979.
- 31.- Procedimiento SGP-A0065 Procedimientos para Secado de Transformadores de Potencia - Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Operación. México -- 1979.
- 32.- Pruebas de Resistencia de Aislamiento en Equipo Eléctrico Primario.-Comi--- sión Federal de Electricidad. Gerencia de Operación. México 1980.
- 33.- Procedimiento SGP-A004-S Procedimiento para Pruebas de Corriente de Excitación en Transformadores de Potencia Comisión Federal de Electricidad.-Gerencia de Operación.-México 1979.
- 34.- Standard Handbook for Electrical Engineers.-Donald G. Fink. and H. Wayne -- Beaty.-Ed. McGraw.- Hill Book. Company. Edición No. 11.-1980.
- 35.- Técnicas de las Altas Tensiones.-Estudio de Sobretensiones transitorias en Sistemas Eléctricos y Coordinación de Aislamiento.- Volumen II. Gilberto En rriquez Harper. Ed. Limusa Willey. México.
- 36.- Norma IEC-1967 Les transformers du Potencial. Comisión Electrotécnica Inter nacional, Ginebra, Suiza, 1975.