

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA
PARA APLICACIÓN EN SUBESTACIONES DE MEDIA Y BAJA
TENSION**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

HECTOR FELIPE CUBILLAS

PROMOCIÓN

1993-II

LIMA-PERÚ

2003

A mí querido hijo David, así como también a todos mis hermanos y profesores, de quienes estoy muy agradecido por su apoyo y colaboración, que hizo posible mi realización como profesional.

**DISEÑO DE UN TRASFOMADOR DE PUESTA A TIERRA
PARA APLICACIÓN EN SUBESTACIONES DE MEDIA Y BAJA
TENSION**

SUMARIO

La parte fundamental en el desarrollo industrial de un País, es la capacidad de generar, transmitir, y aprovechar la energía eléctrica, proceso en los cuales siempre está presente un transformador.

Los transformadores son considerados como la máquina eléctrica más simple, su funcionamiento se sustenta en la teoría electromagnética desde su invención hasta la actualidad, en este lapso de tiempo han experimentado modificaciones por diversas razones; sea por la necesidad de disminuir el costo, por optimización en espacio o por medidas de seguridad.

Su utilización en las diferentes etapas desde la generación hasta su empleo por los usuarios domésticos o industriales es imprescindible.

En el presente trabajo se expone la metodología de diseño de un transformador trifásico de puesta a tierra, trifásico en conexión zig-zag. Asimismo se desarrolla la aplicación al centro de transformación La Unión en el departamento de Piura.

INDICE

	Página
PRÓLOGO	1
CAPITULO I	3
CONSIDERACIONES GENERALES DE PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	
1.1 Puesta a tierra del neutro del sistema	3
1.2 Sistema aislado de tierra	3
1.3 Puesta a tierra de un sistema	7
1.4 Factores que favorecen a los sistemas aislados	8
1.4.1 Continuidad de servicio	8
1.4.2 Fallas múltiples a tierra	9
1.4.3 Localización de fallas	9
1.4.4 Sobre tensiones peligrosas	10
1.5 Métodos de la puesta a tierra del neutro	10
1.6 Características de fallas a tierra de un sistema de distribución sin neutro físico	11
1.7 Alternativas para obtener el punto neutro de un sistema sin neutro físico	15
1.8 Comportamiento teórico de tensiones y corriente residuales, ante fallas monofásicas a tierra	23

1.9	Influencia de las resistencias de puesta a tierra y de la reactancia de tierra, ante fallas monofásicas a tierra	27
1.9.1	La impedancia de tierra	29
1.9.2	La resistencia de falla	31
1.10	Características del transformador de puesta a tierra	33
CAPITULO II		35
FUNDAMENTO TEÓRICO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE PUESTA A TIERRA		
2.1	Características del núcleo	35
2.1.1	Sección transversal	38
2.1.2	Pérdidas en el hierro	38
2.1.3	Corriente de excitación	41
2.2	Características de los devanados	43
2.2.1	Cálculo del número de espiras de la mitad del arrollamiento por fase	44
2.2.2	Área o sección del cobre	45
2.2.3	Pérdidas en el cobre	46
2.2.4	Reactancia de dispersión	47
2.2.5	Tensión de cortocircuito	50
2.2.6	Efectos térmicos de los bobinados	55
2.2.7	Aislamiento y distancia	55
2.3	La cuba y el aceite	60
2.3.1	Resistencia mecánica	60
2.3.2	Disipación térmica	62

2.3.3	Accesorios	63
-------	------------	----

CAPITULO III		65
---------------------	--	-----------

**TENSIONES INDUCIDAS EN LOS DEVANADOS Y
ECUACIONES ANALITICAS PARA DETERMINAR
LAS DIMENSIONES DEL NUCLEO**

3.1	Análisis fasorial de las tensiones inducidas y conexión del transformador	65
-----	---	----

3.2	Determinación de las dimensiones principales del núcleo	69
-----	---	----

3.2.1	Peso del fierro	69
-------	-----------------	----

3.2.2	Peso del cobre	70
-------	----------------	----

3.3	Determinación de las dimensiones principales	70
-----	--	----

3.3.1	Determinación del diámetro (D)	70
-------	--------------------------------	----

3.3.2	Determinación del ancho de ventana (A)	72
-------	--	----

3.3.3	Determinación de la altura de ventana (H)	73
-------	---	----

CAPITULO IV		74
--------------------	--	-----------

**CARACTERÍSTICAS DEL CENTRO DE
TRANSFORMACIÓN 60/10 KV Y DETERMINACIÓN
DE LA CORRIENTE DE FALLA MONOFÁSICA A
TIERRA**

4.1	Características del sistema de distribución	74
-----	---	----

4.2	Importancia de la corriente de falla a tierra en barra de baja tensión	76
-----	--	----

4.3	Calculo de los parámetros de la red para la determinación de la corriente de falla a tierra	80
-----	---	----

4.3.1	Valores de la reactancia equivalente fase-tierra de los alimentadores en 10 KV en ohmios	80
-------	--	----

4.3.2	Cálculo de la reactancia equivalente del sistema hasta la barra del sistema en 10 KV en ohmios	81
4.3.3	Determinación del valor de la reactancia del transformador de puesta a tierra	82
4.4	Cálculo de la corriente de falla monofásica a tierra en barras de 10 KV incluyendo la reactancia de puesta a tierra	84
4.5	Potencia nominal de corta duración de la reactancia trifásica de puesta a tierra	86

CAPITULO V

DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE PUESTA A TIERRA EN CONEXIÓN ZIG-ZAG EN 10 KV PARA LA SUBESTACIÓN “LA UNIÓN” EN EL DEPARTAMENTO DE PIURA

5.1	Parámetros y especificaciones técnicas para el dimensionamiento del transformador trifásico de puesta a tierra	89
5.2	Especificaciones técnicas de diseño	90
5.3	Determinación de las dimensiones principales del núcleo	91
5.3.1	Relación de costos	91
5.3.2	Determinación del diámetro (D)	91
5.3.3	Determinación de ancho de ventana (A)	92
5.3.4	Determinación de la altura de ventana (H)	92
5.4	Cálculos de las bobinas del transformador	92
5.4.1	Sección del conductor	92
5.4.2	Números de espiras del arrollamiento de una fase	95
5.4.3	Distribución de los arrollamientos	96

5.4.4	Altura axial de cada devanado	97
5.4.5	Números de espiras por capas	99
5.4.6	Número de capas	99
5.4.7	Longitud radial de los bobinados	99
5.4.8	Dimensionamiento finales para el núcleo	100
5.4.9	Reactancia del transformador	100
5.5	Pérdidas en la parte activa del transformador	100
5.5.1	Peso del núcleo	100
5.5.2	Pérdidas en el hierro	101
5.5.3	Corriente en vacío	101
5.5.4	Peso del cobre	104
5.5.5	Pérdidas en el cobre	106
5.5.6	Tensión de cortocircuito	107
5.6	Calculo de la cuba y dotación del aceite	109
5.6.1	Dimensiones interiores de la cuba	109
5.6.2	Disipación térmica	111
5.6.3	Resistencia mecánica	114
5.7	Consideraciones económicas	115
5.7.1	Precio de venta	115
5.7.2	Capitalización de pérdidas	116
5.7.3	Precio financiero	116
5.8	Presentación de los resultados en hoja de calculo (Excel).	117
CONCLUSIONES		119
ANEXOS		122
BIBLIOGRAFÍA		144

ANEXOS

ANEXO A	122
Sección del fierro.	
Sección del cobre para un bobinado (arrollamiento).	
Intensidad de fase.	
Peso de fierro y del cobre en función de la potencia.	
Costo del transformador de puesta a tierra.	
ANEXO B	129
Método de Rogosvski para la determinación de la reactancia de dispersión.	
Potencia permanente del transformador de puesta a tierra.	
Complemento finales de diseño de parte activa.	
Especificaciones técnicas del transformador de puesta a tierra en conexión Zig-Zag.	
Especificaciones técnicas de la resistencia para puesta a tierra.	
ANEXO C	141
Dimensiones del núcleo y del transformador.	

PRÓLOGO

Por lo general los sistemas de distribución sin neutro físico ofrecen la máxima continuidad de servicio; sin embargo, las sobre tensiones debidas a fallas monofásicas de puesta a tierra limitan su empleo.

Existen varios métodos de protección contra fallas monofásicas de puesta a tierra para los sistemas de distribución aislados, pero de todos ellos, siempre se escoge por utilizar los llamados “transformadores” o reactores de puesta a tierra en conexión Zig – Zag, lo cual proporcionan un punto neutro estable, que es de uso para la puesta a tierra de dichos sistemas sin neutro físico; y además porque resultan económicos y fáciles de diseñar.

El objetivo de la presente tesis, es dar a conocer una metodología acerca del procedimiento que se debe seguir para el diseño de un transformador de puesta a tierra en conexión Zig-Zag. Es muy importante mencionar, que los sistemas de las subestaciones presentan un sistema de protección diferente contra fallas monofásicas de puesta a tierra.

A manera de presentación adecuada del tema de tesis, se ha dividido

en cinco capítulos. En el capítulo **I** se describe en forma general las consideraciones sobre las puestas a tierra en sistemas eléctricos. En el capítulo **II** se presenta el fundamento teórico de los elementos constructivos del transformador de puesta a tierra. En el capítulo **III** se fundamentan las ecuaciones de las tensiones inducidas en los devanados así como la determinación del núcleo del transformador de puesta a tierra. En el capítulo **IV** se describen las características de la subestación y determinación de la corriente de falla monofásica a tierra. Finalmente en el Capítulo **V** se plantea el procedimiento para el diseño de un transformador de puesta a tierra en conexión Zig-Zag.

CAPITULO I

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

1.1 Puesta a tierra

La denominación de puesta a tierra comprende toda la unión metálica directa, sin fusibles de protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupos de electrodos interconectados en el suelo, con el objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificio, motor, transformador, etc., y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo se permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de descarga de origen atmosférico.

Puesta a tierra del neutro del sistema.

Es una conexión entre el punto neutro del sistema y tierra, dependiendo del tipo de conexión estrella-triángulo o viceversa, podemos decir tales como el transformador, maquinas rotativas, etc.

1.2 Sistema aislado de tierra

Es un sistema en donde no hay conexión entre los conductores del sistema y tierra; sin embargo, en cualquier sistema siempre existe un acoplamiento capacitivo entre conductores del sistema y tierra.

CAPITULO I

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

1.1 Puesta a tierra

La denominación de puesta a tierra comprende toda la unión metálica directa, sin fusibles de protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupos de electrodos interconectados en el suelo, con el objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificio, motor, transformador, etc., y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo se permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de descarga de origen atmosférico.

Puesta a tierra del neutro del sistema.

Es una conexión entre el punto neutro del sistema y tierra, dependiendo del tipo de conexión estrella-triángulo o viceversa, podemos decir tales como el transformador, maquinas rotativas, etc.

1.2 Sistema aislado de tierra

Es un sistema en donde no hay conexión entre los conductores del sistema y tierra; sin embargo, en cualquier sistema siempre existe un acoplamiento capacitivo entre conductores del sistema y tierra.

Por consiguiente, el llamado sistema aislado de tierra, es en realidad un sistema capacitivo puesto a tierra, debido a la capacidad distribuida desde los conductores del sistema a tierra.

Se ha demostrado, que las sobre tensiones pueden causar ruptura del aislamiento en otras partes del sistemas además del punto de falla. De esta manera, en una falla de fase a tierra de un circuito pueden resultar dañados el o los equipos y producir la interrupción del servicio en otros circuitos. La condición se puede apreciar en la Fig. N° 1,1.

En un sistema con el neutro aislado a tierra una segunda falla a tierra en otra fase puede ocurrir antes que la primera falla sea retirada. La segunda falla puede estar en el mismo circuito así como la falla original, en cualquier caso, la falla resultante entre fases hará accionar los relees o interruptores automáticos y disparará en uno o en ambos circuitos. Esto podemos apreciarlo en las Fig. N° 1,2 y Fig. N° 1,3.

En un sistema aislado, una falla a tierra en una línea causa tensión plena de línea a línea (a lo largo del sistema entre tierra y las dos líneas no falladas); esta tensión es 73% más alta que la normal. En la Fig. N° 1,4 se puede apreciar el aumento de la tensión fase a tierra debido a una falla a tierra. La única ventaja otorgada al sistema aislado de tierra es que un circuito no es automáticamente abierto en el momento que ocurre la primera falla a tierra, entonces se puede permitir que el circuito continúe en

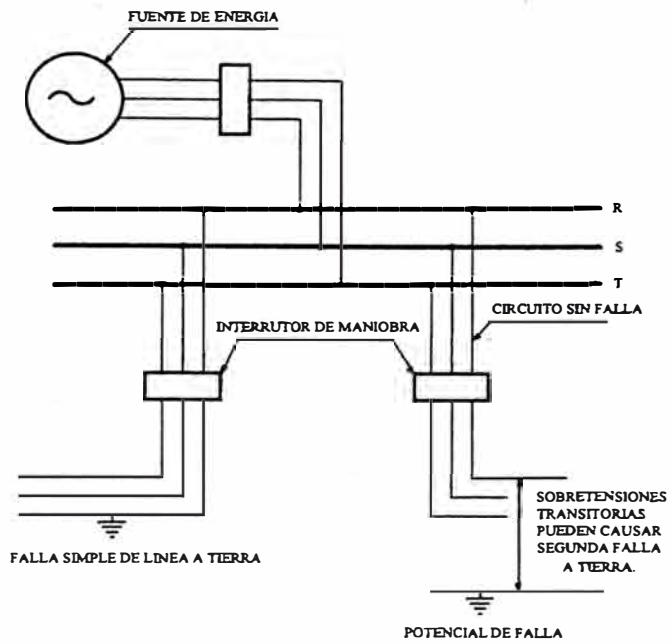


FIG. N° 1,1 Sobre tensiones transitorias debido a maniobras de circuito conteniendo una falla a tierra en un sistema aislado de tierra, puede causar otras fallas en el sistema.

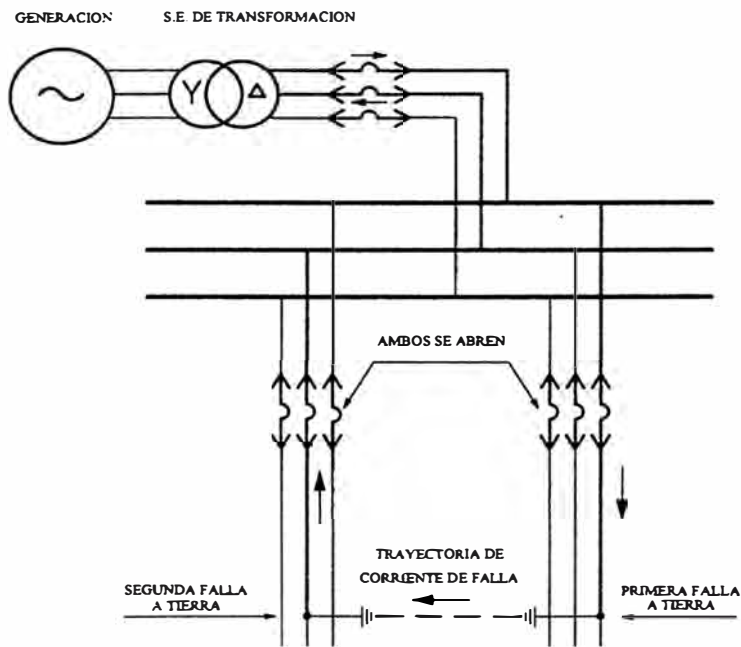


FIG. N° 1.2 Doble falla de línea a tierra en un sistema aislado de tierra da como resultado la interrupción en el servicio de los circuitos y corrientes de falla que pueden causar fuerte daño al equipo.

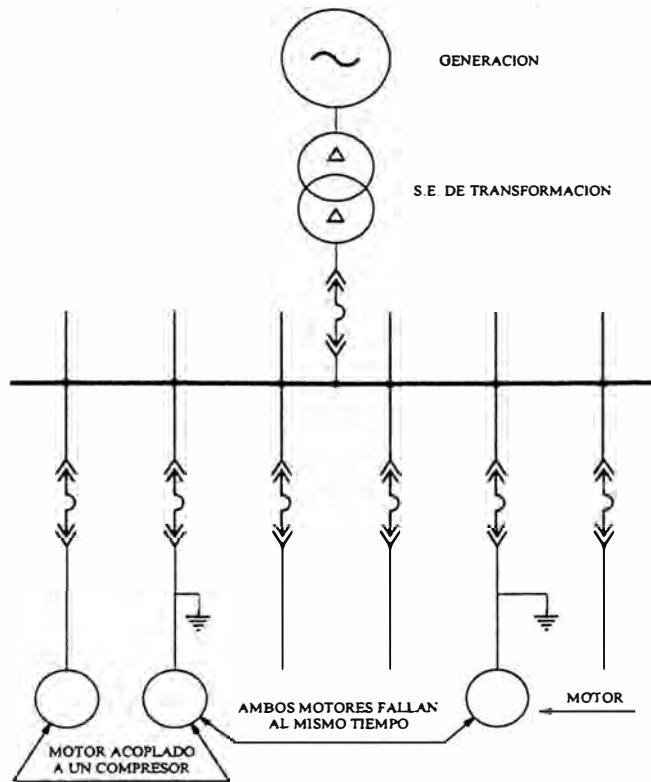


FIG. N° 1.3 Una falla a tierra en un sistema aislado a tierra puede causar fallas a tierra en otro aparato conectado.

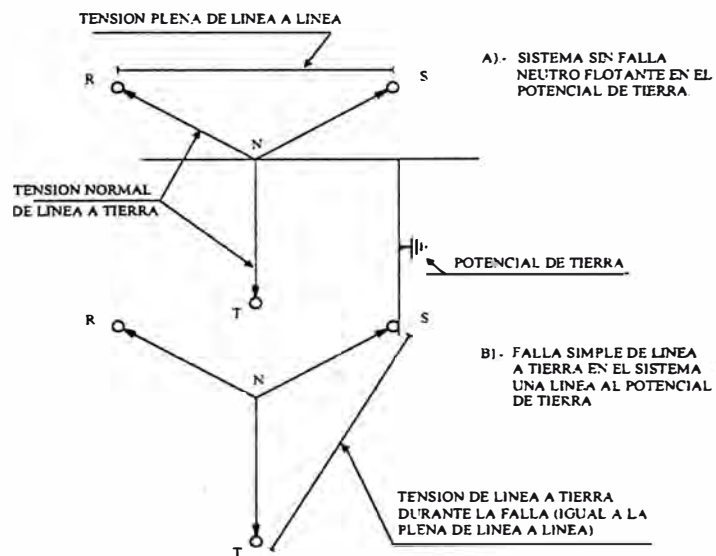


FIG. N° 1.4 Potencial de tierra efecto en las tensiones de línea a tierra por una falla simple a tierra en un sistema con neutro aislado a tierra.

operación hasta que se realice el mantenimiento programado. [13]

1.3 Puesta a tierra de un sistema

Los sistemas trifásicos normalmente llevan un punto neutro puesto a tierra; cualquier método de puesta a tierra del punto neutro que se adopte, debe permitir el uso de protección o dispositivos que aislen la falla del sistema en el momento que ocurre una falla a tierra, asegurando de esta manera la continuidad del servicio.

En un sistema la pérdida del neutro a tierra en cualquier parte o sección del sistema bajo condiciones de falla, puede tener grandes consecuencias como descargas disruptivas; y una simple falla, puede desarrollar rápidamente fallas más serias, que pueden causar la paralización completa del sistema.

Las ventajas de operación de un sistema puesto a tierra comparado con la operación del sistema aislado de tierra, son los siguientes:

- Reducción en magnitud de las sobre tensiones transitorias.
- Mejora la protección contra rayos.
- Simplifica la ubicación de una falla a tierra.
- Mejora la confiabilidad del sistema.
- Reduce el número de fallas
- Reduce gastos de mantenimiento y operación
- Mayor seguridad para el personal.

Las ventajas varían con los niveles de tensión, y en menor grado con respecto a las condiciones de instalación.

Por consiguiente, podemos decir que las sobre tensiones de un sistema con el neutro aislado de tierra pueden no ser lo suficientemente altas para causar múltiples fallas cada vez que ocurre una falla a tierra, La continuidad de estas sobre tensiones hará que el aislamiento se debilite y cause posteriormente una mayor falla que en un sistema con el neutro puesto a tierra. [13]

1.4 Factores que favorecen a los sistemas aislados

1.4.1 Continuidad del servicio

La ocurrencia de falla entre una fase del sistema y tierra, no se considera como una salida inmediata de alguna carga, esto podría representar una ventaja en el sistema aislado de tierra; sin embargo, en un número de sistemas se ha comprobado, que una mayor continuidad de servicio se da en los sistemas con neutros puestos a tierra que aquellos cuyo neutro esta aislado.

En los sistemas de puesto a tierra, en la mayoría de los casos se diseñan los dispositivos de protección de los circuitos, de tal manera que actúen inmediatamente para sacar fuera del servicio el circuito fallado, obteniéndose así la salida de las cargas de ese circuito.

1.4.2 Fallas múltiples a tierra

Cuando una falla a tierra en una fase de un sistema aislado no cause interrupción del servicio, la ocurrencia de una segunda falla a tierra en una fase diferente, antes que la primera falla haya sido reparada implica una salida. Si ocurre una segunda falla en un alimentador diferente, ambos alimentadores salen fuera de servicio.

En un sistema aislado, es importante que se tenga en cuenta un programa de mantenimiento, con la finalidad de que las tierras que son localizadas, sean reparadas tan pronto como sea posible después de su detección. Por lo tanto es aconsejable emplear equipos de detección de fallas a tierra, lo que permita que el personal de mantenimiento ubique una tierra con el sistema energizado, sin la necesidad de interrumpir el servicio durante el proceso de ubicación de falla.

1.4.3 Localización de fallas

En un sistema aislado, cuando se produce una falla a tierra y el sistema continua en servicio, se deberá instalar equipos que detecten e indiquen la presencia de una falla a tierra y cuál fase está involucrada; sin embargo, no mostrará en qué alimentador ha ocurrido la falla.

Una forma de ubicar la presencia de una falla a tierra es conectando lámparas que indiquen el potencial de cada fase a tierra.

1.4.4 Sobre tensiones peligrosas

Las sobre tensiones en un sistema aislado, frecuentemente deteriora el aislamiento de los conductores y a los equipos que están conectados a este sistema.

Una falla a tierra, en una fase de un sistema aislado, puede incrementar la tensión en el aislamiento de la otra fase en un sistema trifásico. Esta sobre tensión es de $\sqrt{3}$ veces el voltaje normal en el aislamiento.

Las sobre tensiones en los sistemas puestos a tierra tienen menos probabilidad de causar daño en el equipo o en el aislamiento de los conductores. [13]

1.5 Métodos de puesta a tierra del neutro

En un sistema de potencia, el método de puesta a tierra del neutro, se bosquejará prestando atención a la impedancia del circuito de puesta a tierra del neutro del sistema.

Los métodos de puesta a tierra en sistema de potencia son los siguientes:

- a) Puesta a tierra sólida.
- b) Puesta a tierra a través de una resistencia.
- c) Puesta a tierra a través de una reactancia.

Nótese que cada puesta a tierra se nombra de acuerdo con la

naturaleza del circuito externo del sistema. En cada caso la impedancia del generador o transformador, cuyo neutro está puesto a tierra es conectado en serie con el circuito externo.

Los diferentes métodos de puesta a tierra del neutro del sistema, se encuentran en la tabla N° 1,1.

Las aplicaciones para los diferentes métodos, se bosquejan de la siguiente manera:

- Efectos en el desarrollo de sobre tensiones transitorias.
- Daño en el punto de falla debido a la magnitud de la corriente de falla a tierra.
- Aplicación de dispositivos de interrupción del circuito para el disparo selectivo de falla a tierra.
- Protección contra descargas atmosféricas.

1.6 Falla a tierra de un sistema de distribución sin neutro físico

Las características de una falla monofásica a tierra en un sistema sin neutro físico son las siguientes:

a) En servicio normal, debido a las capacitancias fase-tierra, el neutro se encuentra aproximadamente al mismo potencial que tierra. Al ocurrir la falla de una fase a tierra, los voltajes de las otras dos fases respecto a tierra se elevan de un valor igual a la tensión de fase a la de la línea, (ver Fig. N° 1,5); esto originará la aparición de una tensión residual (V_0), la

TABLA Nº 1,1 .- CARACTERISTICAS DEL SISTEMA CON DIFERENTES METODOS DE PUESTA A TIERRA

	AISLADO DE TIERRA	PUESTO A TIERRA SOLIDAMENTE	PUESTA A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA		PUESTA A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA	
			REACTOR DE BAJO VALOR	REACTOR DE ALTO VALOR	RESISTENCIA BAJA	RESISTENCIA ALTA
CORRIENTE DE FALLA POR FASE A TIERRA EN % DE CORRIENTE DE FALLA TRIFASICA	MENOR QUE EL 1%	VARIA, PUEDE SER 100% O MAYOR	USUALMENTE PROYECTADO PARA PRODUCIR EL 25% AL 100%	5% - 25%	HASTA EL 20%	MENOR DEL 1% PERO NO MENOR QUE LA CORRIENTE DEL SISTEMA
SOBRE TENSIONES TRANSITORIAS	MUY ALTA	NO EXCESIVO	NO EXCESIVO	MUY ALTA	NO EXCESIVO	NO EXCESIVO
SEPARACION AUTOMATICA DE LA ZONA DEFECTUOSA	NO	SI	SI	SI	SI	NO
OBSERVACIONES	NO RECOMENDADO DEBIDO A SOBRE TENSIONES Y A LA NO SEPARACION DE LAS FALLAS	GENERALMENTE USADOS EN SISTEMAS: 1) 600 VOLTIOS Y POR DEBAJO 2) 600 VOLTIOS Y 15 KV 3) ENCIMA DE 15 KV		NO USADO DEBIDO A EXCESIVAS SOBRE TENSIONES	GENERALMENTE USADO EN SISTEMAS INDUSTRIALES DE 2.4 KV Y 15 KV	USADO CUANDO LAS CARACTERISTICAS DE OTROS METODOS DE PUESTA A TIERRA NO SON DESEADOS

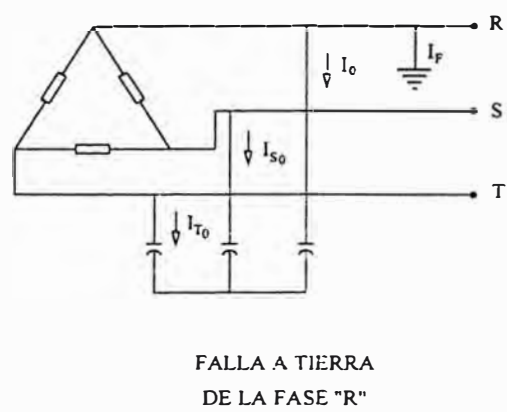
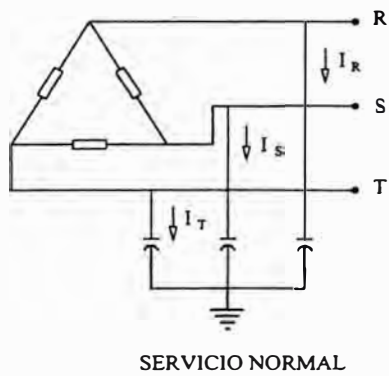
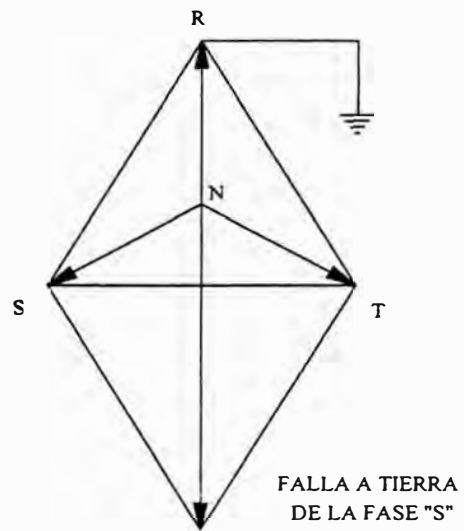
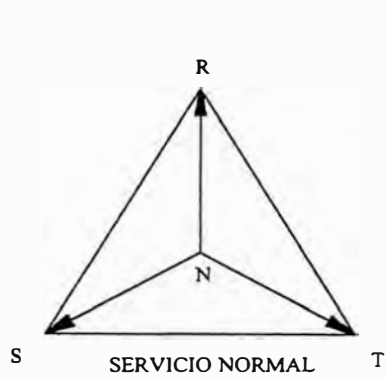


FIG. N° 1,5 Características de una falla monofásica a tierra en un sistema sin neutro físico, como el sistema de distribución del centro de transformación la union piura.
- (Para fines subterranos).

cual será igual a la suma de las tensiones de las fases S y T respecto a tierra, en el caso que la falla sea en la fase R.

b) En condiciones normales, debido a las capacitancias fase-tierra de los alimentadores, circularán corrientes de carga de tipo capacitivo de cada fase a tierra (I_R , I_S , I_T) según se puede apreciar en la Fig. N° 1,5. En la misma figura se puede observar, que en el caso de ocurrir una falla en la fase R, aparecerá una corriente de falla I_F entre dichas fases y tierra, la cual retornará a través de las capacitancias entre las fases sanas y tierra del alimentador fallado (I_{S0} , I_{T0}) y de todos los demás en paralelo: luego, en el alimentador fallado aparecerá un valor de corriente residual, dado por la suma fasorial de I_F , I_{S0} , I_{T0} .

c) Cuando se elimina una falla monofásica a tierra, la capacitancia del sistema retiene una carga y mantiene una tensión a tierra como tensión de compensación o de equilibrio de corriente continua. Si la fase que estaba fallada después de haber sido reparada es puesta nuevamente a tierra, puede sumarse una tensión de equilibrio adicional; si la falla es intermitente, La tensión puede seguir aumentando hasta que falle el aislamiento de los conductores. Esta tensión a tierra puede alcanzar fácilmente de seis a ocho veces el valor de la tensión de fase. Obsérvese que la sobre tensión es a tierra y que las tensiones fase a fase no son afectadas.

1.7 Alternativas para obtener el punto neutro de un sistema sin neutro físico

a) Tres resistencias idénticas

Usando tres resistencias iguales y conectados en estrella, para crear el punto neutro en un sistema delta y luego ser puesto a tierra, (Fig. N° 1,6). La desventaja de este método es que las tres resistencias consumen energía continuamente, incluso bajo operación normal o cuando existe falla monofásica a tierra.

b) Auto transformador conectado en T

Este método usando un auto transformador en T, es poco utilizado para crear el punto neutro de un sistema en delta. (Ver Fig. N° 1,7)

c) Transformador estrella - triángulo

El neutro de un sistema en delta también se obtiene mediante un transformador trifásico estrella-triángulo o también un banco de tres transformadores monofásicos, (transformador de puesta a tierra estrella-triángulo). En la Fig. N° 1,8 se muestra la forma de conexión de este transformador de puesta a tierra; donde la falla a tierra es mostrada en la línea "T". La corriente en el punto de falla a tierra total en el transformador de puesta a tierra ha sido dividida en tres partes iguales: i_1 , i_2 , i_3 . Estas corrientes son monofásicas y cada una de ellas representa la

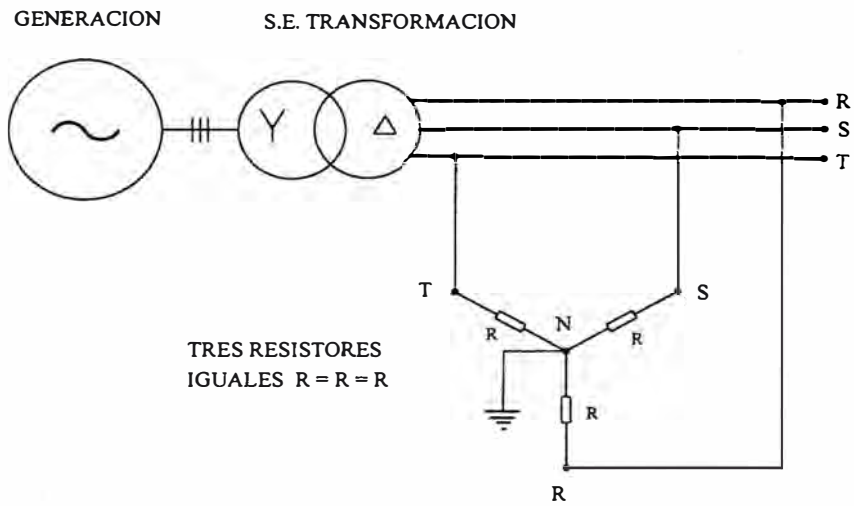


FIG. N° 1.6 Conexión para obtener el punto neutro con 3 resistores

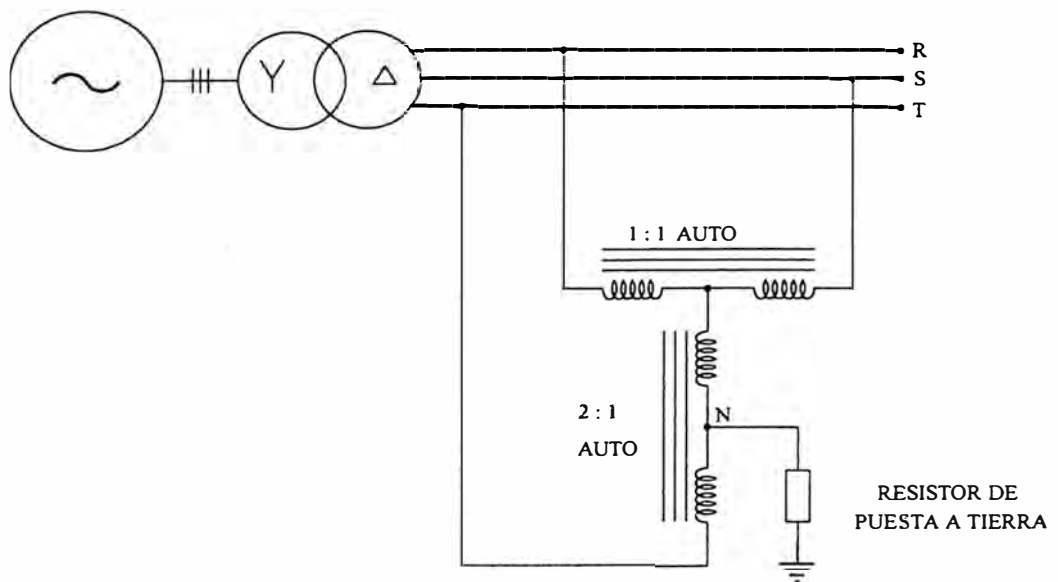


FIG. N° 1,7 Conexión de un autotransformador para puesta a tierra de un sistema delta conectado en T, con un resistor de puesta a tierra.

tercera parte de la corriente total de falla, como son iguales y están en fase entre ellas, son llamadas corriente de de secuencia cero. La corriente encuentra solamente la reactancia de dispersión del transformador en lugar de la alta reactancia magnetizante, esto se debe a que el circuito del transformador en triangulo se encuentra abierto de manera que no pueda fluir corriente en él.

La corriente de falla a tierra que ingresa al sistema principal se divide, parte de esta corriente se dirige a la carga y parte a la fuente; la componente de la corriente de falla a tierra "2" se divide en "2S" y "2L", y la componente "3" se divide en "3S" y "3L", como se ha indicado en la Fig. N° 1,8. La razón por la cual la corriente de falla a tierra se dividen en tres partes iguales en el transformador de puesta a tierra, cuando solamente una línea esté fallada a tierra, puede ser explicada considerando, qué sucedería si la corriente trata de dividirse desigualmente. El devanado secundario del transformador en delta es un circuito en serie, de manera que las corrientes en los tres devanados conectados en delta son iguales. El devanado de la fase R del transformador en conexión en el delta está en la misma columna del núcleo como la fase R del devanado en estrella, éstos devanados encierran el mismo camino del flujo magnético, que es la fase R de la columna del núcleo; los devanados de la fase S y T están juntos en sus

respectivas columnas del núcleo. Por la ley de Amper en cada columna del núcleo deben ser iguales y opuestas, como en cualquier transformador de doble devanado cuando está llevando carga. La diferencia en Amper-vueltas entre el par de devanados de cada columna del núcleo es requerida únicamente para magnetizar el núcleo; si la corriente de la fase R del devanado en estrella trata de ser pequeña que las otras dos fases; entonces debido a que la corriente en la fase R del devanado en triángulo es la misma para las otras dos fases, se tendría una fmm, adicional para producir un flujo magnético adicional que generaría una tensión en la columna R del devanado en estrella, provocando así el aumento de dicha corriente y restitución del balance normal.

Las características de operación del transformador de puesta a tierra en estrella-triángulo durante condiciones normales del sistema, la impedancia que ofrece a la corriente trifásica es completamente alta, y solamente se permite que fluya una pequeña corriente magnetizante por el transformador de puesta a tierra.

d) Transformador de puesta a tierra

Es otro método para la creación del punto neutro de un sistema en delta utilizando un transformador de puesta a tierra (equivalente a un reactor con fines de puesta a tierra). La Fig. N° 1,9, se puede apreciar una reactancia de puesta a tierra conectado en un sistema aislado.

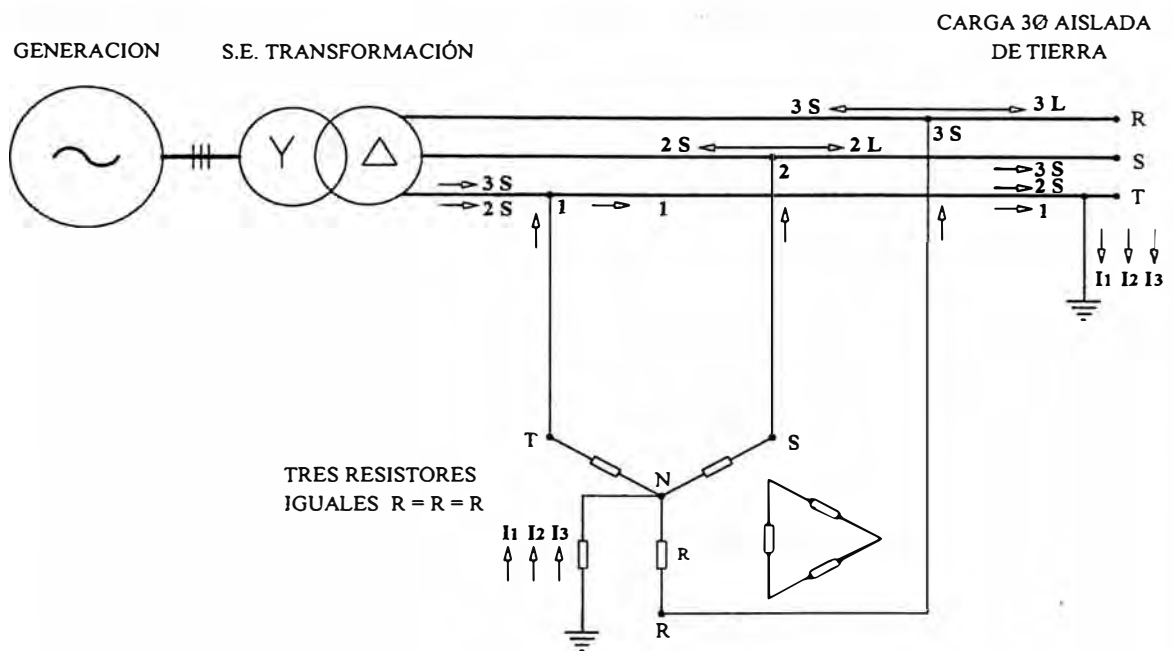


FIG. N° 1,8 Conexión de un transformador estrella-triángulo de puesta a tierra y distribución de la corriente cuando se presenta una falla de línea a tierra en el sistema trifásico.

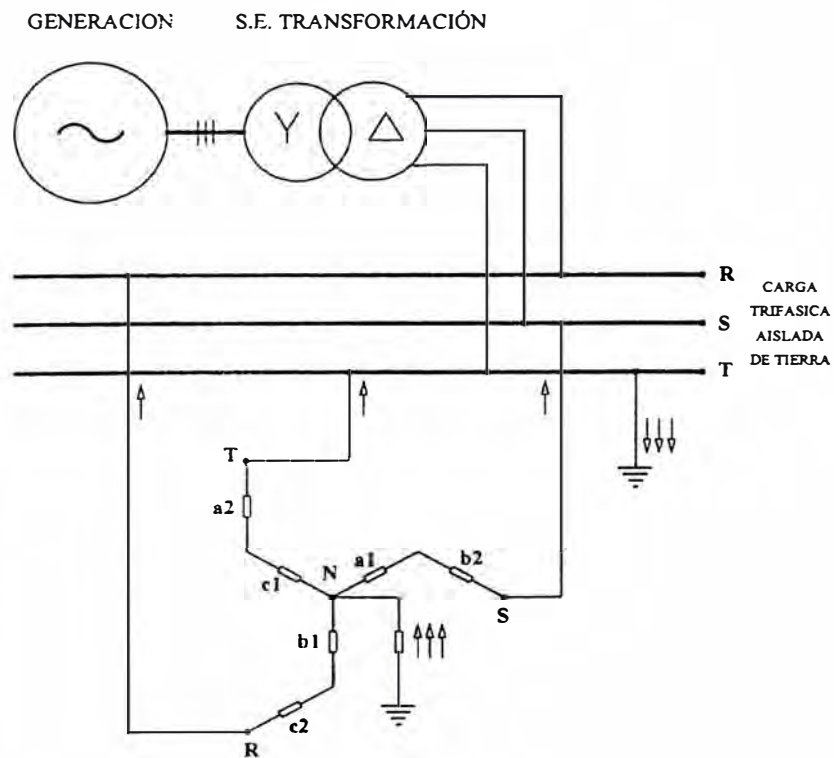


FIG. N° 1.9 Conexión de un transformador de puesta a tierra zig-zag cuando se presenta una falla de línea a tierra en un sistema trifásico, la distribución de la corriente de falla es la misma como se ha indicado en el transformador de puesta a tierra estrella-triángulo FIG. N° 1,8.

En este caso, los devanados marcados a_1 y a_2 están en la misma columna; y c_1 y c_2 están en la tercera columna. Todos los devanados tienen el mismo número de espiras, pero cada par de devanados en una columna están arrollados en direcciones opuestas. (Ver Fig. N° 1,10)

Se puede deducir que el modelo de distribución de la corriente de falla a tierra es el mismo que para el caso de un transformador de puesta a tierra estrella triángulo. Las conexiones del devanado del transformador de puesta a tierra se puede observar que las corrientes en las secciones de los devanados a_1 y b_2 son iguales debido a que están en serie; lo mismo puede decirse de las corrientes en los devanados b_1 y c_2 , así como en c_1 y a_2 . De esta manera, debido a las conexiones en serie de los pares de devanados, se cumplen las siguientes igualdades:

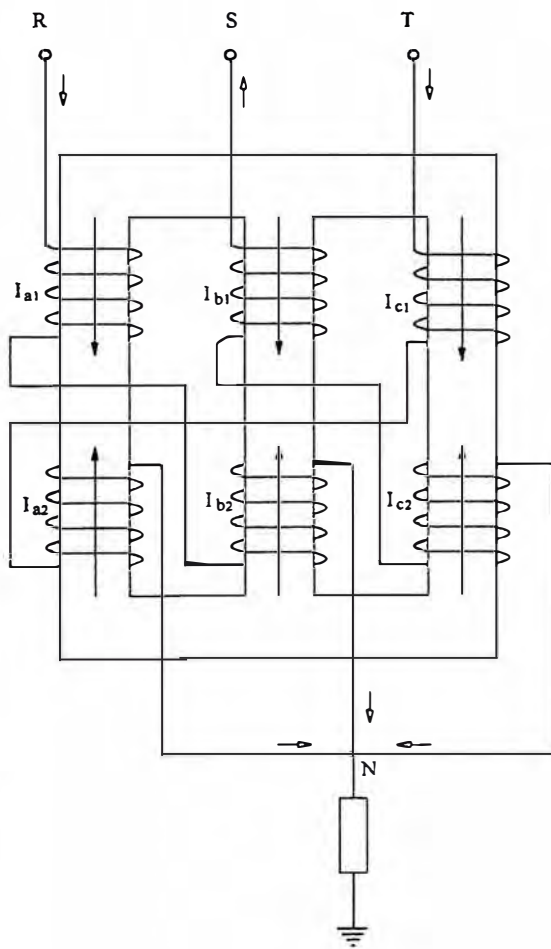
$$i_{a1} = i_{b2} , i_{b1} = i_{c2} , i_{c1} = i_{a2}$$

Por estar juntos los devanados en la columna del núcleo, tienen igual número de espiras y requieren que las fuerzas magnetomotrices sean balanceadas (diferenciándose solamente en una pequeña fmm magnetizante para cada columna), se cumple las siguientes relaciones:

$$i_{a1} = i_{a2} , i_{b1} = i_{b2} , i_{c1} = i_{c2}$$

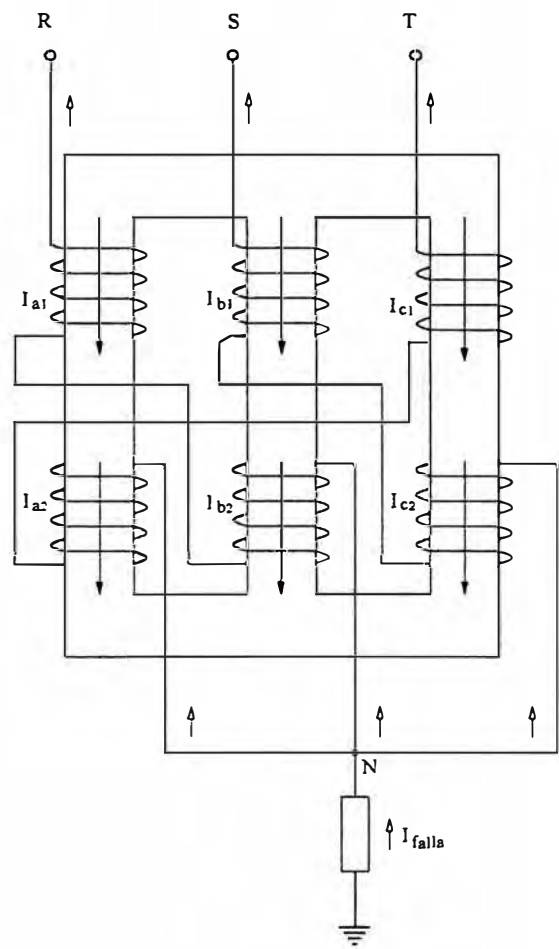
La única manera de que estas seis relaciones puedan ser satisfechas, es que las corrientes en todos los devanados sean iguales; por

SISTEMA TRIFASICO



A).- F.M.M. resultante en una columna debido a la tensión de fase durante la operación normal del sistema.

SISTEMA TRIFASICO



B).- F.M.M. resultante del flujo de corriente de falla a tierra

FIG. N° 1,10 Disposición del devanado en el núcleo del transformador trifásico de puesta a tierra en el conexionado zig-zag.

consiguiente:

$$i_{a1} = i_{b1} = i_{c1} = i_{a2} = i_{b2} = i_{c2}$$

De esta relación es evidente que el transformador de puesta a tierra trabaja de la misma manera que un transformador de puesta a tierra estrella triángulo. Si apareciera cualquier desbalance, la fmm adicional proporcionará un flujo magnético adicional; por lo tanto produce un aumento de la tensión en la columna desbalanceada, lográndose así el restablecimiento del balance de la corriente. En consecuencia, un transformador de puesta a tierra proporciona esencialmente un punto neutro estable que hace posible su uso para la puesta a tierra de un sistema con neutro aislado.

La Fig. N° 1,10A, se puede observar que las fmm.'s balanceadas en cada columna de la reactancia resultan una condición de mínimo flujo concatenado (las dos componentes de las fmm.'s de cada columna están indicadas por las flechas largas); por consiguiente, la impedancia serie ofrecida a las tres componentes de la corriente de falla a tierra es completamente baja. En la Fig. N° 1,10A, la corriente de secuencia cero circulan en las tres columnas (por los tres devanados) del núcleo, la mitad inferior con un giro derecho y la mitad superior con un giro izquierdo.

En la Fig. N° 1,10B, indica que la tensión normal fase a fase del sistema aplicada a través de cualesquiera de dos terminales del

transformador de puesta a tierra, produce f_{mm} 's que están en una misma dirección en cada columna del núcleo; entonces tenemos una condición de máximo flujo concatenado en una columna. Por consiguiente, debido a esta superposición de flujo, fluirá solamente una pequeña corriente de magnetización. [11]

1.8 Comportamiento teórico de tensiones y corriente residuales ante fallas monofásicas a tierra.

En condiciones anormales de operación, tal como una falla monofásica a tierra, aparecen tensiones y corriente residuales ($3V_0$), ($3I_0$), cuyas magnitudes dependen principalmente, entre otros factores, de la condición del neutro del sistema. Estas magnitudes pueden ser tomadas como referencia, para determinar la ocurrencia de una falla monofásica a tierra. A continuación analizaremos el comportamiento de éstas magnitudes, ante fallas monofásicas a tierra.

El comportamiento teórico de las tensiones y corriente residuales ($3V_0$), ($3I_0$), ante fallas monofásicas a tierra, esta en función del aterramiento del neutro. Dicho comportamiento, para un sistema trifásico en general será brevemente explicado considerando el circuito simple de un sistema grupo generador-transformador y línea; en la cual se produce una falla monofásica a tierra de la fase R, a través de una resistencia de falla (R_f). Fig. N° 1,11.

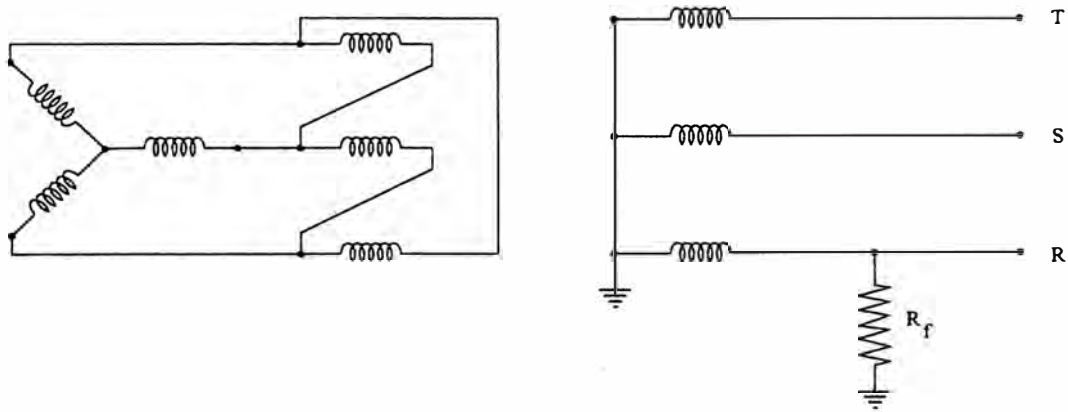


FIG. N° 1,11 Circuito simple de un grupo generador-transformador y línea, cuando se produce una falla a tierra de la fase "R" a través de una resistencia de falla R_f .

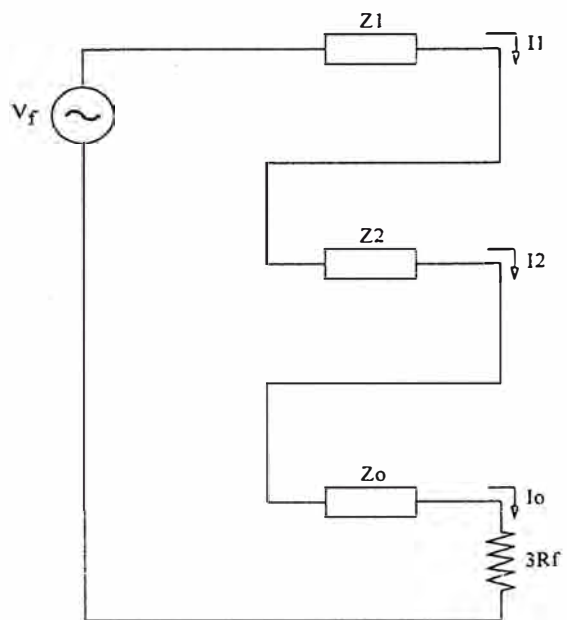


FIG. N° 1,12 Circuito formado por las secuencias de las tres impedancias equivalente en serie

Si dividimos entre Z_1 , el numerador y denominador de la expresión anterior, tenemos:

$$I_R = \frac{3V_{\text{fase}}}{Z_1 \left(2 + \frac{Z_0}{Z_1} + 3\frac{R_f}{Z_1}\right)} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

La relación Z_0/Z_1 del sistema es definido como la relación de impedancias de secuencia cero y secuencia positiva vista desde el punto de falla; esta relación es variable, dependiendo del tipo de aterramiento, posición de la falla y disposición del sistema. La relación R_f / Z_1 es definida como la relación de la resistencia de falla y la impedancia de secuencia positiva vista desde el punto de falla. Esta relación es variable, dependiendo de las condiciones de como se produce el contacto de la fase con tierra, y de la resistividad eléctrica del terreno. Cuando se estima la distribución de las cantidades residuales a través del sistema es conveniente usar el punto de falla como referencia; por cuanto este es el punto de inyección de las cantidades desbalanceadas hacia el sistema. El voltaje residual ($3V_0$) es medido en relación a la tensión fase-neutro normal del sistema, y la corriente residual ($3I_0$) es comparada con la corriente de falla trifásica en el punto de falla. Puede demostrarse que estas cantidades pueden ser expresadas, en términos de la relación Z_0/Z_1 y R_f/Z_1 del sistema.

Si hacemos $K_1 = Z_0/Z_1$; $K_2 = R_f/Z_1$ y teniendo en cuenta que la corriente de falla trifásica = V_{fase}/Z_1 , de la expresión (1,4) tenemos:

$$I_R = 3 I_0 = \frac{3 I_{fase}}{(2 + K_1 + 3K_2)} \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

Similarmente son halladas las tensiones residuales, de:

$$V_0 = I_0 Z_0$$

$$V_0 = \frac{V Z_0}{(2Z_1 + Z_0 + 3R_f)} \quad \dots\dots\dots (1.6)$$

Dividiendo tanto el numerador y denominador por Z_1 tenemos: [12]

$$V_0 = \frac{\frac{V Z_0}{Z_1}}{2 + \frac{Z_0}{Z_1} + 3 \frac{R_f}{Z_1}} \quad \dots\dots\dots (1.7)$$

Obtenemos:

$$V_0 = \frac{V K_1}{2 + K_1 + 3K_2}$$

$$3V_0 = \frac{3V K_1}{2 + K_1 + 3K_2} \quad \dots\dots\dots (1.8)$$

1.9 Influencia de las resistencias de puesta a tierra y de la reactancia de puesta a tierra, ante fallas monofásicas a tierra

Como se puede ver en la Fig. N° 1,13, la corriente producida por una falla monofásica (puesta a tierra accidentalmente) en sistemas con el punto neutro conectado a tierra, pero sin conductor neutro, depende entre

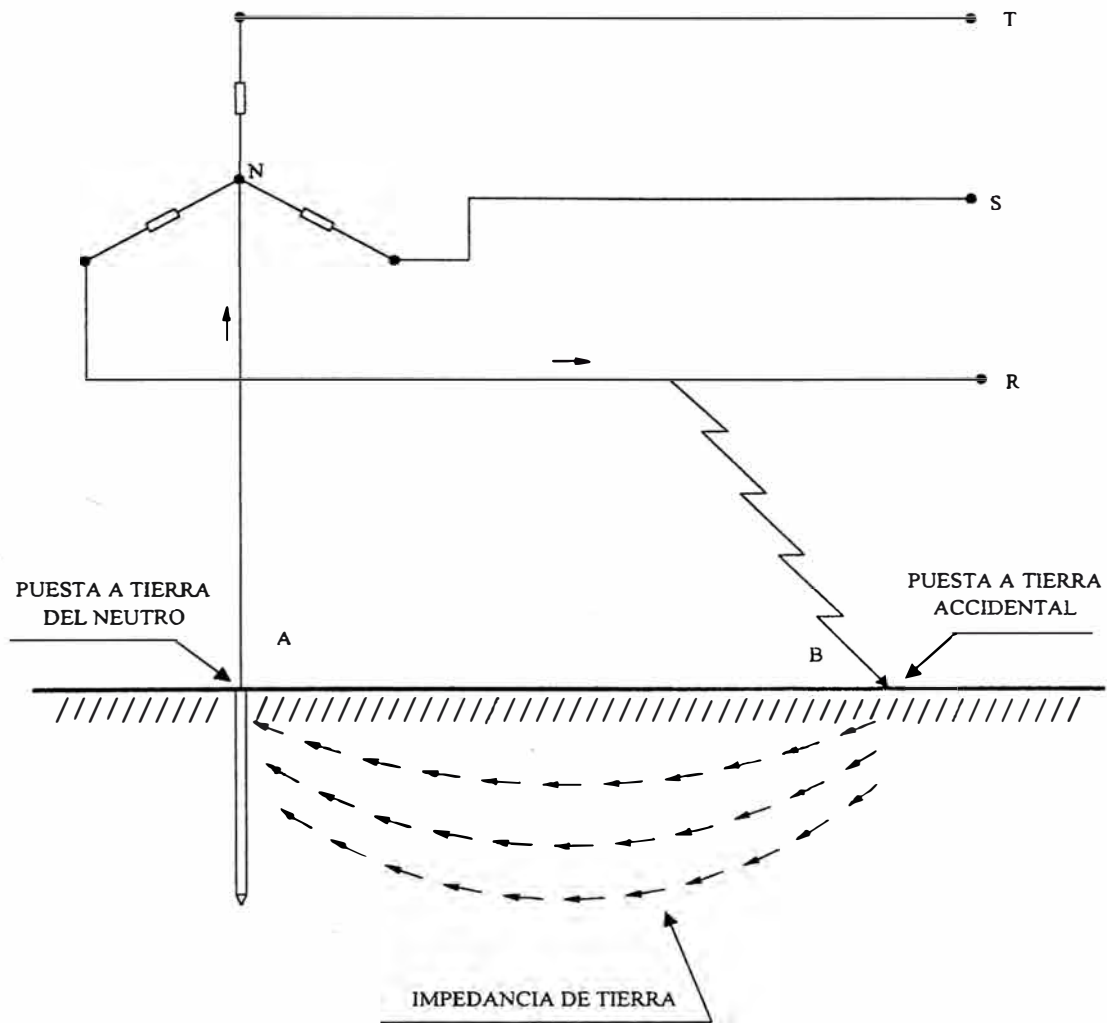


FIG. N° 1,13 Influencia de las resistencias de puesta a tierra y de la impedancia de tierra, ante fallas monofásicas a tierra.

otros factores de: la resistencia que encuentra la corriente al pasar desde el electrodo que conecta el punto neutro (N) con la tierra (puesta a tierra del neutro); la resistencia de falla que representa la puesta a tierra accidental en el punto B, y de la impedancia propia de la tierra entre A y B.

La conexión a tierra del punto neutro en A, es ejecutada mediante sistemas especiales, con electrodos, mallas, etc. Supongamos que la puesta a tierra del neutro en A, es efectuada con un electrodo. La resistencia presentada al paso de la corriente del electrodo a tierra, se denomina resistencia de puesta a tierra. La resistencia de puesta a tierra del neutro e impedancia de tierra, forman parte de la impedancia de secuencia cero del sistema. La resistencia de falla que representa la puesta a tierra accidentalmente, se encuentra en serie con la secuencia de las tres impedancias del sistema, para el caso de fallas monofásicas a tierra.

Por lo expresado, es conveniente conocer el comportamiento de cada una de ellas. [12]

1.9.1 La impedancia de tierra

El conocimiento del comportamiento de la tierra recorrida por grandes corrientes, es importante para la determinación de la corriente producida por fallas monofásicas a tierra. A pesar de su alta resistividad, la tierra puede ser recorrida por corrientes de muy alta intensidad, ya que la

sección que éstas utilizan no tiene prácticamente limitaciones.

Como se sabe, la corriente de falla producida por una falla monofásica a tierra, retorna principalmente por el terreno en los sistemas con neutro conectado a tierra; y por el terreno y conductor neutro en el caso de un sistema trifásico con neutro corrido.

En ambos casos, para determinar el valor de la impedancia de secuencia cero equivalente (incluye la del conductor y el terreno); es necesario, emplear métodos que tomen en consideración la resistividad eléctrica del terreno.

La fórmula simplificada dada por J.R Carson satisfactoria en la práctica para todos los cálculos de potencia, para determinar la impedancia de secuencia cero de un lazo formado por un simple conductor con retorno por tierra es:

$$Z_0 = r + r_e + j X_0$$

El Término $r + r_e$ comprende la resistencia r del conductor aumentada por:

$$r_e = \pi^2 f 10^{-4} \text{ ohmios/m.} \quad \dots\dots\dots (1.11)$$

Para X_0 se obtiene de la siguiente relación:

$$X_0 = 28.93510^{-4} f \text{Log} \left(\frac{De}{RMG} \right) \quad \dots\dots\dots (1.12)$$

Donde:

f = Frecuencia en ciclos por segundos (Hz.)

D_e = Profundidad equivalente de la vía de retorno por el suelo

$$D_e = 658.368 \sqrt{\frac{R_0}{f}}$$

R_0 = Resistividad eléctrica del terreno, en ohmios-m.

RMG = Radio medio equivalente del grupo de conductores en m.

1.9.2 La resistencia de falla

En el caso de roturas de conductores, el contacto del conductor roto con el suelo formaría el paso de la corriente a tierra; formándose una resistencia de falla, la cual representa la puesta a tierra accidental.

Se puede apreciar en el esquema de la Fig. N° 1,14. Puede decirse que la resistencia de falla, está formada por la resistencia de arco más la resistencia de paso a tierra. El arco eléctrico es un puente de vapor incandescente compuesto por electrones impulsados eléctricamente desde un electrodo negativo hacia uno positivo. En el caso de producirse una falla a tierra producida por rotura de un conductor; el conductor roto y tierra harán de electrodos. Si llamamos V a la caída de potencial a través del arco e I al flujo de corriente; en régimen no uniforme, dv/dl será la resistencia que ofrecerá el arco al paso de la corriente. Si bien el arco es inestable; en todas las gamas comunes de frecuencia (menos de 10 kilociclos), la relación dv/dl tiende a ser relativamente baja. Ello

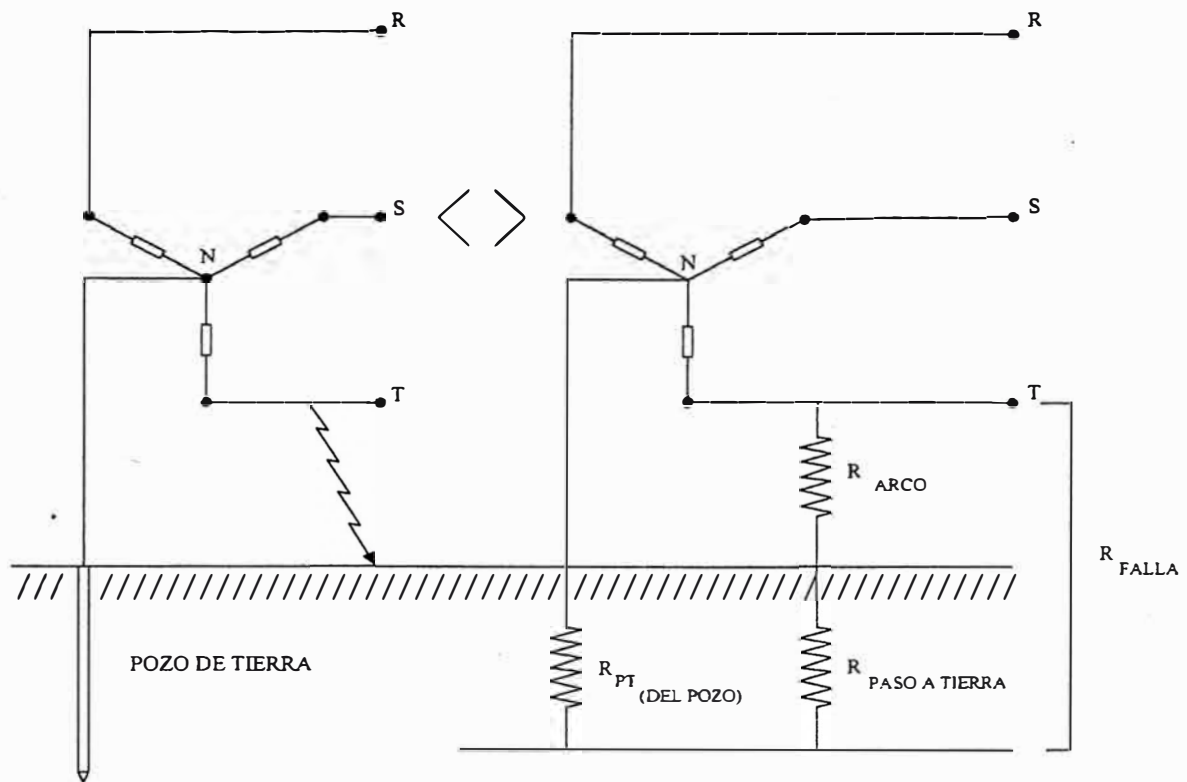


FIG. N° 1,14 En el esquema se puede apreciar, el caso de rotura de conductor, el contacto del conductor roto con el suelo formaría el paso de la corriente a tierra, formándose una resistencia de falla, puede decirse que la resistencia de falla, esta formada por la resistencia de arco más la resistencia de paso a tierra.

significaría que la resistencia al paso de la corriente que ofrece el arco eléctrico, tiene relativa incidencia sobre la resistencia de falla total.

La resistencia de paso a tierra depende principalmente de la resistividad eléctrica del terreno. Es decir, de que tan buena conductibilidad eléctrica, de mezcla de los materiales componentes de la tierra en su superficie y bajo ella, se tengan en el lugar de contacto del conductor roto con el terreno. [12]

1.10 Características del transformador de puesta a tierra

El transformador de puesta a tierra es un reactor trifásico, Se diferencia de los demás transformadores porque en cada brazo tiene dos bobinas devanadas en direcciones opuestas, no tiene devanado secundario, presenta una impedancia muy alta fase a fase, es decir la impedancia de la reactancia para corrientes trifásicas es alta, de manera que cuando ocurra una falla a tierra en el sistema, circulara un gran nivel de corriente de magnetización en el arrollamiento de la reactancia. En condiciones normales la reactancia no consume energía.

La reactancia del transformador de puesta a tierra divide a la corriente de falla a tierra en tres componentes iguales; estas corrientes están en fase una con otra y fluyen en los tres arrollamiento de dicha reactancia. La forma del arrollamiento se muestra en la Fig. N° N° 1,10.

El dimensionamiento del transformador de puesta a tierra, se realiza

teniendo en cuenta el régimen nominal en KVA (de corta duración), que es igual a la tensión nominal de línea a neutro multiplicada por la corriente neutral de régimen nominal.

Un transformador de puesta a tierra se diseña para que fluya su corriente nominal por un tiempo limitado de 10 segundos a 60 segundos.

[11]

CAPITULO II

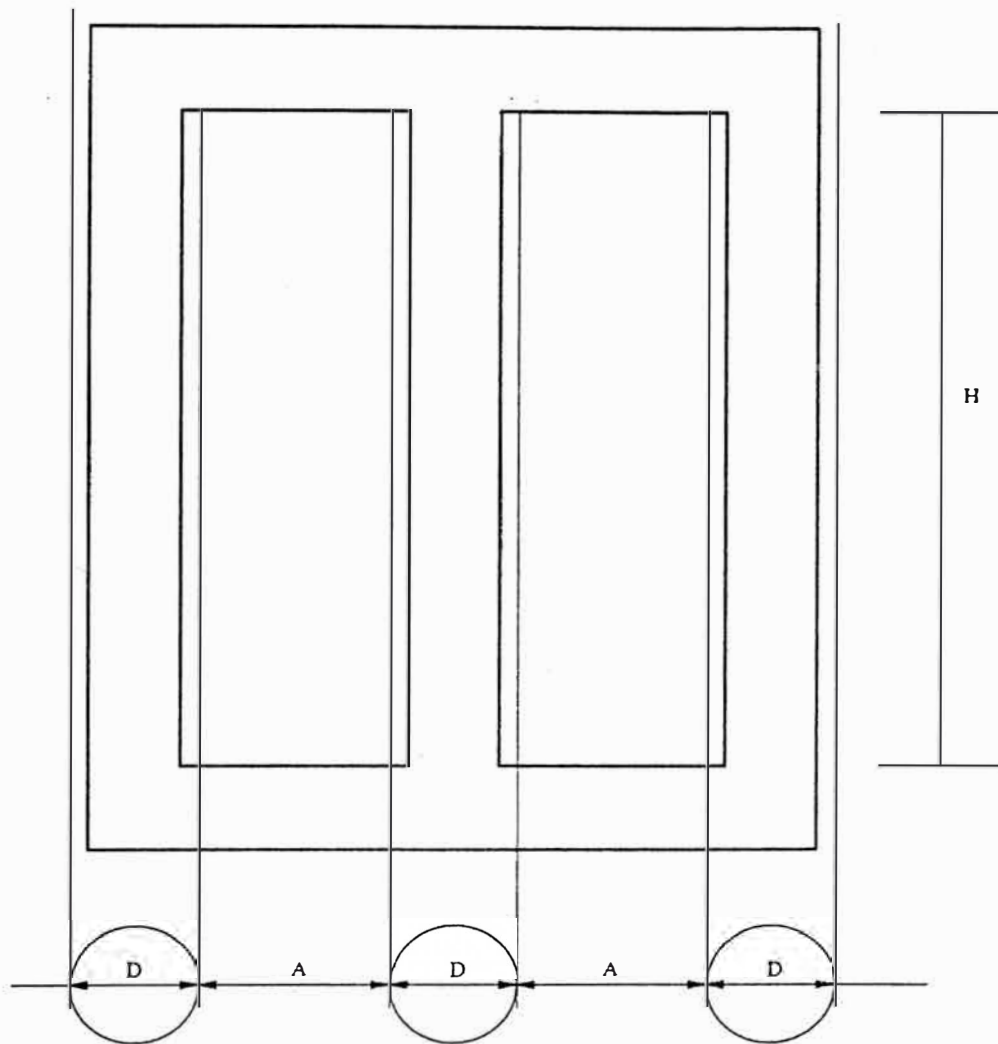
FUNDAMENTO TEORICO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR DE MEDIANA POTENCIA

2.1 Características del núcleo

El núcleo del transformador de puesta a tierra tiene las mismas características que el núcleo de un transformador trifásico de mediana potencia; el circuito está formada por laminas ferromagnéticas eléctricamente aisladas (Fig. N° 2,1). Además de servir como elemento de conducción del flujo magnético, el núcleo es el soporte mecánico de los devanados, ya que éstos se arrollarán a lo largo de sus columnas.

En general, las láminas que forman el núcleo se fabrican de acero con una aleación a base de silicio (del orden de 3% al 5%). La finalidad del aporte del silicio es reducir las pérdidas por histéresis y aumentar la resistividad del acero. Actualmente se utilizan dos tipos de láminas magnéticas en los transformadores y reactores: las laminadas en caliente y las de grano orientado o laminadas en frío.

En comparación con el primero el laminado del segundo tipo, tiene mejores características magnéticas, es por eso que actualmente en la fabricación de transformadores y reactores se emplea casi en forma exclusiva las láminas magnéticas de grano orientado. Normalmente el



D = mm

A = mm

H = mm

FIG. Nº 2.1 Dimensiones principales del núcleo del transformador de puesta a tierra. en conexión zig-zag.

espesor de las laminas utilizadas en transformadores es aproximadamente de 0.3 mm. ó 0.35 mm.

El aislamiento entre las láminas magnéticas puede ser de diversas naturalezas. Anteriormente se utilizaba el papel que se pegaba antes de un corte en una de las caras de las láminas magnética, trabajo que era realizado por el constructor.

Posteriormente se utilizó el barniz (silicato sólido). Actualmente, las láminas de grano orientado vienen preparadas mediante un tratamiento termoquímico especial (carlita), que proporciona en ambas caras el aislamiento requerido.

La utilización del barniz como aislamiento de las láminas ha provocado una mejora del factor de apilamiento; ya que con la “carlita” se llega a obtener en núcleos para transformadores y reactores (laminas de 0.35 mm.) un factor de apilamiento comprendido entre 0.95 a 0.97.

El núcleo del transformador de mediana potencia consta de 3 columnas principales y 2 columnas adicionales llamadas culatas, los arrollamientos se disponen en las tres columnas principales. [6]

En general, la unión de los núcleos con las culatas puede efectuarse a tope o mediante el traslape de laminación. En la construcción a tope, las columnas y culatas se arman separadamente y luego se unen con ayuda de piezas de sujeción. Esta construcción del núcleo facilita el montaje del

devanado en las columnas, ya que para ello sólo hay que retirar la culata superior. Sin embargo durante el montaje por traslape todo el núcleo se arma de una tirada; razón por la cual, al colocar el devanado en la columna es necesario deslaminar la culata superior y después disponer el devanado, se lamina de nuevo.

2.1.1 Sección transversal

La sección del núcleo se dispone en forma escalonada por paquetes de diferentes anchos, de modo tal que se inscribe en una circunferencia de diámetro D . De esta manera es posible darle a las bobinas una forma cilíndrica, conseguir el máximo factor de espacio para el fierro y obtener una mínima espira media para el cobre.

El número de escalones depende del diámetro D (mm.). En el presente trabajo se ha utilizado las siguientes relaciones [1]:

Número de escalones < 5 , $D < 100$ mm.

Número de escalones < 7 , $100 < D < 500$ mm.

Número de escalones < 10 , $D < 1000$ mm.

En la Fig. N° 2,2 se muestra las dimensiones óptimas de la sección recta del núcleo cuando se utiliza cinco escalones.

2.1.2 Pérdidas en el fierro

Estas pérdidas dan origen al calentamiento del núcleo y están compuestas por las pérdidas de histéresis y las pérdidas por corrientes

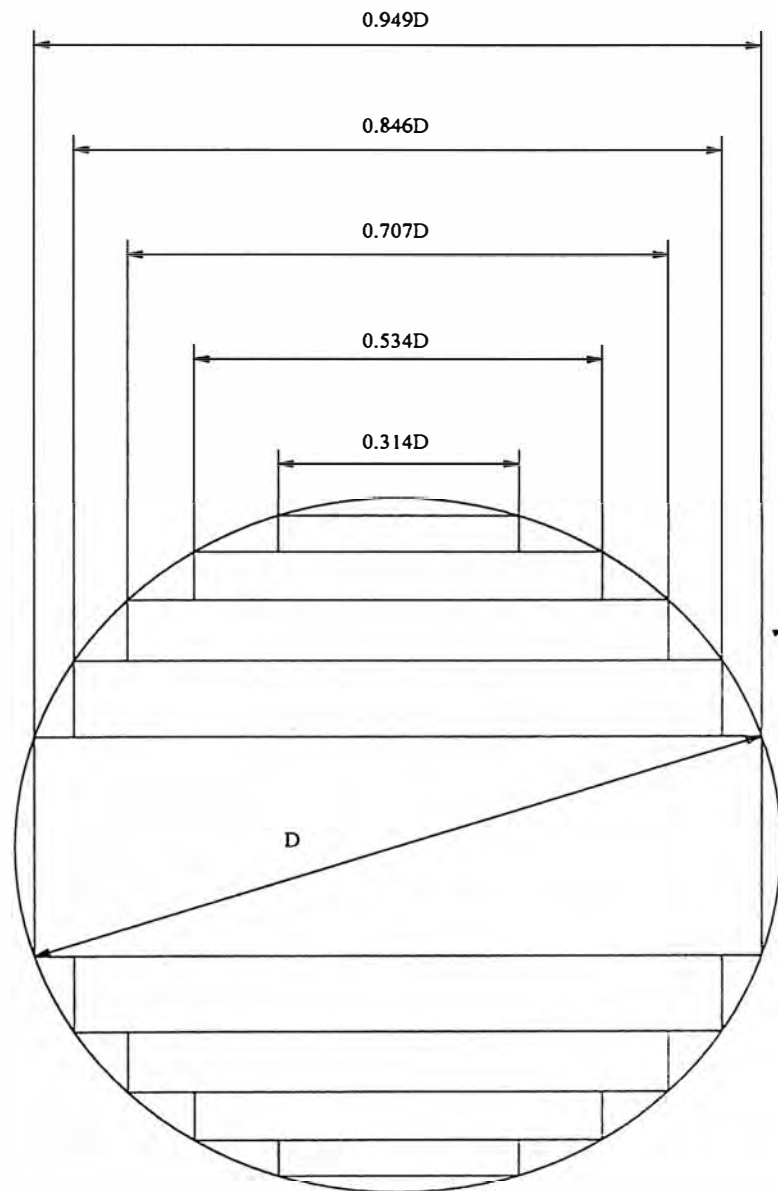


FIG. N° 2,2 Dimensiones óptimas de la sección recta del núcleo utilizado en el diseño.

parásitas o de Foucault. Existen fórmulas matemáticas para el cálculo de esta componente de pérdidas.

Por histéresis: $W_h = n B_{\max}^2 f G_{fe}$

Por foucault: $W_f = \epsilon (B_{ef})^2 f^2 G_{fe} t^2$

Donde:

B_{\max} = Inducción máxima en Gauss

B_{ef} = Inducción eficaz en Gauss

G_{fe} – Peso total del núcleo en Kg.

W_h – Pérdida total por histéresis en watts

W_f – Pérdida total por corriente de Foucault en watts

f – Frecuencia en Hz

t – Espesor de la plancha

n – coeficiente de histéresis, proporcional a la superficie del núcleo y depende del tipo de material

ϵ = coeficiente de foucault

Las fórmulas anteriores no incluyen los defectos de construcción y las pérdidas de la misma naturaleza en otros elementos constructivos, tales como: soportes, tirantes, cajas, cubierta o tapa, rebabas de las láminas, deterioro del aislamiento al montar las planchas, etc. Por lo mencionado estas ecuaciones carecen de interés práctico debido a su inexactitud.

Con el objeto de incluir en lo posible estas pérdidas, se elaboran curvas experimentales utilizando prototipos de transformadores y reactores para obtener pérdidas en el hierro reales a los diferentes niveles de inducción. Este es el método que generalmente utilizan los fabricante de transformadores y reactores, siendo el dato principal los vatios por kilogramos a los diferentes niveles de inducción, para los diferentes tipos de laminas ferromagnéticas. Luego, calculado el peso total del núcleo en kilogramos, se obtiene las pérdidas totales en el fierro en vatios aplicando la siguiente relación:

$$W_{fe} = P_{ef} G_{fe} F_c \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde: P_{ef} = Pérdidas específicas en el fierro en W/Kg.

G_{fe} = Peso total del núcleo en Kg.

F_c = Factor de corrección por pérdidas específicas. [5]

2.1.3 Corriente de excitación

La corriente de excitación o de vacío define a los Amper-vuelta netos que actúan sobre el circuito magnético del transformador y produce el flujo en el núcleo. Este flujo induce una fuerza electromotriz en el primario igual a:

$$e_1 = - N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde: N_1 = Número de vueltas en el devanado primario.

$\varnothing = \text{Flujo.}$

De acuerdo a la ley de inducción el flujo está determinado únicamente por la tensión aplicada, su frecuencia y el número de vueltas del devanado.

Para un tipo de construcción y con una calidad de lamina determinada, cada kilogramo del núcleo requiere un cierto número de Volt-Amperios eficaces que dependen únicamente de la inducción máxima (B_{\max}) en el circuito magnético, en ese sentido, se puede trazar la curva de Volt-Amper por kilogramos (V_a) u en función de la inducción magnética, y luego deducir la corriente magnetizante. Por lo tanto, las características magnéticas del núcleo determinan la naturaleza de la corriente de excitación.

Teniendo estas curvas para el material utilizado, la corriente de magnetización será:

$$I_m = \frac{(V_a)_u G_{fe}}{E_p} \text{ A} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde: $G_{fe} = \text{Peso del núcleo en Kg.}$

$(V_a)_u = \text{Volt-Amper eficaces por Kg.}$

$E_p = \text{Tensión aplicada voltios (V).}$

Existe otra componente en la corriente de excitación y se le denomina corriente de pérdidas magnéticas, que se expresa mediante:

$$I_p = \frac{W_{fe} \cdot G_{fe}}{E_p} \quad (A) \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Donde: W_{fe} = Pérdidas en el hierro en vatios por Kg.

Por lo tanto, calculadas las componentes magnéticas y de pérdidas en el hierro, cuyos valores se hallan en cuadratura se deduce la corriente de excitación: [2]

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_p^2} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

2.2 Características de los devanados

El devanado de un transformador de puesta a tierra es una bobina trifásica en conexión zig-zag, por consiguiente no tendrá devanado de baja tensión. El arrollamiento de una fase se divide en dos partes iguales, devanándose cada parte en dos columnas diferentes y luego se conectan en serie, de manera que uno sea el devanado interior y el otro el exterior de una columna del núcleo, como si fuera el devanado de baja tensión y el de alta tensión de un transformador trifásico de potencia. Como los dos arrollamientos de cada columna están formados por la mitad del arrollamiento de dos fases diferentes correspondiente a la misma tensión, entonces éstos serán iguales. Dichos arrollamientos estarán formados por capas de cobre superpuestas que serán bobinados a lo largo de la columna, formando dos cilindros concéntricos, y se tendrá que determinar

solamente las características de uno de ellos (interior o exterior). [8]

2.2.1 Cálculo del número de espiras de la mitad del arrollamiento por fase

Una vez obtenido el tamaño del núcleo se determina el número de espiras de la mitad del arrollamiento por fase de cada arrollamiento que se bobinará a lo largo de las columnas del mismo, teniendo presente los voltios por espiras.

En el transformador de puesta a tierra con el devanado en conexión zig-zag la fuerza electromotriz de cada fase en voltios viene dada por la siguiente expresión (ver Anexo A): [2]

$$E = 4,44 \sqrt{3} f B N \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 F_{fe} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Por consiguiente los voltios por espiras:

$$\frac{E}{N} = 4,44 \sqrt{3} f B \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 F_{fe} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Donde:

B = Inducción magnética en tesla.

N = Número de espiras de la mitad del arrollamiento de fase.

D = Diámetro nominal de la columna del núcleo en m.

f = Frecuencia en Hz.

F_{fe} = Factor de utilización del hierro.

Habiéndose encontrado los voltios por espiras, luego se determina la mitad del arrollamiento de fase:

$$N = \frac{V_{\text{fase}}}{E/N} \dots\dots\dots (2.8)$$

Donde: V_{fase} = Tensión de fase nominal de la red en voltios.

El número de espiras debe ser un número entero, por lo que el valor obtenido se sustituye por el entero próximo más conveniente, y a partir de este valor se recalcula la tensión por espira, así como también el nuevo valor del diámetro nominal del núcleo.

2.2.2 Área o sección del cobre

Así como la inducción magnética es determinante en las pérdidas en el fierro, la densidad de corriente J que debe circular por las bobinas define las pérdidas del cobre. El valor de J utilizado en el diseño de transformador esta entre los limites de 2 a 3.5 A/mm².

La sección transversal del cobre para el arrollamiento se determina de la siguiente expresión:

$$S_{cu} = \frac{I_f}{J} \quad (\text{mm}^2) \dots\dots\dots (2.9)$$

También se sabe que:

$$I_f = \frac{P}{\sqrt{3} V L} \quad (\text{A}) \dots\dots\dots (2.10)$$

Donde:

- S_{cu} – Sección transversal del cobre en mm^2 .
- I_f Corriente de fase en A.
- J = Densidad de corriente en A/mm^2 .
- P = Potencia de diseño del transformador en VA.
- V_L = Tensión de línea en voltios.

El número de capas del devanado, depende de la sección obtenida, así como también del espacio disponible para el arrollamiento en el núcleo.

2.2.3 Pérdidas en el cobre

En condiciones normales el transformador de puesta a tierra se comporta como un reactor con núcleo de hierro ó un transformador de potencia en vacío. Por consiguiente, por sus arrollamientos circula una pequeña corriente de excitación. Luego es posible, que las pérdidas por efecto Joule producidas por esta corriente en estado estacionario son despreciables.

Sin embargo, en condiciones de falla, las cuales transcurren en un periodo de tiempo muy corto por los devanados del transformador circulará la corriente de falla monofásica a tierra de la barra al que esta conectado. Por lo tanto, la bobina del transformador en este periodo de corta duración disipa una magnitud de pérdidas en el cobre que va a ser considerada como las nominales. Esta corriente al circular por los devanados incrementará la temperatura hasta un determinado valor

máximo permisible.

Por consiguiente, las pérdidas en el cobre para este periodo de corta duración, teniendo presente la resistividad a 75°C se calcula mediante la siguiente expresión: [3]

$$P_{cu} = 2,43 G_{cu} (J_{cd})^2 \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Donde:

P_{cu} = Pérdidas totales en el cobre en corta duración (W).

G_{cu} = Peso total de los bobinados en (Kg.)

J_{cd} = Densidad de corriente de corta duración (A / mm²)

2.2.4 Reactancia de dispersión

En el transformador de puesta a tierra, el valor de la reactancia de dispersión responde a la corriente homo polar que circula por el sistema, el cual ocurre en un periodo de tiempo en donde el transformador asume su potencia de plena carga.

La corriente de secuencia cero que circula por el arrollamiento de una misma columna, no creará magnetización total en el núcleo, debido a que la corriente fluye en sentido contrario una de la otra.

Considerando que en los transformadores de mediana potencia, se han desarrollado expresiones de diseño que permiten calcular el valor de la reactancia de dispersión, cuando éste adquiere su potencia de plena carga.

La determinación de la reactancia estará en función de las dimensiones de la parte activa.

En la Fig. N° 2,3, se representa el transformador bajo carga con los arrollamientos concéntricos. Los flujos de dispersión se superpondrán dando nuevas configuraciones. De acuerdo a las características de los bobinados, la distribución de las corrientes en los bobinados interiores (1) y exteriores (2) es igual y opuesta, por lo que el flujo común en el núcleo es nulo.

Se han trazado la distribución de la intensidad de campo para cada bobina. En la parte inferior se obtiene el campo resultante representado por sus vectores H . Este campo final es el resultado de la superposición de los flujos de dispersión, que están representados sus respectivos vectores.

Se debe tener en cuenta que la reactancia de dispersión del bobinado interior se debe al flujo de dispersión ϕ_{d1} que enlaza solamente con este bobinado y no con el exterior. De la misma manera, con el bobinado exterior que tiene un flujo de dispersión ϕ_{d2} que enlaza con este bobinado, pero no con el bobinado interior. Por consiguiente, el cálculo de la reactancia de dispersión resulta de analizar la magnitud y distribución de los flujos de dispersión y sus enlaces con las espiras de sus respectivos devanados.

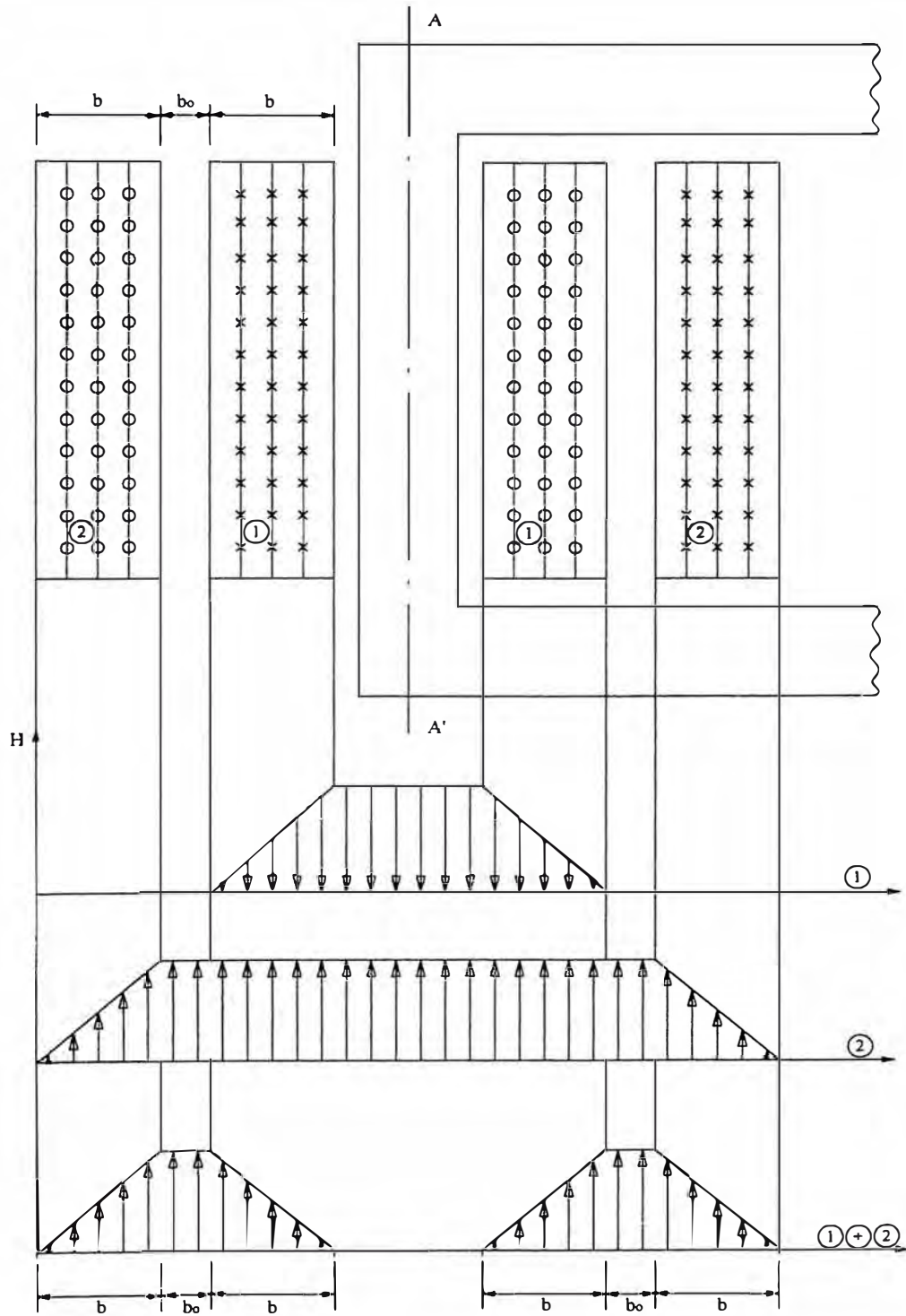


FIG. N° 2.3 Distribución de los amper-vuelta por metro debido al flujo de dispersión en los bobinados cuando por el bobinado del transformador de puesta a tierra circula la corriente de falla monofásica del sistema al cual esta conectado

Teniendo presente el procedimiento de enlaces (métodos de Rogovski), la reactancia de corta duración del transformador de puesta a tierra se expresa de la siguiente manera: [3]

$$X_{xt} = \frac{\sqrt{3} 8 \pi^2 f N^2 10^{-10}}{h} \left(b_0 D_{om} + \frac{b}{3} (D_{1m} + D_{2m}) \right) \dots\dots (2.12)$$

Siendo:

$$h = \frac{H_{dev}}{1 - \frac{2b + b_0}{\pi H_{dev}}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Donde:

N = Número de espiras de la mitad del arrollamiento por fase.

f = Frecuencia (Hz.)

b_o = Distancia entre bobinado interior y exterior (mm.)

b = Altura radial de los bobinados (mm.)

D_{om} = Diámetro medio del espacio entre bobinados (mm.)

D_{1m} = Diámetro medio exterior de los bobinados (mm.)

D_{2m} = Diámetro medio interior de los bobinados (mm.)

H_{dev} = Altura axial de los bobinados (mm.)

2.2.5 Tensión de cortocircuito

El transformador de puesta a tierra es semejante un auto transformador trifásico, pues, se diferencian en que las bobinas del auto transformador se

encuentran en fase, mientras que las bobinas del transformador se encuentran desfasadas en 120° .

La tensión de cortocircuito de un auto transformador trifásico se calcula como si fuese un transformador con sus devanados independientes. Donde U_p e I_p vienen ha ser la tensión y la corriente primaria del auto transformador, y U_s e I_s los valores secundarios. Luego las características que tiene como transformador es:

$$(U_p - U_s), I_p \quad \text{y} \quad U_s, (I_s - I_p)$$

Considerando la sección total y la tensión primaria (U_p) aplicada al arrollamiento total del auto transformador, la impedancia de corto circuito del devanado serie viene expresada por la siguiente ecuación en valores relativos o porcentaje:

$$u_{za} = \frac{U_p - U_s}{U_p} 100\% \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

Donde: (Ver Fig. N° 2,4)

U_{za} = la tensión que hace circular I_p por el devanado serie

u_{za} = la tensión relativa de cortocircuito del devanado serie.

La expresión anterior puede escribirse de la siguiente manera.

$$u_{za} = \left(\frac{U_{za}}{U_p - U_s} \right) \left(\frac{U_p - U_s}{U_p} \right) 100\% \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

Se sabe que la impedancia reactiva de corto circuito total también puede

ser expresada como: (Ver Fig. N° 2,5)

$$u_{zt} = \left(\frac{U_{za}}{U_p - U_s} \right) 100\% \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

El cual corresponde a la tensión de cortocircuito relativa que se obtiene como transformador en el devanado serie, cuando circula una corriente (I_s - I_p) por el devanado común. Por consiguiente, remplazando la expresión (2.16) en (2.15) se obtiene:

$$u_{za} = \left(\frac{U_p - U_s}{U_p} \right) U_{zt} \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

Considerando la semejanza con un auto transformador, se deduce que U_p en nuestro caso es la tensión de fase resultante y U_s es la proyección de la tensión de uno de los componentes, es decir:

(Ver Fig. N° 2,6)

$$U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

$$U_s = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cos 30^\circ$$

Luego, remplazando las igualdades anteriores en la ecuación (2.17) se obtiene:

$$u_{za} = \frac{u_{zt} \frac{U_L}{\sqrt{3}} - \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cos 30^\circ}{\frac{U_L}{\sqrt{3}}} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

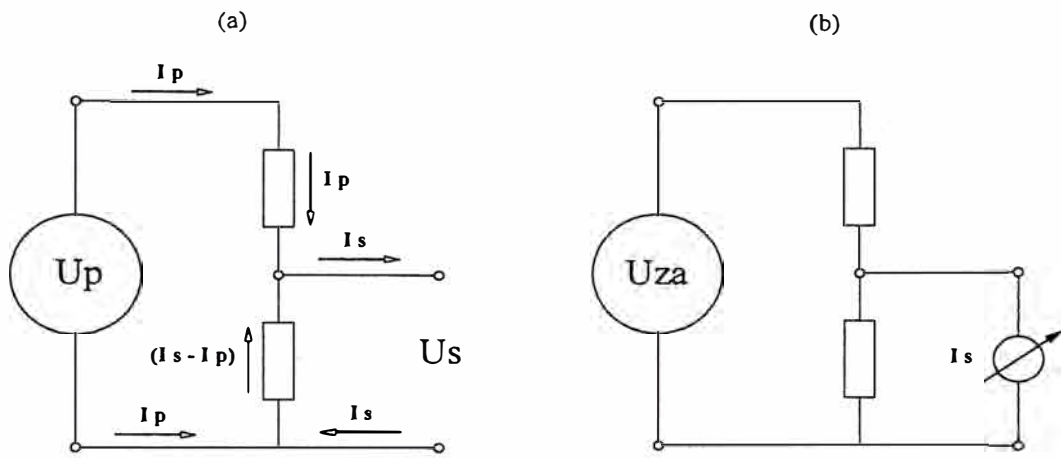


FIG. N° 2,4 Tensión de corto circuito.
 a) U_p = Tensión primaria, U_s Tensión secundaria
 b) U_{za} = Tensión relativa de cortocircuito.

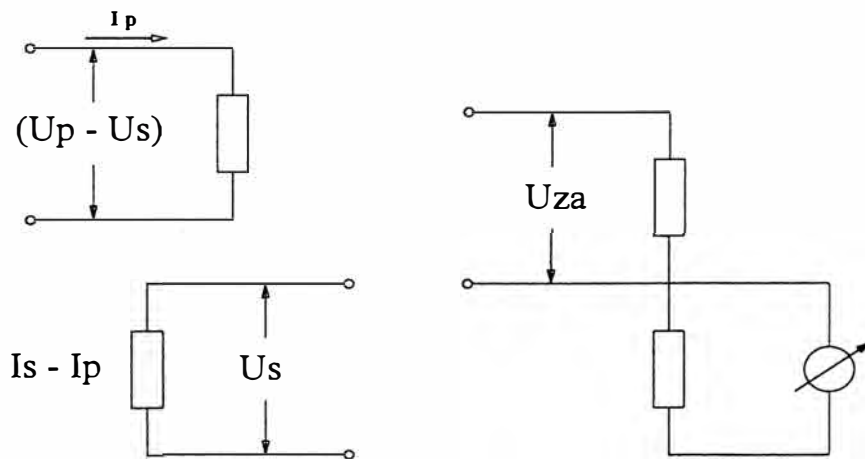


FIG. N° 2.5 Tensión de corto circuito relativa que se obtendrá como transformador refiriéndose al devanado secundario y haciendo circular la intensidad de corriente $(I_s - I_p)$ por el devanado común.

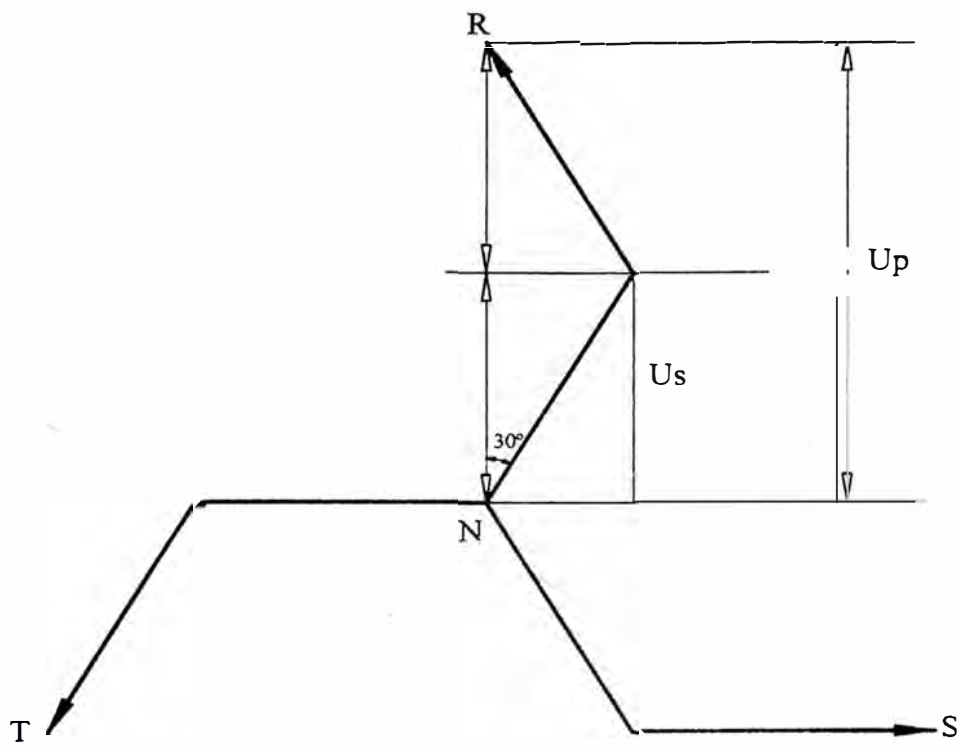


FIG. N ° 2,6 Tenemos V_p , es la tensión de fase resultante, U_s es la proyección de la de la tensión del vano de los componentes

Siendo:

$$u_{zt} = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \dots\dots\dots(2.19)$$

Donde: u_{za} = Tensión de cortocircuito.

U_r = Caída resistiva en porcentaje.

U_x = Caída reactiva en porcentaje.

V_L = Tensión de línea de la red (V).

2.2.6 Efecto térmico de los bobinados

En condiciones de estado permanente, por sus bobinas del transformador solamente circulará una pequeña corriente de excitación, luego, la energía que se disipa a través de las bobinas es despreciable, y el aumento de temperatura es insignificante.

Por lo tanto, se puede afirmar que para el transformador de puesta a tierra no interesa analizar el efecto térmico de los bobinados.

En conclusión el transformador de puesta a tierra esta en condiciones de operar sin considerar algún medio refrigerante, es decir como un “transformador seco”.

2.2.7 Aislamiento y distancia

El aislamiento que se emplea en los arrollamientos de los transformadores es el papel arrollado a máquina en mayor o menor número de capas según sea el nivel de tensión, teniendo en cuenta las

propiedades de rigidez dieléctrica, elasticidad y resistencia a la temperatura. También se considera el aislamiento entre los bobinados y bobinas, así como los espesores de los cilindros aislantes. [2]

a) Distancia entre bobinado y el núcleo

Los valores indicados en la Fig. N° 2,8 que está en función de las tensiones de líneas, en donde para una tensión de 10 KV se obtiene la distancia (k) de 15 mm. El espesor del cilindro aislante (m.) se determina de la Fig. N° 2,7; de donde para 10 KV resulta un espesor de 2 mm.

Para el transformador de puesta a tierra, se ha obtenido el valor de la reactancia para condiciones de operación a plena carga y así cumplir con las especificaciones técnicas. Se considera una distancia entre bobinado y núcleo de 15 mm. Y un espesor de cilindro de 2 mm.

b) Distancia mínima entre bobina interior y exterior

Esta distancia mínima se determina haciendo uso de la curva de la Fig. N° 2,8 obteniendo una distancia entre bobinas (j) de 15 mm. Para un nivel de tensión 10 KV y un espesor de cilindro de 2 mm.

Para cumplir con las especificaciones técnicas, se considera una distancia entre arrollamientos de 15 mm. Y un espesor de cilindro de 2 mm.

c) Distancia entre arrollamiento y yugo

En la Fig. N° 2,9 indica la distancia axial (f) para un nivel tensión de

FIG. N° 2,7 Espesor del cilindro aislante.

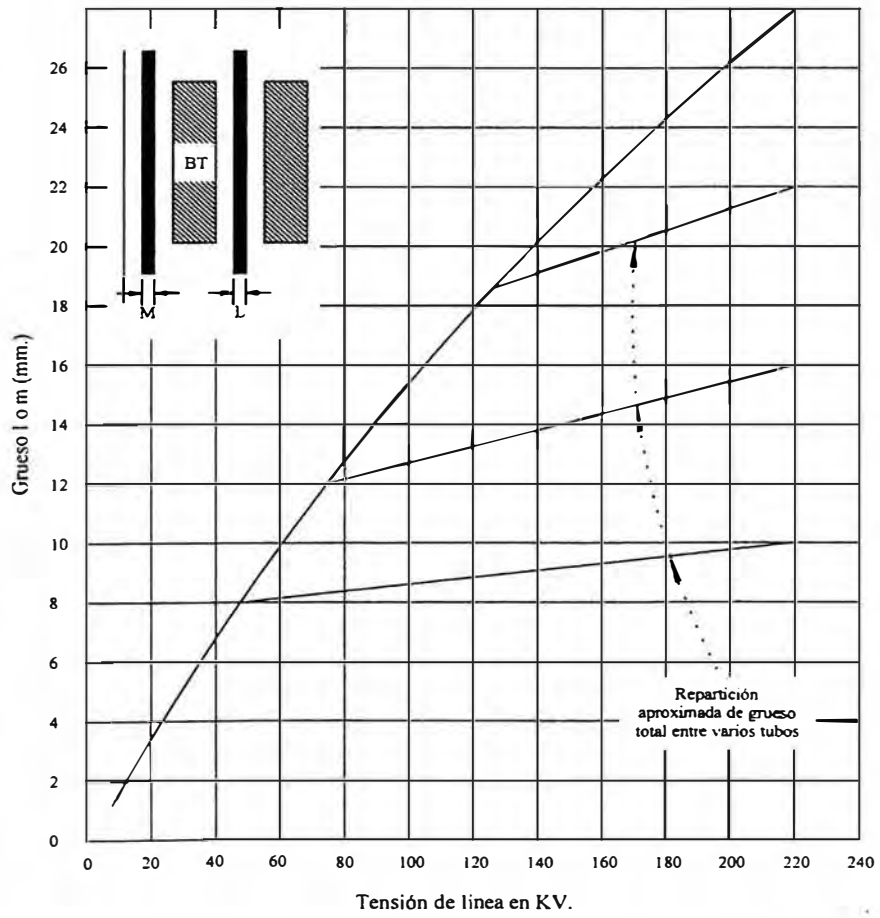
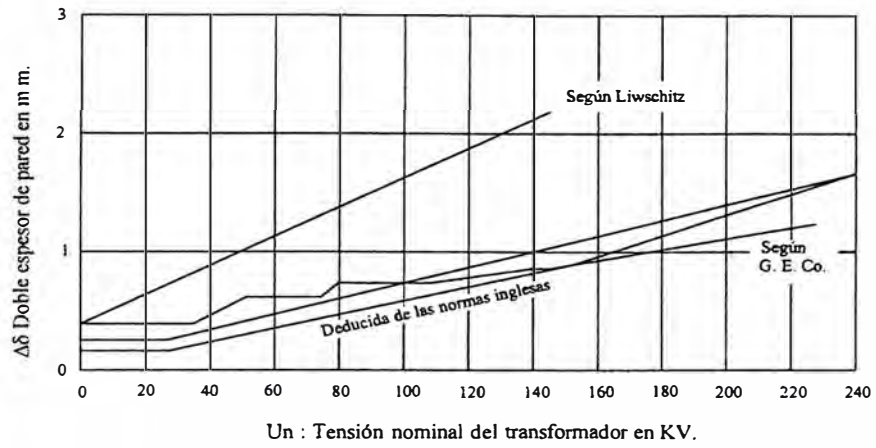


FIG. N° 2,8 Distancia mínima entre el núcleo y el bobinado

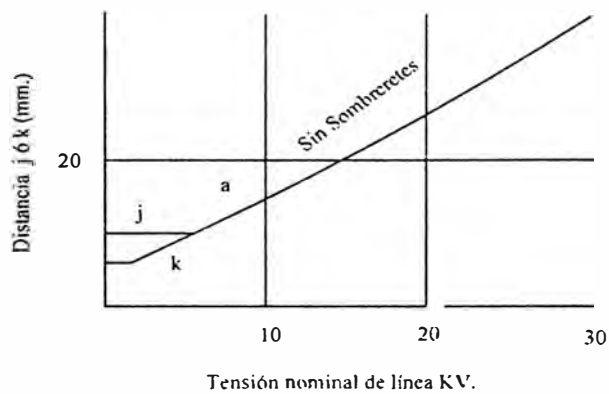
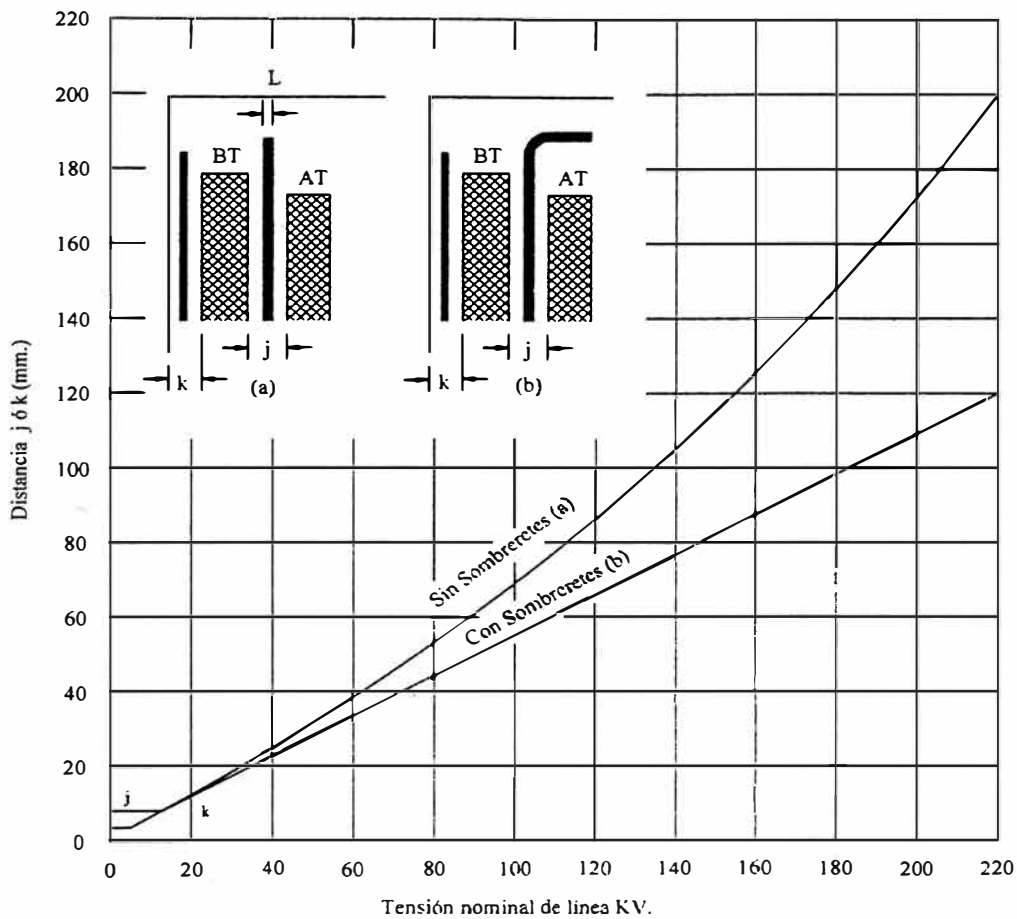
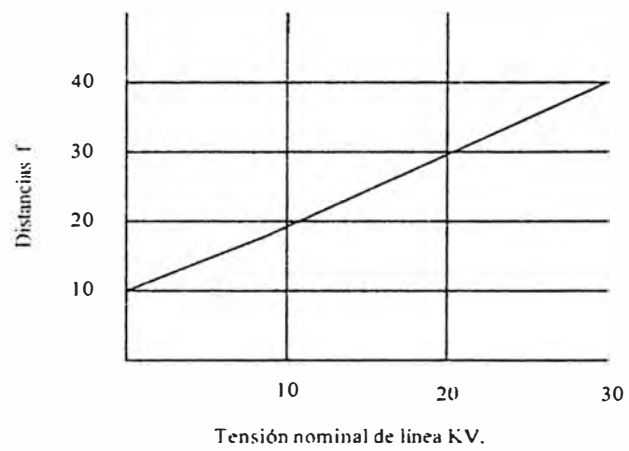
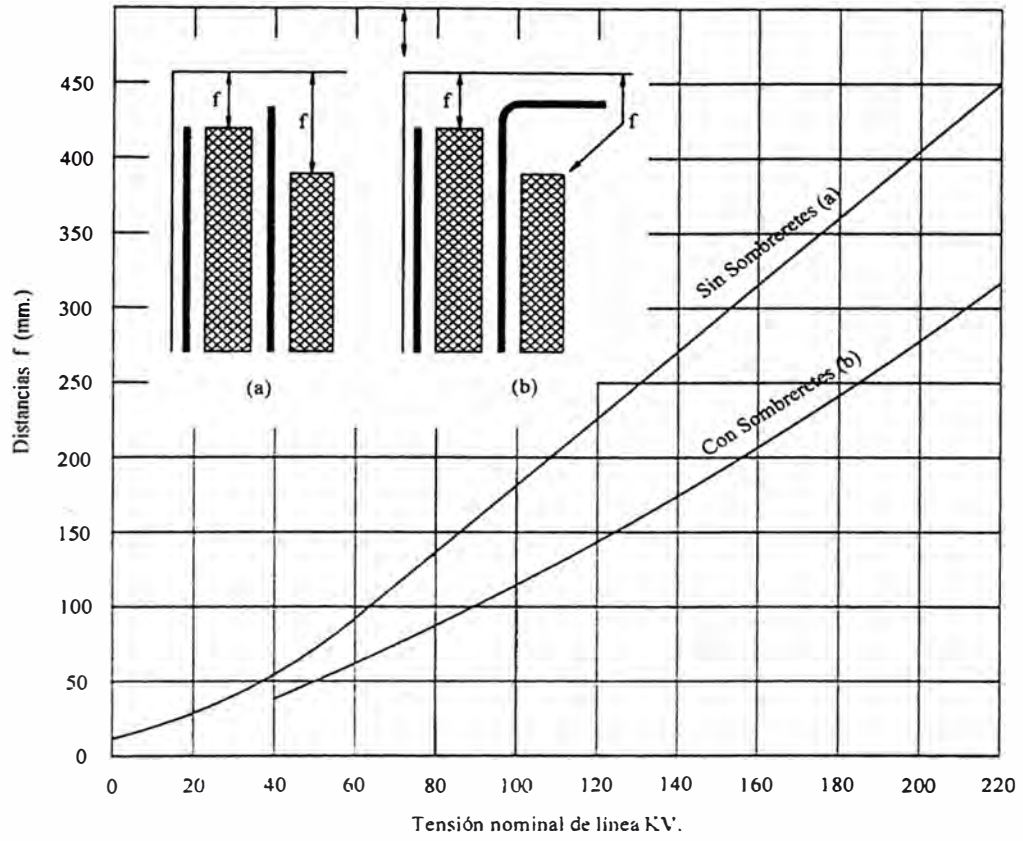


FIG. N° 2,9 Distancia axial entre núcleo y bobinado



10 KV, entre el arrollamiento y el yugo que corresponde a 19 mm. Asumiendo finalmente una distancia de 20 mm.

d) Distancia mínima entre bobinas exteriores

Considerando despreciable el calentamiento del transformador y que el valor de la tensión de corto circuito resulta aceptable, se asume aproximadamente la misma distancia, entre arrollamiento y yugo mencionado se tendrá, los mismos valores de distancia. Para nuestro diseño se considera una distancia de 22 mm. Todas las distancias se encuentran en la Fig. N° 2,10. Que corresponde a las dimensiones de la parte activa.

2.3 La cuba y el aceite

Los transformadores de potencia, como los transformadores de puesta a tierra, deben tener sus núcleos y devanados en aceite y encerrados en tanques que eviten pérdidas de aceite. Estos están contruidos de acero y pueden tener la forma redonda, elíptica, o rectangular; así mismo deben tener un volumen que le pueda permitir la dilatación y contracción térmica del aceite.

2.3.1 Resistencia mecánica

Considerando que el funcionamiento del transformador es intermitente (solo en falla), la carcasa que recepciona y protege al transformador no necesita de elementos adicionales para su refrigeración.

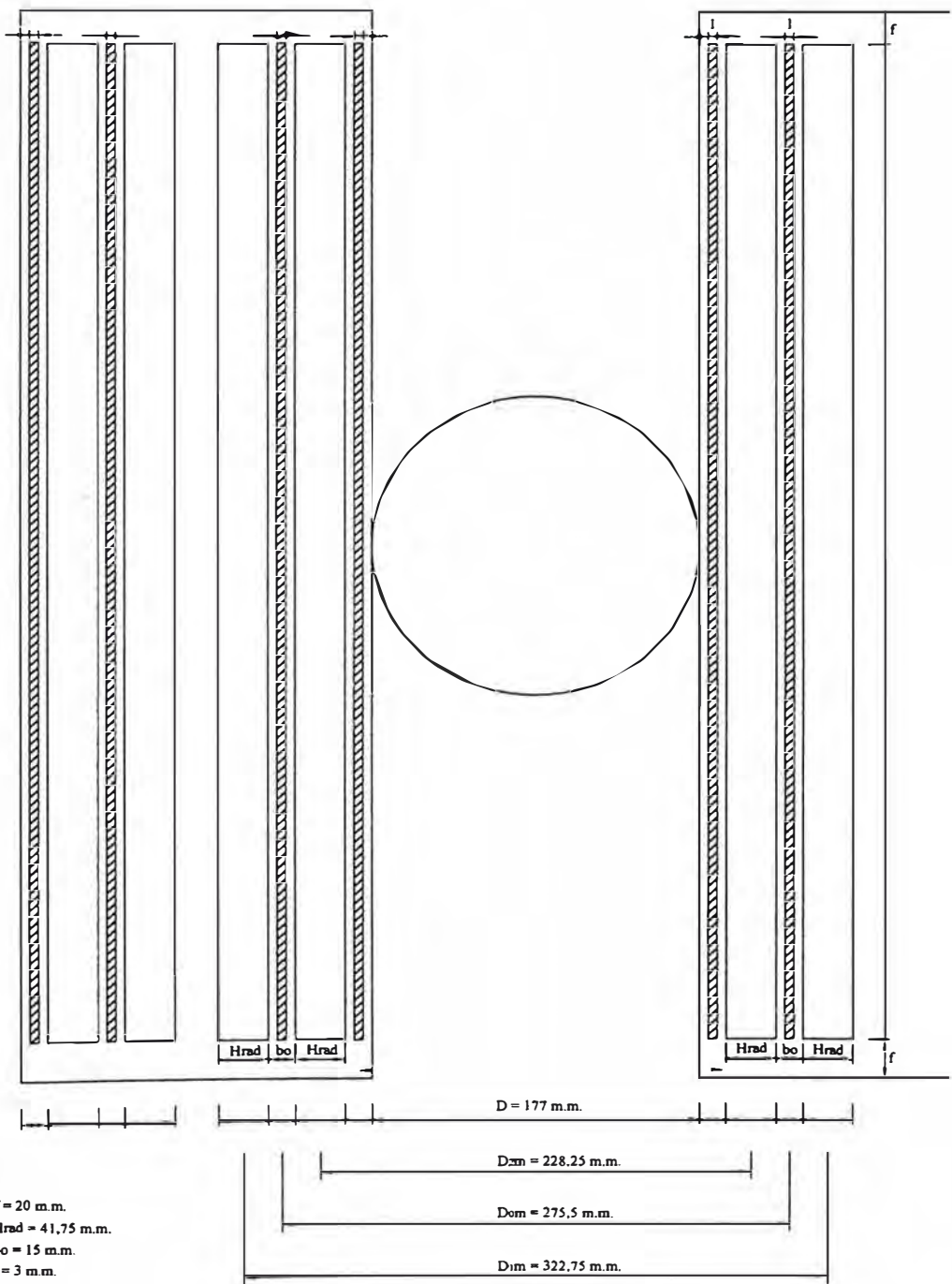


FIG. N° 2,10 Dimensiones de la parte activa.

Por lo tanto, la superficie de esta carcasa será plana.

La resistencia mecánica de la cuba, seleccionada tendrá una plancha, cuyo espesor mínimo, esta en función de la presión de aceite que debe soportar y viene expresada por la siguiente expresión:

$$t = 3 \sqrt{H_1^3} \dots\dots\dots (2.20)$$

Donde: t = Espesor mínimo de la plancha (mm.)

H_1 = Altura libre del aceite (mm.)

2.3.2 Disipación térmica

La disipación de energía se realiza a través de las paredes del tanque mediante dos formas, una por radiación, el cual es el proceso por donde fluye calor desde un cuerpo caliente a uno frío, a través de un espacio de separación, la segunda es por convección, que es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Luego la disipación total de la energía se obtiene de la siguiente relación:

$$W_d = \theta_{om} (K_c A_c + K_r A_r) \dots\dots\dots(2.21)$$

Donde:

A_c, A_r = Superficies eficaces de convección y radiación (m²).

K_c, K_r – Coeficiente de calor (W / m² °C).

W_d – Pérdidas totales a disipar (W).

θ_0 = Elevación de temperatura media de la cuba (°C).

Durante el desarrollo del diseño, se deberá cumplir que el calor la energía de disipación W_d resulte mayor que las pérdidas totales del transformador de puesta a tierra. [2]

Los valores de K_c y K_r son estándar para superficies planas y son los siguientes:

$$K_c = 6.7 \text{ (W / m}^2 \text{ °C)} \quad K_r = 6.7 \text{ (W / m}^2 \text{ °C)}$$

2.3.3 Accesorios

El transformador de puesta a tierra trifásico deberá incluir como mínimo los siguientes accesorios:

a) placa inoxidable con indicación indeleble de las siguientes características:

Tipo de instalación.

Potencia.

Número de fases.

Frecuencia.

Tensión.

Tensión de cortocircuito.

Conexión.

Corriente de neutro.

Peso, marca y tipo de aceite.

- Peso de la parte activa.

Temperatura ambiental para el diseño.

Cantidad de aceite en galones.

- Peso total.
- Fabricante y número de serie de la unidad.
- Norma de fabricación.

b) Indicador de nivel de aceite.

c) Placa con diagramas de conexiones interiores.

d) Ganchos u orejas de suspensión.

e) Grifo de vaciado en la parte inferior.

f) Tubo cerrado para medir la temperatura del aceite (termómetro).

g) Plancha para conexión a tierra del tanque.

CAPITULO III

TENSIONES INDUCIDAS EN LOS DEVANADOS Y ECUACIONES ANALÍTICAS PARA DETERMINAR LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO

3.1 Análisis fasorial de las tensiones inducidas en los devanados y conexión del transformador de puesta a tierra.

El transformador trifásico de puesta a tierra, tiene una conexión de tal forma que cada uno de los devanados de fase se divide en dos partes iguales, las cuales van colocadas en diferentes columnas, de manera que una mitad forme parte del bobinado interior y la otra forme el bobinado exterior de una columna del núcleo (Fig. N° 3,1).

Las fuerzas electromotrices debido a la conexión indicada, se resten geométricamente tal como se puede apreciar en la Fig. N° 3,2.

Cada par de devanados arrollados sobre una misma columna constituye un transformador monofásico, siendo la relación de estos devanado 1:1. Si el sistema es simétrico al cual está conectado el transformador, las tensiones entre línea y neutro están equilibradas, y las corrientes que ingresan por las fases constituyen la corriente de vacío.

Al ocurrir una falla en el sistema (sistema asimétrico o desequilibrado), por cada fase del transformador fluirán corrientes iguales, precisamente representa a la corriente homo polar o de secuencia

cero. En la Fig. N° 3,1, las corrientes de secuencia cero que circula de N a T' y de R' a R en una misma columna, originan campos electromagnéticos que se contrarrestan, por lo que no existe una magnetización total en el núcleo. Si por los terminales R, S y T de la Fig. N° 3,1 ingresan corrientes equilibradas I_{RN} , I_{SN} , y I_{TN} , las tensiones inducidas en los devanados debido a los flujos resultantes en los núcleos también están equilibradas tal como se puede ver en la Fig. N° 3,3. En donde los vectores representan las fuerzas electromotrices.

Del diagrama fasorial de tensiones inducidas por fase de la Fig. N° 3,3. Se deducen las siguientes ecuaciones:

$$V_{NR} = V_{R'R} + (-V_{R'N}) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$V_{NS} = V_{S'S} + (-V_{S'N}) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$V_{NT} = V_{T'T} + (-V_{T'N}) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

Estas tensiones en los devanados se encuentran equilibradas, por lo tanto, los arrollamientos están desfasados en 120° entre ellos; y tomando como referencia la tensión inducida en el devanado R'R, se verifica que corresponde a las ecuaciones (3.1), (3.2), y (3.3).

Así mismo de la Fig. N° 3,3. Mediante relaciones trigonométricas se obtiene la siguiente expresión:

$$V_{NR} = \sqrt{3} V_{R'R} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

SISTEMA TRIFASICO

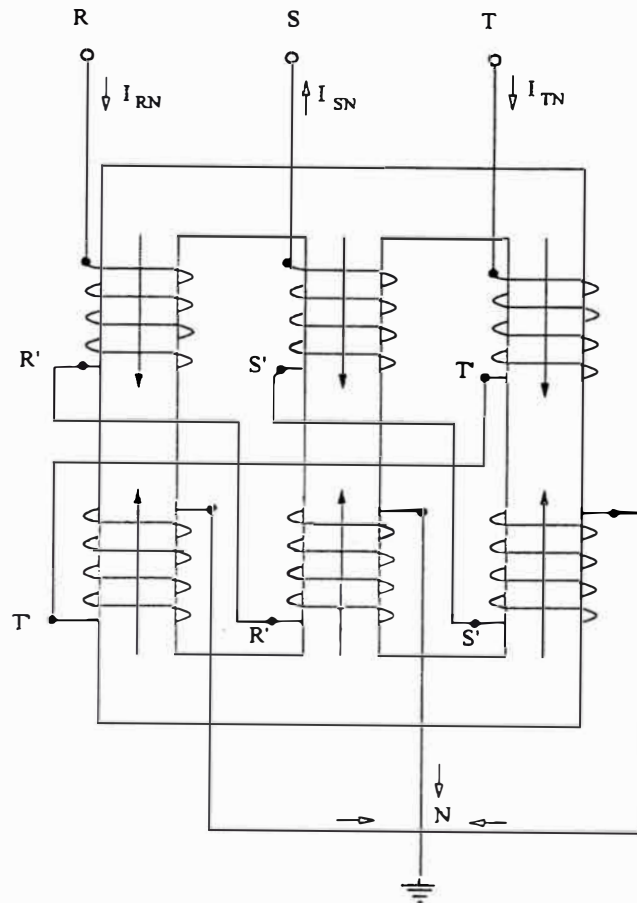


FIG. N° 3.1 Forma de conexión de los devanados de una reactancia trifásica de puesta a tierra en conexión zig - zag (s/c).

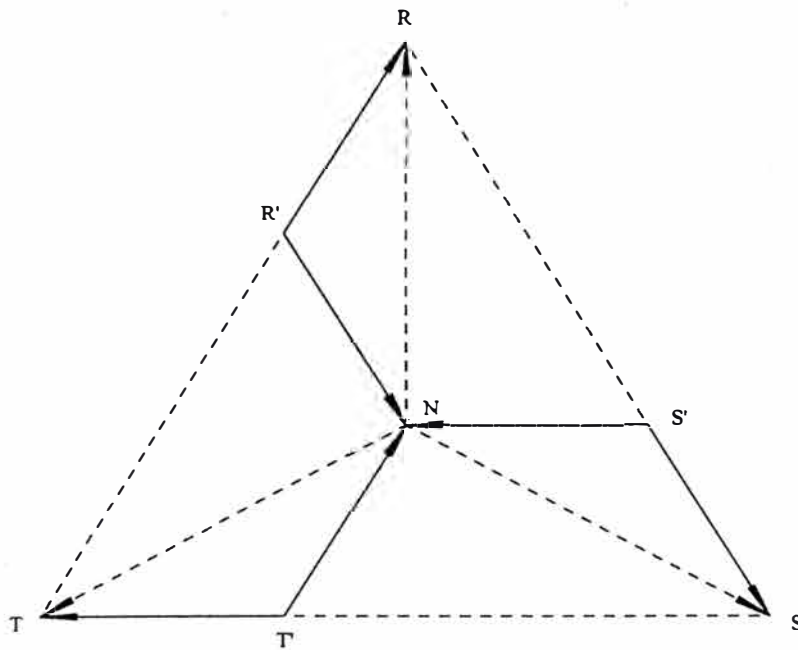


FIG. N° 3,2 Diagrama fasorial donde se muestra que la F.E.M.'s se restan geoméricamente.

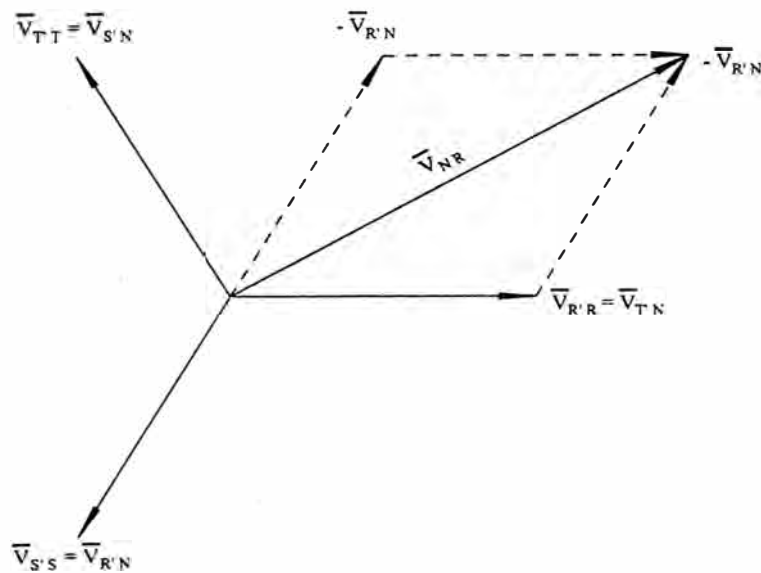


FIG. N° 3,3 Diagrama fasorial de las tensiones inducidas en los devanados de la reactancia de puesta a tierra.

Luego podemos designar, a V_{fase} como la tensión de fase de la red, a V_L como la tensión de línea de la red y a V'_{fase} como la tensión de media fase, por lo tanto podemos escribir las siguientes ecuaciones: [14]

$$V_{\text{fase}} = \sqrt{3} V'_{\text{fase}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$V_{\text{fase}} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

De donde resulta:

$$V'_{\text{fase}} = \frac{V_L}{3} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

3.2 Determinación de las dimensiones principales del núcleo

Para determinar las dimensiones, se utilizan las ecuaciones obtenidas mediante la aplicación de los principios de electromagnetismo. Estas ecuaciones no presentan dificultades para emplearlas como método directo, y por otro lado, a partir de las mismas formulas se establece el valor de la impedancia del transformador de puesta a tierra.

Se tendrá presente algunos parámetros obtenidos de datos estadísticos de diseño. (Formulas a aplicarse y deducidas, ver Anexo A)

3.2.1 Peso del fierro

Para determinar el peso del fierro (G_{fe}) es necesario conocer las dimensiones del núcleo, así como parámetros técnicos (densidad del fierro, factor de apilamiento), ya que estos se hallan ligados al peso del

material activo o al peso del fierro que viene representado por la siguiente ecuación:

$$G_{fe} = \left(\frac{\pi}{4}\right) P_{fe} D^2 (3H + 4A + 6D) F_{fe} 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

3.2.2 Peso del cobre

En forma similar al ítem 3.2.1, se concluye que el peso del cobre (G_{cu}) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$G_{cu} = 3 P_{cu} \pi \left(\frac{A H}{2}\right) \left(D + \frac{A}{2}\right) F_{fe} 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

Donde: D = diámetro del núcleo (cm.)

H = Altura de ventana (cm.)

A = Ancho de ventana (cm.)

P_{fe} = Peso específico del fierro (Kg. /cm³.)

P_{cu} = Peso específico del cobre (Kg. /cm³.)

F_{fe} = Factor de utilización del fierro.

3.3 Determinación de las dimensiones principales

Las dimensiones fundamentales del núcleo del transformador trifásico de puesta a tierra, queda determinada por la potencia nominal de diseño en Volt-Amperios.

3.3.1 Determinación del diámetro (D)

De las ecuaciones obtenidas en el Anexo A. Se tiene que expresión

determina el diámetro (mm.) de las columnas del núcleo y esta dada por:

$$D = X \sqrt[4]{\left(\frac{P P_{ecu} (C_{cu} + W_{cu} \Delta P_{ecu})}{K P_{fe} F_{fe}^2 (C_{fe} + W_{fe} \Delta P_{efe})} \right)} 10^3 \quad \dots (3.10)$$

Siendo:

$$X = \sqrt[4]{\left(\frac{12}{\pi} \right) \left(\frac{T + m}{9T + 4m} \right)} \quad \dots (3.11)$$

$$K = \frac{3 \sqrt{6} \pi f B J}{4} \quad \dots (3.12)$$

$$F_{fe} = f_a n_f \quad \dots (3.13)$$

$$T = \sqrt{\frac{(C_{cu} + W_{cu} \Delta P_{ecu}) P_{ecu} F_c}{(C_{fe} + W_{fe} \Delta P_{efe}) P_{efe} F_{efe}}} \quad \dots (3.14)$$

$$m = \sqrt{\frac{3}{3 + \pi X^4}} \quad \dots (3.15)$$

- Donde:
- P = Potencia de diseño (VA.)
 - D = Diámetro del núcleo (mm.)
 - P_{ecu} = Peso específico del cobre (gr. /cm.³.)
 - P_{efe} = Peso específico del fierro (gr. /cm.³.)
 - C_{cu} = Costo del cobre (dólares/Watts.)
 - C_{fe} = Costo del fierro (dólares/Watts.)
 - W_{cu} = Valorización de pérdidas en el cobre (dólares/Watts.)

W_{fe} = Valorización de pérdidas en el hierro
(dólares/Watts.)

Δp_{ecu} = Pérdidas específicas de potencia para el cobre en
carga estable (dólares/Watts.)

ΔP_{efe} = Pérdidas específicas del hierro a tensión nominal
(dólares/Watts.)

f = Frecuencia de la red (Hz.)

B = Inducción magnética (tesla.)

J = Densidad de corriente (A/mm².)

F_{fe} = Factor de utilización del hierro.

f_a – factor de apilamiento o de relleno.

n_{fe} – factor de plenitud del hierro.

T = relación de costo financiero.

Para obtener los valores de "m" y de "X" se da de un valor inicial "m₀" perteneciente al intervalo [0,706 – 0,832], obteniéndose de esta manera un "X₀", luego, mediante un proceso iterativo se obtendrá un valor constante.

3.3.2 Determinación del ancho de ventana (A)

Estas dimensiones se determinarán teniendo presente las relaciones entre las igualdades obtenidas en el Anexo A.

$$\frac{A}{D} = \frac{m}{T} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$\frac{H}{D} = \frac{4}{\pi m T X^4} \dots\dots\dots(3.17)$$

Luego, de la expresión (3.16) obtenemos:

$$A = \frac{D m}{T} \text{ mm.} \dots\dots\dots(3.18)$$

3.3.3 Determinación de la altura de ventana (H)

De la expresión (3.17) despejando obtenemos lo siguiente:

$$H = \frac{4 D}{\pi m T X^4} \text{ mm.} \dots\dots\dots(3.19)$$

CAPITULO IV

CARACTERÍSTICAS DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN 60/10 KV Y DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE DE FALLA MONOFÁSICA A TIERRA

4.1 Características del sistema de distribución

El sistema de distribución de media tensión, (10 KV) para el cual se ha de diseñado el transformador de puesta a tierra, corresponde al centro de transformación S.E. La Unión (Piura). En donde existe un transformador de potencia cuya relación de tensión es de 60/10 KV.

La conexión del transformador reductor con neutro a tierra en el lado de alta tensión, y triangulo en el lado de baja tensión. Se observa que el centro de transformación en el lado de baja corresponde a un sistema sin neutro físico. (Ver Fig. N° 4,1 y 4,2)

En la tabla N° 4,1 se aprecia los porcentajes de las redes aéreas y de las redes subterráneas correspondientes al centro de transformación La Unión.

El centro de transformación tiene instalado enlaces aéreos cuya longitud son mayores de 15000 metros. [10]

TABLA N° 4,1.- Porcentaje de las redes aéreas y subterráneas del centro de transformación La Unión (Piura)

CENTRO DE TRANSFORMACION	RED AEREA	RED SUBTERRANEA
LA UNION	% 100	% 0

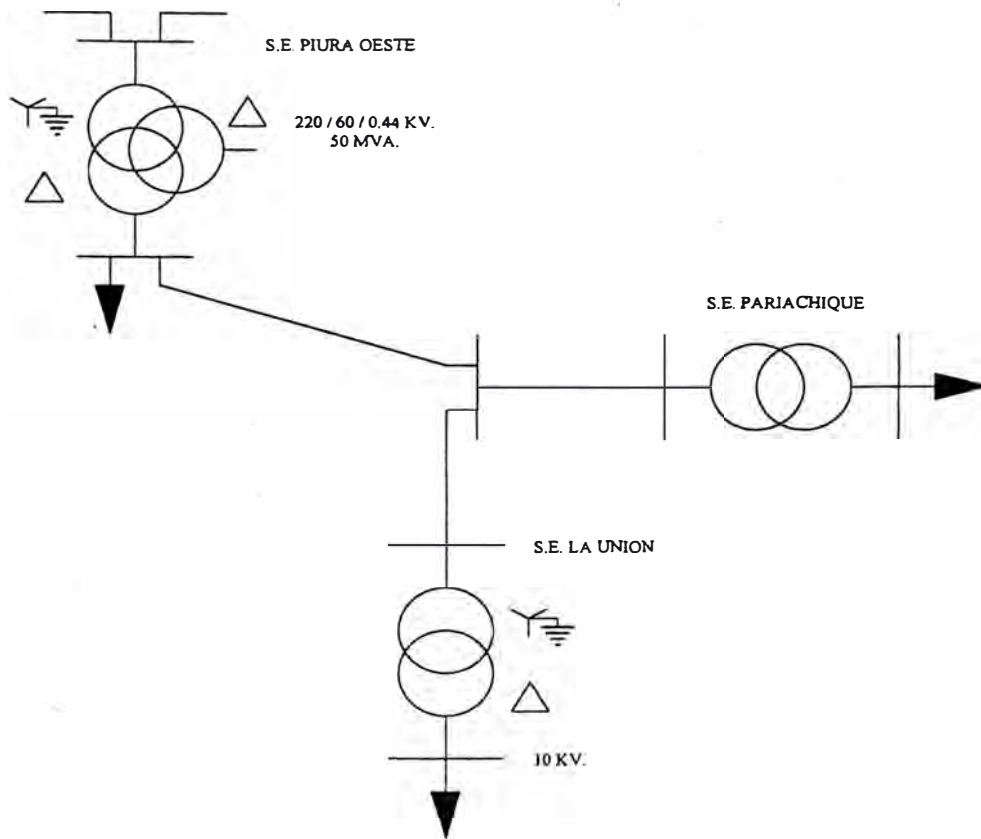


FIG. N° 4,1 Diagrama Unifilar de la línea de transmisión Piura-Oeste

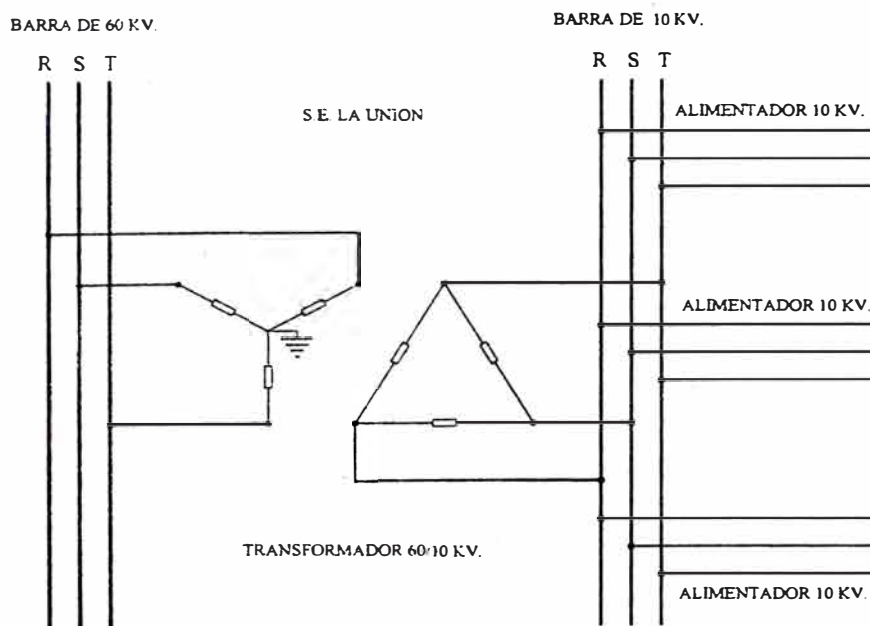


FIG. N° 4.2 Esquema eléctrico del centro de transformación de la unión (Piura)

4.2 Importancia de la corriente de falla tierra en barra de baja tensión

La determinación de la corriente de falla monofásica a tierra en un sistema de distribución de baja tensión es de gran importancia, debido a que el transformador de puesta a tierra se instalará en el lado de baja tensión. Por el transformador de puesta a tierra, fluirá cualquier corriente de falla monofásica a tierra que se pueda producir a lo largo de cualquier alimentador en baja tensión. El transformador es diseñado para el caso más desfavorable, es decir, para la corriente de falla que se debe considerar, cuando se da en la barra de baja tensión.

Para obtener el valor de la corriente de falla monofásica a tierra, es necesario determinar previamente las reactancias que conforman la red. En la Fig. N° 4,3 se aprecia el esquema representativo del centro de transformación La Unión de 60/10 KV, incluido el transformador de puesta a tierra. En la Fig. N° 4,4 se plantea el diagrama unifilar simplificado, las redes de secuencia componente del sistema se aprecian en la Fig. N° 4,5. Observándose que la reactancia de puesta a tierra del transformador no se considera en la secuencia positiva y negativa, debido a que presenta una impedancia elevada en dicha secuencia.

Para la determinación de la corriente de falla a tierra, las tres secuencias deben conectarse en serie, como se aprecia en la Fig. N° 4,6.

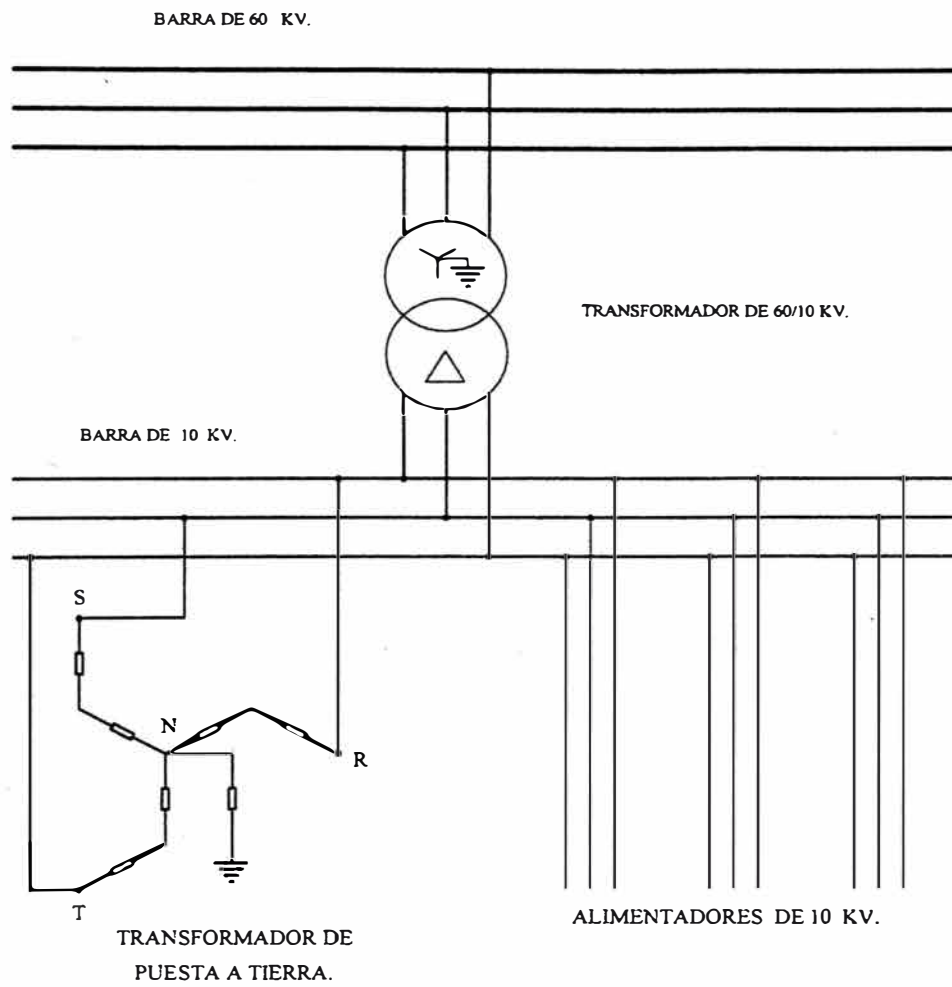
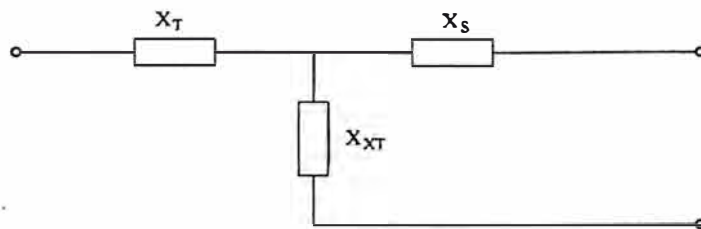


FIG. N° 4,3 Esquema representativo del centro de transformación la unión (Piura), considerando el transformador de puesta a tierra.



X_T , REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR 60/10 KV.
 X_{XT} , REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA
 X_S REACTANCIA EQUIVALENTE DE LOS ALIMENTADORES DE 10 KV/OHMS

FIG. N° 4,4 Diagrama unifilar simplificado correspondiente a la S.E. la Unión (Piura)

CIRCUITO EQUIVALENTE
 A LA BARRA DE 10 KV.

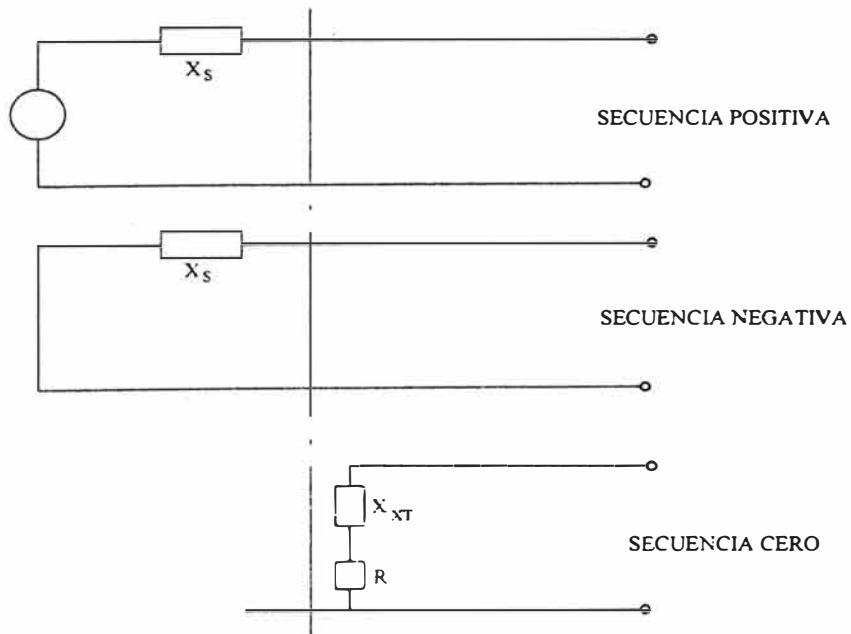


FIG. N° 4,5 Redes correspondientes a las secuencias del centro de transformación

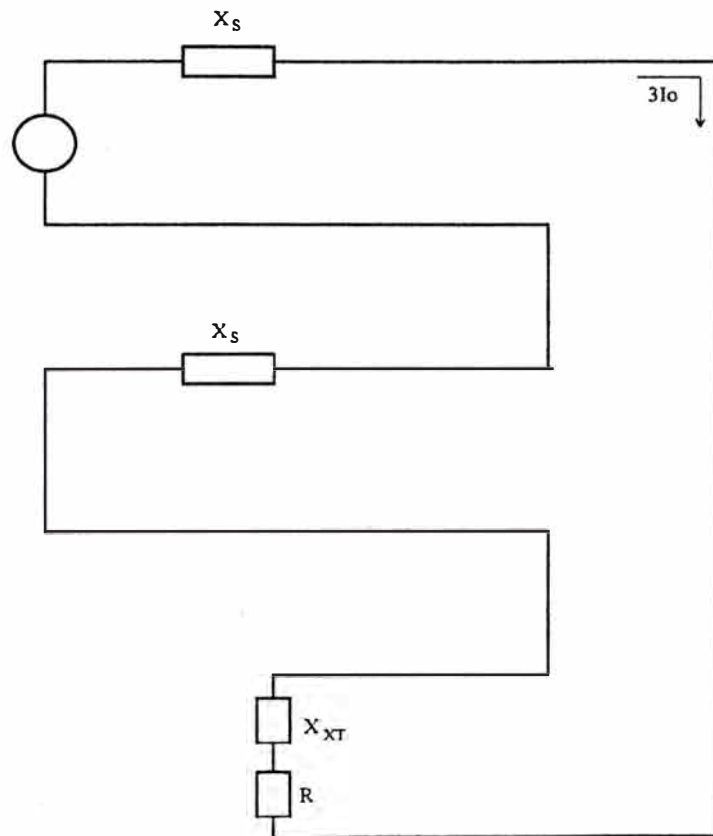


FIG. N° 4.6 Conexión de las redes de secuencia cuando ocurre una falla monofásica franca a tierra en barras de 10 Kv.

En el circuito equivalente debe incluirse una resistencia para considerar una falla monofásica franca a tierra.

4.3 Cálculo de los parámetros de la red para la determinación de la Corriente de falla monofásica a tierra.

4.3.1 Valores de la reactancia equivalente fase-tierra de los alimentadores de 10 KV en ohmios.

El valor de la reactancia de secuencia positiva, que es igual al valor de la reactancia de secuencia negativa, así como el valor de la reactancia de secuencia cero en la barra de baja tensión; son calculados considerando la magnitud de las reactancias de los diferentes alimentadores. Finalmente se obtiene el circuito equivalente donde se consideran las reactancias determinadas. (Fig. N° 4,5).

Los valores de las reactancias equivalentes fase-tierra correspondiente a las secuencias de los alimentadores de baja tensión (en ohmios), se indican en la tabla N° 4,2. [12]

TABLA N° 4,2 Valores de reactancia para la secuencia de baja tensión

CENTRO DE TRANSFORMACION	REACTANCIA EQUIVALENTE FASE A TIERRA DE LOS ALIMENTADORES 10 KV	
	SECUENCIA "O"	SECUENCIA '+=' '-'
	Xco (OHMIOS)	Xc1=Xc2 (OHMIOS)
LA UNION	6	0.6

4.3.2 Calculo de la reactancia equivalente del sistema hasta la barra de 10KV baja tensión

Se sabe que la potencia de corto circuito para un sistema trifásico queda determinado por:

$$P_{cc} = \sqrt{3} V I_{cc} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

También:

$$I_{cc} = \frac{V L}{\sqrt{3} X_s} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Remplazando la expresión (4.2) en (4.1) y efectuando operaciones y despejando X_s , se obtiene la siguiente expresión para determinar la impedancia equivalente del sistema de baja tensión:

$$X_s = \frac{(V L)^2}{P_{cc}} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

Donde:

I_{cc} = Corriente de cortocircuito (A).

P_{cc} = Potencia de cortocircuito en la barra (KVA).

V_L = Tensión nominal en barras del sistema de baja tensión (V).

Los datos proporcionados por el centro de transformación La Unión (Piura) son los siguientes: [10]

$$P_{cc} = 169.5 \text{ KVA}$$

$$V_L = 10 \text{ KV}$$

Remplazando estos valores en la expresión (4.3), se obtiene el valor de la reactancia equivalente del sistema hasta la barra de 10 KV. [2]

$$X_s = 0.6 \text{ Ohm/fase.}$$

4.3.3 Determinación del valor de la reactancia del transformador de puesta a tierra

La reactancia del transformador de puesta a tierra, está en función de la reactancia de secuencia cero, de la reactancia de secuencia positiva, de la tensión de barra, y de la potencia de cortocircuito en MVA. Por lo tanto, la expresión para obtener la reactancia del transformador de puesta a tierra es la siguiente:

$$X_{xt} = \frac{\left(\frac{X_0}{X_1} V_L \right)^2}{P_{cc}} \dots\dots\dots (4.4)$$

Donde: X_0 = Reactancia de secuencia cero del sistema.

X_1 = Reactancia de secuencia positiva del sistema.

P_{cc} = Potencia de cortocircuito del sistema.

La reactancia del transformador de puesta a tierra que se ha de considerar para el diseño, debe encontrarse entre límites recomendados.

Primero tenemos que limitar las sobre tensiones transitorias que se tienen que cumplir de acuerdo a las recomendaciones de la IEEE por la siguiente relación. [12]

$$I_{1\phi} \geq \frac{1}{4} I_{3\phi} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

La segunda recomendación es que la corriente de falla monofásica, al incrementarse su valor por la inclusión de la reactancia del transformador de puesta a tierra no debe ser mayor que la corriente de falla trifásica, es decir se debe cumplir lo siguiente:

$$I_{1\phi} \leq I_{3\phi} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

Luego para obtener los límites de la relación, se tendrá que remplazar en las expresiones (4.5) y (4.6), los valores de $I_{1\phi}$ y $I_{3\phi}$ que a continuación se indican:

$$I_{1\phi} = \frac{3E}{2X_1 + X_0} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$I_{3\phi} = \frac{E}{X_1} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Efectuando las operaciones algebraicas y considerando (4.5) y (4.6) se obtiene los siguientes límites:

$$\frac{X_0}{X_1} \geq 1 \quad , \quad 10 \geq \frac{X_0}{X_1} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

A continuación, para satisfacer las condiciones expresadas en (4.5) y (4.6) se tiene que cumplir con la siguiente relación:

$$10 \geq \frac{X_0}{X_1} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

Los valores de estos límites serán remplazados en la expresión (4.4), obteniendo los valores la reactancia del transformador de puesta a tierra. Estos valores se muestran en la Tabla N° 4,3.

TABLA 4,3.- Valores Límites de la reactancia para las secuencias de baja tensión

CENTRO DE TRANSFORMACION	POTENCIA DE CORTO CIRCUITO	VL	REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR	
	KVA	KV	$X_0/X_1 = 1$	$X_0/X_1 = 10$
LA UNION	169.5	10	0.6	6

La reactancia para el transformador de puesta a tierra, es de 6 ohmios/fase, como especificación técnica ha considerar será de 12 ohmios.

4.4 Cálculo de la corriente de falla monofásica a tierra en barras de 10 KV incluyendo la impedancia del transformador de puesta a tierra.

Considerando el ítem 4.3.3, se concluye que el transformador de puesta a tierra, tiene como característica fundamental, presentar una reactancia de dispersión de 6 ohmios/fase (X_{xt}), tal como se puede ver en la Fig. N° 4,5 y Fig. N° 4,6.

Para simplificar los cálculos, los parámetros determinados serán expresados en valores relativos (p.u), tomando como valores base, la tensión y la potencia trifásica aparente:

$$V_{b3\phi} = 10 \text{ KV}$$

$$P_{b3\phi} = 7 \text{ MVA}$$

Remplazando valores obtenemos la impedancia base

$$Z_{b3\phi} = \frac{(V_{b3\phi})^2}{P_{b3\phi}} = 14.285 \text{ Ohm.}$$

Luego el valor de la corriente base será:

$$I_{b3\phi} = \frac{P_{b3\phi}}{\sqrt{3} V_{b3\phi}} \text{ A}$$

Remplazando valores obtenemos:

$$I_{b3\phi} = 404.145 \text{ A}$$

Por definición de valor por unidad (p.u), tenemos lo siguiente:

$$\text{p.u} = \text{Magnitud real/Valor base}$$

Teniendo presente esta definición y remplazando los valores numéricos, obtenemos los parámetros por fase en p.u para las redes de secuencia, que son los siguientes:

i) Tensión de línea por unidad

$$V_L = 1 \text{ (p.u)}$$

ii) Reactancia de secuencia positiva y negativa por fase

$$X_s = X_1 = X_2 = 0.0413 \text{ (p.u)}$$

iii) Reactancia del transformador de puesta a tierra

$$X_{xt} = 0.42 \text{ (p.u)}$$

Habiendo obtenido los valores en p.u y remplazados de acuerdo a la red de secuencia que se muestra en la Fig. N° 4,6. Se obtiene como resultado la corriente de falla que pasa por el neutro de la reactancia de puesta a tierra en p.u.

$$I_f = 1 \text{ (p.u)}$$

Considerando el modulo, de la expresión anterior y multiplicada por la corriente base, se obtendrá como resultado la corriente de falla en valores reales que circula por el transformador de puesta a tierra cuyo resultado es el siguiente:

$$3I_0 = I_{nf} = 404.145 \text{ A}$$

4.5 Potencia nominal de corta duración de la reactancia trifásica de puesta a tierra

Habiéndose calculado la corriente de falla monofásica a tierra se obtiene la potencia de corta duración, con la siguiente expresión:

$$P_{cd} = \frac{(V_L I_{nf})}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (4.11)$$

La potencia de diseño se obtendrá teniendo presente la siguiente expresión:

$$P_d = P_{cd} K \dots\dots\dots (4.12)$$

Donde:

$$K = 0,104$$

Valor que se cumple para un tiempo de 60 seg. , considerando las recomendaciones de la IEEEE para transformadores y reactores de la Tabla N° 4,4., luego remplazando los valores numéricos en la expresión (4.12), se obtiene como resultado el valor de la potencia de diseño.

$$P_d = 242.666 \text{ KVA.}$$

El valor obtenido no es comercial, por lo que se tendrá que considerar el valor más próximo al estándar comercial. En este caso la potencia de diseño será:

$$P_d = 250 \text{ KVA}$$

Precisamente esta potencia es utilizada para el diseño del transformador de puesta a tierra.

Así mismo en el anexo B, se plantea otra metodología según recomendaciones de la revista IEEEE, coincidiendo plenamente los resultados.

TABLA N° 4,4 "K" FACTORES PARA DETERMINAR EQUIVALENCIA DE 2 BOBINADOS 55CKVA DE TRANSFORMADORES DE TIERRA

TIEMPO	CONEXIÓN ESTR-DELT	CONEXIÓN ZIG - ZAG				
		(2,4 -13.8)KV	(23-34.5) KV	40 KV	69 KV	92 KV
K PARA UN SISTEMA TRIFASICO						
10 SEGUNDOS	0.064	0.076	0.080	0.085	0.092
1 MINUTO	0.170	0.104	0.110	0.113	0.118	0.120
2 MINUTO	0.240	0.130	0.153	0.160	0.167	0.170
3 MINUTO	0.295	0.170	0.187	0.196	0.204	0.210
4 MINUTO	0.340	0.196	0.216	0.225	0.235	0.246
5 MINUTO	0.380	0.220	0.242	0.253	0.264	0.275
K PARA UN SISTEMA MONOFASICO						
1 MINUTO	0.057	0.033	0.037	0.040	0.043	0.048
2 MINUTO	0.080	0.046	0.054	0.055	0.060	0.060
3 MINUTO	0.098	0.057	0.064	0.068	0.074	0.080
4 MINUTO	0.113	0.065	0.073	0.078	0.081	0.090
5 MINUTO	0.127	0.073	0.082	0.088	0.095	0.102

CAPITULO V
DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA
TRIFÁSICO EN CONEXIÓN ZIG-ZAG, EN 10KV PARA LA S.E.
“LA UNIÓN” EN EL DEPARTAMENTO DE PIURA.

5.1 Parámetros y especificaciones técnicas para el dimensionamiento del transformador de puesta a tierra

Especificaciones técnicas de la S.E.

Estos datos técnicos son el fundamento para el diseño del transformador, así mismo a partir de ellos se seleccionan las cargas electromagnéticas J y B ; y las características de los materiales a usarse.

Potencia de corto circuito (P_{cc})	= 169.5 MVA
Tensión de línea (V_L)	– 10 KV
Frecuencia	– 60 Hz
Reactancia de la red (X_s)	= 0.6 ohmios/fase.
Reactancia del transformador (X_{xt})	= 6 ohmios/fase.
Corriente de falla (I_f)	= 404.145 A.

Parámetros técnicos

Densidad de corriente en estado permanente (J)	= 2.5 A/mm ² .
Inducción magnética (B)	= 1.1 Tesla
Factor de apilamiento (f_a)	= 0.96
Factor de plenitud de fierro (5 escalones) (n_f)	= 0.9079

Factor de utilización (F_{fe})	= 0.8716
Factor de cobre (F_{cu})	= 0.4
Pérdidas específicas en el hierro (P_{esfe})	= 0.6 Watt. /Kg.
Peso específico en el hierro. (P_{efe})	= 7.65 gr. /cm ³ .
Peso específico en el cobre (P_{escu})	= 8.95 gr. /cm ³ .

Parámetros económicos

Precio de facturación de los materiales:

Precio del hierro (C_{fe})	= 1.8 \$/Kg.
Precio del cobre (C_{cu})	= 7.0 \$/Kg.
Precio de capitalización de pérdidas:	
Precio del hierro (W_{fe})	– 2.3 \$/Kg.
Precio del cobre (W_{cu})	0.5 \$/Kg.

5.2 Especificaciones técnicas de diseño

Tensión de línea (V_L)	– 10 KV
Frecuencia	– 60 Hz
Reactancia de red (X_s)	= 0.6 ohmios/fase.
Reactancia del transformador (X_{xt})	= 6 ohmios/fase.
Corriente de falla (I_f)	= 404.145 A.
Potencia de corta duración (P_{cd})	= 2333.33 KVA

La potencia de corta duración (P_{cd}), corriente de falla (I_f), reactancia de red (X_s), reactancia del transformador (X_{xt}), han sido determinados en

el capítulo IV.

5.3 Determinación de las dimensiones principales del núcleo

5.3.1 Relación de costos (T)

El valor T viene ha ser la relación de costos, donde incluye la suma de los importes, tanto el precio de facturación, como el precio de capitalización de perdidas del fierro y cobre. Este valor se calculará remplazando los valores necesarios, especificados en el ítem 5.1, en la expresión (3.14), dando como resultado:

$$T = 1.5697$$

De las expresiones (3.11), (3.15) obtenemos los valores de “x” que esta en función de T, y también el valor de “m” que esta en función de “x”, mediante un proceso iterativo encontramos los valores de:

$$x = 0.8503$$

$$m = 0.8039$$

5.3.2 Determinación del diámetro (D)

Para obtener las dimensiones principales del núcleo, previamente se calculará el valor de K, que viene ha ser el valor de sollicitación que esta en función de los parámetros f, B, J. El valor de K se obtiene remplazando los valores numéricos en la expresión (3.12), dando como resultado:

$$K = 952,295475 \cdot 10^6 \text{ A-Tesla/mm}^2.$$

Remplazando este valor y los valores numéricos en la expresión (3.10), nos da como resultado el valor del diámetro D:

$$D = 177 \text{ mm.}$$

5.3.3 Determinación del ancho de ventana (A)

Este valor es calculado remplazando el valor de D en la expresión (3.18), con lo que se obtiene el valor de A:

$$A = 127 \text{ mm.}$$

5.3.4 Determinación de la altura de ventana (H)

Se hallará el valor de H remplazando los valores anteriormente calculados en la expresión (3.19), dando como resultado:

$$H = 362 \text{ mm.}$$

5.4 Cálculos de las bobinas del transformador

5.4.1 Sección del conductor

Para el cálculo de la sección del conductor, considerando la expresión (2.9), se tendrá que la corriente y densidad de corriente corresponden a una falla de corta duración, por lo tanto se evaluará para un I_{fcd} y J_{cd} por la siguiente expresión.

$$S_{cu} = \frac{I_{fcd}}{J_{cd}} \text{ mm}^2. \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

La corriente de falla de corta duración ha sido calculada en el capítulo IV y la densidad de corriente en la expresión (5,2). Luego reemplazando

los valores correspondientes en la expresión (5.3) se obtiene el área del conductor:

$$S_{cu} = 15,788 \quad \text{mm}^2.$$

En la Tabla N° 5,1 se tienen las secciones del conductor normalizado. Teniendo presente las normas del C.E., se tendrá que escoger el área igual o mayor más cercano al valor buscado, luego la sección rectangular es:

$$S_{cu} = 15,8 \quad \text{mm}^2.$$

Donde sus dimensiones serán:

$$a_0 = 7,5 \text{ mm.} \quad , \quad b_0 = 2,2 \text{ mm.}$$

Este valor de sección del conductor a usarse en los arrollamientos, la densidad de corriente de corta duración será recalculada por la expresión (5.3), obteniéndose el valor definitivo de J_{cd}' : (Anexo B)

$$J_{cd}' = 25,5788 \quad \text{A/mm}^2.$$

Con este nuevo valor podemos decir que la temperatura máxima T_1 (ecuación 5.2) que alcanzan los arrollamientos durante una falla monofásica a tierra del sistema será de:

$$T_1 = 174.8 \quad ^\circ\text{C}$$

Con este resultado se concluye que la temperatura calculada durante una falla a tierra, es menor que la temperatura alcanzada al 70% de la temperatura máxima, es decir: (Anexo B)

TABLA Nº 5,1.- MEDIDAS DE LOS CABLES DE DEVANADOS DE COBRE DE SECCION RECTANGULAR

MEDIDA NOMINAL DEL CABLE POR LADO, ao, m.m	MEDIDA NOMINAL DEL CABLE POR LADO, bo, m.m															
	1.25	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.5	2.8	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
	SECCION CALCULADA DEL CABLE m.m															
4.5	5.1	5.8	6.5	7.4	8.3	9.2	10.6	11.9	12.8	14.9	17.1	19.4	21.6	23.7	26	28.2
5	5.7	6.5	7.3	8.3	9.3	10.3	11.8	13.3	14.3	16.6	19.1	21.6	24.1	26.5	29	31.5
5.5	6.4	7.2	8.1	9.2	10.3	11.4	13.1	14.7	15.8	18.4	21.1	23.9	26.6	29.2	32	34.7
6	7	7.9	8.9	10.1	11.3	12.5	14.3	16.1	17.3	20.1	23.1	26.1	29.1	32	35	38
605	7.6	8.6	9.7	11	12.3	13.6	15.6	17.5	18.8	21.9	25.1	28.4	31.6	34.7	38	41.2
7	8.2	9.3	10.5	11.9	13.3	14.7	16.8	18.9	20.3	23.6	27.1	30.6	34.1	37.5	41	44.5
7.5	8.9	10	11.3	12.8	14.3	15.8	18.1	20.3	21.8	25.4	29.1	32.9	36.6	40.2	44	47.7
8	9.5	10.7	12.1	13.7	15.3	16.9	19.3	21.7	23.3	27.1	31.1	35.1	39.1	43	47	51
8.5	10.1	11.4	12.9	14.6	16.3	18	20.6	23.1	24.8	28.9	33.1	37.4	41.6	45.7	50	54.2
9	10.7	12.1	13.7	15.5	17.3	19.1	21.8	24.5	26.3	30.6	35.1	39.6	44.1	48.5	53	57.5
9.5	11.4	12.8	14.5	16.4	18.3	20.2	23.1	25.9	27.8	32.4	37.1	41.9	46.6	51.2	56	60.7
10	21	13.5	15.3	17.3	19.3	21.3	24.3	27.3	29.3	34.1	39.1	44.1	49.1	54	59	64
10.5	12.6	14.2	16.1	18.2	20.3	22.4	25.6	28.7	30.6	35.9	41.1	46.4	51.6	56.7	62	67.2
11	13.2	14.9	16.9	19.1	21.3	23.5	26.8	30.1	32.3	37.6	43.1	48.6	54.1	59.5	65	70.5
11.5	13.9	15.6	17.7	20	22.3	24.6	28.1	31.5	33.8	39.4	45.1	50.9	56.6	62.2	68	73.7
12	14.5	16.3	18.5	20.9	23.3	25.7	29.3	32.9	35.3	41.1	47.1	53.1	59.1	65	71	77
12.5	15.1	17	19.3	21.8	24.3	26.8	30.6	34.3	36.8	42.9	49.1	55.4	61.6	67.7	74	80.2
13	15.7	17.7	20.1	22.7	25.3	27.9	31.8	35.7	38.3	44.6	51.1	57.6	64.1	70.5	77	83.5
13.5	16.4	18.4	20.9	23.6	26.3	29	33.1	37.1	39.9	46.4	53.1	59.9	66.6	73.2	80	86.7
14	17	19.1	21.7	24.5	27.3	30.1	34.3	38.5	41.3	48.1	55.1	62.1	69.1	76	83	90
14.5	17.6	19.8	22.5	25.4	28.3	31.2	35.6	39.9	42.8	49.9	57.1	64.4	71.6	78.7	86	93.2
15	18.2	20.5	23.5	26.3	29.3	32.3	36.8	41.3	44.3	51.6	59.1	66.6	74.1	81.5	89	96.5
15.5	18.9	21.2	24.1	27.2	30.3	33.4	38.1	42.7	45.8	53.4	61.1	68.9	76.6	84.2	92	99.7
16	19.5	21.9	24.9	28.1	31.3	34.5	39.3	44.1	47.3	55.1	63.1	71.1	79.1	87	95	103
16.5	20.1	22.6	25.7	29	32.3	35.6	40.6	45.5	48.8	56.9	65.1	73.4	81.6	89.7	98	106.2

$$T_1 < T_{\max}$$

$$174.8 \text{ }^\circ\text{C} < 175 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.4.2 Número de espiras por fase del transformador

El número de espiras del arrollamiento del transformador zig-zag se calculará haciendo uso de la expresión (2.7) y considerando los parámetros especificados en el ítem 5.1, por lo que se obtiene como resultado:

$$\frac{E}{N} = 10.885 \text{ V/esp.}$$

Luego el valor obtenido es reemplazado en la expresión (2.8), para determinar el número de espiras por fase:

$$N = 530,3 \text{ espiras}$$

El valor de N debe ser redondeado a un número entero, de acuerdo a normas establecidas. Por lo tanto, N viene a ser un número entero inmediato superior.

Este valor es el número de espiras a colocarse a lo largo de la columna del núcleo:

$$N' = 531 \text{ espiras}$$

Reemplazando el nuevo valor del número de espiras en la expresión (2.8), obtenemos el nuevo valor de voltios/espira:

$$\frac{E}{N} = 10,8729 \text{ V/espiras}$$

De la misma manera si se remplaza este nuevo valor de Volt. /esp en la expresión (2.6) se obtiene el nuevo valor del diámetro D:

$$D = 177 \text{ mm.}$$

Con lo cual, y utilizando las expresiones (3.18), y (3.19), determinamos los valores finales de A y H para el diseño del núcleo, que son los siguientes:

$$A = 127 \text{ mm.}$$

$$H = 362 \text{ mm.}$$

Así mismo, mediante la expresión (2.6), recalculamos la inducción magnética:

$$B = 1.0987 \text{ tesla.}$$

De esta manera, con los nuevos valores de D, A, H, se diseñará el transformador de puesta a tierra.

5.4.3 Distribución de los arrollamientos (bobinados)

Los arrollamientos estarán formados por capas, cada capa devanada en forma helicoidal con espiras de cobre de sección rectangular. Las espiras irán colocadas en dirección axial del arrollamiento, y se bobinarán muy juntas una a continuación de otra a lo largo de la generatriz del cilindro. El conductor utilizado estará aislado por dos capas de papel en

hélice, el espesor del forro dependerá del nivel de tensión que se utilice y se obtiene de la Fig. N° 2,7. Considerando lo mencionado y escogiendo por seguridad los valores mayores, obtenemos para un nivel de tensión de 10KV un aislamiento de 0.3 mm. Luego podemos decir que las dimensiones de la platina de cobre aislada a usarse será de:

$$a_0 = 8,10 \text{ mm.}, \quad b_0 = 2,80 \text{ mm.}$$

Para un mejor aislamiento entre capa y capa de bobina se colocará un papel aislante de 0.25 mm., de espesor. Por consiguiente entre capa y capa existirá un aislamiento de 0.85 mm.

La distribución de los arrollamientos, consiste en cuadrar en toda la ventana del núcleo: Los bobinados de cobre, los aislamientos (si el transformador es de gran potencia se debe tener presente los canales de refrigeración como también las distancias que deben respetarse entre bobinado y núcleo), entre bobinado y carcasa, entre bobinado y bobinado.

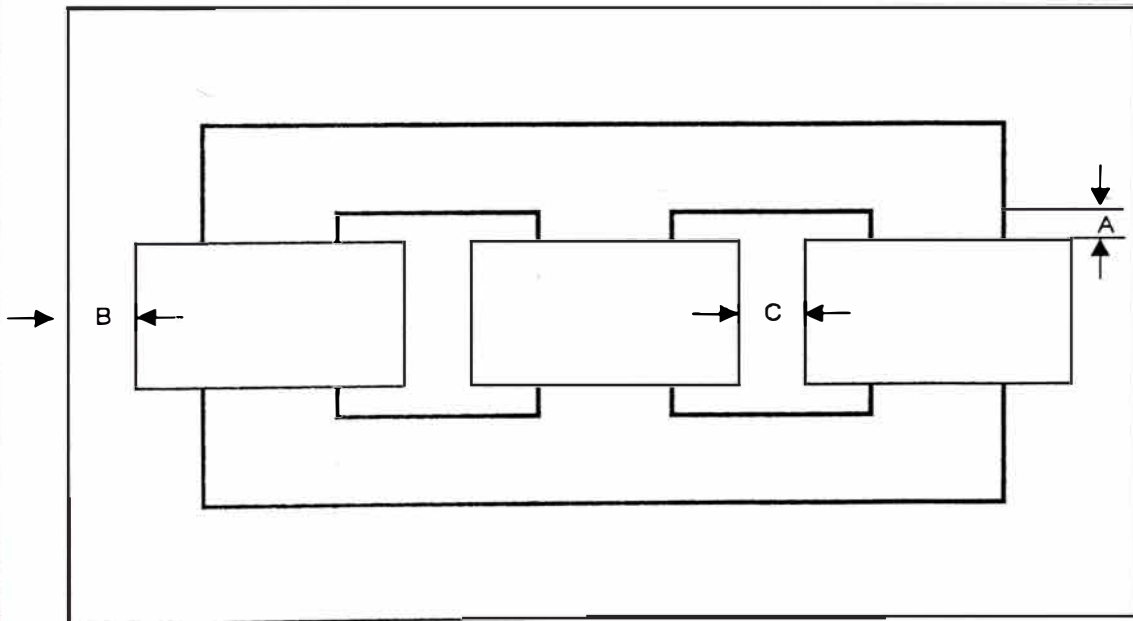
(Tabla N° 5,2)

5.4.4 Altura axial de cada devanado

La altura útil o longitud axial de los devanados se calcula teniendo presente la separación en cada extremo, que de acuerdo a normas se hace uso de la gráfica (Fig. N° 2,9). Obteniendo una distancia de 20 mm., y con estas consideraciones, la altura útil del devanado queda determinado según:

TABLA N° 5,2 .- VALORES DE DISTANCIA MINIMAS ENTRE LOS DEVANADOS Y EL TANQUE EN TRANSFORMADORES

TENSION DE OPERACIÓN (KV)	3	5	10	20	30	40	50	60	70	100
EN AIRE A _{min} (mm.)	35	50	-	-	-	-	-	-	-	-
EN ACEITE A _{min} (mm.)	-	25	35	55	80	90	100	120	130	160
	-	-	-	-	-	-	120	130	160	200
B min (m:m)	-	50	60	75	85	100	120	140	150	180



POR RAZONES DE DISEÑO, SE RECOMIENDA NO USAR VALORES INFERIORES A LOS SIGUIENTES:

PARA A EN AIRE 35 mm.
EN ACEITE 20 mm.

PARA B 40 mm.

C = 0.8 (KV) mm.

$$H_{dev} = H - 2(f) \quad \text{mm.} \quad \dots\dots (5.2)$$

Remplazando tenemos

$$H_{dev} = 322 \quad \text{mm.}$$

5.4.5 Numero de espiras por capa

El calculo de número de espiras por capa se obtiene haciendo uso de la siguiente expresión

$$H_{dev} = b_0 (\text{Número de esp./cap} + 1) \quad \dots\dots (5.3)$$

Se obtiene el número de espiras por capa:

$$N_{\text{esp./cap}} = 111$$

5.4.6 Números de capas

Queda determinado por la expresión:

$$N^{\circ}_{\text{capas}} = \frac{N^{\circ}_{\text{espiras totales}}}{N^{\circ}_{\text{esp./cap.}}} \quad \dots\dots (5.4)$$

Remplazando los valores tenemos el número de capas para cada arrollamiento:

$$N^{\circ}_{\text{capas}} = 5$$

5.4.7 Longitud radial de los bobinados

Teniendo presente el número de capas, el cálculo de la longitud radial de los bobinados viene dado por la siguiente expresión:

$$H_r = b_0 (N^{\circ}_{\text{capas}}) + \sum \text{aislan} \quad \dots\dots (5.5)$$

Donde: b_0 = Longitud radial de la platina. (mm.)

N°_{cap} = N° de capas que conforman cada bobinado.

$\Sigma \text{ aislam}$ = De todos los aislamientos entre capas.

Reemplazando valores numéricos se obtendrá la longitud radial de los bobinados:

$$H_r = 41,75 \quad \text{mm.}$$

5.4.8 Dimensiones finales para el núcleo

Las dimensiones finales obtenidas en el ítem 5.4.2, son las que determinan el volumen definitivo del transformador, son las siguientes:

$$D = 177 \text{ mm.} \quad A = 127 \text{ mm.} \quad H = 362 \text{ mm.}$$

5.4.9 Reactancia del transformador

Considerando las dimensiones de la parte activa, así como también las características de los arrollamientos. Por lo tanto, el valor de la reactancia por fase, se obtiene reemplazando los valores numéricos en (2.1.2), (2.1.3):

$$h = 344,95 \quad \text{mm.}$$

$$X_{xt} = 6.353 \quad \text{Ohmios/fase}$$

5.5 Pérdidas en las partes activas del transformador

5.5.1 Peso del núcleo

El peso del núcleo se obtiene reemplazando valores en la expresión (3.8):

$$G_{fe} = 436 \text{ Kg.}$$

5.5.2 Pérdidas en el hierro

Teniendo presente la curva de pérdidas mostradas en la Fig. N° 5,1. que corresponde al hierro silicoso de espesor $t = 0.30 \text{ mm.}$; y considerando la inducción magnética $B = 1,1 \text{ Tesla}$ y a 60 Hz , se obtiene las pérdidas específicas en el hierro. Dando como resultado el valor de 0.6 Watt/Kg.

También se tiene presente que para transformadores trifásicos el factor de corrección (f_c) varia entre 1.2 a 1.4. Por lo tanto, se asume el factor de corrección de 1.2

Finalmente reemplazando valores en la expresión (2.1) obtenemos las pérdidas totales en el hierro:

$$W_{fe} = 313,92 \text{ Watt.}$$

5.5.3 Corriente en vacío

Para el cálculo de la corriente de vacío (I_0) se tiene que calcular la corriente de magnetización que está en función de los VA/Kg. Este valor se obtiene de la Fig. N° 5,2., dado por el fabricante y cuyo valor se tendrá que multiplicar por un factor 2, que en la práctica sirve para considerar los entre hierros formados en el núcleo laminado; por lo tanto:

$$(\text{VA/Kg.}) = 2 (0.65) \text{ V-A/Kg.}$$

Remplazando este resultado en la expresión (2.3) se obtiene la

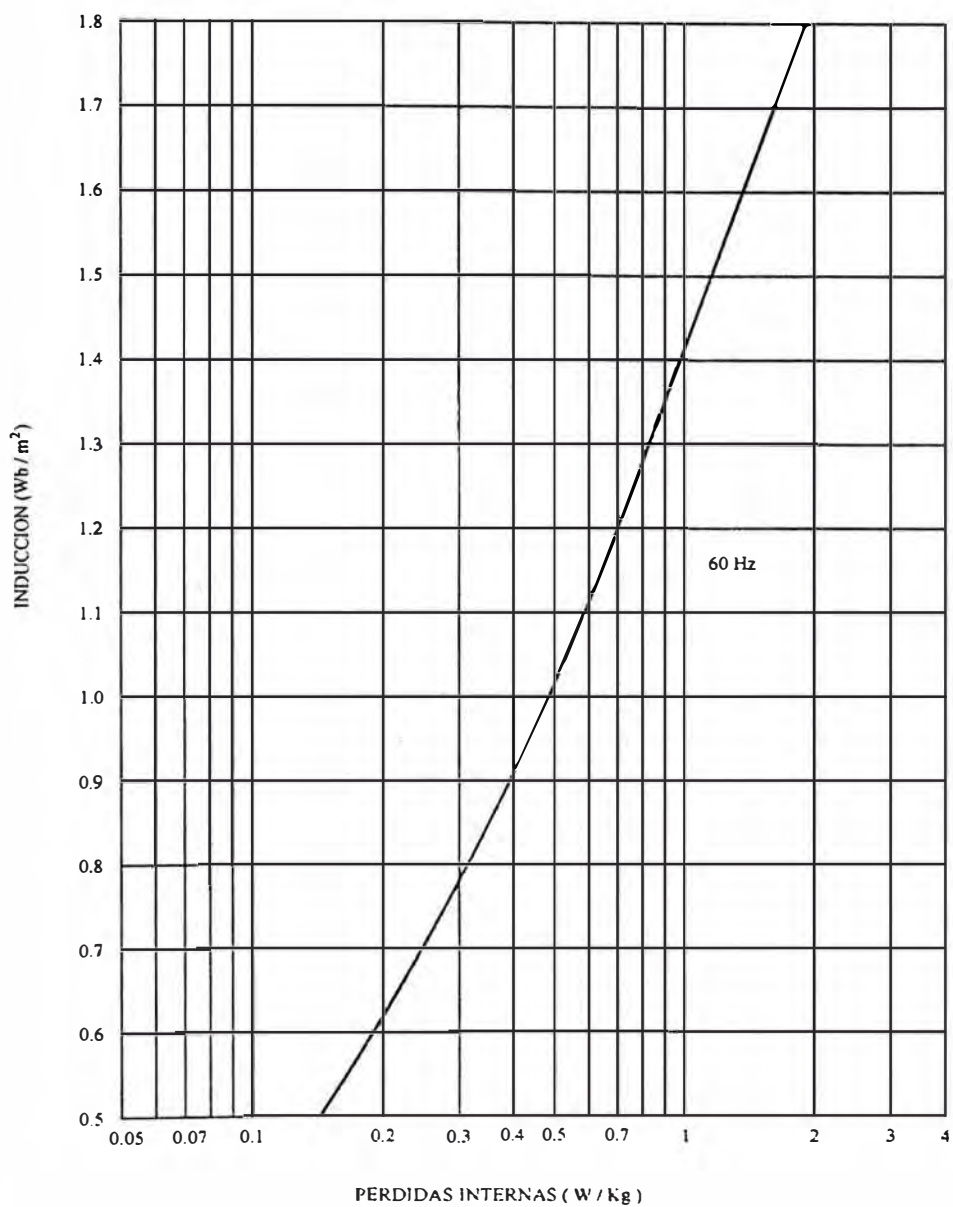


FIG. N° 5.1 Curva de pérdidas en el hierro silicoso
 MATERIAL : Z9
 t = 0.30 m m.

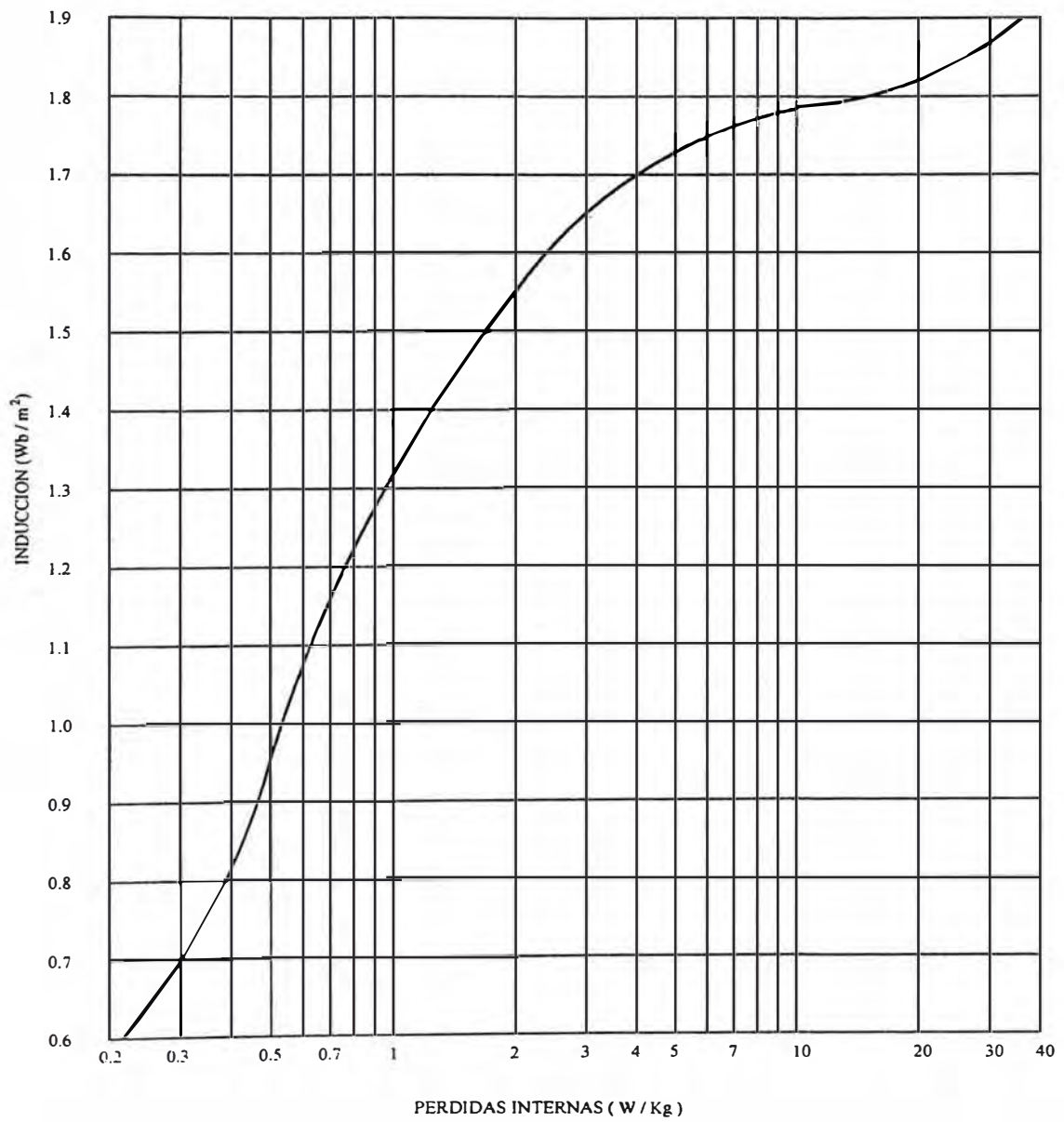


FIG. N° 5.2 Pérdidas específicas en el hierro silicoso

MATERIAL : Z9

$\tau = 0.30$ m m.

corriente de magnetización:

$$I_m = 0.0327 \text{ A}$$

Considerando las pérdidas totales en el fierro (calculadas en ítem 5.6.3), y reemplazando en la expresión (2.4) se obtiene como resultado la corriente de perdidas:

$$I_p = 0.0181 \text{ A}$$

Luego haber calculado las componentes de corriente de vacío, son reemplazados en la expresión (2.5) para obtener finalmente la corriente de excitación o de vacío:

$$I_0 = 0.0374 \text{ A}$$

5.5.4 Peso del cobre

a) Bobinado interior

La espira media del bobinado interior viene dado por la siguiente expresión:

$$L_{2m} = \pi D_{2m} \dots\dots\dots (5.6)$$

Remplazando valores tenemos:

$$L_{2m} = 719 \text{ m.m.}$$

La longitud del arrollamiento interior se obtiene usando la siguiente relación:

$$L_2 = \frac{N L_{2m} + 700}{1000} \text{ m.} \dots\dots\dots (5.7)$$

Remplazando valores tenemos:

$$L_2 = 192 \text{ m.}$$

El peso del arrollamiento interior se calcula haciendo uso de la siguiente expresión:

$$G_{2cu} = 3 P_{espcu} L_2 A_{cu} \quad \dots\dots (5.8)$$

Remplazando valores tenemos:

$$G_{2cu} = 81 \text{ Kg.}$$

b) Bobinado exterior

Para el cálculo de la espira media del bobinado exterior se usará la siguiente expresión:

$$L_{1m} = \pi D_{1m} \quad \text{mm.} \quad \dots\dots (5.9)$$

Remplazando valores:

$$L_{1m} = 1013 \text{ mm.}$$

La longitud del bobinado exterior viene dado por:

$$L_1 = \frac{N L_{1m} + 1700}{1000} \text{ m.} \quad \dots\dots (5.10)$$

Remplazando valores tenemos:

$$L_1 = 271 \text{ m.}$$

El peso del bobinado exterior viene dado por:

$$G_{1cu} = 3 P_{espcu} L_1 A_{cu} \quad \text{Kg.} \quad \dots\dots (5.11)$$

Remplazando valores tenemos:

$$G_{1cu} = 112 \text{ Kg.}$$

Finalmente el cálculo del peso total de los bobinados se evalúa de la siguiente manera:

$$G_{cu} = G_{1cu} + G_{2cu} \quad \dots\dots (5.12)$$

Obteniendo como resultado:

$$G_{cu} = 195 \text{ Kg.}$$

5.5.5 Pérdidas en el cobre

Las pérdidas específicas en el cobre para un tiempo de funcionamiento nominal se calculará teniendo presente la resistividad del cobre a 75 °C.

$$\Delta P_{espcu} = 2.43 \text{ J}^2 \text{ Watt / seg.} \quad \dots\dots (5.13)$$

Incluida en (2.11) del ítem 2.2.3.

Luego las pérdidas específicas en el cobre serán iguales, tanto para el bobinado interior como para el bobinado exterior, reemplazando valores tenemos:

$$\Delta P_{espcu} = 15,1875 \text{ Watts/Kg.}$$

Por lo tanto, las pérdidas totales en el cobre viene expresado por:

$$\Delta P_{cu} = P_{espcu} G_{cu} \text{ Kw.} \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

Remplazando valores tenemos:

$$\Delta P_{cu} = 2,962 \text{ Kw.}$$

5.5.6 Tensión de cortocircuito

a) Cálculo de la caída resistiva en porcentaje

El valor de la caída resistiva se calculará como la relación de la pérdidas totales en el cobre respecto a la potencia nominal de corta duración del transformador de puesta a tierra, es decir:

$$U_r = \left(\frac{\Delta P_{cu}}{P_{cd}} \right) 100\% \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

Remplazando valores tenemos:

$$U_r = 0.126 \%$$

b) Cálculo de la caída reactiva en porcentaje

Este valor esta definido por la siguiente expresión:

$$U_x = \frac{\phi_\sigma}{\phi_m} 100\% \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

A continuación se mencionará como se obtienen los valores de flujos:

$$\phi_\sigma = S_\sigma B_\sigma \quad \text{Weber} \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

$$\phi_m = S_{fe} B \quad \text{Weber} \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

Es decir:

$$S_\sigma = \pi D_{om} \left(c + \frac{(a+b)}{3} \right) 10^{-6} \text{ m}^2. \quad \dots\dots (5.19)$$

$$B_\sigma = \frac{\sqrt{2} \mu_0 N I K_r}{H_{dev}} 10^3 \text{ Tesla} \quad \dots\dots (5.20)$$

$$K_r = 1 - \frac{a + b + c}{\pi H_{dev}} \dots\dots\dots(5.21)$$

$$S_{fe} = \frac{\pi}{4} D^2 F_f 10^{-6} \text{ m}^2. \dots\dots\dots (5.22)$$

Donde:

ϕ_σ = Flujo de dispersión (Weber)

ϕ_m = Flujo permanente o magnetizante (Weber)

S_σ = Sección del canal de dispersión (m².)

S_{fe} = Sección del núcleo (m².)

B_σ = Inducción magnética de dispersión (Weber)

B = Inducción magnética permanente o magnetizante (Weber)

D_{om} = Diámetro medio del canal de dispersión (mm.)

a, b = Altura radial de los bobinados interior y exterior (mm.)

c = Altura radial del canal de dispersión (mm.)

N = Número de espiras del bobinado

K_r = Coeficiente de Rogovski

H_{dev} = Altura axial de los devanados (mm.)

D = Diámetro de la columna (mm.)

F_{fe} = Factor de utilización del fierro

μ_0 = Permeabilidad en vacío $4 \pi 10^{-7}$ Weber/A- m

Remplazando valores en las expresiones mencionadas obtenemos:

$$S_{\sigma} = 0.0284 \text{ m}^2.$$

$$B_{\sigma} = 0.34743 \text{ Tesla}$$

$$S_{fe} = 0.021446 \text{ m}^2.$$

$$B = 1.1 \text{ Tesla}$$

$$K_r = 0.91028$$

Finalmente se obtiene la caída de tensión reactiva:

$$U_x = 41,85 \%$$

Al reemplazar los valores de U_r , U_x en la expresión (2.19) del ítem 2.25, obtenemos el valor de la tensión de corto circuito en el transformador:

$$U_{zt} = 41,85 \%$$

Remplazando el valor anterior en la expresión (2.18), y considerando la conexión Zig-Zag, obtenemos como resultado:

$$U_{za} = 5,6 \%$$

5.6 Cálculo de la cuba y dotación del aceite

5.6.1 Dimensiones interiores de la cuba

Las dimensiones interiores del tanque son determinadas en función de las dimensiones exteriores de la parte activa así como las dimensiones mínimas suplementarias tales como la distancia entre bobinado y la cuba, viga, colchón de aire etc. A continuación se calculará las diferentes

dimensiones interiores de la cuba:

a) Largo (X) (Fig. N° 5,3)

Teniendo presente las dimensiones de la parte activa se tienen:

$$d = 4Hr + 4Jo \quad \text{mm.} \quad \dots\dots\dots (5.23)$$

$$M = A + D \quad \text{mm.} \quad \dots\dots\dots (5.24)$$

El valor de X se obtendrá de la siguiente expresión.

$$X = 2K + 2M + d + \text{tolerancia} \quad \text{mm.} \quad \dots\dots\dots (5.25)$$

K = Valor que se considera de acuerdo a la potencia del transformador, y de acuerdo a normas establecidas.

Reemplazando valores tenemos:

$$d = 364 \text{ mm.} \quad , \quad M = 304 \text{ mm.} \quad , \quad K = 40 \text{ mm.}$$

La tolerancia es de acuerdo a la potencia de dicho transformador, reemplazando valores tenemos:

$$X = 1077 \text{ mm.}$$

b) Ancho (Y). Este valor se evalúa de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Y = 2K + d + \text{tolerancia} \quad \dots\dots\dots (5.26)$$

Reemplazando valores nos da un valor de:

$$Y = 469 \text{ mm.}$$

c) Altura (Z). El valor de esta altura de acuerdo a la Fig. N° 5,4., queda determinado por la siguiente relación:

$$Z = P + r + 2D + H + v \quad \text{mm.} \quad \dots\dots\dots (5.27)$$

- Donde:
- P = Colchón de aire (mm.)
 - r = menor o igual a D (mm.)
 - D = Diámetro del núcleo (mm.)
 - H = Altura de ventana (mm.)
 - V = viga o base de madera (mm.)

Reemplazando valores en la expresión anterior tenemos:

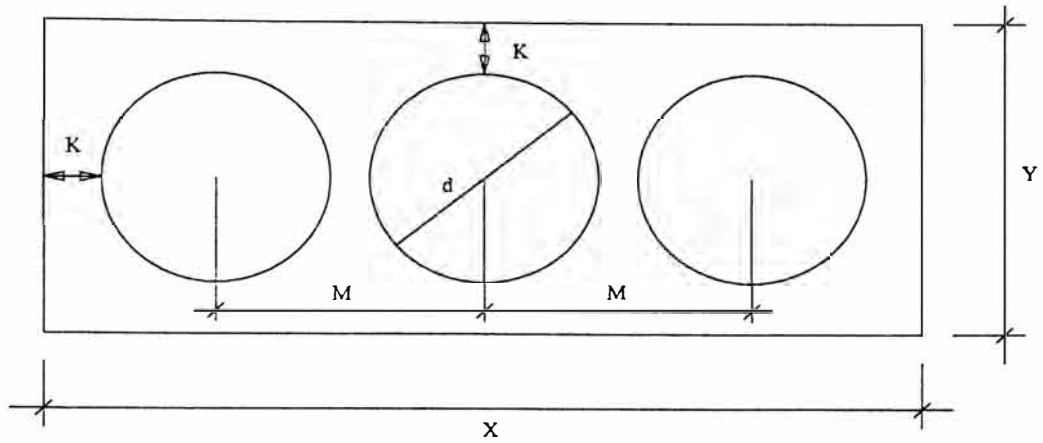
$$Z = 1214 \quad \text{mm.}$$

5.6.2 Disipación térmica

Las pérdidas totales en el transformador de puesta a tierra operando en estado estacionario, está constituido fundamentalmente por las pérdidas en el fierro; y las pérdidas en el cobre del bobinado. En ese sentido el volumen total de pérdidas a disiparse, puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$W_t = 1.2 W_{fe} \quad \text{Watts.} \quad \dots\dots\dots (5.28)$$

El 20% adicional corresponde a las pérdidas producidas por la corriente de excitación del transformador. Reemplazando valores se obtiene:



$d = 364 \text{ mm}$ $M = 304 \text{ mm}$ $K = 40 \text{ mm}$ $Y = 469 \text{ mm}$ $X = 1077 \text{ mm}$ $Z = 1214 \text{ mm}$

FIG. N° 5.3 Vista de planta de las dimensiones del transformador de puesta a tierra.

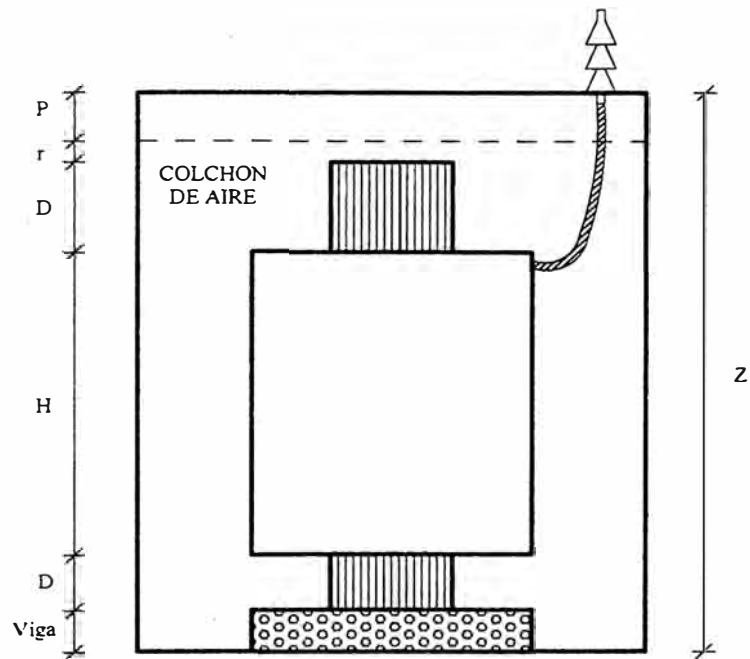


FIG. N° 5.4 Vista de corte y las dimensiones del transformador de puesta a tierra.

$$W_t = 313,92 \quad \text{Watts.}$$

Las pérdidas totales a disiparse en el transformador de puesta a tierra operando en estado estacionario son pequeñas (del orden de 1800 Watt). Por lo tanto, bastará utilizar en el diseño una caja plana, sin elementos adicionales de disipación térmica.

Si el transformador es de gran potencia (>500 KVA) se debe tener presente que la temperatura media del aceite (θ_{ac}) y la temperatura media de la caja (θ_{om}) no debe ser mayor o igual a 8 °C, así mismo la temperatura media del aceite representa el 85% de la temperatura máxima del aceite es decir:

$$\theta_{om} = 85\% \theta_{acmax} - 8 \quad ^\circ\text{C} \quad \dots\dots (5.29)$$

De acuerdo a la norma de I.E.C. En los transformadores sin conservador de aceite la temperatura máxima del aceite es de 55 °C, luego reemplazando valores se obtiene:

$$\theta_{om} = 38.75 \quad ^\circ\text{C}$$

Si se utilizará aceite para la refrigeración del transformador, se debe tener presente que la superficie eficaz de convección y de radiación (A_c , A_r) puede tomarse, como la superficie lateral hasta la altura del aceite, no debe considerarse la superficie del fondo y de la tapa del tanque en virtud a que su contribución en la refrigeración es marginal. Finalmente,

tomando en cuenta las dimensiones del tanque, la superficie eficaz de convección y radiación esta dada por:

$$A_c = A_r = 2,529 \text{ m}^2.$$

Luego por la expresión (2.21) la disipación total de energía a través de las paredes de la cuba es:

$$W_d = 1312,96 \text{ watts.}$$

Como se podrá observar el calor radiado por la caja de la cuba es mayor que las pérdidas totales que disipa la bobina del transformador de puesta a tierra, $W_d > W_t$. Con esto se demuestra que la superficie de la caja de cuba debe ser plana y podemos afirmar entonces que el transformador de puesta a tierra funcionara sin aceite.

5.6.3 Resistencia mecánica

El espesor mínimo de la plancha para cubrir el transformador se calcula mediante la expresión (2.20) de donde se obtiene:

$$t = 2,835 \text{ mm.}$$

Luego teniendo presente que la base y la tapa serán de mayor espesor que los lados, se concluye:

$$\text{Lados} = \frac{1}{4} \text{ ”}$$

$$\text{Tapa y fondo} = \frac{1}{8} \text{ ”}$$

5.7 Consideraciones económicas

5.7.1 Precio de venta

El precio de venta V , está dado por el valor reducido a los componentes activos más importantes del mismo; es decir el fierro (núcleo) y el cobre (bobinas). Este precio se determina por el importe que resulta una vez terminado y montado fuera del tanque.

El aceite, aislantes, accesorios estructurales, etc., se tomarán como constantes aditivas para llegar al precio global. Por lo tanto, el precio de venta será calculado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V = \varphi_{fe} G_{fe} + \varphi_{cu} G_{cu} \quad \dots\dots\dots (5.30)$$

Donde: V = Precio venta (\$)

φ_{cu} = Costo en \$/Kg. De bobina terminada

φ_{fe} = Costo en \$/Kg. del núcleo armado

G_{cu} = Peso total de las bobinas (Kg.)

G_{fe} = Peso total del núcleo (Kg.)

Para los transformadores de potencia, ésta relación que mencionamos tiene valores que oscilan entre un rango de 4 a 4.5, es decir:

$$\rho_{\varphi} = \frac{\varphi_{cu}}{\varphi_{fe}} \quad \dots\dots\dots (5.31)$$

Remplazando valores obtenemos:

$$V = 6666,19 \quad (\$)$$

5.7.2 Capitalización de pérdidas

En términos generales, debido al efecto de las pérdidas en el fierro y en el cobre se generan unos montos que se capitalizan y llegan a formar parte del precio final del transformador, para el cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$Q' = \psi_{fe} \Delta P_{fe} + \psi_{cu} \Delta P_{cu} \quad \dots\dots\dots (5.32)$$

Donde:

P_{cu} = Pérdidas en el cobre (Watts.)

P_{fe} = Pérdidas en el núcleo (Watts.)

ψ_{fe} = Factor de capitalización de pérdidas del núcleo (\$/watts)

ψ_{cu} = Factor de capitalización de pérdidas del cobre (\$/watts)

Remplazando valores obtenemos:

$$Q' = 2202,79 \quad (\$)$$

5.7.3 Precio financiero

El precio financiero (F) del transformador viene expresado de la siguiente manera:

$$F = V + Q' \quad \dots\dots\dots (5.33)$$

Finalmente remplazando valores en las expresiones (5.36), (5.37), obtenemos el valor del transformador de puesta a tierra.

$$F = 8868,99 \quad (\$)$$

5. 8 Presentación del programa de cálculo

Se puede apreciar los resultados del diseño, presentado en una hoja de cálculo, donde se dan tanto las dimensiones fundamentales de la estructura del fierro magnético como también las dimensiones de las bobinas y por ultimo el precio del transformador incluido todos los accesorios.

DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO DE PUESTA A TIERRA

DATOS DE LA SUBESTACION			
DEPARTAMENTO PIURA			POTENCIA MVA
POTENCIA DEL CENTRO DE TRASFOMACION			BASE MVA
POTENCIA DE CORTOCIRCUITO	189.5	MVA	7
TENSION	10	kv	0
FRECUENCIA	60	Hz	

DATOS CALCULADOS			DATOS FINALES
CORRIENTE DE FALLA/FASE	404.145	Amp.	
POTENCIA DE CORTA DURACION	2333.333	KVA	
DENSIDAD DE CORTA DURACION	25.588	Amp/m ²	25.579
POTENCIA DE DISEÑO	242.867	KVA	250.00
FACTOR K	952295475.77		
DIAMETRO	177.00	m.m	177.00
ANCHO DE VENTANA	91.00	m.m	127.00
ALTURA DE VANTANA	362.00	m.m	367.00
SECCION DEL CONDUCTOR	15.788	m.m ²	
VOLTIOS /ESPIRAS	10.885		10.87
NUMERO DE ESPIRAS	531		531
INDUCCION MAGNETICA (B)	1.10	Tesla	1.099

VALOR DE TABLA	15.788	m.m ²	RELACION DE COSTO	
SECCION DEL CONDUCTOR	15.8	m.m ²	T =	1.5897
ao =	7.50	m.m	x =	0.8503
bo =	2.20	m.m	m =	0.8039

ESPESOR MINIMO DE LA PLANCHA A USAR		
T	2.8616	m.m
FONDO Y TAPA	1/4"	pulgadas
LADOS	1/8"	pulgadas

PESO QUE OCUPAN ESPACIO DENTRO DEL TRANSFORMADOR			
PESO DE LAS BOBINAS	Gc	585.0	Kg.
PESO DEL FIERRO	Gf	439.0	Kg.
PESO DE LA MADERA	Gm	30.7	Kg.
PESO FERRETERIA	Gh	51.20	Kg.
PESO DEL ACEITE	Gac		Kg.
PESO DE LA CUBA		131	Kg.
VOLUMEN DEL ACEITE EN GALONES USA			

PESO TOTAL DEL TRANSFORMADOR ZIG-ZAG	1520.75	Kg
VALOR TOTAL DEL TRANSFORMADOR ZIG-ZAG	8880.65	\$

CARACTERISTICAS DEL NUCLEO Y BOBINADO			
ALTURA UTIL O AXIAL DE CADA BOBINADO	Hdev	312.0	m.m
ALTURA RADIAL DE LOS BOBINADOS	Hr	41.76	m.m
PESO DEL NUCLEO	Gfe	439.0	Kg
PERDIDAS EN EL FIERRO	Wfe	318.1	Watts
ESPIRA MEDIA DEL BOBINADO INTERIOR	T2	719	m.m
LONGITUD DEL BOBINADO INTERIOR	L2	192	m.
PESO DEL BOBINADO INTERIOR	G2c	81	Kg
ESPIRA MEDIA DEL BOBINADO EXTERIOR	T1	1013	m.m
LONGITUD DEL BOBINADO EXTERIOR	L1	271	m.
PESO DE BOBINADO EXTERIOR	G1c	114	Kg
PESO TOTAL DE LOS BOBINADOS	Glc	195	Kg
PERDIDAS EN EL COBRE	Picu	2.9816	Kw
TENSION DE CORTOCIRCUITO	Uzt	5.5	%
CORRIENTE DE INDUCCION EN CARGA	Idl	0.0377	Amp.
REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR	Xst	8.211	Ohmios

DISIPACION TERMICA QUE PRODUCE LA CORRIENTE DE EXCITACION	
Wl =	379.30 Watts
DISIPACION TOTAL DE ENERGIA ATRAVES DE LAS PAREDES DE LA CUBA	
Wd =	1319.77 Watts

DIMENSIONES DE LA CUBA		
LARGO X=	1077.0	m.m
ANCHO Y=	459.0	m.m
ALTURA Z=	1219.0	m.m

DILATACION VOLUMETRICA DEL ACEITE Y ALTURA QUE SE DESPLAZA	
Delta Teq =	°C
DELTA Vec =	cm ³
h =	m.m

COMPLEMENTACIONES FINALES		
(Aislamiento entre capa y capa < 3KV/mm)		
Aislamiento entre capa y capa	2.825	(< 3KV/m)
El factor de venta Fc = 0.4	0.380	(Fc = 0.4)

ALTITUD (m.s.n.m) 1000

DISEÑADO : HECTOR FELIPE CUBILLAS

CONCLUSIONES

[1].- Como objetivo principal de la tesis. El método de diseño planteado arroja resultados compatibles con las normas; por la tanto puede ser utilizado para el diseño de transformadores de protección en subestaciones de media y baja tensión aislados de tierra.

[2].- En la presente tesis se ha demostrado que, aún existiendo otros métodos de protección contra fallas monofásicas en sistemas aislados, el transformados o reactor de puesta a tierra en conexión zig – zag, proporcionan un punto neutro estable, así mismo su aplicación y diseño resultan fáciles y económicas.

[3].- Para la concepción del diseño automático, se ha elaborado el cálculo mediante una hoja excel, el cual proporciona un cuadro de resultados finales con las características electromecánicas del transformador.

[4].- Los valores de tensión fase-tierra de las fases sanas se incrementan notablemente desde valores de $V_n/\sqrt{3}$ (condiciones normales) hasta valores que sobrepasan la tensión nominal (V_n). Cabe indicar que estos sobrevoltaje son perjudiciales para la vida útil del dieléctrico de los

accesorios y equipos de las redes. Por ello, deben ser considerados en la selección de los niveles de aislamiento correspondiente.

[5].- Los valores de la corriente de falla son de magnitudes muchos menores comparados con los sistemas con el punto neutro conectado a tierra. Estos valores, en la mayoría de los casos no podrían ser detectados por los dispositivos de protección contra cortocircuito convencionales, requiriéndose de un transformador de puesta a tierra en conexión zig-zag.

[6].- Con a la instalación de un transformador de puesta a tierra en conexión zig-zag en el lado de baja tensión, se obtienen ventajas de operación frente a un sistema aislado a tierra, entre las cuales se puede mencionar:

- Reducción en magnitud de las sobre tensiones transitorias.
- Mejora la protección contra rayos.
- Simplifica la ubicación de una falla a tierra.
- Mejora la confiabilidad del servicio.
- Reduce el número de fallas
- Reduce el gasto de mantenimiento y operación.
- Mayor seguridad para el personal.

[7].- El valor obtenido en el análisis teórico de una falla a tierra en el sistema de baja tensión, se ha demostrado que la temperatura máxima de falla calculada es menor que la temperatura alcanzada al 70% de la

temperatura máxima de acuerdo a la norma del C.E.N.

$$T_f < T_{\max}$$

Por lo tanto se ha determinado que el transformador de puesta a tierra, no estará sumergido en aceite.

[8].- También se concluye a partir del análisis teórico de la disipación térmica, que el calor radiado por la cuba que cubre al transformador es mayor el calor producido por las pérdidas totales en las bobinas del transformador; con lo cual se demuestra que la cuba no necesita de aletas o superficies adicionales de refrigeración.

[9].- Finalmente el valor calculado de la reactancia mediante fórmula analítica que considera las dimensiones, del transformador de puesta a tierra es:

$$X_{xt} = 6,35 \text{ Ohmios /fase}$$

Este resultado es muy cercano al valor considerado inicialmente (X_{xt} 6 ohmios/fase), para obtener la corriente de falla. Por lo tanto, las dimensiones obtenidas de la parte activa del transformador son coherentes.

ANEXO A

**CÁLCULOS MATEMÁTICOS PARA OBTENER LAS
DIMENSIONES DE LA PARTE ACTIVA DEL
TRANSFORMADOR**

CÁLCULOS MATEMÁTICOS PARA OBTENER LAS DIMENSIONES DE LA PARTE ACTIVA DEL TRANSFORMADOR

Consideraciones que se debe tener presente para obtener la Fmm., en la impedancia del transformador de puesta a tierra en conexión Zig-Zag.

Sección del núcleo (fierro)

Para el cálculo de la superficie de la columna del núcleo de fierro; haremos uso de la siguiente expresión:

$$S_{fe} = (\pi/4) D^2 F_{fe} \quad (m^2.)$$

Donde:

S_{fe} = Sección del núcleo de fierro. (m².)

D = Diámetro de la circunferencia circunscrita a la sección de la Columna. (m.)

F_{fe} = Factor de plenitud del fierro

Tensión de la mitad del bobinado de fase

La tensión de fase en el arrollamiento viene expresada de la siguiente manera:

$$E' = 4.44 f B N S_{fe}$$

Si reemplazamos la expresión de S_{fe} en la ecuación anterior obtenemos:

$$E' = 4.44 f B N (\pi/4) D^2 F_{fe}$$

Donde: F = frecuencia (Hz)

N = Numero de espiras en serie por columna.

E' = Fem. / columna a la mitad del devanado (Voltios)

B = Inducción magnética permanente (Weber/m².)

Tensión de fase

Expresamos por E a la Fem., por fase y teniendo presente el análisis fasorial de las tensiones inducidas en los devanados vistos en el capítulo

III (ecuación 3.4), tenemos:

$$E = \sqrt{3} E'$$

Finalmente si reemplazamos el resultado de E' , se obtendrá:

$$E = \sqrt{3} 4.44 f B N (\pi/4) D^2 F_{fe} \quad (\text{Voltios})$$

Las formulas que se obtiene y que están en función de las dimensiones del núcleo, que se deba tener presente en el diseño del transformador de puesta a tierra se dan a continuación.

Sección del cobre para un bobinado

Si consideramos uno de los devanados de una columna, podemos decir que la sección del conductor viene expresada por:

$$S_{cu} = \frac{A H F_c}{4} \quad (\text{m}^2.)$$

Donde:

S_{cu} = Sección transversal del conductor (m².)

A = Ancho de ventana (m.)

H = Altura de ventana (m.)

F_c = Factor de plenitud del cobre

Intensidad de fase

La corriente es la misma que pasa por las dos mitades del bobinado de fase, ya que estos se conectan en serie y teniendo en cuenta una de las dos mitades decimos que:

$$I_f = \left(\frac{S_c}{N} \right) J \quad \text{A.}$$

Luego reemplazando la expresión de S_{cu} en la formula anterior tenemos:

$$I_f = \left(\frac{A H F_c}{4} N \right) J \quad \text{A.}$$

Potencia aparente del transformador de puesta a tierra

Sabemos que la potencia aparente de un transformador de potencia es:

$$P = 3 E I_f$$

Reemplazando las expresiones de E y de I_f en la ecuación anterior tenemos:

$$P = 3 (\sqrt{3} 4.44 f B N (\pi/4) D^2 F_{fe}) \left(\frac{A H F_c}{4} N \right) J \quad (\text{KVA})$$

Se define como un parámetro de solución específica a la siguiente expresión:

$$K = \frac{3 \sqrt{3} 4.44 f B J}{4}$$

Con esto la potencia queda expresada como el producto de la sollicitación específica por la sección del núcleo y por la sección del arrollamiento:

$$P = K (\pi/4) D^2 F_{fe} (A H F_c) \quad \text{KVA} \quad \dots\dots(I)$$

Peso del cobre

El peso del cobre se obtiene, utilizando la siguiente expresión:

$$G_{cu} = 3 \varnothing S_{cu} l_m \quad (\text{Kg.})$$

Donde: G_{cu} = peso total del cobre (Kg.)

\varnothing = Peso específico del cobre (Kg. /cm³.)

l_m = Longitud de espira media = $\pi (D + A/2)$ (cm.)

D_m = Diámetro de la espira media = $D + A/2$ (cm.)

Reemplazando las expresiones de S_{cu} y de l_m en la ecuación anterior tenemos:

$$G_{cu} = 3 \varnothing_{cu} \left(\frac{A H F_c}{4} \right) \pi (D + A/2) \quad (\text{Kg.}) \quad \dots\dots (II)$$

Peso del fierro

El cálculo del peso del fierro, viene expresado en función de todas las partes del núcleo, es decir, de columnas, yugo y esquinas y obtenemos la siguiente expresión:

$$G_{fe} = 3 G_c + 4 G_y + 6 G_e \quad (\text{Kg.})$$

Donde cada columna. Yugo y esquina viene expresado por:

$$G_c = \varnothing_{fe} (\pi/4) D^2 H F_{fe}$$

$$G_y = \varnothing_{fe} (\pi/4) D^2 A F_{fe}$$

$$G_e = \varnothing_{fe} (\pi/4) D^2 D F_{fe}$$

Si reemplazamos las expresiones de G_c , G_y , G_e , en la ecuación anterior tendremos el peso del hierro:

$$G_{fe} = \varnothing_{fe} (\pi/4) D^2 (3H + 4 A + 6 D) F_{fe} \quad (\text{Kg.}) \quad \dots (III)$$

Peso del hierro y del cobre en función de la potencia

Si despejamos H de la expresión (I), tenemos:

$$H = P / (K \pi/4) D^2 D F_{fe} F_c$$

Si reemplazamos la expresión anterior en (II) y en (III) tenemos:

$$G_{cu} = (6\varnothing_{cu} P/K D F_{fe}) + (3\varnothing_{cu} A P/K D^2 F_{fe}) \quad (\text{Kg.})$$

$$G_{fe} = 3 \varnothing_{fe} P/K A F_c + \varnothing_{fe} \pi D^2 A F_{fe} + 6/4 \varnothing_{fe} \pi D^3 F_{fe} \quad (\text{Kg.})$$

Costo del transformador de puesta a tierra

El costo viene ha ser la suma de los importes, es decir, del precio de facturación como el del capital de pérdidas y se expresa de la siguiente manera:

$$F = G_{fe} (C_{fe} + W_{fe} \Delta P_{efe}) + G_{cu} (C_{cu} + W_{cu} \Delta P_{ecu}) \quad (\$) \quad \dots (IV)$$

Donde:

$$G_{fe}, G_{cu} = \text{Peso del hierro y cobre} \quad (\text{Kg.})$$

$$C_{fe}, C_{cu} = \text{Costo del hierro y del cobre} \quad (\$/\text{Kg.})$$

$$W_{fe}, W_{cu} = \text{Valorización de pérdidas en el hierro y cobre} \quad (\$/\text{Kg.})$$

$$P_{efe}, P_{ecu} = \text{Pérdidas específicas del hierro y cobre} \quad (\text{Watt}/\text{Kg.})$$

Reemplazando las expresiones de G_{cu} y G_{fe} , en la ecuación anterior se obtendrá que F esté en función de los pesos de cobre y del hierro. Ordenando convenientemente y haciendo un cambio de variables tenemos:

$$D = x \sqrt[4]{\frac{P \phi_{cu} (C_{cu} + W_{cu} \Delta P_{ecu})}{K \phi_{fe} F_{fe}^2 (C_{fe} + W_{fe} \Delta P_{efe})}} \quad (m.)$$

$$A = y \sqrt[4]{\frac{P \phi_{cu} (C_{fe} + W_{fe} \Delta P_{efe})}{K \phi_{cu} F_{cu}^2 (C_{cu} + W_{cu} \Delta P_{ecu})}} \quad (m.)$$

$$T = \sqrt{\frac{F_{cu} \phi_{cu} (C_{cu} + W_{cu} \Delta P_{ecu})}{\phi_{fe} F_{fe}^2 (C_{fe} + W_{fe} \Delta P_{efe})}}$$

Reemplazando estos cambios de variable en la ecuación F, se va a obtener que F estará en función de x, y, y por lo tanto diremos dF/dx; dF/dy será igual a cero para obtener los valores de x, y, es decir:

$$\frac{dF}{dx} = -6T/x^2 - 6y/x^3 + 2\pi xy + 9/2 \pi T x^2 = 0$$

$$\frac{dF}{dx} = 3/x^2 - 3/y^2 + \pi x^2 = 0$$

De la última expresión se obtiene lo siguiente:

$$\frac{y}{x} = \sqrt{\frac{3}{3 + \pi x^4}}$$

De la primera expresión obtenemos la relación de costos T:

$$T = (2 y/x) ((6 - 2 \pi x^4)/(9 \pi^4 - 12))$$

Haciendo un cambio de variable decimos:

$$m = y/x, \quad w = \pi x^4$$

Luego la expresión de costos T vendrá representado por:

$$T = 2 m ((6 - 2w)/(9w - 12))$$

De la expresión anterior decimos que $w = f(T)$, es decir:

$$w = 12 ((m + T) / (4m + 9T))$$

Si reemplazamos $w = \pi x^4$, y despejando la variable x tenemos:

$$x = \sqrt[4]{\left(\frac{12}{\pi}\right) \left(\frac{T + m}{9T + 4m}\right)}$$

Luego diremos también de $y/x = m$:

$$m = \sqrt{\frac{3}{3 + \pi x^4}}$$

Los valores de 'x', 'm' se resuelven mediante un proceso iterativo partiendo de un valor 'm₀' se obtendrá un valor 'x₀', hasta cumplir ambas igualdades y obteniéndose así los valores de 'x', 'm'

Relación entre el ancho de ventana (A) y el diámetro (D)

La relación se obtiene dividiendo la expresión de A entre la expresión D y simplificando la expresión se obtiene:

$$\frac{A}{D} = \frac{m}{T}$$

Relación entre el alto de ventana (H) y el diámetro (D)

Si dividimos la expresión H entre la expresión D y efectuando las simplificaciones se tiene:

$$\frac{H}{D} = \frac{4}{\pi m T x^4}$$

ANEXO B

**METODO DE ROGOSVSKI PARA LA DETERMINACION DE
LA REACTANCIA DE DISPERSION**

MÉTODO DE ROGOSVSKI PARA LA DETERMINACIÓN DE LA REACTANCIA DE DISPERSIÓN

Las formulas requeridas para el cálculo de la impedancia de dispersión del transformador de puesta a tierra, cuando por las bobinas circula una corriente de falla monofásica a tierra.

El método de Rogosvski, define que el campo de dispersión para los devanados concéntricos en donde los Amper-vueltas de uno de los devanados está en sentido contrario a los del otro devanado como se muestra en la figura B1.

Se conocen las características de los devanados del transformador de puesta a tierra, los flujos de dispersión se superpondrán, los A-vueltas del primario (1) y los del secundario (2) son iguales y opuestos.

El flujo común sería nulo, a no ser por efecto de la corriente de vacío I_0 , por lo tanto, se puede decir lo siguiente:

- En la figura (B1), los bobinados (1), y (2) son cilindros concéntricos de igual altura y con la misma Fmm., es decir:

$$F_{mm.} = I_1 N_1 = I_2 N_2$$

- Todos los flujos de dispersión están dirigidos paralelamente a las generatrices de los cilindros y tiene una longitud calculada 'h', haciendo un análisis teórico se tiene la siguiente expresión:

$$h = \frac{H_{dev}}{1 - \frac{b_1 + b_2 + b_0}{\pi H_{dev}}}$$

Donde:

$$H_{dev} = \text{Altura del devanado} \quad (\text{mm.})$$

$$b_0 = \text{Espacio entre los devanados (1) y (2)} \quad (\text{mm.})$$

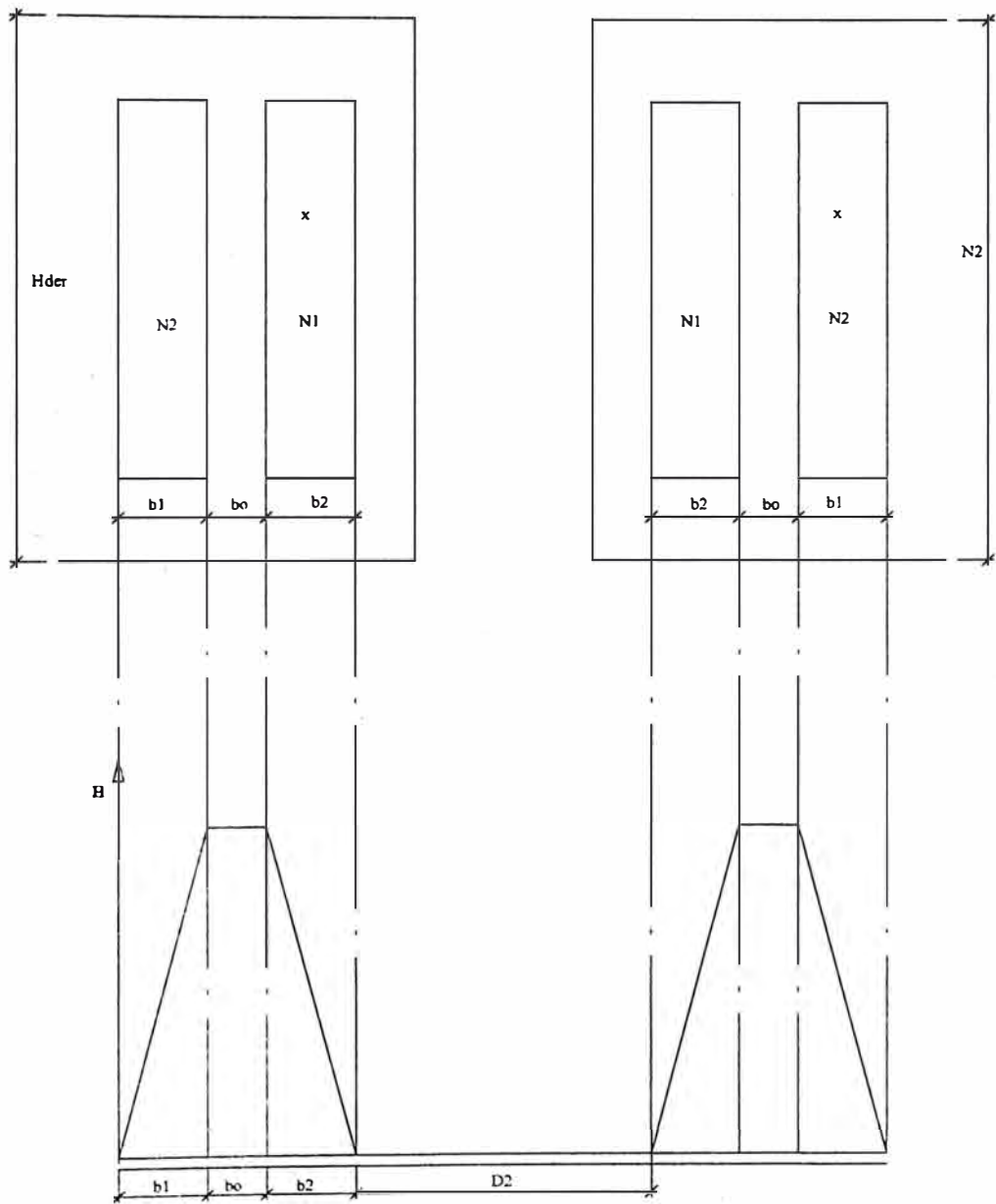


FIG. N° B - 1 Campo de dispersión para los devanados concéntricos donde los Ampers-Vuelta de uno de los devanados están en sentido contrario a los del otro devanado.

$b_1 =$ Altura radial del devanado (1) (mm.)

$b_2 =$ Altura radial del devanado (2) (mm.)

- La Fmm., no varia en el espacio b_0 , es decir, se considera que una mitad del espacio está de líneas de dispersión del devanado (1) y la otra mitad del líneas de dispersión del devanado (2).

Para el cálculo de la inductancia de dispersión del devanado (2), se ha de suponer que el número de sus espiras está reducido al devanado (1).

Es decir, consiste en la determinación de la inductancia " L_b " por su anchura " b_2 " del devanado donde la Fmm., varía continuamente y la determinación de la inductancia " L_0 " y su anchura " $b_0/2$ ", donde la Fmm., es constante. La inductancia buscada para la bobina (2) será:

$$L_2 = L_b + L_0$$

Para obtener el valor de la inductancia L se tiene que seguir los siguientes pasos:

I.- Se elegirá un diferencial a la distancia " x " del origen, de espesor " dx " y se determina su Fmm., y también el flujo cuando por el devanado circula una corriente de 1 A.

II.- Se determinará el número de flujos concatenados de éste diferencial.

III.- que se encuentra dentro de los límites dados.

Luego tenemos que tener presente lo siguiente como se puede apreciar en la figura B2.

De la figura B2 podemos decir:

$$B_x/B_m = x/b_2$$

De donde: $B_x = B_m (x/b_2)$

También: $N_x/N_1 = x/b_2$

Luego: $N_x = N_1 (x/b_2)$

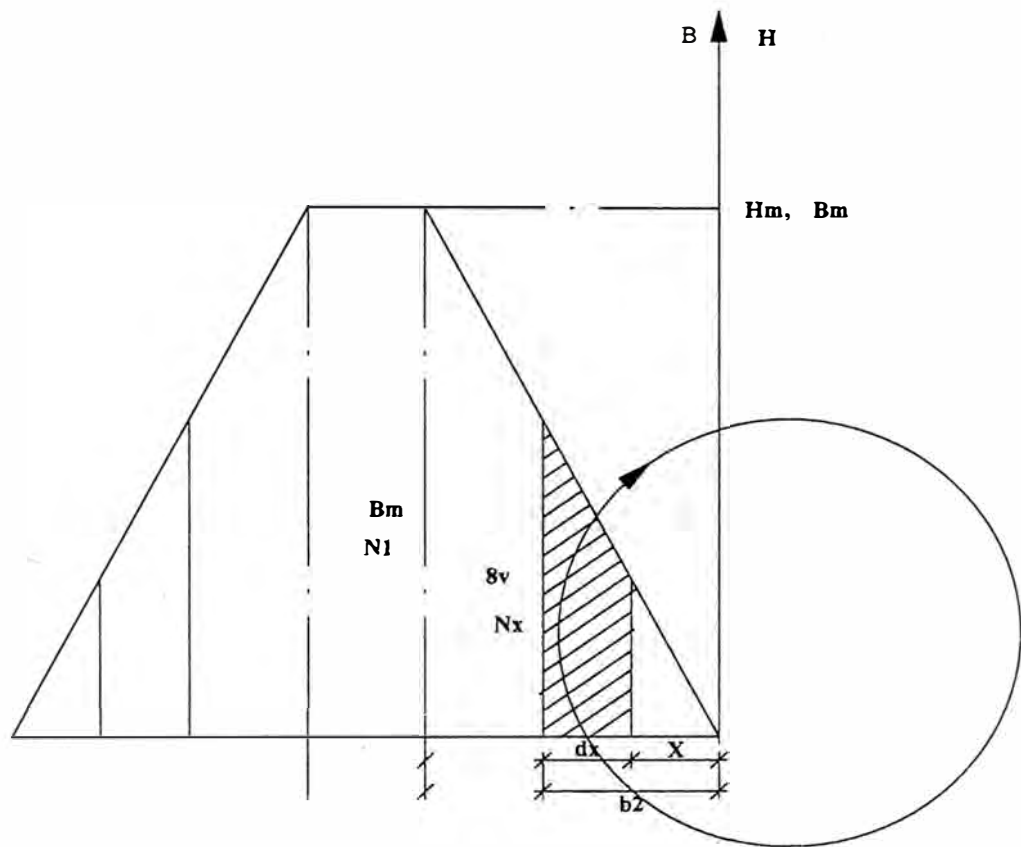


FIG N° B - 2 Flujo concatenado cuando circula por el devanado una corriente 1.

El diferencial de área de la parte sombreada para un dx es:

$$d_A = \pi (D^2 + 2x) dx$$

La Fmm., de la parte sombreada para un dx es:

$$F_{mm.} = I_2 N_x$$

Si consideramos $I_2 = 1$ A., y reemplazando el valor de N_x tenemos:

$$F_{mm.} = N_1 (x/b_2)$$

También se debe tener presente que la reluctancia se expresa de la siguiente manera:

$$\mathcal{R} = L_m (\text{longitud del camino}) / \mu_0 (\text{área del camino})$$

Luego para un diferencial dx será:

$$\mathcal{R} = L / \mu_0 \pi (D^2 + 2x) dx$$

Sabemos que se cumple en forma general:

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

Despejando el flujo para un diferencial de x tenemos:

$$d\phi_x = F_{mm.} (x) / \mathcal{R} x$$

También sabemos que el diferencial flujo concatenado en la región sombreada de la figura 2C será:

$$d\psi = N_x d\phi_x$$

Si reemplazamos el valor de N_x , y el valor del diferencial de flujo, en la expresión anterior tendremos:

$$d\psi(x) = \mu_0 (N_1 (x/b_2))^2 (\pi (D^2 + 2x) dx) / h$$

En general sabemos que el valor de la inductancia cumple con la siguiente igualdad:

$$L = \psi / I$$

Luego también diremos para un diferencial de dx , tenemos:

$$dL_b = d\psi(x) / I_2$$

Como $I_2 = 1$ A., la integración se realizará, entre 0 y b_2 :

$$L_b = \int \psi(x)$$

Reemplazando el valor de $\psi(x)$ en la expresión anterior y realizando la integración tenemos:

$$L_b = \mu_0 (N_1)^2 / h (\pi b_2/3 (D'^2 + 3/2 b_2))$$

El valor de L_0 que corresponde a la anchura de $b_0/2$, se determina análogamente, con la diferencia de que el diferencial de x está en el espacio donde toda la Fmm., del devanado que estamos considerando (devanado (2)) y esta concatenado con toda las espiras, diremos entonces, el número de flujo concatenado por la anchura $b_0/2$, en el intervalo desde 0 hasta $b_0/2$ será:

$$L_0 = \int \mu_0 (N_1)^2 \pi (D'^2 + 2 b_2 + 2y)/h dy$$

Realizando la integración obtenemos:

$$L_0 = \mu_0 (N_1)^2 / h (\pi (b_0/2) (D'^2 + 2 b_2 + b_0/2))$$

En las expresiones L_b , L_0 podemos decir que $(D' + 3b_2/2)$ y $(D' + 2 b_2 + b_0/2)$, representan cada uno a los diámetros medios D_{2m} . y D_{1m} , luego las ecuaciones se pueden representar de la siguiente manera:

$$L_b = \mu_0 (N_1)^2 / h (\pi (b_2/3) (D_{2m}))$$

$$L_0 = \mu_0 (N_1)^2 / h (\pi (b_0/2) (D_{1m}))$$

Teniendo presente que la inductancia del bobinado (2) viene expresado por:

$$L_2 = L_b + L_0$$

Remplazando los valores de L_b y L_0 obtenemos lo siguiente:

$$L_2 = \mu_0 \pi (N_1)^2 / h (b_0/2 D_{0m} + b_2/3 D_{2m})$$

Realizando el mismo procedimiento para el cálculo del bobinado (1), se obtiene la inductancia L_1 :

$$L_1 = \mu_0 \pi (N_1)^2 / h (b_0/2 D_{om} + b_1/3 D_{2m})$$

En el diseño del transformador de puesta a tierra se cumple:

$$b_1 = b_2 = b, \quad N_1 = N_2 = N$$

Luego podemos decir que la inductancia de dispersión de los devanados en una misma columna es:

$$L = L_1 + L_2$$

Luego remplazando las expresiones de L_1 , Y de L_2 obtenemos:

$$L = \mu_0 \pi (N_1)^2 / h (b_0 D_{om} + b/3 (D_{1m} + D_{2m}))$$

Sabemos también que el valor de la reactancia de X viene expresada por:

$$X = 2 \pi f L$$

Finalmente remplazando el valor de la inductancia tenemos:

$$X = \frac{\sqrt{3} 8 \pi^2 f N^2 10^{-10}}{h} \left(b_0 D_{om} + \frac{b}{3} (D_{1m} + D_{2m}) \right) \text{ ohmios/fase}$$

Potencia permanente del transformador de puesta a tierra

Para el cálculo de la potencia de diseño en estado permanente se hará uso de la siguiente expresión que viene dado por:

$$P_d = P_{cd} (J/J_{cd})$$

Teniendo presente las normas del C.E.I, los transformadores sumergidos en aceite deben resistir sin peligro los efectos térmicos de un cortocircuito en donde la temperatura máxima alcanzada en los arrollamientos es de 250 °C. Teniendo presente esta condición se obtendrá la densidad de corta duración de la siguiente expresión:

$$T_1 = (T_0 + a J_{cd}^2 t 10^{-E3}) \text{ °C}$$

Donde: T_0 = Temperatura inicial °C

J_{cd} = Densidad de corriente de corta duración A/mm².

t = Tiempo de corta duración 25 seg.

a – En función de las temperaturas T_1 , T_0 . (Tabla V)

La densidad de corriente en operación permanente esta comprendido entre $2 - 3.5 \text{ A/mm}^2$. Por lo que seleccionamos el valor de la densidad de corriente para trabajo permanente de:

$$J = 2,5 \text{ A/mm}^2.$$

Luego, reemplazando valores en la expresión (5.1) obtenemos como resultado la potencia de trabajo permanente de:

$$P = 242.667 \text{ KVA}$$

El valor obtenido no es comercial, por lo que se tendrá que considerar el valor más próximo al estándar comercial. En este caso la potencia de diseño será:

$$P_d = 250 \text{ KVA}$$

Con lo cual se define las dimensiones del transformador.

Complementos finales de diseño de la parte activa

Verificación de la tensión en el aislamiento entre capas

La tensión en el aislamiento entre dos capas consecutivas del bobinado no debe sobrepasar ciertos límites de nivel de tensión. En general, el diseño de un transformador de potencia, debe cumplirse que la tensión de aislamiento entre dos capa consecutivas no debe ser mayor de 3 KV/mm . Por lo tanto en nuestro diseño debe verificarse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$(V / \text{esp } N_{\text{esp/cap}} 2\text{capas})/e < 3\text{KV/mm}.$$

Donde “e” es el espesor total entre dos capas consecutivas.

Reemplazando valores en la expresión anterior tenemos:

$$2,83 \text{ Kv/mm.} < 3 \text{ KV/mm.}$$

Por lo tanto podemos decir que los cálculos del diseño satisfacen la condición de la norma del C.E.N.

Verificación del factor de utilización del cobre o de ventana

Este factor de utilización (F_c), viene definido por:

$$F_c = (\text{Sección útil del cobre}) / (\text{Sección disponible})$$

Es decir:

$$F_c = (N_1/2 S_{cu} + N_2/2 S_{cu}) / (H A/2)$$

En nuestro diseño se cumple que $N_1 = N_2 = N$, al reemplazar los valores obtenidos anteriormente tenemos:

$$F_c = 0.393$$

Este valor demuestra que la distribución de los bobinados dentro de la ventana del núcleo ha sido adecuada, cual se ajusta al valor teórico asumido inicialmente $F_c = 0.4$.

ESPECIFICACIONES TECNICAS DE RESISTENCIA PARA PUESTA A TIERRA

Resistencia	:	15 Ohm
Frecuencia	:	60 Hz
Tensión nominal	:	$10/\sqrt{3}$ V
Corriente de falla por 25 seg.	:	360 A
Corriente permanente	:	2 A
Tensión de prueba a 60 Hz, 1 min.	:	1 KV
Temperatura ambiente máxima	:	40° C
Altitud de instalación	:	1000 m.s.n.m.
Clasificación por tiempo de operación (Tiempo de corta duración – normal IEEE-32):		10 seg.
Elevación máxima permitida sobre 30° C (Norma IEEE-32)	:	760° C
Gabinete protector (intemperie)	:	NEMA 3

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL TRANSFORMADOR ZIG-ZAG

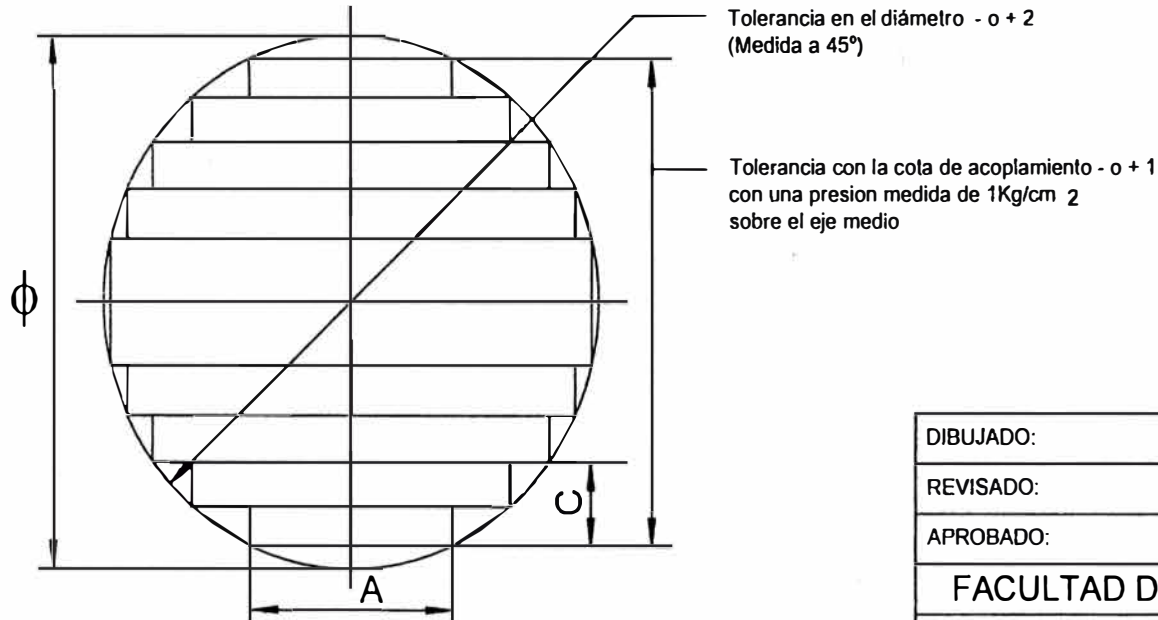
Potencia nominal	:	250 KV
Frecuencia	:	60 Hz
Tensión nominal	:	$10/\sqrt{3}$ V
Arrollamiento (Con neutro)	:	Zig-Zag
Tensión de corto circuito	:	3%
Enfriamiento	:	ONAN
Corriente nominal	:	14.45 A
Corriente de corta duración por fase	:	360/3 A
Corriente de corta duración por el neutro	:	360 A
Tiempo de operación (clasificación)	:	10 seg.
Corriente permanente del neutro	:	2 A
Tensión de prueba a la onda de choque 1,2/5	:	75 KV pico
Tensión de prueba a 60 Hz., 1 min.	:	28 KVef.
Altitud de instalación	:	1000 m.s.n.m.

ANEXO C

DIMENSIONES DEL NÚCLEO Y DEL TRANSFORMADOR

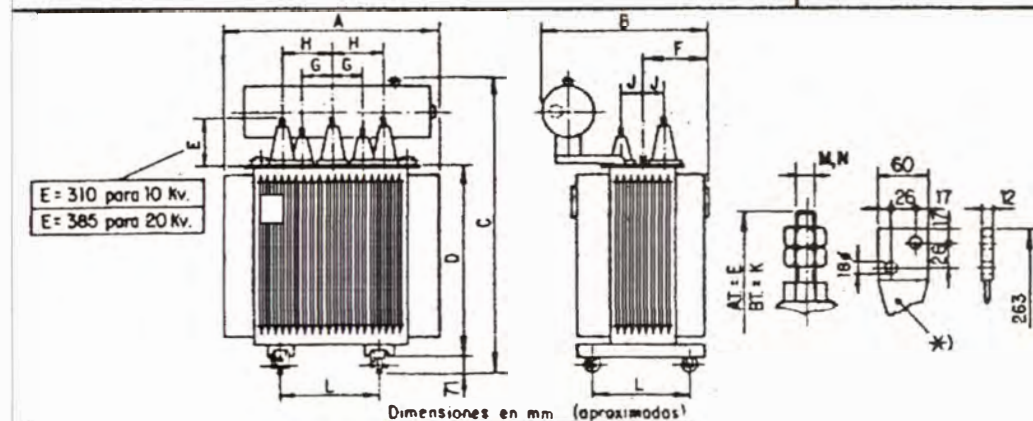
ANEXO C
SECCIÓN DEL NÚCLEO

		PLANCHA MAGNÉTICA, ESCALÓN								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ancho de placa	A (mm)	55	94	125	149	168				
Altura de paquete	H (mm)	10	13	15	19	27				
Cota de acoplamiento	Inf.	10	23	38	57	84				
Sobre la base C (mm)	Sup.	168	155	142	127	108				
Peso por escalón (%)		5,06	11,33	17,47	26,66	43,6				



DIBUJADO:	Nº REGISTRO:	TITULO: NÚCLEO 177 mm φ n = 0.907 nf = 0.847
REVISADO:	ESCALA:	
APROBADO:		
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA		
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA		

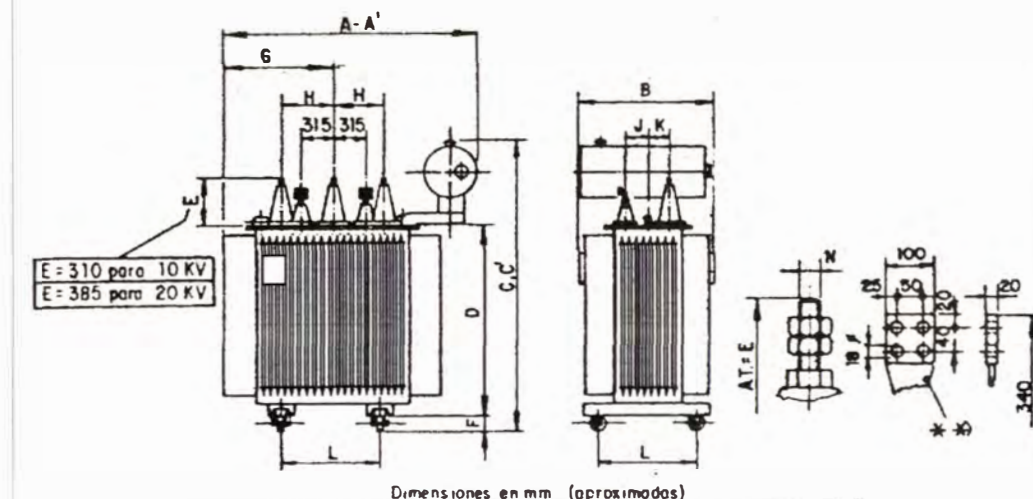
Transformador Trifásico en Aceite Tipo: TOAKWB YPCT
 Tensión en A.T. hasta 20KV. . . P. X. 490901



Dimensiones en mm (aproximadas)

Potencia KVA	A	B	C	D	F	G	H	J	K	L	Conexiones	
											BT	AT
50	870	790	1510	920	245	195	250	90	138	420	M12	M12
100	970	895	1570	985	335	280	350	100	178	420	M20	M12
160-200	1180	980	1660	1070	400	300	350	110	178	470	M20	M12
250-320	1260	1000	1770	1180	415	300	350	130	*	470	*	M12

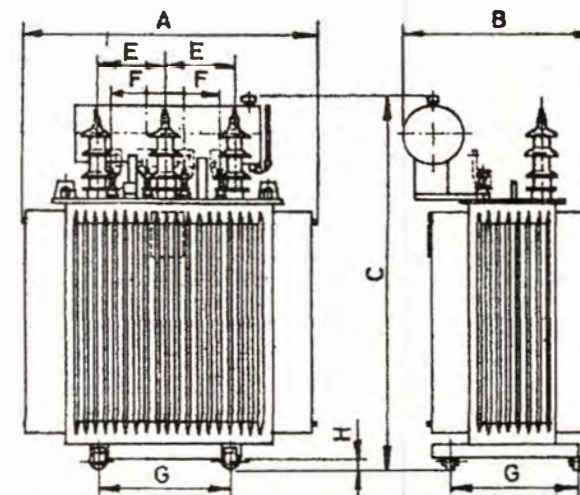
A'y C' Sólo para ejecución en caldo hasta 12 Kv. o 1000 m.s.m.



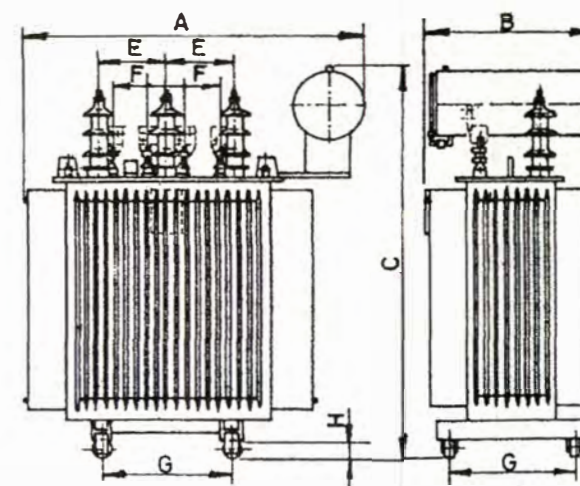
Dimensiones en mm (aproximadas)

Potencia KVA	A	B	C	C'	D	F	G	H	J	K	L	A'	Conexiones	
													BT	AT
400 + 500	1700	980	2060	1935	1360	86	665	315	155	150	570	1535	*	M12
640 + 800	1940	1020	2160	2040	1465	86	830	315	160	160	570	1670	* *	M12
1000 + 1250	2150	1050	2270	2150	1575	86	960	345	175	175	670	1920	* *	M12
1600	2200	1185	2360	-	1600	92	1020	345	200	250	820	-	* *	M12

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DELCROSA
 DEVANADOS EN ACEITE CON ENFRIAMIENTO NATURAL
 AISL. CLASE A 60 Hz. NORMAS: I E C 76, ITINTEC 370.002



TIPO	KVA	DIMENSIONES (m.m)								PESOS (Kg.)		
		A	B	C	E	F	G	H	PARTE ACT.	ACEITE	TOTAL	
TECD 3092	100-125	930	690	1490	280	100	450	90	360	180	850	
TECD 3112	160-200	990	760	1620	300	160	450	90	530	260	930	
TECD 3153	250-315	1170	850	1690	300	180	570	90	680	320	1210	



TIPO	KVA	DIMENSIONES (mm)								PESOS (Kg.)		
		A	B	C	E	F	G	H	PARTE ACT.	ACEITE	TOTAL	
TECD 3205	400-500	1660	830	1870	300	160	570	90	990	420	1710	
TECD 3267	630	1720	980	2070	300	160	570	140	1340	550	2340	
TECD 3322	1000	1785	1020	2280	300	160	620	140	1870	750	3300	
TECD 3383	1600	2050	1086	2690	400	240	820	140	2420	950	4250	
TECD 3463	2000	2140	1250	2890	480	240	820	140	2720	1100	4800	

DIBUJADO:	Nº REGISTRO:	TITULO: CROQUIS DE DIMENSIONES TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS 10Kv/20Kv - 60 Hz
REVISADO:	ESCALA:	
APROBADO:		
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA		

BIBLIOGRAFÍA

1. Vasiutinski C.B Kransilnikov A.D
Cálculo y proyección de transformadores monofásicos y trifásicos
Instituto Técnico de Moscú Moscú 1976
2. Juan Corrales Martín
Teoría, cálculo y construcción de transformadores
Editorial Labor 1954
3. M.P Kostenko L.M Piotrovski
Maquinas eléctricas Tomo I
Editorial Mir 1985
4. Richard Roeper
Las corrientes de cortocircuito en redes trifásicas
(Siemens)
5. E.E. Staff- M.I.T
Circuitos magnéticos y transformadores
Editorial Reverte 1980
6. Enrique Ras oliva
Transformadores de potencia, de medida y de protección
Editorial Boixareu 1978 , 4ta Edición renovada
7. Willian D. Stevenson J.
Análisis de sistemas eléctricos de potencia
8. P. Camarena M
Transformadores eléctricos industriales

- Editorial Celsa
9. G.Zoppeti
Estaciones transformadora y de distribución
Ediciones G.Gili S.A
 10. Información y características del centro de transformación La Unión
(Piura).
 11. Grounding of Industrial Power Systems Publicación 953 (IEEE)
Capitulo I
 12. Ing. Edelin Piña, Ing. Cesar Montero, Ing. Miguel A Contreras C
X – Reunión del Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica Eléctrica
y Ramas afines “CONIMERA”
 13. Ing. Justo Yanque
Calidad de la Energía Eléctrica y Seguridad en las Instalaciones
 14. Langsdorf
Teoría de las maquinas Eléctricas de Corriente Alterna
2da Edición
 15. Gilberto Enríquez Harper
El ABC de las maquinas eléctricas - I. Transformadores
8va edición Editorial Limusa 1999
 16. Camilo Odulmiro Collazos Salazar
Cálculo de un transformador de potencia de 25 MVA – 60/10 KV
1ra edición 2000
 17. Ralph R. Lawrence
Maquinas de corriente alterna
4ta edición Editorial H.A.S.A. 1967