

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR MULTITAP PARA USO EN POZOS PETROLEROS**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
SERGIO VICENTE CHACMANA ASTURIMA**

**PROMOCIÓN  
2004 - I**

**LIMA - PERÚ  
2013**

**DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR MULTITAP PARA  
USO EN POZOS PETROLEROS**

A mi familia

A mis amigos

A mi universidad y profesores de la FIEE-UNI

## SUMARIO

El presente trabajo describe el diseño de la construcción de un transformador para un Sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) para pozos petroleros. El transformador requerido para dicho escenario es Multitap trifásico de 520 kVA con un rango de transformación de 0,48 / 2,3 – 4,6 kV para una salida preliminar de 14 niveles de tensión, para los grupos de conexiones Yd11 – Dd0, y un rango de frecuencias de 35 a 90 Hz. Es necesario recalcar que con el cambio del grupo de conexión se logra aumentar la cantidad de niveles de tensión de salida al doble, convirtiéndose el transformador Multitap en un transformador de 28 salidas que van desde 1,328 a 4,6 kV

Estos tipos de transformadores son necesarios por cuanto los transformadores convencionales no son de utilidad para el escenario establecido (BES para pozos petroleros); ellos deben ser diseñados para ser capaces de elevar el nivel de tensión de salida del variador de velocidad (el cual proporciona la potencia suficiente al equipo de fondo para que éste funcione en buenas condiciones) soportando variaciones de frecuencia, distorsión de armónicos y componentes de corriente directa.

El transformador es fabricado sin considerar factores “K” (no contempla efecto de los armónicos) debido a que los clientes comúnmente le colocan filtros a la salida del variador, esto para mitigar el efecto de los armónicos.

Asimismo se proporciona el análisis de la capitalización de pérdidas, tomando en cuenta su costo inicial y los costos generados por las pérdidas a lo largo de su tiempo de vida útil.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA</b> .....	3
1.1 Descripción del problema .....	3
1.2 Objetivos del trabajo .....	3
1.3 Evaluación del problema .....	3
1.4 Alcance del trabajo .....	6
1.5 Síntesis del trabajo .....	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL TRANSFORMADOR MULTITAP</b> .....	8
2.1 Partes principales .....	8
2.1.1 Bobinas .....	8
2.1.2 Núcleo .....	9
2.1.3 Aislantes .....	10
2.1.4 Aceite .....	11
2.1.5 Conmutador .....	11
2.2 Partes auxiliares y accesorios .....	12
2.2.1 Tanque .....	12
2.2.2 Dispositivos de protección .....	13
2.2.3 Válvula de vaciado/filtrado .....	15
2.2.4 Aisladores M.T. y B.T. ....	15
2.2.5 Deshumecedor .....	16
2.2.6 Placa de características. ....	16
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>DISEÑO Y CÁLCULO DEL TRANSFORMADOR MULTITAP</b> .....	18
3.1 Datos de partida .....	18
3.2 Dimensiones principales .....	19
3.2.1 Número de espiras y sección del núcleo .....	20
3.2.2 Altura del núcleo .....	22
3.2.3 Ancho de ventana .....	22
3.2.4 Peso del núcleo .....	23

3.3	Aislamientos y distancias .....	23
3.3.1	Aislamientos de los conductores o aislamiento entre espiras.....	24
3.3.2	Aislamiento entre capas .....	24
3.3.3	Aislamientos entre bobinas M.T. - B.T.....	25
3.3.4	Aislamiento entre devanados concéntricos M.T.-M.T. y B.T. respecto al núcleo ..	26
3.3.5	Distancia entre los bobinados y la cuba .....	28
3.4	Sección de los devanados .....	29
3.5	Pérdidas en el Fierro .....	31
3.6	Pérdidas en el cobre.....	35
3.6.1	Peso del cobre.....	35
3.6.2	Pérdidas por efecto Joule.....	36
3.6.3	Pérdidas parásitas.....	38
3.6.4	Pérdidas por las conexiones .....	39
3.6.5	Pérdidas por flujos transversales .....	41
3.6.6	Pérdidas totales en el cobre.....	44
3.7	Rendimiento.....	47
3.8	Caídas de cortocircuito.....	53
3.8.1	Parte activa.....	54
3.8.2	Parte Inductiva.....	54
3.8.3	Cálculo de caídas de cortocircuito .....	55
3.8.4	Regulación.....	56
3.9	Corrientes de excitación y de inserción .....	58
3.10	Cálculo del calentamiento en los arrollamientos .....	64
3.10.1	Fórmulas involucradas .....	64
3.10.2	Calentamiento en el devanado de B.T.....	66
3.10.3	Calentamiento en el devanado de M.T.....	67
3.11	Rango de conmutación y conexiones Yd11 - Dd0.....	69
3.12	Pruebas de validación .....	75
3.12.1	Pruebas de rutina .....	75
3.12.2	Pruebas especiales .....	76
3.12.3	Pruebas de laboratorio.....	78
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA .....</b>		
4.1	Pérdidas en el transformador.....	79
4.2	Factores del tipo de servicio.....	79
4.3	Tarifas eléctricas .....	80

4.4	Factores financieros .....	81
4.4.1	Factor de amortización .....	81
4.4.2	Factor de capitalización.....	81
4.5	Coefficientes de capitalización .....	81
4.6	Optimización del transformador Multitap .....	82
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....		<b>85</b>
<b>ANEXO A</b> DATOS TÉCNICOS DEL ACEITE .....		<b>87</b>
<b>ANEXO B</b> DATOS TÉCNICOS PAPEL AISLANTE .....		<b>90</b>
<b>ANEXO C</b> DETALLE DE ESCALONES DEL NÚCLEO .....		<b>93</b>
<b>ANEXO D</b> TABLAS DE CORRIENTE DE INSERCIÓN .....		<b>98</b>
<b>ANEXO E</b> PLANOS DEL TRANSFORMADOR.....		<b>103</b>
<b>ANEXO F</b> CÁLCULO DEL CALENTAMIENTO DEL TANQUE.....		<b>110</b>
<b>ANEXO G</b> FÓRMULAS DE LAS DISTANCIAS ELÉCTRICAS.....		<b>117</b>
<b>ANEXO H</b> APTITUD TÉRMICA PARA SOPORTAR CORTOCIRCUITOS .....		<b>119</b>
<b>ANEXO I</b> TABLAS COMPLEMENTARIAS DE DISEÑO.....		<b>126</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		<b>131</b>

## INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene como objetivo mostrar el diseño del transformador Multitap para aplicaciones de frecuencia variable, estos transformadores son para aplicaciones de accionamiento a velocidad variable. Utilizados cuando se requiera alimentar motores cuya velocidad es controlada por variadores de frecuencia.

Estos transformadores se diseñan para elevar el nivel de tensión de salida del variador de velocidad soportando variaciones de frecuencia, distorsión de armónicos y componentes de corriente directa, por lo cual los transformadores estándar no se usan.

Generalmente es empleado en un Sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) para pozos petroleros, son pocos los pozos terminados y que tengan la suficiente energía en el yacimiento, para que el flujo llegue hasta la estación de recolección; ésta energía de levantamiento es producida por la presión del yacimiento y el gas de formación. La producción de hidrocarburos ocasiona una disminución de la presión del yacimiento por lo que se hace necesario proporcionar energía externa para levantar la columna de fluido desde los yacimientos hasta el centro de recolección.

El transformador cuyo diseño se explica en el presente informe es un transformador Multitap trifásico de 520 kVA con un rango de transformación de 0,48 / 2,3 - 4,6 kV para una salida preliminar de 14 niveles de tensión, para el grupo de conexión Yd11, y mediante el cambio del grupo de conexión a Dd0 externamente con los aisladores, se convierte el transformador Multitap en un transformador de 28 salidas que van desde 1,328 a 4,6 kV y un rango de frecuencias variable de 35 a 90 Hz.

El informe de suficiencia abarca tanto el diseño del transformador, según las especificaciones indicadas, así como la realización de la evaluación económica mediante la capitalización de pérdidas.

El presente informe ha sido realizado gracias a la experiencia laboral de 9 años, dedicado al diseño de transformadores de hasta 4000 kVA y tensiones de hasta 36 kV

El informe está organizado de la siguiente manera:

- Capítulo I: "Planteamiento de Ingeniería del problema".- Capítulo en donde se expone la necesidad de ingeniería a satisfacer. Así mismo se plantean los objetivos y alcances del proyecto.
- Capítulo II: "Elementos constitutivos del transformador Multitap".- En donde se exponen las partes principales, partes auxiliares y accesorios del transformador.



- Capítulo III: "Diseño y Cálculo del transformador Multitap".-Se especifican los requerimientos del proyecto y luego se detalla la metodología usada para el diseño y construcción del transformador Multitap especificado, determinándose los valores característicos de este transformador mediante los cálculos y gráficos que se exponen.

- Capítulo IV: "Evaluación Económica".- Muestra el análisis de capitalización de pérdidas acumuladas durante el tiempo de vida del transformador.

Finalmente en los anexos que van desde la "A" hasta la "I", se detallan las partes complementarias del diseño como datos técnicos de los principales materiales, asimismo cálculos complementarios al desarrollo del propio diseño.

El desarrollo del informe se apoya en la metodología del diseño propia de la experiencia y en las normativas existentes así como en la bibliografía de los proveedores de partes y accesorios.

En el presente informe se han omitido los protocolos de prueba que se realizan en la empresa donde labora el autor, debido a las políticas de confidencialidad de la empresa, la cual no aprobó su publicación.

## **CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA**

En este capítulo se expone la necesidad de Ingeniería a satisfacer. Así mismo se plantean los objetivos y alcances del proyecto.

### **1.1 Descripción del problema**

Necesidad de una empresa petrolera de contar con un transformador Multitap trifásico de distribución como parte de su sistema de alimentación de motores para bombas de pozo profundo en el Campo Petrolero.

La empresa determinó que dicho transformador debía ser de fabricación local, a fin de recibir el adecuado soporte técnico y garantía de respaldo oportunamente.

### **1.2 Objetivos del trabajo**

Diseñar un transformador Multitap trifásico de 520 kVA con un rango de transformación de 0,48 / 1,328 - 4,6 kV para una salida de 28 niveles de tensión, para los grupos de conexiones Yd11 – Dd0, y un rango de frecuencias de 35 a 90 Hz.

### **1.3 Evaluación del problema**

Para la mejor comprensión de la necesidad a satisfacer, se explica en qué consiste un Sistema de Bombeo Electrosumergible para la extracción de petróleo [1]. Su principal función es proporcionar la energía adicional al fluido del yacimiento mediante el uso de bombas centrifugas multi-etapa, donde su caudal de operación es controlado mediante variadores de velocidad instalados en la superficie del pozo.

Este sistema, es un medio (efectivo y económico) para lograr recuperar considerables volúmenes de fluidos a grandes profundidades. Su aplicación es básicamente en yacimientos con altos volúmenes de fluido, grandes porcentajes de agua y una baja relación gas/petróleo. Estos equipos han obtenido excelentes resultados en la producción de fluidos de alta viscosidad, en pozos con fluidos abrasivos, altas temperaturas y que disponen de un diámetro reducido. El sistema consta de dos grupos, que son:

- Equipo de Superficie
- Equipo de Fondo

Para el objetivo del presente informe solo es necesario mencionar los componentes del equipo de superficie sin embargo para aspectos ilustrativos se presenta la disposición de ambos en la Figura 1.1

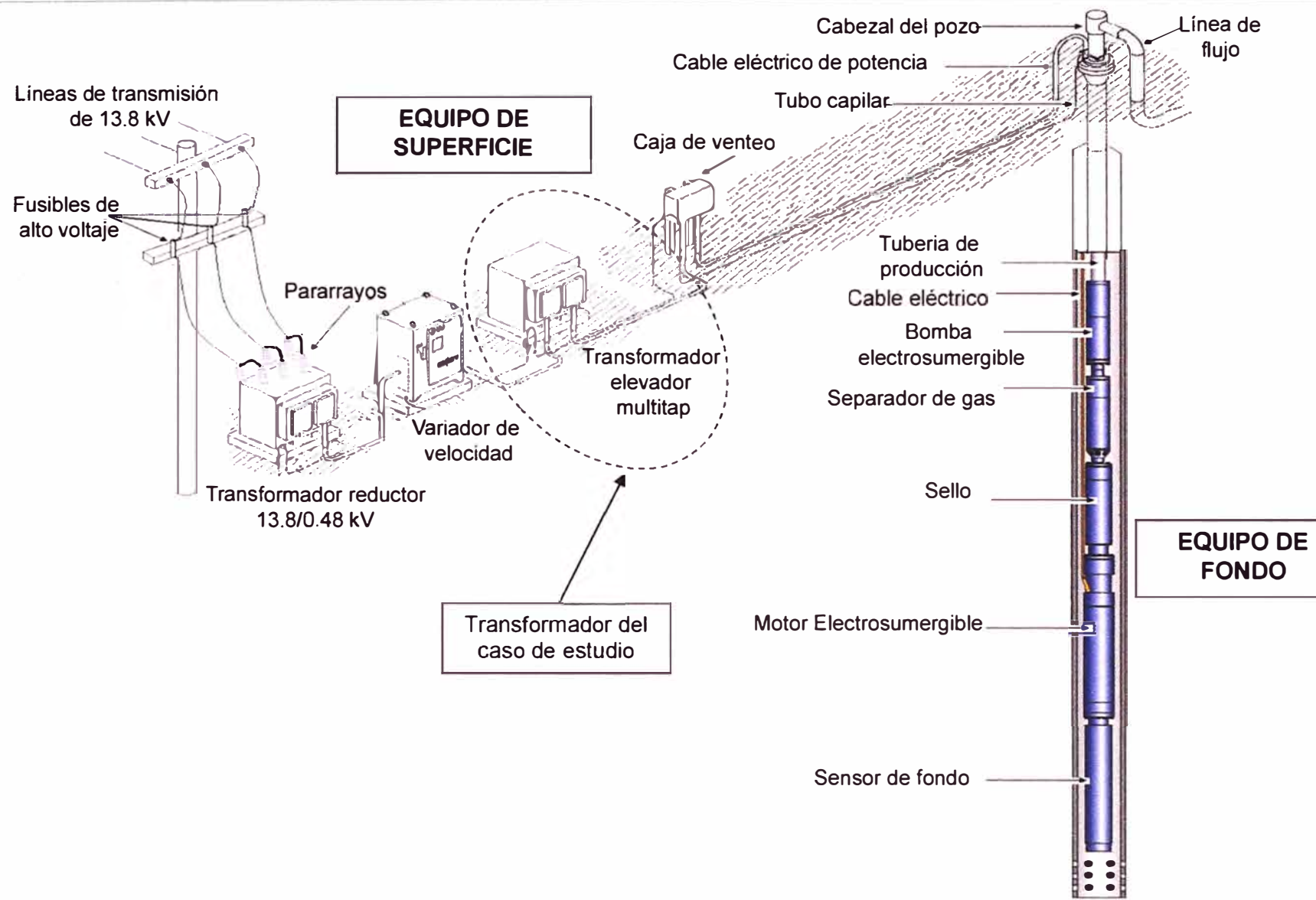
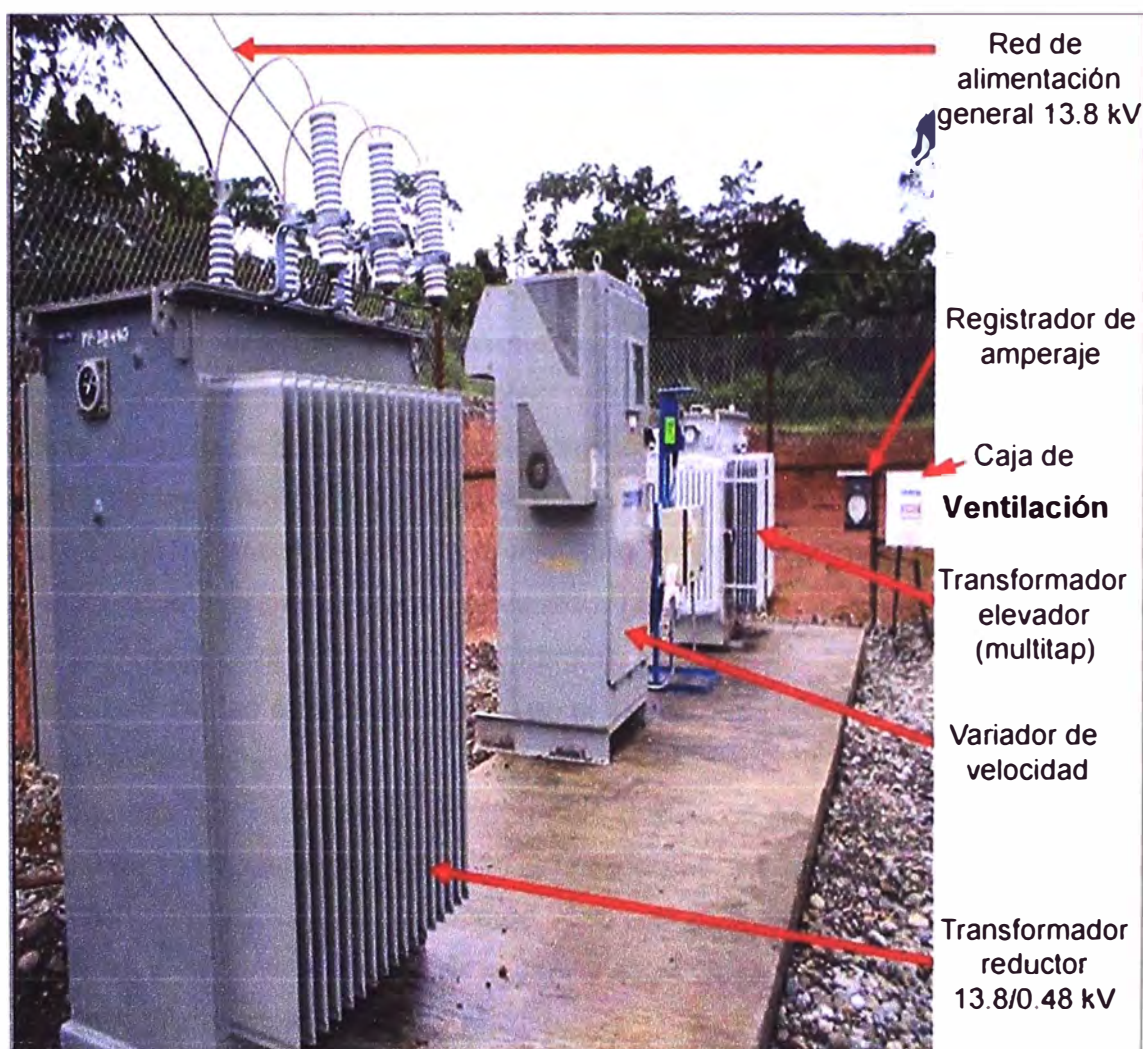


Figura 1.1 Equipos de superficie y de fondo (Fuente: Referencia [1])

Los componentes en la superficie de los pozos son:

- Cabezal del Pozo
- Caja de ventilación (Caja de Empalme)
- Controlador del Motor Electrosumergible (Variador de Velocidad VSD)
- Transformadores

La instalación de superficie consta de un transformador reductor, para este caso de 13,8 kV a 0,48 kV; el cual es el nivel de tensión necesario para la operación del variador de velocidad (VSD), el cual provee el nivel de tensión trifásico variable al transformador elevador Multitap, elevando el nivel de tensión lo necesario para la operación del motor en el fondo del pozo, la caja de ventilación es un punto de conexión del equipo de superficie con el equipo de fondo, finalmente junto a la caja de ventilación se instala un registrador de amperaje del motor electrosumergible, como se describe en la Figura 1.2



**Figura 1.2** Equipos de superficie [Fuente: Ref.1]

- **Cabezal del Pozo.**- El cabezal cierra mecánicamente el pozo en la superficie, soporta el peso del equipo electrosumergible instalado. La conexión del cable de potencia que viene de la caja de ventilación, se realiza mediante un conector llamado “Quick Conector”,

donde se realiza el empalme de los cables eléctricos de superficie y de fondo.

- **Caja de ventilación (de empalme).**- Cumple tres funciones:

- Provee un punto de conexión entre el bobinado secundario del transformador elevador Multitap y el cable eléctrico de potencia proveniente del fondo del pozo.
- Ventea a la atmósfera cualquier gas que se encuentre en la armadura de protección del cable eléctrico de potencia que proviene del pozo.
- Facilita puntos de prueba accesibles para realizar mediciones eléctricas del equipo de fondo.

Nota: Por lo general junto a la caja de ventilación se ubica un registrador amperimétrico, donde se registra de forma gráfica la corriente del motor electrosumergible en cartas Amperimétricas

- **Controlador del Motor Electrosumergible (VSD).**- El controlador del motor electrosumergible VSD (Variable Speed Driver), se instala en la superficie del pozo entre los transformadores reductor y elevador Multitap. Éste controla la velocidad de rotación del eje en el motor electrosumergible que se encuentra axialmente acoplado al eje de la bomba centrífuga multi-etapa ubicada en el fondo del pozo. El VSD proporciona la potencia suficiente al equipo de fondo para que éste funcione en óptimas condiciones, ofrece además numerosas opciones de protección, control y monitoreo del respectivo equipo que varían de acuerdo al fabricante.

- **Transformadores.**- Los transformadores: reductor y elevador Multitap, se instalan en la superficie del pozo de bombeo electrosumergible. El primer transformador reduce el nivel de media tensión a baja tensión (para el presente caso, de 13,8 kV a 0,48 kV) necesario para el funcionamiento del variador de velocidad, mientras que el segundo transformador eleva el nivel de tensión de salida del variador (480 V variable en frecuencia) al nivel de tensión que requiere el motor electrosumergible con las respectivas conexiones (DELTA ó ESTRELLA) y el tap que se selecciona en el transformador elevador.

#### **1.4 Alcance del trabajo**

El informe de suficiencia abarca el diseño del transformador, según las especificaciones indicadas, el cual tiene la finalidad de ser utilizado en aplicaciones como alimentación de motores para bombas de pozo profundo en el campo petrolero. También se incluye en el informe el análisis de la capitalización de pérdidas en la adquisición de un modelo específico de transformador Multitap.

#### **1.5 Síntesis del trabajo**

El informe desarrolla diversos aspectos, tanto conceptuales como metodológicos para el diseño del transformador Multitap. Se ha considerado un capítulo orientado a explicar los elementos constitutivos del transformador Multitap. Luego en otro capítulo, el informe

se enfoca en el diseño y cálculo del transformador. Se inicia con los datos de partida, para luego determinar las dimensiones principales (número de espiras, altura de núcleo, ancho de ventana), aislamientos y distancias, sección de los devanados, pérdidas en el hierro y en el cobre, rendimiento, caídas de cortocircuito, corrientes de excitación y de inserción, cálculo del calentamiento, conexiones Yd11 - Dd0, rango de conmutación, pruebas de validación.

Un capítulo final realiza el análisis de capitalización de pérdidas acumuladas durante el tiempo de vida del transformador.

## CAPÍTULO II ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL TRANSFORMADOR MULTITAP

En este capítulo está organizado en dos secciones: las partes principales y las partes auxiliares y accesorios del transformador Multitap.

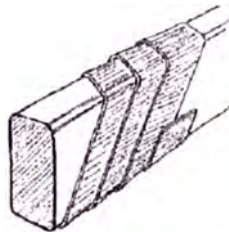
### 2.1 Partes principales

El transformador Multitap consta de diversos elementos tales como: bobinas, núcleo, aislantes, aceite y conexiones interiores. Estas son descritas a continuación [2]

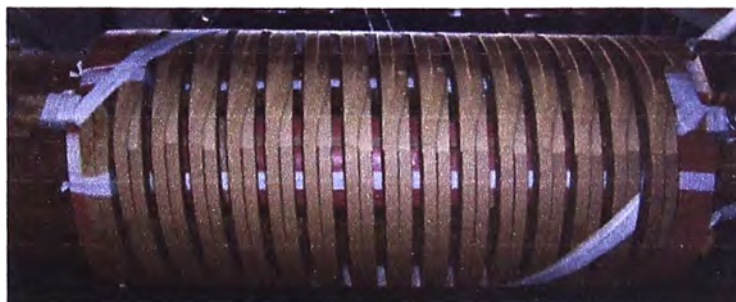
#### 2.1.1 Bobinas

Las bobinas (arrollamientos) están dispuestos en la forma siguiente: B.T. al interior, M.T. al exterior, respectivamente. Para el caso de estudio esto corresponde: B.T.= 480 V y M.T. de rango variable de 2,3 a 4,6 kV en conexión estrella.

Las bobinas son fabricadas con platina de cobre de 99,9% de pureza. El calibre de la platina depende de las corrientes (en B.T. es mayor el calibre). Los valores se especificarán en el siguiente capítulo. El aislamiento de los conductores es de papel para uso dieléctrico de pura celulosa, para el caso de estudio se utiliza papel kraft de 0,05 mm de espesor (Figura 2.1). La Figura 2.2 muestra una bobina en fabricación.



**Figura 2.1** Platina conductora con aislamiento de papel kraft (Fuente: Ref. [3])



**Figura 2.2** Bobina en proceso de fabricación (Fuente: Propia)

Las bobinas son tratadas térmicamente y prensadas antes de ser ubicadas en las respectivas columnas.

Los esfuerzos dieléctricos a frecuencia industrial al que se someten las bobinas así

como los originados por el corto circuito son analizados en una hoja Excel.

Los dos devanados se diseñan de acuerdo a los datos de entrada requeridos por el cliente.

### 2.1.2 Núcleo

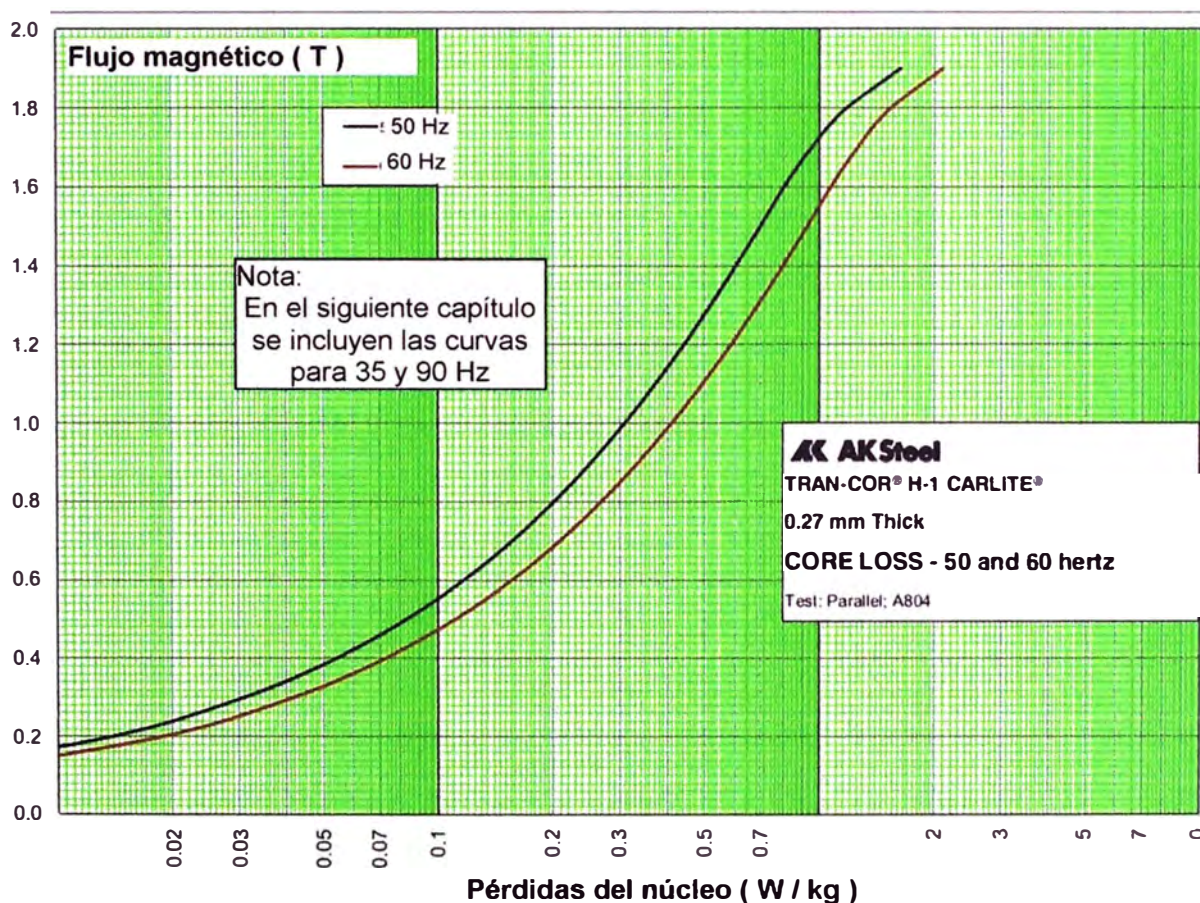
El núcleo magnético trifásico está compuesto por tres columnas y dos yugos, cortados a 45° en plancha magnética tipo TRAN-COR H1 de alta calidad con cristales orientados.

Cada lámina que compone el núcleo (0,27 mm de espesor) está aislada con un recubrimiento especial (Carlite) de bajo coeficiente de expansión térmica lo cual permite reducir los efectos de la magneto-estricción ofreciendo además una alta resistencia eléctrica entre láminas así como una excelente resistencia a la corrosión.

La forma constructiva permite conseguir un prensaje uniforme mediante la utilización de los aislamientos adecuados, así como el bandaje mediante cintas especiales que se contraen por acción del incremento de temperatura.

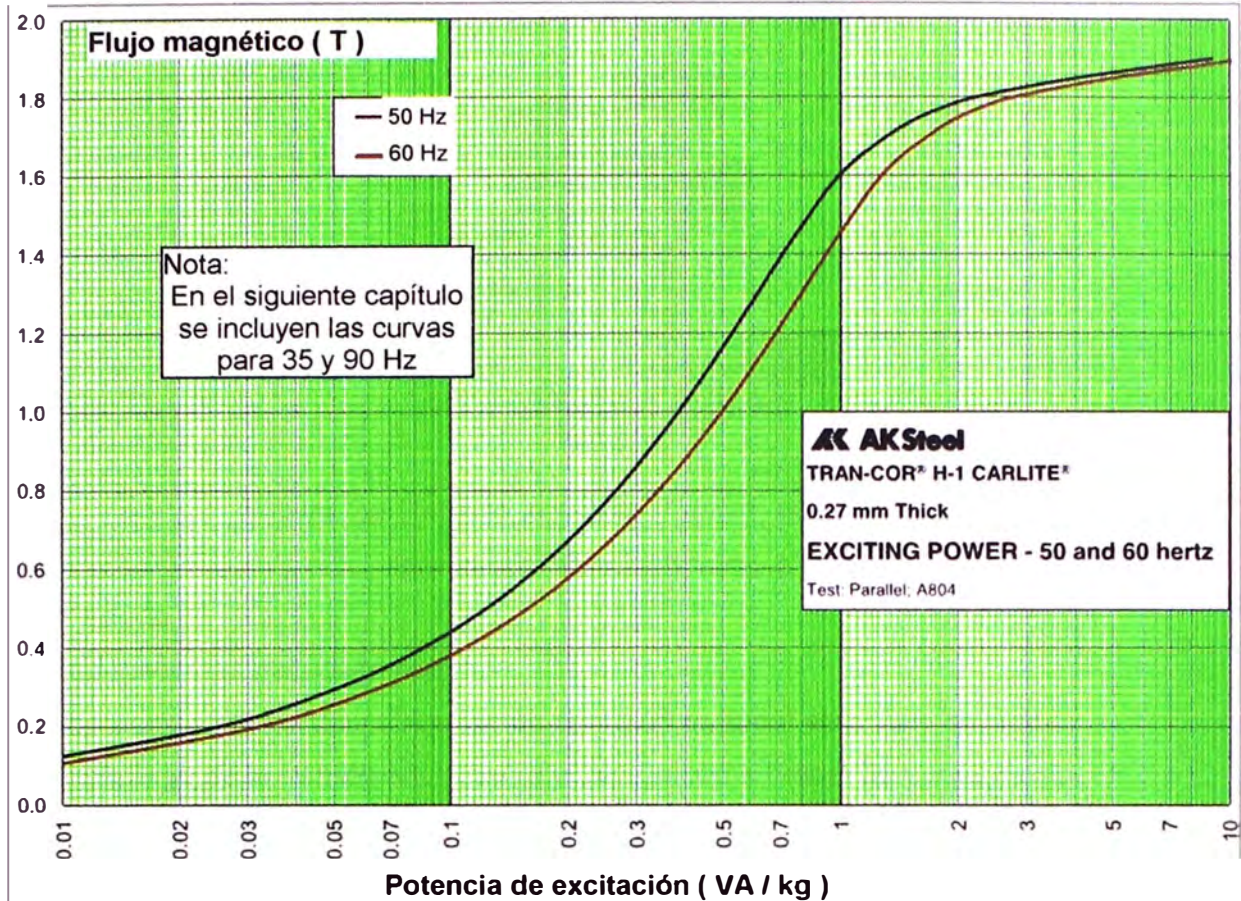
El diseño de los travesaños garantiza un adecuado prensaje transversal del núcleo magnético completo y la puesta a tierra del núcleo se efectúa mediante folio de cobre con el fin de evitar puntos de potencial flotante.

La frecuencia de funcionamiento es un valor crítico para el diseño. Existen dos tipos de gráficas logarítmicas que se aplican al núcleo (Figura 2.3 y Figura 2.4)



**Figura 2.3** Densidad de flujo de magnético Vs. Pérdidas en el núcleo (Fuente: Ref.[4])





**Figura 2.4** Densidad de flujo de magnético Vs. Potencia de excitación (Fuente: Ref.[4])

La primera gráfica es la relación de Densidad de flujo de magnético (Tesla) Vs. Pérdidas en el núcleo (W/kg); la segunda es la relación de Densidad de flujo magnético (Tesla) Vs. la Potencia de excitación (VA/kg); dentro de cada gráfica se pueden mostrar las curvas que corresponden a una frecuencia específica. Se pueden mostrar varias curvas sobre la misma gráfica para cada frecuencia de diseño.

### 2.1.3 Aislantes

Son los separadores que existen entre las capas de las bobinas. Sirven para refrigerar y aislar adecuadamente (canales de refrigeración axial y radialmente); estos aislantes son de material de presspan diamantado en papel y cartón. Adicionalmente se emplea material rancam (Combinación de presspan y resina) para fijar la parte de la bobina y el núcleo. Esto será adecuado según diseño para soportar los esfuerzos de corto circuito ante una falla.

Así mismo se emplean tubos aislantes de papel crepé de 0,1 mm de espesor para las salidas de las derivaciones y la entrada y salida del arrollamiento en M.T. y B. T.

El papel diamantado es ideal para ser utilizado en transformadores en baño de aceite, para el aislamiento de la bobina, cuando se envejece térmicamente (Figura 2.5)

El presspan es un material con base de celulosa para la clase térmica "A" (105 °C) de materiales aislantes (Ver anexo I); según el tipo de celulosa, la preparación de fibras y la

disposición de máquina se obtienen variados valores de rigideces dieléctricas.



**Figura 2.5** Papeles aislantes (Fuente: <http://www.krempel-group.com/spanisch/home.html>)

#### **2.1.4 Aceite**

Las funciones del aceite son:

1. Proporciona rigidez dieléctrica, actúa como un material aislante y dieléctrico.
2. Se encarga de la transferencia de calor, actúa como medio de enfriamiento.
3. Protege al aislamiento sólido; actúa como una barrera entre el papel y los efectos dañinos del oxígeno y la humedad.
4. Puede probarse para conocer las condiciones internas del equipo; actúa como una herramienta de diagnóstico para la evaluación del aislamiento sólido [5].

Esta última función es muy importante para el propósito del diagnóstico preventivo, ya que a medida que el aceite envejece éste disminuye su capacidad para cumplir con las tres primeras funciones listadas [5].

La función más importante del aceite, desde la perspectiva de mantenimiento del equipo y del aceite, es la protección del papel. Éste es también uno de los aspectos más sensible a los efectos del envejecimiento del aceite de los equipos en servicio.

El aceite empleado es la marca Nynas Nytro Izar I [6]. Este producto ha sido especialmente desarrollado para aplicaciones en equipos eléctricos con aceite; como transformadores de alimentación y distribución, rectificadores, disyuntores y conmutadores. Nytro Izar I es un aceite con trazas de inhibidos que cumple los requisitos de ASTM D 3487 tipo I. Nynas clasifica este producto en la gama High Grade. Ver en el Anexo A los detalles técnicos del aceite.

#### **2.1.5 Conmutador**

El conmutador sirve para hacer los cambios de tensión requeridos a la salida del transformador. Los conmutadores en general poseen varios terminales (posiciones) para seleccionar la tensión de salida. Cuanto más terminales haya, los cambios entre uno y otro nivel de tensión son más finos (es decir hay mayor opciones de niveles de tensión)

Para el caso de estudio se utiliza dos conmutadores:

- De 07 posiciones.- 150 A - 24 kV, marca C.A.P.T.; serie 096. Conexión delta.
- De 02 posiciones.- 150 A - 24 kV, marca COMEM., serie MTO LF. Conexión serie-paralelo.

La Figura 2.6 ilustra un conmutador en delta de 05 posiciones (06 bornes).



**Figura 2.6** Conmutadores (Fuente: Propia)

La combinación de ambos conmutadores permite obtener 14 niveles de tensión (2 x 7); asimismo en la parte externa se cuenta con un juego de seis aisladores en M.T. los cuales, mediante las conexiones adecuadas permite obtener 14 niveles de tensión adicionales, dando un total de 28 niveles de tensión.

## **2.2 Partes auxiliares y accesorios**

Estas se agrupan en: tanque, protección, válvula de vaciado/filtrado y aisladores.

### **2.2.1 Tanque**

Se consideran para el caso de estudio solo a las aletas de refrigeración, la cajuela cubre bornes, y los patines. Los cuales se describen a continuación.

#### **a. Aletas de refrigeración**

Si el calor que se produce en los transformadores no se evacua convenientemente se puede producir la destrucción de los materiales aislantes de los devanados.

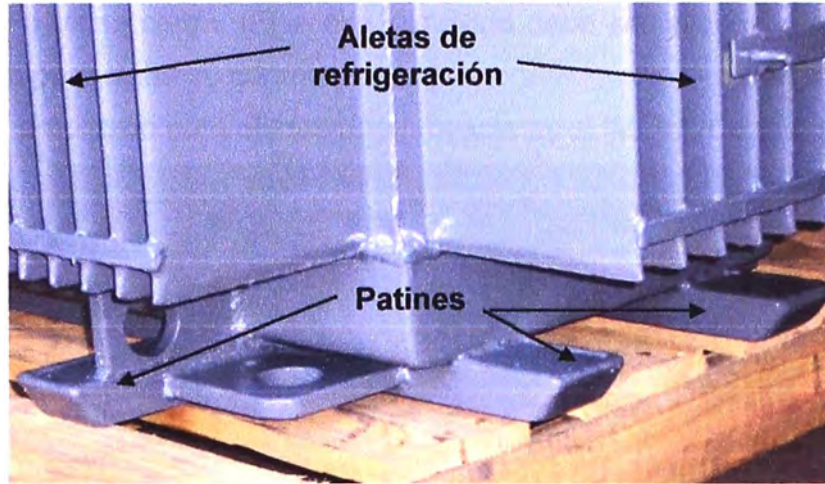
Para evacuar este calor se emplean aletas de refrigeración o radiadores, Las aletas de refrigeración son fabricadas con láminas de acero en frío ASTM 1008, (Ver anexo I).

- Para transformadores de pequeña potencia (hasta 50 kVA): La refrigeración se realiza aprovechando el aire que envuelve a los mismos (tanque liso sin aletas). Si no hay ventilación suficiente, se añadirán ventiladores.

- Para transformadores de mayor potencia: Se añaden aletas de refrigeración en la cubierta exterior del mismo. Las aletas de refrigeración, son de pequeño espesor y gran superficie, constituyen las paredes laterales del transformador y deben disipar cantidades considerables de calor. Su función principal es la de aumentar la superficie exterior (Figura 2.7); en otros casos para transformadores de gran potencia se usan radiadores.

### b. Patines

Los patines son los zapatos externos del transformador y son unos accesorios adecuados para poder trasladar el transformador en lugares en donde no se posee una grúa para el montaje (Figura 2.7)



**Figura 2.7** Patines y aletas de refrigeración (Fuente: Propia)

### c. Cajuela cubre bornes

Sirve para proteger los bornes del transformador y los accesorios de protección, está fabricado con láminas de acero en caliente ASTM A1011, tiene la hermeticidad requerida por el cliente con un grado de protección IP55. La Figura 2.8 muestra un ejemplo de la cajuela mencionada.



**Figura 2.8** Cajuela cubre bornes (Fuente: Transformadores Tesla)

## 2.2.2 Dispositivos de protección

Se consideran a la válvula de seguridad, al indicador de nivel de aceite y al

termómetro de aceite. Todos enfocados al diseño del caso de estudio presentado.

#### a. Indicador de nivel de aceite

El nivel de aceite deberá estar aproximadamente 50 mm por debajo del nivel de la tapa, esto con la finalidad de contemplar la expansión térmica del aceite en funcionamiento a plena carga. (El aceite removido debe ser almacenado en recipientes limpios y tapado para evitar su contaminación)

El indicador empleado para el presente proyecto es el IML80, Cedaspe (Figura 2.9)



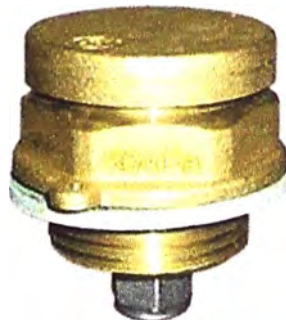
**Figura 2.9** Indicador IML80 (Fuente: [www.cedaspe.com](http://www.cedaspe.com))

#### b. Válvula de seguridad

Se utilizan para evacuar cualquier sobrepresión en los tanques del transformador. Operan en los casos en que la presión aumenta con un peligro no controlado, resultante de la explosión de los tanques. Son usados principalmente en transformadores eléctricos enfriados por aceite. (<http://www.comem.com>)

Su principal característica es de evacuar el aceite en el momento en que ocurra una sobrepresión interna (ocasionada por un cortocircuito, o una falla en general); de hecho un cortocircuito brusco y violento instantáneamente produce un gran volumen de gas que, si no es inmediatamente evacuado, puede resultar en la rotura propia del transformador, con todas las consecuencias perjudiciales que se pueden imaginar.

La aplicación de una determinada válvula debe hacerse en proporción al volumen de aceite en el transformador (Figura 2.10)



**Figura 2.10** Indicador 50 kPA R1 (Fuente: [www.comem.com](http://www.comem.com))

#### c. Termómetro de aceite

Sirve para medir la temperatura del aceite superior. Se utiliza el BM80 Cedaspe, un

indicador de temperatura de aceite bimetálico, sin contactos, con un rango de temperatura de 0 a 120 °C (Figura 2.11)



**Figura 2.11** Termómetro de aceite (Fuente: [www.cesdaspe.com](http://www.cesdaspe.com))

### 2.2.3 Válvula de vaciado-filtrado

Se utiliza para sacar una muestra de aceite para las pruebas cromatográficas, físico-químicas. Sirve para el filtrado y regenerado del aceite. La marca es el Milwaukee (Figura 2.12)



**Figura 2.12** Válvula de vaciado-filtrado de aceite, Gate 1152 (Fuente: <http://www.milwaukeevalve.com>)

### 2.2.4 Aisladores M.T. Y B.T.

Los aisladores cumplen las normas DIN 42530; 42531, están ubicados en la parte frontal del tanque, dentro del gabinete cubre bornes. Sirven para conectar la parte activa del transformador hacia el exterior llevando corriente y tensión de transformación aislándolos adecuadamente según el BIL de tensión. Se ha usado en este caso el de la marca Cedaspe.

Tienen las siguientes características:

- M.T. : 12 kV, 250 A, montaje exterior, BIL 75 kV Seis unidades (Figura 2.13)
- B.T. : 1 kV, 1250 A, montaje exterior, BIL 20 kV Tres unidades. (Figura 2.14)



**Figura 2.13** Aisladores de Media tensión (Fuente: Propia)



**Figura 2.14** Aisladores de Baja tensión (Fuente: Propia)

### 2.2.5 Deshumecedor

Sirve para filtrar la humedad que ingresa al transformador como consecuencia de la expansión y contracción térmica del aceite en funcionamiento propio del transformador, se elige por el volumen o peso de aceite que tiene cada transformador, en el caso de estudio se emplea de la marca CEDASPE TV 75NE (Figura 2.15)



**Figura 2.15** Deshumecedor TV 75NE (Fuente: [www.cedaspe.com](http://www.cedaspe.com))

### 2.2.6 Placa de características

Los principales datos del transformador están en la placa de características; y se especifican: tipo de transformador, norma empleada, año de fabricación, etc. Las normas establecen los datos mínimos que deben colocarse en estas placas (IEC 60076-1), debe

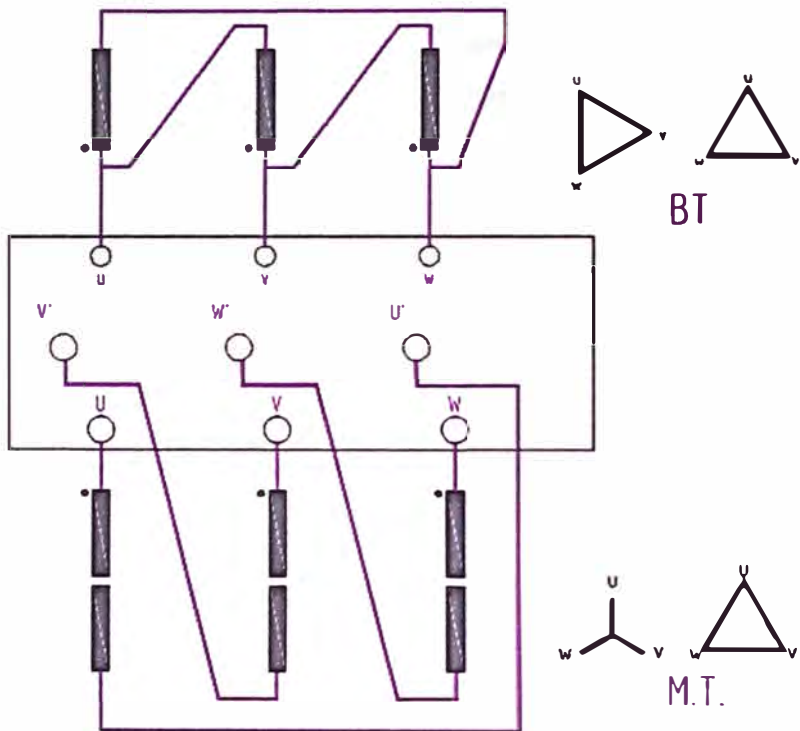
AV. EL BOSQUE 187 && TELEF. 961719261 && LIMA-PERU

# TRASERTON

## TRANSFORMADOR TRIFASICO MULTITAP

TIPO	T030	SERIE	2013-15201
KVA(DNANI)	520	AÑO	2013
RT (kV)	0.48/1328-4.6	ALTURA	1000 m s n m
H <sub>z</sub>	35 - 90		
GRUPO	Dd0 - Yd11		
Δ ACEITE	60 °C		
Δ ARROLL	65 °C		
C M T (MAX)	130.53		
C M T (MIN)	65.27		
C B T	627.55		
NORMA	IEC 60076		
ENFRIAMIENTO	ONAN		
MONTAJE	EXTERIOR		
SERVICIO	CONTINUO		
%Vcc			
BIL EXT MT (kV)	75		
BIL INT MT (kV)	60		
BIL EXT BT (kV)	20		
BIL INT BT (kV)	20		
ACEITE	NYNAS		
PESOS (kg)	Nytra Izar I		
PARTE ACTIVA	1557		
ACEITE	970		
TANQUE	466		
TOTAL	3108		

N°	VOLTAJE VACIO	C A R G A	
		FASE	FASE
1	4.600	65.27	65.27
2	4.424	67.06	67.06
3	4.227	70.09	70.09
4	4.069	73.78	73.78
5	3892	77.14	77.14
6	3775	80.81	80.81
7	3539	84.83	84.83
8	3382	89.30	89.30
9	3185	94.26	94.26
10	3007	99.84	99.84
11	2830	106.09	106.09
12	2654	113.12	113.12
13	2477	121.20	121.20
14	2300	130.53	130.53
N°	VOLTAJE VACIO	C A R G A	
		FASE	FASE
15	2656	113.04	65.27
16	2554	117.55	67.06
17	2452	122.44	70.09
18	2349	127.81	73.78
19	2247	133.61	77.14
20	2145	139.86	80.81
21	2043	146.95	84.83
22	1941	154.47	89.30
23	1839	162.25	94.26
24	1736	170.93	99.84
25	1634	180.33	106.09
26	1532	190.87	113.12
27	1430	200.95	121.20
28	1328	226.07	130.53



INDUSTRIA DEL PERU

Figura 2.6 Placa de características referencial del Transformador de distribución Multitap

estar colocada en un lugar bien visible e impreso en forma indeleble. Cuanto mayor es la importancia de la máquina, mayor es la información que da el fabricante. Se muestra en la Figura 2.16 la placa de características referencial del transformador Multitap.



### CAPÍTULO III DISEÑO Y CÁLCULO DEL TRANSFORMADOR MULTITAP

En este capítulo se precisan los requerimientos del proyecto y luego se detalla la metodología usada para el diseño y construcción del transformador Multitap especificado.

#### 3.1 Datos de partida

Se entiende como datos de partida a la solicitud del cliente respecto a máquina eléctrica, en este caso respecto a un transformador Multitap como parte de un sistema BES (Sistema de Bombeo Electrosumergible); los datos de partida para el caso de estudio se muestran a continuación.

<b>Potencia:</b>	520 kVA
<b>Tensión primaria</b>	480 V
<b>Tensión secundaria</b>	Ver Tabla 3.1

**Tabla 3.1** Tensión secundaria en volts (Fuente: Proyecto cliente)

14 valores básicos	14 valores extendidos
4600	2656
4424	2554
4247	2452
4069	2349
3892	2247
3715	2145
3539	2043
3362	1941
3185	1839
3007	1736
2830	1634
2654	1532
2477	1430
2300	1328

<b>Frecuencia</b>	:	35 a 90 Hz
<b>Grupo conexión</b>	:	Yd11 – Dd0
<b>Altitud trabajo (msnm)</b>	:	1000
<b>Norma de fabricación</b>	:	IEC 76
<b>Refrigeración</b>	:	ONAN
<b>Montaje</b>	:	Exterior

Un transformador de calidad debe cumplir en su totalidad el requerimiento especificado por el cliente.

Es necesario recalcar lo siguiente respecto al diseño:

- La altitud de trabajo se considera ya que, a mayor altitud de trabajo se tiene menor la densidad del aire en la atmósfera, y es el aire el elemento que logra la transferencia del calor irradiado por las aletas de refrigeración. Dado que la presencia de aire es menor, se debe aumentar la superficie de disipación (aumento de aletas de refrigeración)
- IEC 76: Es una norma internacional cuyo código extendido es la IEC 60076. Este estándar está orientado al diseño de transformadores de potencia. El IEC 76 posee varias partes (Ver anexo I) que van desde las generalidades hasta la profundización de cada aspecto relacionado al tema, tales como corto circuito, sobrecargas, aptitud para soportar cortocircuitos, calentamiento, ruido, ensayo de impulso, guía de aplicación, entre los más importantes. Dado su extensión solo se hará referencia puntual a lo correspondiente.
- ONAN: Se refiere a un enfriamiento interno del aceite en forma natural (no es forzada) La refrigeración externa es realizada al aire natural (no es forzada)
- Montaje exterior: El transformador trabajará a la intemperie, es decir no estará dentro de ninguna edificación o gabinete adicional. Dado el escenario se selecciona un índice de protección IP 55 [7], lo cual significa que la entrada de polvo no puede evitarse, pero el mismo no debe entrar en una cantidad tal que interfiera con el correcto funcionamiento del equipamiento (Ver anexo I)
- Frecuencia: Normalmente los transformadores son fabricados para trabajar a una frecuencia específica (60 o 50 Hz), Para el caso del diseño Multitap debe funcionar en un rango desde 35 hasta 90 Hz., debido al variador de velocidad y su acoplamiento con el motor y el equipamiento de fondo, propio del pozo petrolero.
- Grupo conexión Yd11 – Dd0: Tiene dos funcionalidades, la primera es la de poder ponerse en paralelo con otro transformador de igual grupo de conexión y de potencia de relación de hasta 3 veces, a fin de aumentar la potencia en dicho sistema; la segunda es para obtener los 14 niveles de tensión adicionales, totalizando las 28 salidas de niveles de tensión requeridos.

### **3.2 Dimensiones principales**

Esta sección se enfoca en determinar las dimensiones principales del transformador. Esta se refieren a:

- Número de espiras y sección del núcleo: La sección del núcleo es calculada de acuerdo a la potencia del transformador, y el número de espiras es calculada de acuerdo a la relación de tensión entradas/salida. Ambas están concatenadas, es decir que de acuerdo a un valor de sección de núcleo le corresponde un determinado número de espiras para

la misma relación de volt de entrada / volt salida.

- Altura del núcleo: Depende del número de capas que tenga el arrollamiento y el nivel de tensión. A más capas es menor la altura (y también menor la tensión). Todo ello para poder tener una tensión de cortocircuito adecuado para la potencia dada según normas.

- Ancho de ventana: A mayor tensión y a mayor número de capas el ancho de ventanas es mayor.

### 3.2.1 Número de espiras y sección del núcleo

Primero se calcula la sección (área) del núcleo tomando en cuenta un criterio según Richter [8], según lo define la siguiente Fórmula (3.1)

$$S = C_1 \sqrt{\frac{P}{f}} \quad (3.1)$$

Dónde:

S: Es la sección o área (cm<sup>2</sup>)

C<sub>1</sub>: Factor que varía en un rango de 75 a 95

P: Potencia del transformador (kVA)

f: Frecuencia del transformador (Hz)

Dado que el transformador debe trabajar en un rango de 35 a 90 Hz, para el cálculo se parte de una frecuencia de 60 Hz. Mientras que el C<sub>1</sub> se considera igual a 90. Cumpliendo así con Richter. Con ello se obtiene una sección S = 264,952826 cm<sup>2</sup>

La sección no es perfectamente circular, sino que está conformada por varios escalones (Anexo C) y además se considera un factor de apilamiento debido a los aislamientos entre planchas. Se propondrá que la sección esté conformada por 10 escalones, y considerando un factor de apilamiento de 0,98 se puede obtener el diámetro, el cual es 191 mm. Las características de los escalones se ven en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2** Características de los escalones del núcleo (Fuente: Propia)

Escalón	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	190	19,52
2	180	44,36
3	170	23,19
4	160	17,24
5	150	13,93
6	130	21,69
7	110	16,21
8	90	12,32
9	70	9,24
10	60	3,62

Luego se prosigue con el cálculo del número de espiras, según la Fórmula (3.2)

$$E = C_2 f N B S \quad (3.2)$$

Dónde:

- E: Tensión inducida en el arrollamiento (volts)  
 C<sub>2</sub>: Factor de forma. Depende la forma de onda, para el caso, onda sinusoidal: 4,44  
 f: Frecuencia (Hz)  
 N: Número de espiras.  
 B: Inducción magnética (tesla)  
 S: Sección (área) del núcleo del transformador (m<sup>2</sup>)

Para el cálculo se considera una inducción magnética "B" de partida de 1,2 T (dada la variación de frecuencias). Este es un valor bajo respecto al convencional (1,7 T), tampoco se asume un valor más bajo porque es antieconómico trabajar con inducciones muy bajas. La frecuencia "f" también se asume 60 Hz. Despejando la Fórmula (3.2) se obtiene:

- B.T. → 480 V      N= 56 espiras en el arrollamiento de baja tensión.
- M.T. → 4600 V      N= 310 espiras en el arrollamiento de media tensión.

Dado que son tensión variables en la salida, se tienen las derivaciones según se muestra en la Tabla 3.3

**Tabla 3.3** Número espiras para las derivaciones (Fuente: Propia)

Tensión ( V )	N
4600	310
4424	298
4247	286
4069	274
3892	262
3715	250
3539	238
3362	226
3185	215
3007	203
2830	191
2654	179
2477	167
2300	155

Seguidamente se hallan las corrientes que circulan por los devanados.

La baja tensión tiene un grupo de conexión en delta. Por ello se calculan las corrientes "I" en amperes según la Fórmula (3.3)

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} E} \quad (3.3)$$

Dónde:

- P: Potencia (kVA)  
 E: Tensión (kV)

Con lo cual se obtiene  $I_{BT} = 625,46$  A. Dado que la conexión es en delta, la corriente de fase es calculada dividiendo la corriente obtenida entre  $\sqrt{3}$ , teniendo  $I_f = 361$  A

Para M.T se usa la misma Fórmula (3.3); para este caso la conexión es en Estrella-Delta. La Tabla 3.4 muestra los valores obtenidos (en Estrella “ $I_f$ ” es la misma que “ $I$ ”)

**Tabla 3.4** Corrientes de fase de M.T. (Fuente: Propia)

Tensión Estrella( V)	$I = I_f$ (A)	Tensión Delta (V)	$I/\sqrt{3}= I_f$ (A)
4600	65,26	2656	65,26
4424	67,86	2554	67,86
4247	70,69	2452	70,69
4069	73,78	2349	73,78
3892	77,13	2247	77,13
3715	80,81	2145	80,81
3539	84,83	2043	84,83
3362	89,29	1941	89,29
3185	94,26	1839	94,26
3007	99,84	1736	99,84
2830	106,08	1634	106,08
2654	113,12	1532	113,12
2477	121,20	1430	121,20
2300	130,53	1328	130,53

### 3.2.2 Altura del núcleo

Como se mencionó, la altura depende del número de capas que tenga el arrollamiento y el nivel de tensión. A más capas es menor la altura (y también es menor la tensión); todo ello para poder tener una tensión de cortocircuito adecuado según normas (Ver anexo I), alrededor de 4% de 480 V = 19,2 V

Para la metodología empleada se ha usado una hoja de cálculo en Excel. Según lo desarrollado, se introduce en la hoja un valor de altura asumido de 690 mm. Este valor hace variar otros valores en la hoja, tal como la tensión de corto circuito, el número de capas de los arrollamientos y la distancia entre arrollamientos y yugos. Al seleccionar un valor menor de altura, esto se reflejaba en los cálculos, por ejemplo variando el número de capas (y se corregía si no era el adecuado) variaba la distancia radial de bobina, etc.

Es por ello que con la metodología aplicada se obtiene este valor de altura adecuado que corresponde con el número de capas y demás valores buscados, tal como la tensión de cortocircuito el cual es calculado, para verificar el correcto porcentaje obtenido respecto a la tensión nominal (sección 3.8)

### 3.2.3 Ancho de ventana

Como se mencionó, a mayor tensión y a mayor número de capas el ancho de

ventanas es mayor. Para M.T. 6 capas (y 5 capas para B.T.) se obtiene un ancho de ventana de 175 mm. La relación de altura Vs. Ancho optimizado para un costo de material mínimo es de aproximadamente 3,65 (Ver anexo I, también Ver Tabla 4.4), para el caso del diseño del transformador en estudio es de 3,94 (690 / 175)

### 3.2.4 Peso del núcleo

La Tabla 3.5 muestra las dimensiones geométricas de los 10 escalones que componen el núcleo. Se indica para cada componente en mm (columnas y yugos) el largo por altura de cada pieza (A-B; G-H; E-F) y la cantidad de piezas respectivamente, para luego obtener para cada escalón su espesor y peso. Finalmente el peso total es la suma de los pesos de los escalones, obteniéndose un total de 812,6 kg.

**Tabla 3.5** Dimensiones geométricas escalones del núcleo (Fuente: Propia)

ESC.	Espesor (mm)	Columna Lateral			Columna Central			Yugo Trapezoidal			Yugo SemiTrapezoidal			PESO (kg)
		Cant.	A	B	Cant	G	H	Cant.	C	D	Cant.	E	F	
1	19,52	147	1070	190	74	880	190	147	544	190	147	376	190	114,0
2	44,36	335	1060	180	167	880	180	335	534	180	335	376	180	243,7
3	23,19	175	1050	170	87	880	170	175	524	170	175	376	170	119,4
4	17,24	130	1040	160	65	880	160	130	514	160	130	376	160	82,9
5	13,93	105	1030	150	53	880	150	105	504	150	105	376	150	62,3
6	21,69	164	1010	130	82	880	130	164	484	130	164	376	130	82,9
7	16,21	122	990	110	61	880	110	122	464	110	122	376	110	51,6
8	12,32	93	970	90	46	880	90	93	444	90	93	376	90	31,6
9	9,24	70	950	70	35	880	70	70	424	70	70	376	70	18,1
10	3,62	27	940	60	14	880	60	27	414	60	27	376	60	6,0
<b>Peso TOTAL</b>													<b>812,6</b>	

### 3.3 Aislamientos y distancias

Esta sección se enfoca en determinar los aislamientos y distancias. Se toma en consideración los siguientes factores:

- Aislamientos de los conductores o aislamiento entre espiras: La finalidad de los aislamientos de los conductores y entre espiras es para proporcionar un adecuado aislamiento dieléctrico para poder soportar el ensayo de impulso y de la tensión inducida. Asimismo sirve de soporte mecánico ante los esfuerzos de cortocircuito que hubiese.
- Aislamiento entre capas: Cumple dos objetivos: el primero es el de proporcionar aislamiento dieléctrico para la tensión de prueba, el segundo es colocar canales de refrigeración para evacuar el calentamiento producido por la bobina. Este aislamiento debe ser capaz de soportar la prueba de tensión aplicada.
- Aislamientos entre bobinas M.T.-B.T.: Cumple el objetivo de aislar las bobinas de M.T.

de la bobina de B.T., esto con la finalidad de soportar la prueba de tensión aplicada, se debe tener mucho cuidado con seleccionar la distancia de separación, si ella es muy grande entonces la tensión de cortocircuito será muy grande, lo que es contraproducente pues sería difícil cumplir con las normas.

- Aislamiento entre devanados concéntricos y respecto al núcleo: el objetivo es el de aislar las dos bobinas exteriores en M.T., esto para soportar la prueba de tensión inducida y para proporcionar una adecuada separación. Respecto al núcleo se debe aislar la bobina de baja tensión con un cartón de 01 mm o más dependiendo de la tensión del arrollamiento más cercano al núcleo, esto es mas de carácter mecánico que eléctrico.

- Distancia entre los bobinados y la cuba: Es necesaria para poder soportar la tensión aplicada. Es necesario contemplar el espacio para las salidas de los conductores de conexiones debido a que podría no cumplirse la distancia dieléctrica de estos conductores hacia la cualquier parte del tanque.

Teniendo los valores de altura de ventana y ancho de ventana se procede a realizar la determinación de los parámetros mencionados.

### **3.3.1 Aislamientos de los conductores o aislamiento entre espiras**

Para la B.T. se emplea platina forrada con un biespesor de 0,6 mm con rigidez dieléctrica de 0,1 mm/kV (papel kraft en Anexo B), para consideraciones mecánicas se sobredimensiona a 0,6 mm ya que es capaz de manejar eléctricamente 6 kV. El valor de volt por espiras se calcula con la relación  $E/N = 480 / 56$ , obteniéndose 8,57 volt por espira.

El efecto logrado con esta solución es un gran aislamiento eléctrico ya que solo se requiere un aislamiento para 8,57 V. pero se proporciona para 6 kV. Este valor es incluso suficiente para las pruebas de tensión inducida en donde llegaría al doble (17,14V)

Para la M.T. se emplea platina forrada con un espesor de 0,6 mm con rigidez dieléctrica de 0,1 mm/kV. El valor de los volt por espiras es de  $(4600/310) / \sqrt{3}$ , obteniéndose 8,57 volt por espira o también  $(2300/155) / \sqrt{3} = 8,57$  volt por espira.

El sobredimensionamiento del espesor del papel se explica para efectos mecánicos y/o constructivos, al momento de la fabricación del arrollamiento, un papel más delgado podría romperse con la consecuente pérdida de aislamiento.

### **3.3.2 Aislamiento entre capas**

Es necesario recalcar que dado que se ha determinado 5 capas para baja tensión y el número de espiras es de 56, entonces el número de espiras por capa es 11,5 (11,5 en las primeras 4 capas y 10 espiras en la última capa)

Para el lado de media tensión se tiene 310 espiras para 6 capas, obteniéndose el número de espiras es 56,5 para las primeras 4 capas y 42 para las dos últimas capas.

Esta última consideración para facilitar las salidas de derivación.

Dado que el diseño contempla diferentes valores de espiras por capa, entonces se debe considerar el caso más crítico para la obtención de los valores de volts por capa, ello dado por la relación (espiras por capa) x (volts por espira),

- En B.T. los volts por capa son  $11,5 \times 8,57 = 98,55$  V/capa

- En M.T. los volts por capa son  $56,5 \times 8,57 = 484,205$  V/capa

El forrado se realiza con un papel presspan (Anexo B) de rigidez dieléctrica 0,083 mm/kV (5/60 es la condición más desfavorable); para la prueba de tensión inducida, los V/capa se multiplican por 4 para cada arrollamiento, obteniéndose:

- B.T.  $\rightarrow 394,2$  V

- M.T.  $\rightarrow 1936,82$  V

El espesor de papel requerido se obtiene de considerar estos niveles de tensión hallados por 3 (factor de seguridad de 3), para cada arrollamiento:

- En B.T.:  $0,3942 \times 3 = 1,1826$  kV; Con esto se tiene:  $0,083 \times 1,1826 = 0,09816$  mm

- En M.T.:  $1,9368 \times 3 = 5,8105$  kV; Con esto se obtiene:  $0,083 \times 5,8105 = 0,48227$  mm

El espesor seleccionado es 0,38 mm para B.T. y de 0,51 mm para la M.T. Con ello se tiene un adecuado aislamiento dieléctrico y buen soporte mecánico de construcción.

### 3.3.3 Aislamientos entre bobinas M.T. - B.T.

Se consideran tanto al papel como al aceite. Para ilustrar la selección del aislamiento se recurre a la Figura 3.1. En donde:

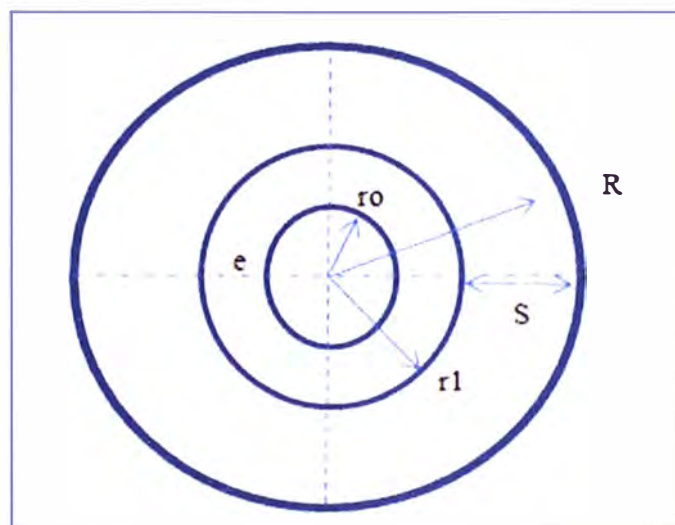
-  $r_o$ : Radio exterior del arrollamiento de B.T. (mm)

-  $e$ : Espesor del papel de aislamiento. (mm)

-  $S$ : Espesor del aceite de aislamiento. (mm)

-  $r_1$ : Radio exterior del arrollamiento de B.T. incluyendo al papel de aislamiento (mm)

-  $R$ : Radio interior del arrollamiento de M.T. (mm)



**Figura 3.1** Esquema de arrollamientos y aislamientos (Fuente: Propia)



Para los cálculos se contemplan las permitividades dieléctricas del papel y del aceite [9]. Para ello se recurre a la Tabla 3.6

**Tabla 3.6** Esfuerzos dieléctricos en el aceite

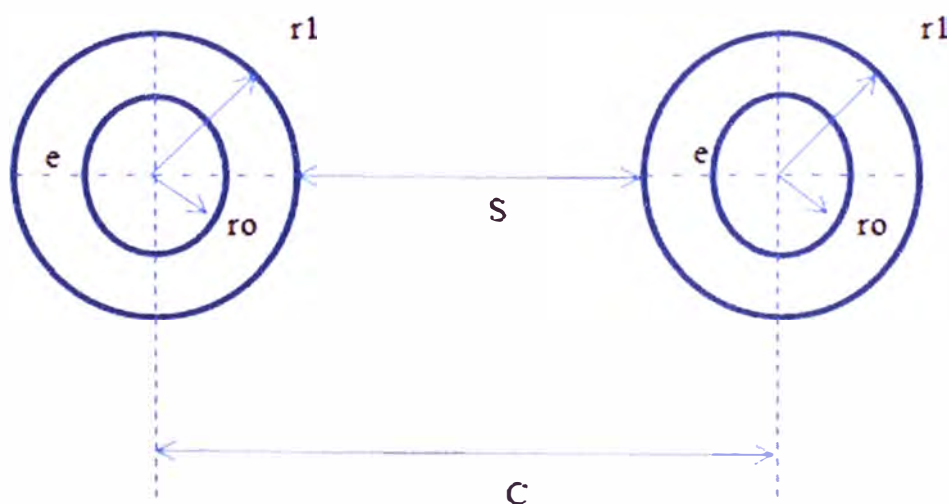
Intensidad de Campo (kV/mm) : $E_{max\ oil}$	4,5
Tensión de prueba (kV)	20
espesor de aislamiento "e" (mm)	4
Radio del cilindro R (mm)	131,52
radio del cilindro $r_o$ (mm)	124,02
radio del cilindro aislado (mm)	128,02
distancia cilindro aislado-cilindro R= "S" (mm)	3,5
permitividad del papel	4,5
permitividad del aceite	2,2
Factor de seguridad "FS"	1
Valor calculado para el gradiente del aceite (kV/mm)	3,6766

Como el valor calculado para el gradiente del aceite es menor que la intensidad de campo, se considera que este aislamiento papel–aceite es el adecuado para la tensión de prueba que se someterá al arrollamiento. Ver en Anexo G las fórmulas utilizadas.

### 3.3.4 Aislamiento entre devanados concéntricos M.T. - M.T. y B.T. respecto al núcleo

La Figura 3.2 muestra ambos devanados de M.T. En donde:

- $r_o$ : Radio exterior del arrollamiento de M.T. (mm)
- e: Espesor del papel de aislamiento. (mm)
- $r_1$ : Radio exterior del arrollamiento de M.T. incluyendo al papel de aislamiento. (mm)
- S: Espesor del aceite de aislamiento. (mm)
- C: Distancia entre ejes de los arrollamientos de M.T. (mm)



**Figura 3.2** Devanados de M.T. (Fuente: Propia)

Para el cálculo se recurre a la Tabla 3.7

**Tabla 3.7** Esfuerzos dieléctricos en el aceite

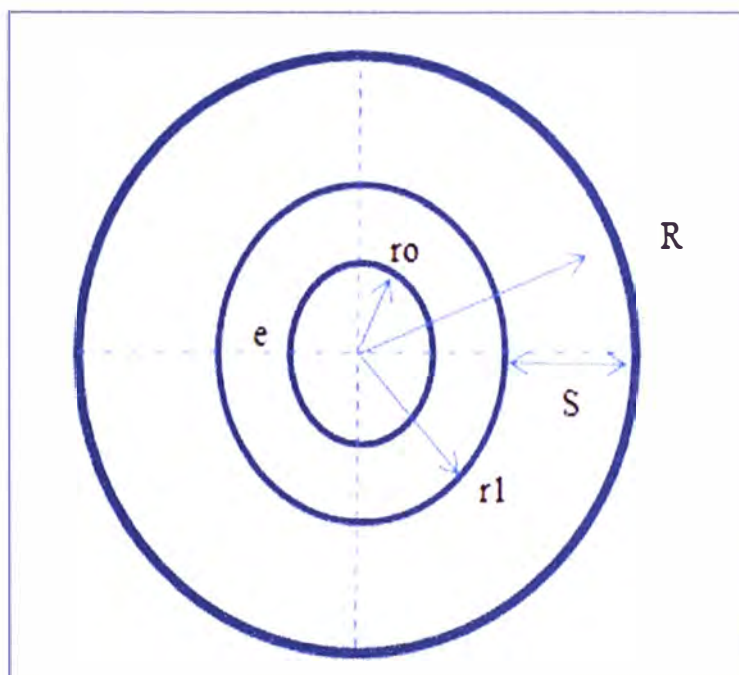
Intensidad de campo (kV/mm) : $E_{max\ oil}$	4,5
Tensión de prueba (kV)	20
espesor de aislamiento "e" (mm)	0
radio del cilindro $r_o$ (mm)	171,67
radio del cilindro aislado (mm)	171,67
distancia cilindro aislado-cilindro aislado "S" (mm)	21,66
distancia / ejes cilindros "C" (mm)	365
permitividad del papel	3,8
permitividad del aceite	2,2
Factor de seguridad "FS"	1,25
Valor calculado para el gradiente del aceite (kV/mm)	1,1784

Como el valor calculado para el gradiente del aceite es menor que la Intensidad de Campo, se considera que este aislamiento del aceite es el adecuado para la tensión de prueba que se someterá al arrollamiento. Ver en el anexo G las fórmulas utilizadas.

Para la parte de aislamiento de B.T. respecto al núcleo se recurre a la Figura 3.3

En donde:

- $r_o$ : Radio exterior del núcleo. (mm)
- e: Espesor del papel de aislamiento. (mm)
- S: Espesor del aceite de aislamiento. (mm)
- $r_1$ : Radio exterior del núcleo incluyendo al papel de aislamiento. (mm)
- R: Radio interior del arrollamiento de B.T. (mm)



**Figura 3.3** Esquema de arrollamiento B.T. y núcleo (Fuente: Propia)

Para el cálculo se recurre a la Tabla 3.8

**Tabla 3.8** Esfuerzos dieléctricos en el aceite

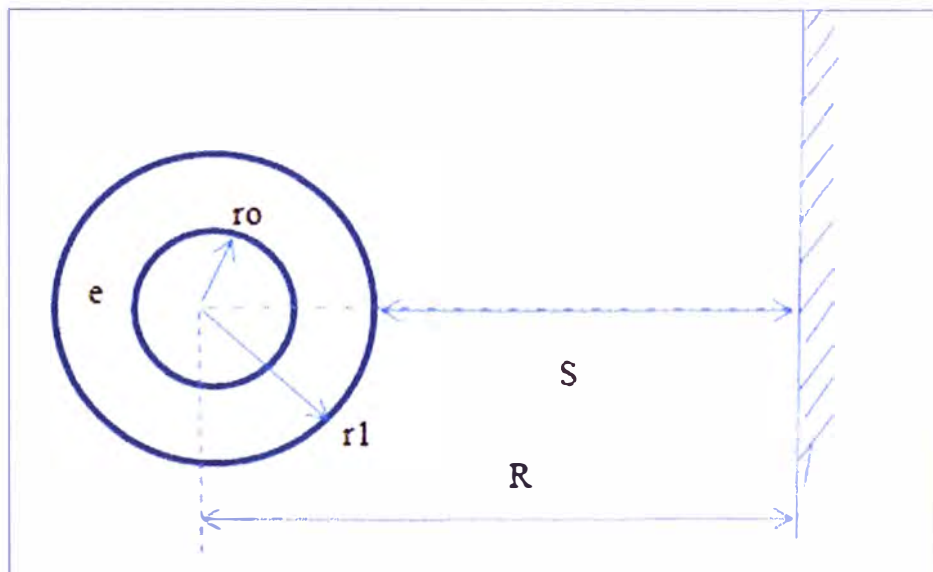
Intensidad de campo (kV/mm) : $E_{max\ oil}$	4,5
Tensión de prueba (kV)	3
espesor de aislamiento "e" (mm)	1
Radio del cilindro R (mm)	99
radio del cilindro $r_o$ (mm)	95,5
radio del cilindro aislado (mm)	96,5
distancia cilindro aislado-cilindro R = "S"(mm)	2,5
permitividad del papel	4,5
permitividad del aceite	2,2
Factor de seguridad "FS"	1
Valor calculado para el gradiente del aceite (kV/mm)	1,01

Como el valor calculado para el gradiente del aceite es menor que la Intensidad de Campo, se considera que este aislamiento del aceite es el adecuado para la tensión de prueba que se someterá al arrollamiento. Ver en el Anexo G las fórmulas utilizadas.

### 3.3.5 Distancia entre los bobinados y la cuba.

La Figura 3.4 muestra el devanado de M.T. y la pared de la cuba del transformador. En donde:

- $r_o$ : Radio exterior del arrollamiento de M.T. (mm)
- e: Espesor del papel de aislamiento (mm)
- $r_1$ : Radio exterior del arrollamiento de M.T. incluyendo al papel de aislamiento. (mm)
- S: Distancia del papel hacia la cuba (mm)
- R: Distancia del eje del arrollamiento hacia la cuba (mm)



**Figura 3.4** Devanado de M.T. y cuba (Fuente: Propia)

Para el cálculo se recurre a la Tabla 3.9

**Tabla 3.9** Esfuerzos dieléctricos en el aceite

Intensidad de campo (kV/mm) : Emax oil	4,5
Tension de prueba ( kV )	20
espesor de aislamiento "e" ( mm )	0
Radio del cilindro R (mm)	269,67
radio del cilindro ro (mm)	171,67
radio del cilindro aislado (mm)	171,67
distancia cilindro aislado-pared cuba "S" (mm)	98
permitividad del papel	4,5
permitividad del aceite	2,2
Factor de seguridad "FS"	2,8
Valor calculado para el gradiente del aceite (kV/mm)	0,6765

Como el valor calculado para el gradiente del aceite es menor que la Intensidad de Campo, se considera que este aislamiento del aceite es el adecuado para la tensión de prueba que se someterá al arrollamiento de M.T. Ver en el Anexo G las fórmulas usadas.

### 3.4 Sección de los devanados

La sección de los devanados depende del amperaje y se busca una densidad de corriente adecuada ( $A/mm^2$ ), esto para que el transformador pueda soportar una corriente de cortocircuito de dos segundos, según norma IEC 76-5 (Anexo H); se suele trabajar con una densidad de  $4 A/mm^2$ , sin embargo dado el caso especial del transformador (rango amplio de tensiones y frecuencias), se trabajará con densidades bajas para el cumplimiento de la aptitud de soportar cortocircuitos térmicamente durante el tiempo que señala la norma. Dado que las corrientes existentes en M.T. y B.T. son diferentes, las secciones también serán diferentes, asimismo cabe indicar que el lado de M.T. posee diferentes valores por la variedad en tensiones, se tomará en cuenta el caso crítico. El lado de Baja Tensión posee mayor amperaje y por ende tendrá un calibre de sus conductores mayor respecto al lado de Media Tensión. Se recurre a la Fórmula (3.4)

$$S = \frac{I}{\delta} \quad (3.4)$$

Dónde:

- S: Sección ,área del conductor ( $mm^2$ )
- I: Corriente nominal del arrollamiento (A)
- $\delta$ : Densidad de corriente ( $A/mm^2$ )

Para B.T. se tiene 361 A por fase, reemplazando se obtiene  $S = 90,25 mm^2$ . Se emplea 4 platinas en paralelo de  $2,7 \times 12$ ; dando un total de  $129,6 mm^2$ . Ahora, considerando el factor de curvatura en fillos para conductores rectangulares = 0,975 se obtiene un nuevo valor =  $126,36 mm^2$ . Finalmente se obtiene la densidad " $\delta$ " de B.T. igual

$$a \text{ I / S} = 2,8578 \text{ A/mm}^2$$

Para M.T. se recurre a dividir "I" entre "S" obteniéndose lo mostrado en la Tabla 3.10

**Tabla 3.10** Corrientes de fase de M.T. (Fuente: Propia)

Nº espiras	I = I <sub>f</sub>	Sección ( mm <sup>2</sup> )
310	65,26	16,31
298	67,86	16,96
286	70,69	17,67
274	73,78	18,44
262	77,13	19,28
250	80,81	20,20
238	84,83	21,20
226	89,29	22,32
215	94,26	23,56
203	99,84	24,96
191	106,08	26,52
179	113,12	28,28
167	121,20	30,30
155	130,53	32,63

Se escoge la mayor de las secciones obtenidas (32,63 mm<sup>2</sup>); para ello se selecciona una platina de 4,5 mm x 10,1 mm = 45,45 mm<sup>2</sup>. Aplicando el factor de curvatura en fillos para conductores rectangulares se obtiene un nuevo valor = 44,31375 mm<sup>2</sup>

Entonces la densidad con la que se va a trabajar para cada caso se muestra en la Tabla 3.11

**Tabla 3.11** Densidad de corrientes de fase de M.T (Fuente: Propia)

Nº espiras	I = I <sub>f</sub>	Densidad (A/mm <sup>2</sup> )
310	65,26	1,473
298	67,86	1,531
286	70,69	1,595
274	73,78	1,665
262	77,13	1,741
250	80,81	1,824
238	84,83	1,914
226	89,29	2,015
215	94,26	2,127
203	99,84	2,253
191	106,08	2,394
179	113,12	2,553
167	121,20	2,735
155	130,53	2,946

### 3.5 Pérdidas en el Fierro

Las pérdidas se refieren a que no toda la energía eléctrica es transferida y parte de ella se transforma en calor. Existen dos tipos de pérdidas:

- Histéresis: Se refiere a la energización y funcionamiento en vacío del transformador. Para el caso de estudio, que contempla frecuencias variables, se tendrán valores diferentes para cada frecuencia de operación.
- Corrientes parásitas: Se originan por el espesor de las planchas magnéticas. Dado que se genera un campo magnético, éste induce corrientes en los elementos metálicos cercanos propios del transformador. Estas corrientes son circulantes y ello produce calentamiento.

Las pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ) se calculan sumando las pérdidas por histéresis ( $a.f$ ) y las pérdidas por Foucault ( $b.f^2$ )

$$P_{fe} = a f + b f^2 \quad (3.5)$$

Dónde:

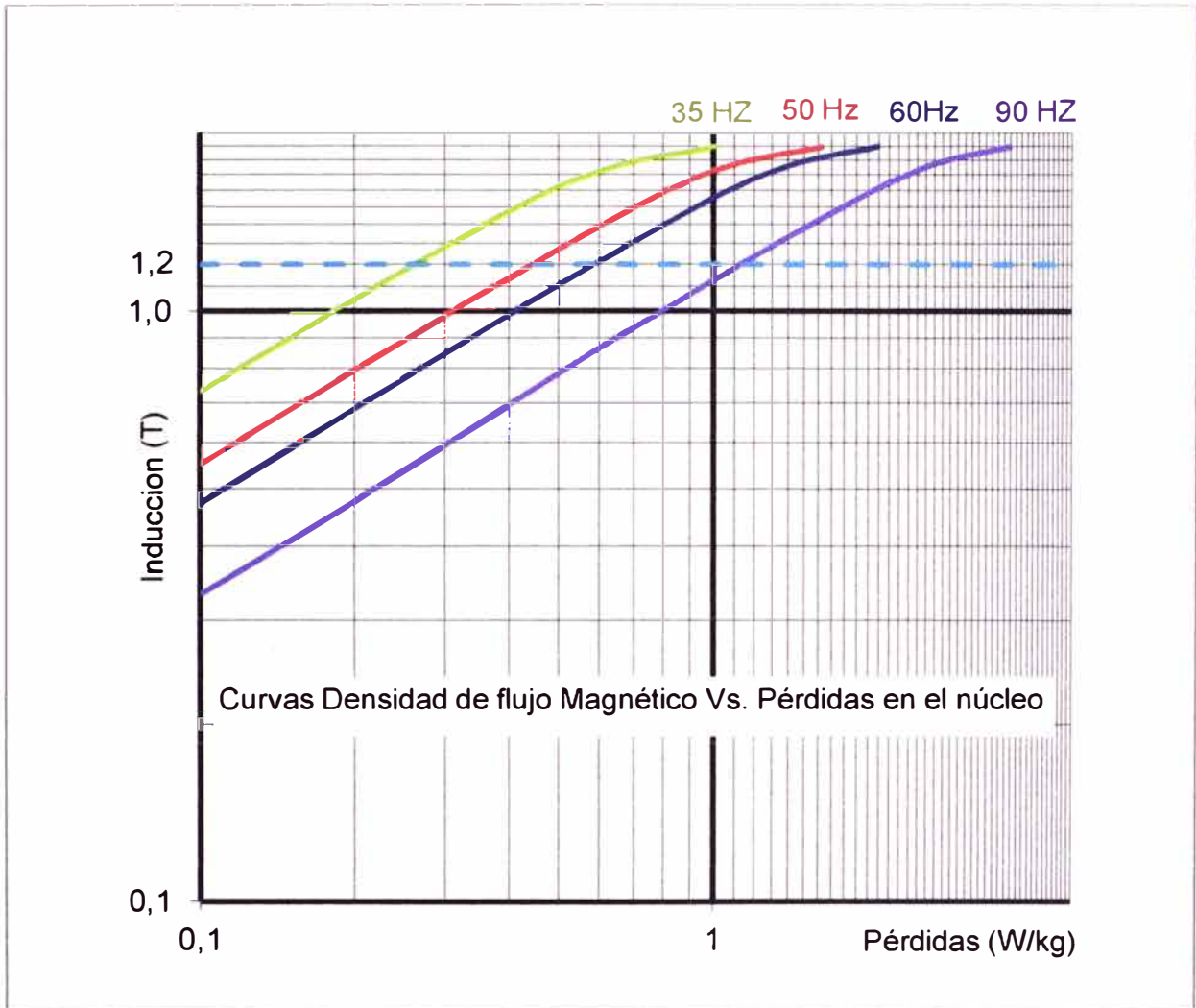
- a y b: Constantes para un nivel determinado de inducción magnética.
- f: Frecuencia (Hz)
- $P_{fe}$ : Pérdidas en el hierro (W/kg)

El fabricante provee los datos para las frecuencias de 50 y 60 Hz. Dado que es necesario conocer las curvas de las pérdidas en el hierro para las frecuencias de 35 y de 90 Hz., se procedió a averiguar preliminarmente el valor de las constantes "a" y "b" para cada densidad de flujo (T) para luego reemplazarla en la Fórmula (3.5) aplicándola a las frecuencias mencionadas. Los resultados de dichos cálculos se muestran en la Tabla 3.12 y en la Figura 3.5; Del mismo modo se realizan los cálculos para los VA de excitación, los cuales se aprecian en la Tabla 3.13 y Figura 3.6

**Tabla 3.12** Pérdidas (W/kg) para 35 y 90 Hz (Fuente: Propia)

(Tesla)	50 Hz	60 Hz	a	b	35 Hz	90 Hz
0,1	0,00362	0,00486	2,94E-05	0,00000086	0,0020825	0,009612
0,2	0,0139	0,01873	0,000107167	3,41667E-06	0,00793625	0,03732
0,3	0,0308	0,0414	0,000246	7,4E-06	0,017675	0,08208
0,4	0,0539	0,0723	0,000443	0,0000127	0,0310625	0,14274
0,5	0,0826	0,1105	0,000703667	1,89667E-05	0,0478625	0,21696
0,6	0,1168	0,1558	0,001032667	2,60667E-05	0,068075	0,30408
0,7	0,1563	0,208	0,001422667	3,40667E-05	0,091525	0,40398
0,8	0,201	0,267	0,00187	0,000043	0,118125	0,5166
0,9	0,252	0,334	0,002406667	5,26667E-05	0,14875	0,6432
1	0,308	0,409	0,002876667	6,56667E-05	0,181125	0,7908
1,1	0,371	0,492	0,00352	7,8E-05	0,21875	0,9486
1,2	0,441	0,584	0,004253333	9,13333E-05	0,26075	1,1226

1,3	0,518	0,686	0,004993333	0,000107333	0,30625	1,3188
1,4	0,602	0,798	0,00574	0,000126	0,35525	1,5372
1,5	0,698	0,924	0,00676	0,000144	0,413	1,7748
1,6	0,805	1,064	0,007933333	0,000163333	0,47775	2,037
1,7	0,95	1,25	0,009833333	0,000183333	0,56875	2,37
1,8	1,168	1,523	0,013243333	0,000202333	0,711375	2,8308
1,9	1,622	2,09	0,020473333	0,000239333	1,00975	3,7812

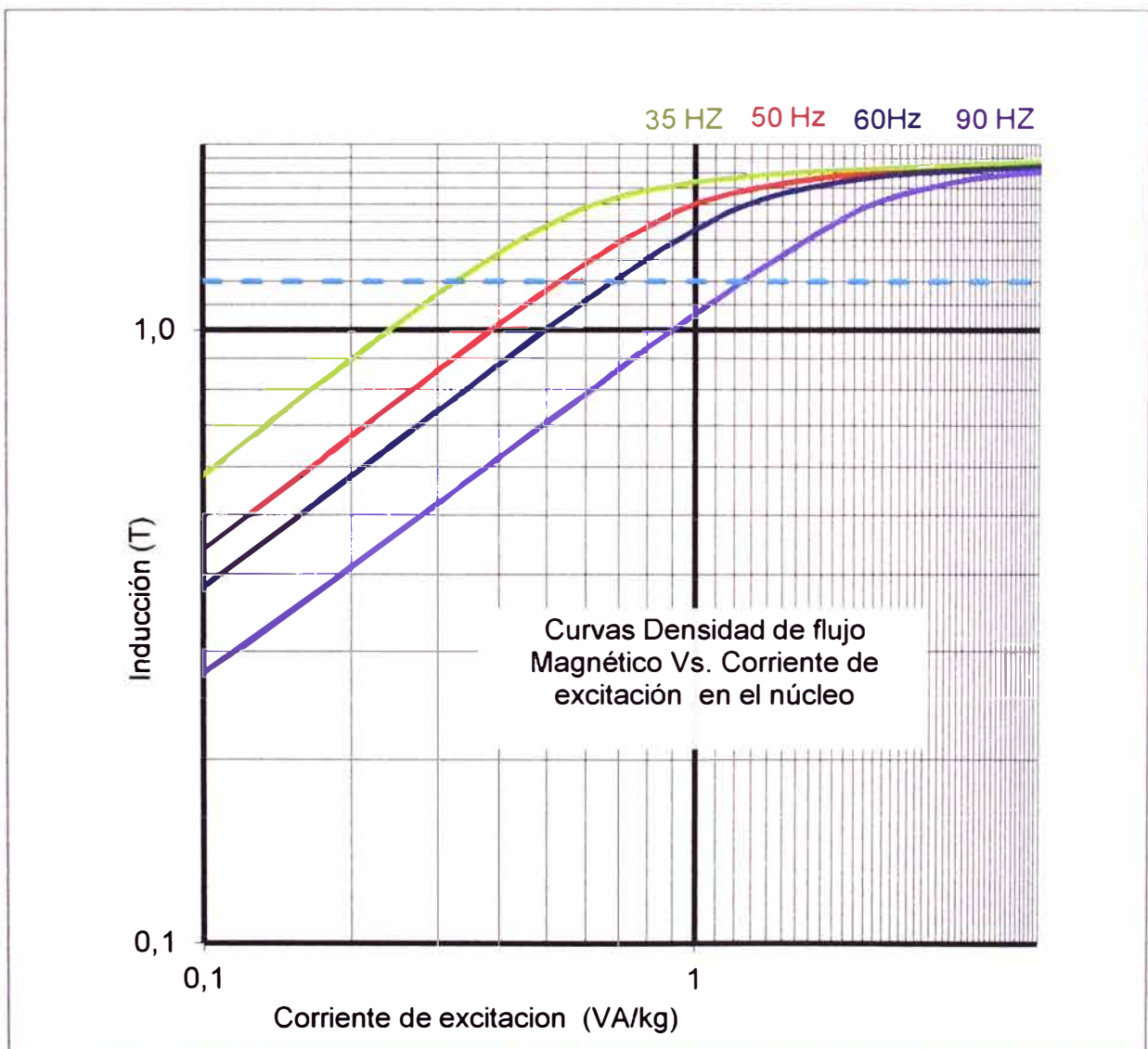


**Figura 3.5** Pérdidas en el hierro (Fuente: Propia)

**Tabla 3.13** VA de excitación (VA/kg) para 35 y 90 Hz (Fuente: Propia)

(Tesla)	50 Hz	60 Hz	a	b	35 Hz	90 Hz
0,1	0,00724	0,00912	0,0001088	7,2E-07	0,00469	0,015624
0,2	0,0252	0,0319	0,000365667	2,76667E-06	0,0161875	0,05532
0,3	0,0517	0,0657	0,000729	6,1E-06	0,0329875	0,11502
0,4	0,0847	0,1079	0,001172333	1,04333E-05	0,0538125	0,19002
0,5	0,1229	0,1569	0,001673	0,0000157	0,0777875	0,27774
0,6	0,1659	0,212	0,002241333	2,15333E-05	0,104825	0,37614
0,7	0,213	0,273	0,00281	0,000029	0,133875	0,4878

0,8	0,265	0,341	0,003383333	3,83333E-05	0,165375	0,615
0,9	0,322	0,414	0,00414	0,000046	0,20125	0,7452
1,0	0,384	0,495	0,00483	0,000057	0,238875	0,8964
1,1	0,451	0,583	0,005536667	6,96667E-05	0,279125	1,0626
1,2	0,526	0,680	0,006453333	8,13333E-05	0,3255	1,2396
1,3	0,612	0,791	0,007523333	9,43333E-05	0,378875	1,4412
1,4	0,708	0,915	0,00871	0,000109	0,438375	1,6668
1,5	0,830	1,069	0,010516667	0,000121667	0,517125	1,932
1,6	0,989	1,268	0,013013333	0,000135333	0,62125	2,2674
1,7	1,309	1,664	0,018413333	0,000155333	0,83475	2,9154
1,8	2,22	2,75	0,037233333	0,000143333	1,47875	4,512
1,9	9,03	11,02	0,165266667	0,000306667	6,16	17,358



**Figura 3.6** VA de excitación en el hierro (Fuente: Propia)

Con los valores obtenidos de la Tabla 3.12 y Tabla 3.13 se procede a calcular las pérdidas y VA de excitación en el núcleo, para diversas frecuencias, considerando el peso del núcleo. Estos cálculos se muestran en la Tabla 3.14 (factor de manufactura de



pérdidas =1,15) y la Tabla 3.15 (el factor de manufactura de VA de excitación = 5,925)

**Tabla 3.14** Pérdidas en el núcleo en watts (Fuente: Propia)

(Tesla)	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
0,1	1,946	3,383	4,541	8,982
0,2	7,416	12,989	17,503	34,874
0,3	16,517	28,781	38,687	76,701
0,4	29,027	50,368	67,562	133,385
0,5	44,726	77,187	103,258	202,741
0,6	63,614	109,145	145,589	284,152
0,7	85,527	146,057	194,368	377,505
0,8	110,384	187,827	249,502	482,744
0,9	139,001	235,485	312,111	601,047
1,0	169,255	287,815	382,196	738,974
1,1	204,414	346,686	459,756	886,432
1,2	243,661	412,098	545,727	1049,029
1,3	286,180	484,052	641,042	1232,371
1,4	331,968	562,547	745,702	1436,458
1,5	385,934	652,256	863,444	1658,486
1,6	446,440	752,243	994,269	1903,503
1,7	531,476	887,741	1168,080	2214,679
1,8	664,754	1091,454	1423,188	2645,280
1,9	943,575	1515,700	1953,029	3533,394

**Tabla 3.15** VA de excitación (Fuente: Propia)

(Tesla)	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
0,1	22,580	34,857	43,908	75,222
0,2	77,935	121,326	153,583	266,339
0,3	158,819	248,911	316,314	553,766
0,4	259,081	407,790	519,487	914,855
0,5	374,509	591,704	755,398	1337,185
0,6	504,682	798,729	1020,678	1810,933
0,7	644,544	1025,493	1314,364	2348,523
0,8	796,201	1275,848	1641,751	2960,930
0,9	968,922	1550,275	1993,211	3587,780
1,0	1150,068	1848,776	2383,187	4315,735
1,1	1343,853	2171,348	2806,865	5115,908
1,2	1567,126	2532,437	3273,873	5968,078
1,3	1824,101	2946,486	3808,285	6938,686
1,4	2110,565	3408,680	4405,285	8024,841
1,5	2489,708	3996,051	5146,721	9301,652
1,6	2991,020	4761,560	6104,811	10916,442
1,7	4018,920	6302,206	8011,361	14036,250
1,8	7119,471	10688,233	13239,929	21723,112
1,9	29657,440	43475,111	53056,005	83570,430

### 3.6 Pérdidas en el cobre

Para este caso se pueden mencionar cuatro tipos de pérdidas:

- **Efecto Joule:** Debido a la resistencia de los arrollamientos y a la frecuencia variable se obtiene calentamiento en el conductor.
- **Parásitas:** Originados por la frecuencia. Esto dado a que el arrollamiento de la bobina es principalmente un elemento inductivo y dado que la reactancia es directamente proporcional a la frecuencia, las pérdidas parásitas son mayor cuanto mayor es la frecuencia. Se va a requerir que el ancho radial sea mucho menor que el ancho axial, esto ayuda a que las pérdidas sean bajas.
- **Por las conexiones:** Una mala conexión significa una menor área de contacto y por lo tanto mayor resistencia, lo que trae como consecuencia un calentamiento en esa zona. Una mayor corriente origina mayores pérdidas por conexiones.
- **Por flujos transversales:** La diferencia de alturas de los arrollamientos de M.T. y B.T. ocasionan pérdidas de flujo transversales por los ampere - espiras no compensadas. Se requiere que las alturas de los arrollamientos sean lo más iguales posibles. Una gran diferencia ocasionaría pérdidas muchos mayores.

Sin embargo es necesario previamente conocer el peso del cobre en B.T. y en M.T. Esta sección está organizada de tal manera que primero se calcula el peso del cobre y luego las pérdidas de cada caso y finalmente se muestra las pérdidas totales a 75 °C.

#### 3.6.1 Peso del cobre

Los arrollamientos de B.T. y M.T. son del tipo capas.

El diámetro del núcleo es 191 mm, se ha dejado un espacio para el montaje de 2,5 mm, a partir de ello una base cartón presspan de 1 mm de espesor como aislamiento del núcleo al arrollamiento de B.T., con esto se tiene un diámetro interior de B.T. de 198 mm ( $191 + 2,5 \times 2 + 1 \times 2 = 198$ ), la platina utilizada en B.T. es 4 en paralelo de 2,7 x 12 mm con biespesor de 0,6 mm de forrado, por tanto la platina forrada será de 3,3 x 12,6 mm axialmente se colocaran las 4 platinas, entonces se tendrá la platina de 3,3 x 50,4 mm radial y axialmente respectivamente.

El papel entre capas es de 0,38 mm y se tienen 5 capas con lo cual radialmente se tiene un radio en B.T. de  $3,3 \times 5 + 0,38 \times 4 = 18,02$  mm, asimismo se ha colocado 2 canales de refrigeración en B.T. de 3,5 mm cada uno, esto se tendrá que sumar al radio hasta el momento para obtener un radio exterior en B.T.:  $18,02 + 3,5 \times 2 = 25,02$  mm, el diámetro medio que se obtiene así es :  $\phi_m = (\phi_i + \phi_e)/2$ , donde  $\phi_i = 198$  mm,  $\phi_e = 198 + 2 \times 25,02 = 248,04$  mm, obteniéndose un diámetro medio de 223,02 mm

Axialmente se tienen 11,5 espiras en las 4 primeras capas, con lo cual se obtiene  $(11,5 + 1) \times 50,4 = 630$  mm de altura axial, y en la última capa se tendrá  $(10 + 1) \times 50,4 =$

554,4 mm de altura axial.

La separación entre M.T. y B.T. es un canal de 3,5 mm y un cartón de 4 mm, total de separación de 7,5 mm.

El diámetro hasta el momento es  $248,04 + 2 \times 7,5 = 263,04$  mm, donde empieza el arrollamiento de M.T. (diámetro interior de M.T.)

La platina utilizada en M.T. es una platina de  $4,5 \times 10,1$  mm con biespesor de 0,6 mm de forrado, por tanto la platina forrada será de  $5,1 \times 10,7$  mm; radial y axialmente respectivamente.

El papel entre capas es de 0,51 mm, y se tienen 6 capas con lo cual radialmente se tiene un radio en M.T. de  $5,1 \times 6 + 0,51 \times 5 = 33,15$  mm; asimismo se ha colocado 2 canales de refrigeración en B.T. de 3,5 mm cada uno, esto se tendrá que sumar al radio hasta el momento para obtener un radio exterior en M.T.:  $33,15 + 3,5 \times 2 = 40,15$  mm; el diámetro medio que se obtiene así es :  $\phi_m = (\phi_i + \phi_e)/2$  , donde  $\phi_i = 263,04$  mm,  $\phi_e = 263,04 + 2 \times 40,15 = 343,34$  mm; obteniéndose un diámetro medio de 303,19 mm.

Axialmente se tienen 56,5 espiras en las 4 primeras capas, con lo cual se obtiene  $(56,5 + 1) \times 10,7 = 615,25$  mm de altura axial, y en las 2 últimas capas se tendrá  $(42 + 1) \times 10,7 = 460,1$  mm, pero se adicionará 1 separador de 50 mm en las 2 últimas capas, con lo cual se tiene  $460,1 + 1 \times 50 = 510,1$  mm de altura axial.

El peso del cobre para cada fase se calcula con la siguiente Fórmula (3.6)

$$\text{Peso} = \gamma_{\text{Cu}} L_m S N + 600 \gamma_{\text{Cu}} S \quad (3.6)$$

Dónde:

- $\gamma_{\text{Cu}}$ : Peso específico del cobre =  $8,9 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>
- $L_m$ : Longitud media del arrollamiento =  $\pi \phi_m$  ;  $\pi = 3,1416$ ;  $L_m$  en mm
- S: Sección del conductor (B.T. 126,36 mm<sup>2</sup>; M.T. 44,31375 mm<sup>2</sup>)
- N: Número de espiras (B.T. → 56; y en M.T. → 310)

Teniendo en cuenta que el diámetro medio ( $\phi_m$ ) del arrollamiento es en B.T. → 223,02 mm y en M.T. → 303,19 mm Se obtiene un peso por fase de:

- B.T.: 44,799 kg
- M.T.: 116,691 kg

El peso total se halla multiplicando tales valores por tres (transformador trifásico con 03 bobinas en cada columna del núcleo)

- B.T.: 134,4 kg
- M.T.: 350,07 kg

### 3.6.2 Pérdidas por efecto Joule

Las pérdidas se calculan en watts con la siguiente Fórmula (3.7)

$$\text{Pérdidas}_{\text{Joule}} = \rho_{75^\circ} / \gamma \text{ Peso } \delta^2 \quad (3.7)$$

Dónde:

-  $\rho_{75^\circ}/\gamma$ : Resistividad/peso específico del conductor a 75 °C = 2,4313  $\Omega \cdot m$

-  $\delta$ : Densidad de corriente B.T. ( $A/mm^2$ )  $\rightarrow$  2,8578  $A/mm^2$

Obteniéndose que las Pérdidas<sub>Joule</sub>

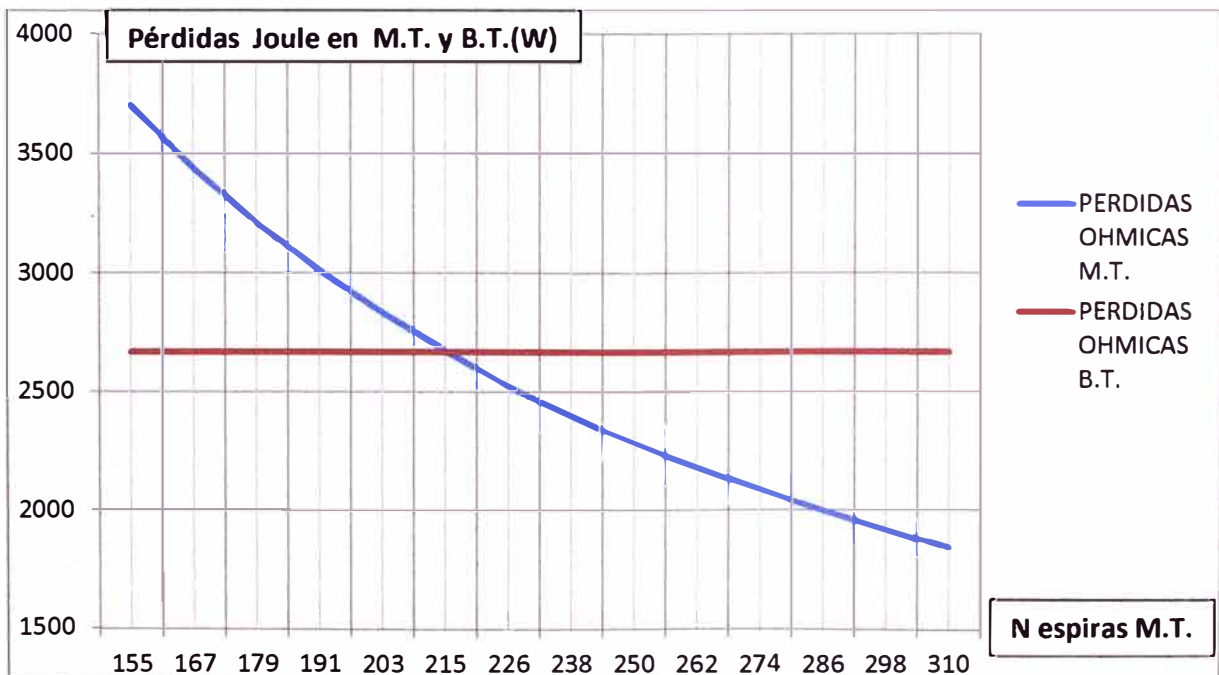
- B.T. 2668,75 W

- M.T. Para las pérdidas en M.T. ver Tabla 3.16 y las pérdidas en M.T. y B.T. por efecto Joule se muestran en la Figura 3.7

**Tabla 3.16** Pérdidas por efecto Joule en M.T. (Fuente: Propia)

Nº espiras	Peso (kg)	Densidad ( $A/mm^2$ )	Pérdidas ( W )
310	350,072	1,473	1846,299
298	336,549	1,531	1919,011
286	323,025	1,595	1998,626
274	309,501	1,665	2086,157
262	295,978	1,741	2180,585
250	282,454	1,824	2283,966
238	268,930	1,914	2396,284
226	255,406	2,015	2521,717
215	243,010	2,127	2673,404
203	229,486	2,253	2832,365
191	215,962	2,394	3009,296
179	202,439	2,553	3207,386
167	188,915	2,735	3436,165
155	175,391	2,946	3700,086

Se ve que el valor más crítico es 3700,086 W (Pérdidas en M.T.)



**Figura 3.7** Pérdidas Óhmicas en los arrollamientos (Fuente: Propia)

### 3.6.3 Pérdidas parásitas

Son calculadas mediante la siguiente Fórmula (3.8) en watts.

$$\text{Pérdidas parásitas} = A \left(\frac{f}{60}\right)^2 \left(\left(\frac{N}{c} h_c \frac{n_a}{H_a}\right)^2 r^4 ((n_r c)^2 - 0,2)\right) \text{Pérdidas}_{\text{Joule}} \quad (3.8)$$

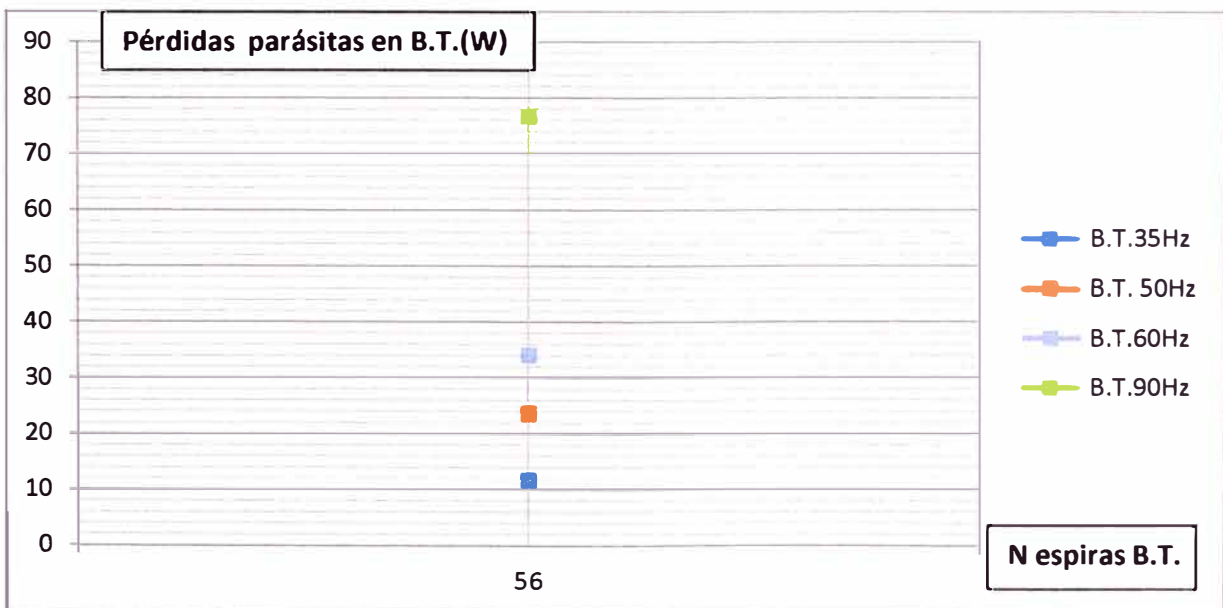
Dónde:

- A: Constante =  $1,331 \times 10^{-5} \text{ H}^2/(\text{m}^4 \cdot \Omega^2)$
- f: Frecuencia (Hz)
- N: Número de espiras
- c: Número de capas
- $h_c$ : Altura axial del conductor (mm)
- $n_a$ : Número de conductores axial por espira
- $H_a$ : Altura axial del arrollamiento (mm)
- r: Altura radial del conductor (mm)
- $n_r$ : Número de conductores radial por espira

Para el caso de B.T. se muestran los resultados en la Tabla 3.17; se muestran los resultados para las frecuencias 35; 50; 60 y 90 Hz, tomando en cuenta que las pérdidas Joule en B.T. son 2668,75 W y el número de espiras es 56.

**Tabla 3.17** Pérdidas parásitas en B.T. (Fuente: Propia)

Pérdidas Joule ( W )	N	Pérdidas parásitas ( W )			
		35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
2668,75	56	11,6033	23,6802	34,0995	76,7239

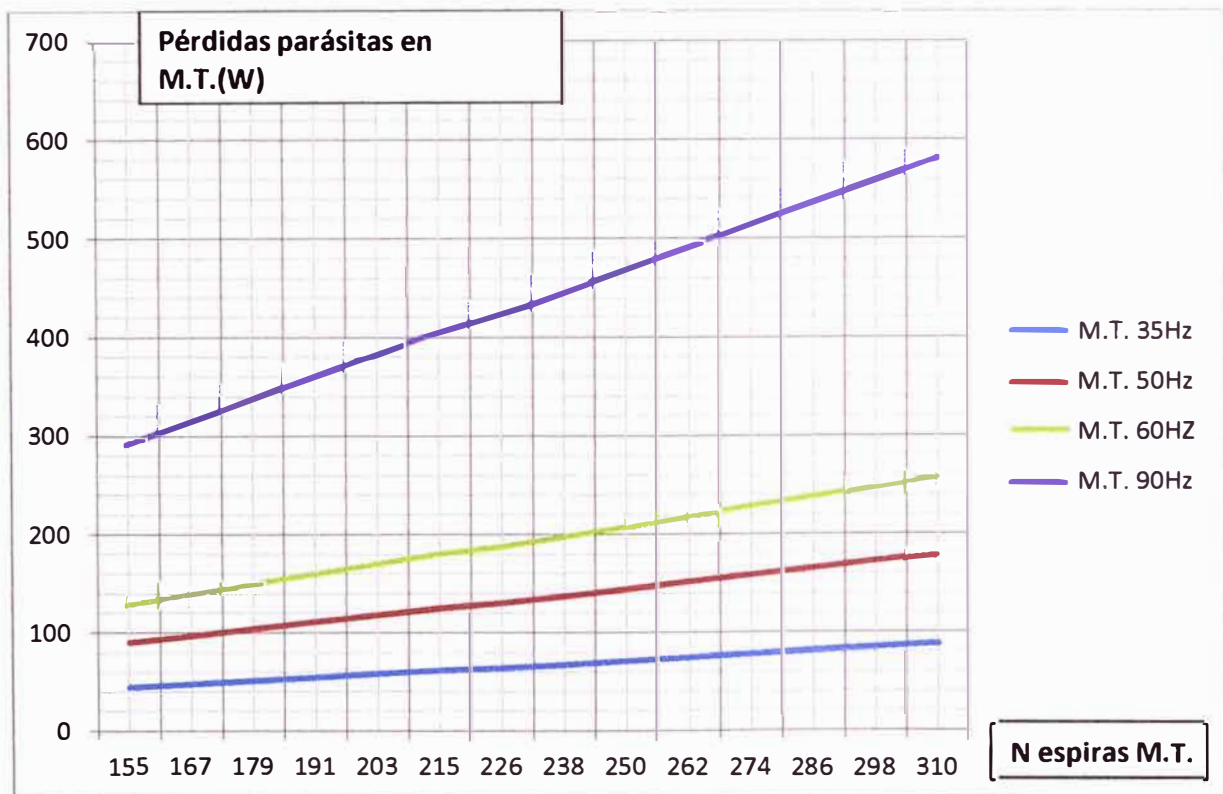


**Figura 3.8** Pérdidas Parásitas en B.T. (Fuente: Propia)

Para el caso de M.T. se muestran los resultados en la Tabla 3.18; para este caso se ve que el valor máximo es 584,0829 W

**Tabla 3.18** Pérdidas parásitas en M.T. (Fuente: Propia)

Pérdidas Joule ( W )	N	Pérdidas parásitas ( W )			
		35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
1846,30	310	88,3335	180,2725	259,5924	584,0829
1919,01	298	84,8419	173,1466	249,3312	560,9951
1998,63	286	81,3886	166,0992	239,1828	538,1614
2086,16	274	77,9737	159,1300	229,1472	515,5812
2180,58	262	74,5205	152,0826	218,9990	492,7477
2283,97	250	71,0673	145,0353	208,8509	469,9144
2396,28	238	67,5760	137,9101	198,5906	446,8288
2521,72	226	64,1229	130,8631	188,4429	423,9964
2673,40	215	61,5236	125,5583	180,8040	406,8090
2832,36	203	58,1087	118,5892	170,7685	384,2291
3009,30	191	54,6552	111,5413	160,6195	361,3938
3207,39	179	51,1632	104,4146	150,3571	338,3034
3436,16	167	47,7097	97,3668	140,2082	315,4685
3700,09	155	44,2563	90,3190	130,0594	292,6337

**Figura 3.9** Pérdidas Parásitas en M.T. (Fuente: Propia)

### 3.6.4 Pérdidas por las conexiones

Está dada por la siguiente Fórmula (3.9)

$$PD = I_f (C_1 H_a + C_2 I_f) \quad (3.9)$$

-  $C_1 = 7,2 \times 10^{-4}$  , para conexasión en Delta y  $6 \times 10^{-4}$  , para conexasión en estrella

-  $C_2 = 1,9 \times 10^{-4}$

- $H_a$ : Altura axial del arrollamiento (mm)
- $I_f$ : Corriente de fase del arrollamiento (A)
- PD: Pérdidas por conexiones (watts)

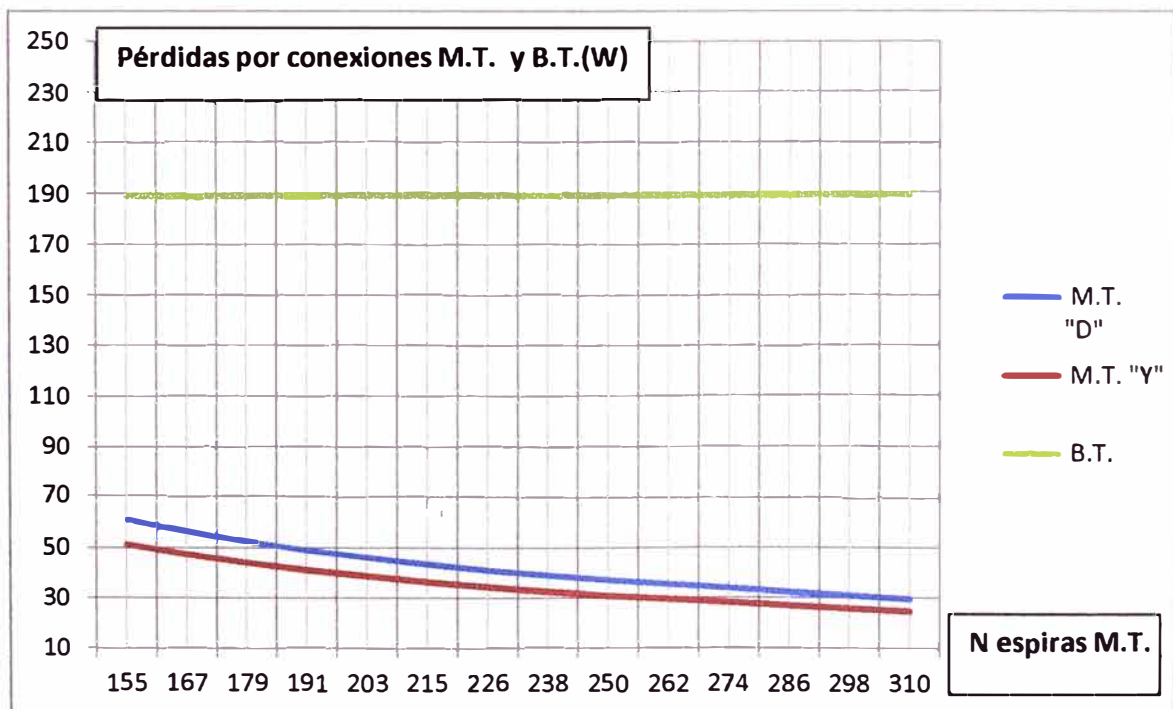
Para el caso de B.T. las pérdidas por conexiones son 188,5762 W

Para el caso de M.T. vemos la Tabla 3.19 y ambos casos se ven en la Figura 3.10

**Tabla 3.19** Pérdidas por las conexiones en M.T. (Fuente: Propia)

N	Corrientes de fase ( A )	En Delta ( W )	En Estrella ( W )
310	65,26	29,7185	24,9003
298	67,86	30,9390	25,9284
286	70,69	32,2640	27,0449
274	73,78	33,7222	28,2742
262	77,13	35,3020	29,6068
250	80,81	37,0371	31,0710
238	84,83	38,9512	32,6873
226	89,29	41,0738	34,4807
215	94,26	43,4406	36,4818
203	99,84	46,1241	38,7525
191	106,08	49,1290	41,2971
179	113,12	52,5518	44,1985
167	121,20	56,4861	47,5370
155	130,53	61,0555	51,4191

Se considera el mayor valor, el cual se da para el conexionado en delta para la corriente de fase 130,522 (155 espiras)



**Figura 3.10** Pérdidas por las conexiones (Fuente: Propia)

### 3.6.5 Pérdidas por flujos transversales

Las siguientes fórmulas nos servirán para realizar el cálculo de las pérdidas por flujos transversales en los arrollamientos de M.T. y B.T.

#### a. Flujo longitudinal, flujo transversal y razón axial del arrollamiento en B.T. y M.T.

Primeramente se muestra las fórmulas para hallar el flujo longitudinal ( $F_L$ ), el flujo transversal ( $F_T$ ) y la razón longitudinal del arrollamiento ( $R_L$ ):

$$F_L = r_c^4 ((n_r c)^2 - 0,2) \quad (3.10)$$

$$F_T = h_c^4 \left( \left[ \frac{N n_a}{2 c} \right]^2 - 0,2 \right) \quad (3.11)$$

$$R_L = \frac{N}{c} n_a \frac{h_c}{H_a} \quad (3.12)$$

Dónde:

- $r_c$ : Ancho radial del conductor (mm)
- $n_r$ : Número de conductores radiales por espira.
- $c$ : Número de capas.
- $h_c$ : Altura axial del conductor (mm)
- $n_a$ : Número de conductores axiales por espira.
- $N/c$ : Número de espiras por capa.
- $H_a$ : Altura axial de arrollamiento (mm)

#### b. Porcentaje de flujo máximo y razón transversal del arrollamiento.

El porcentaje de flujo máximo está dado por la siguiente Fórmula (3.13)

$$\chi = \frac{H_a' - H_a''}{\left( h_c n_a \frac{N}{c} \right)} \quad (3.13)$$

Y La razón transversal del arrollamiento ( $R_T$ ) está dada por la Fórmula (3.14)

$$R_T = \frac{n_r' c' r_c' + n_r'' c'' r_c''}{\frac{H_a' + H_a''}{2\pi} + r' + D + r'' + e} \quad (3.14)$$

Dónde:

- $H_a'$ : Altura del arrollamiento en B.T. (mm)
- $H_a''$ : Altura del arrollamiento en M.T. (mm)
- $n_r' c' r_c'$ : Los factores mencionados para B.T.
- $n_r'' c'' r_c''$ : Los factores mencionados para M.T.
- $r'$ : Ancho radial de B.T. (mm)
- $r''$ : Ancho radial de M.T. (mm)
- $D$ : Distancia entre arrollamiento M.T. y B.T. (mm)



- e: Distancia entre el núcleo y el arrollamiento B.T. (mm)

### c. Cálculo de pérdidas

Ya con las expresiones antes mencionadas, se procede a calcular las pérdidas por flujo transversal, lo cual está determinado por las siguientes fórmulas:

$$\text{Pérdidas}_{\text{Flujo transversal B.T.}} = 2X^2 \left( \frac{R_T}{R_L} \right)^2 \left( \frac{F_T}{F_L} \right) \text{Pérdidas}_{\text{parásitas B.T.}} \quad (3.15)$$

$$\text{Pérdidas}_{\text{Flujo transversal M.T.}} = 2X^2 \left( \frac{R_T}{R_L} \right)^2 \left( \frac{F_T}{F_L} \right) \text{Pérdidas}_{\text{parásitas M.T.}} \quad (3.16)$$

Los valores para los cálculos son resumidos en la Tabla 3.20

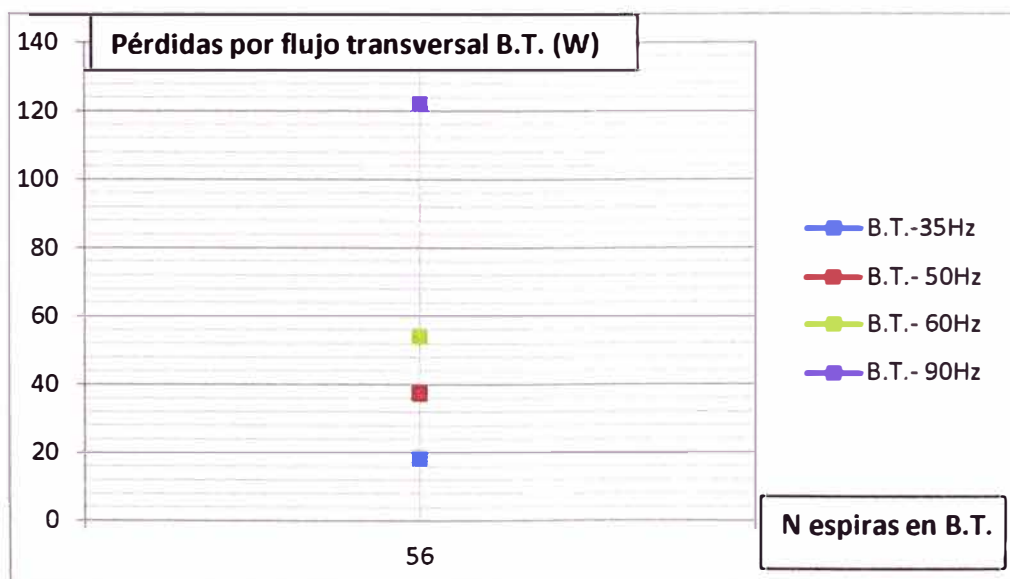
**Tabla 3.20** Valores para los cálculos en B.T. y M.T. (Fuente: Propia)

Valores para B.T.		Valores para M.T.	
$r_c'$	2,7	$r_c''$	4,5
$n_r'$	1	$n_r''$	1
$h_c'$	12	$h_c''$	10,1
$n_a'$	4	$n_a''$	1
$N'$	11,5 --- 10	$N''$	56.5 --- 42
$c'$	4 --- 1	$c''$	4 --- 2
$H_a'$	630 – 554,4	$H_a''$	615,25 – 510,1
$r'$	25,02	$r''$	40,15

Adicionalmente se tiene  $D = 7,5$  mm;  $e = 3,5$  mm; de donde se obtienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} F_L' &= 1317,97368; & F_T' &= 10400348; & R_L' &= 0,85333 \\ F_L'' &= 14680,2375; & X &= 0,05803796; & R_T &= 0,1476175 \end{aligned}$$

Las pérdidas por flujo transversal en B.T. se obtienen reemplazando en la Fórmula (3.15), para lo cual se elaboró la Tabla 3.21



**Figura 3.11** Pérdidas por flujo transversal en B.T. (Fuente: Propia)

**Tabla 3.21** Pérdidas por flujo transversal en B.T. (Fuente: Propia)

N	Pérdidas por flujo transversal en B.T. ( W )			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
56	18,4593	37,6721	54,2478	122,0575

Para hallar los valores de  $F_T''$  y  $R_L''$  en el arrollamiento de M.T., debido a que el número de espiras es variable se elaboró la Tabla 3.22

**Tabla 3.22**  $F_T''$  y  $R_L''$  para el arrollamiento de M.T. (Fuente: Propia)

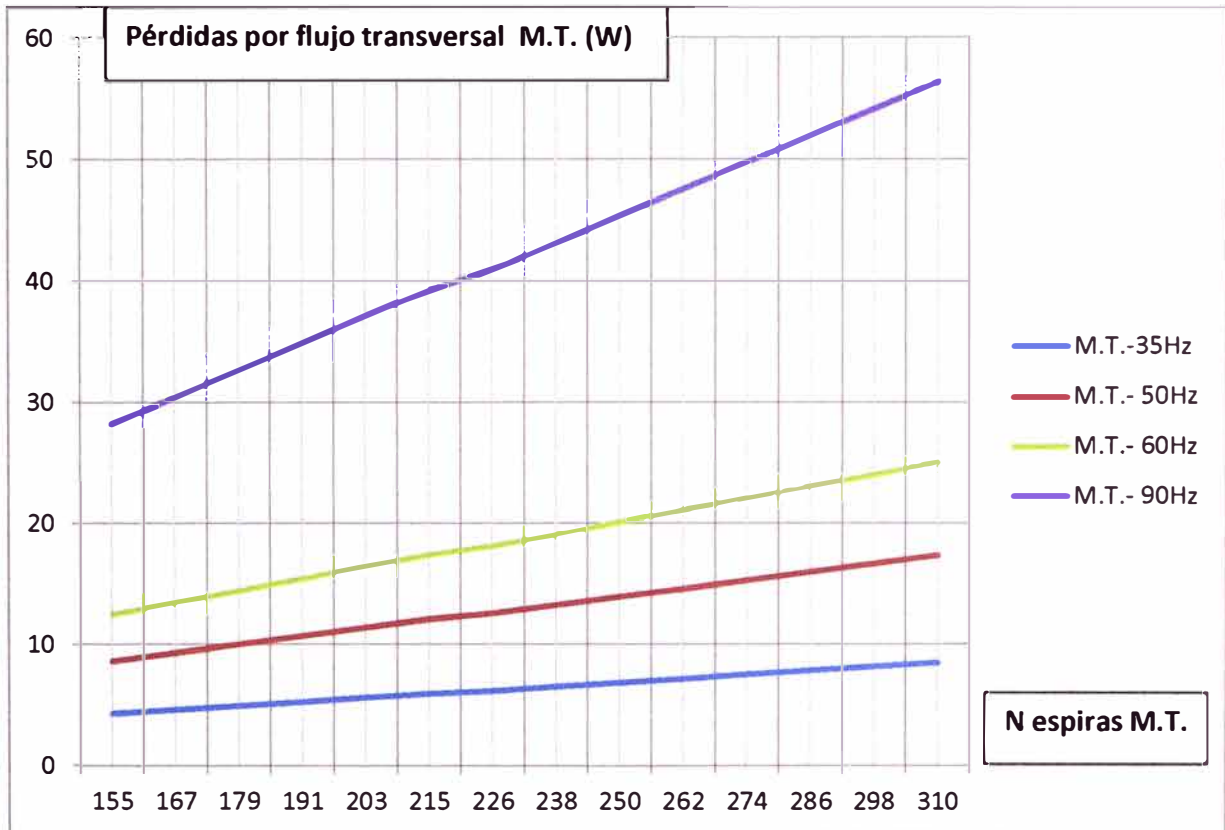
N	$F_T''$	$R_L''$
310	6942505,275	0,8482
298	6415265,91	0,8153
286	5908838,625	0,7825
274	5423223,421	0,7497
262	4958420,296	0,7168
250	4514429,252	0,6840
238	4091250,288	0,6512
226	3688883,404	0,6183
215	3338329,928	0,5882
203	2975852,865	0,5554
191	2634187,881	0,5226
179	2313334,978	0,4897
167	2013294,156	0,4569
155	1734065,413	0,4241

Asimismo para el lado de M.T. reemplazando en la Fórmula (3.16) se tiene el siguiente cuadro de pérdidas para las frecuencias indicadas, en donde se puede apreciar que el máximo valor se da para  $N = 310$  y  $f = 90$  Hz

**Tabla 3.23** Pérdidas por flujo transversal en M.T. (Fuente: Propia)

N	Pérdidas por flujo transversal en M.T. ( W )			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	8,5247	17,3973	25,0521	56,3673
298	8,1875	16,7092	24,0613	54,1379
286	7,8540	16,0287	23,0813	51,9329
274	7,5243	15,3557	22,1121	49,7523
262	7,1908	14,6751	21,1321	47,5472
250	6,8573	13,9945	20,1520	45,3421

238	6,5201	13,3063	19,1611	43,1125
226	6,1866	12,6257	18,1810	40,9072
215	5,9355	12,1132	17,4430	39,2467
203	5,6056	11,4400	16,4735	37,0655
191	5,2720	10,7591	15,4931	34,8595
179	4,9346	10,0706	14,5016	32,6286
167	4,6009	9,3896	13,5210	30,4222
155	4,2671	8,7085	12,5402	28,2154



**Figura 3.12** Pérdidas por flujo transversal en M.T. (Fuente: Propia)

Por lo tanto, las pérdidas para el caso crítico son a 90 Hz

- Pérdidas<sub>Flujo transversal BT</sub> = 122,0575 W

- Pérdidas<sub>Flujo transversal MT</sub> = 56,3673 W

Luego las pérdidas totales críticos será la suma de estos valores = 178,6248 W

### 3.6.6 Pérdidas totales en el Cobre

Las pérdidas totales en el transformador se obtienen de sumar las pérdidas por efecto Joule, las pérdidas parásitas, las pérdidas por conexiones y las pérdidas por flujo transversal en M.T. y B.T.

#### a. Pérdidas en B.T.

Se resumen a continuación, en la Tabla 3.24

**Tabla 3.24** Pérdidas en el cobre para B.T. en watts (Fuente: Propia)

Pérdidas en B.T. ( W )				
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
Joule	2668,748	2668,748	2668,748	2668,748
parásitas	11,603	23,680	34,100	76,724
conexiones	188,576	188,576	188,576	188,576
flujo transversal	18,459	37,672	54,248	122,058
<b>Pérdidas totales en B.T.</b>	<b>2887,387</b>	<b>2918,677</b>	<b>2945,672</b>	<b>3056,106</b>

**b. Pérdidas en M.T.**

Se resumen a continuación, en la Tabla 3.25

**Tabla 3.25** Pérdidas en el cobre para M.T. en watts (Fuente: Propia)

N	Pérdidas Joule	Pérdidas parásitas				Pérdidas Conex.		Pérdidas flujo transversal			
		35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	D	Y	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	1846,30	88,33	180,27	259,59	584,08	29,72	24,90	8,52	17,40	25,05	56,37
298	1919,01	84,84	173,15	249,33	561,00	30,94	25,93	8,19	16,71	24,06	54,14
286	1998,63	81,39	166,10	239,18	538,16	32,26	27,04	7,85	16,03	23,08	51,93
274	2086,16	77,97	159,13	229,15	515,58	33,72	28,27	7,52	15,36	22,11	49,75
262	2180,58	74,52	152,08	219,00	492,75	35,30	29,61	7,19	14,68	21,13	47,55
250	2283,97	71,07	145,04	208,85	469,91	37,04	31,07	6,86	13,99	20,15	45,34
238	2396,28	67,58	137,91	198,59	446,83	38,95	32,69	6,52	13,31	19,16	43,11
226	2521,72	64,12	130,86	188,44	424,00	41,07	34,48	6,19	12,63	18,18	40,91
215	2673,40	61,52	125,56	180,80	406,81	43,44	36,48	5,94	12,11	17,44	39,25
203	2832,36	58,11	118,59	170,77	384,23	46,12	38,75	5,61	11,44	16,47	37,07
191	3009,30	54,66	111,54	160,62	361,39	49,13	41,30	5,27	10,76	15,49	34,86
179	3207,39	51,16	104,41	150,36	338,30	52,55	44,20	4,93	10,07	14,50	32,63
167	3436,16	47,71	97,37	140,21	315,47	56,49	47,54	4,60	9,39	13,52	30,42
155	3700,09	44,26	90,32	130,06	292,63	61,06	51,42	4,27	8,71	12,54	28,22

Luego sumando las pérdidas de M.T. se muestra en la Tabla 3.26

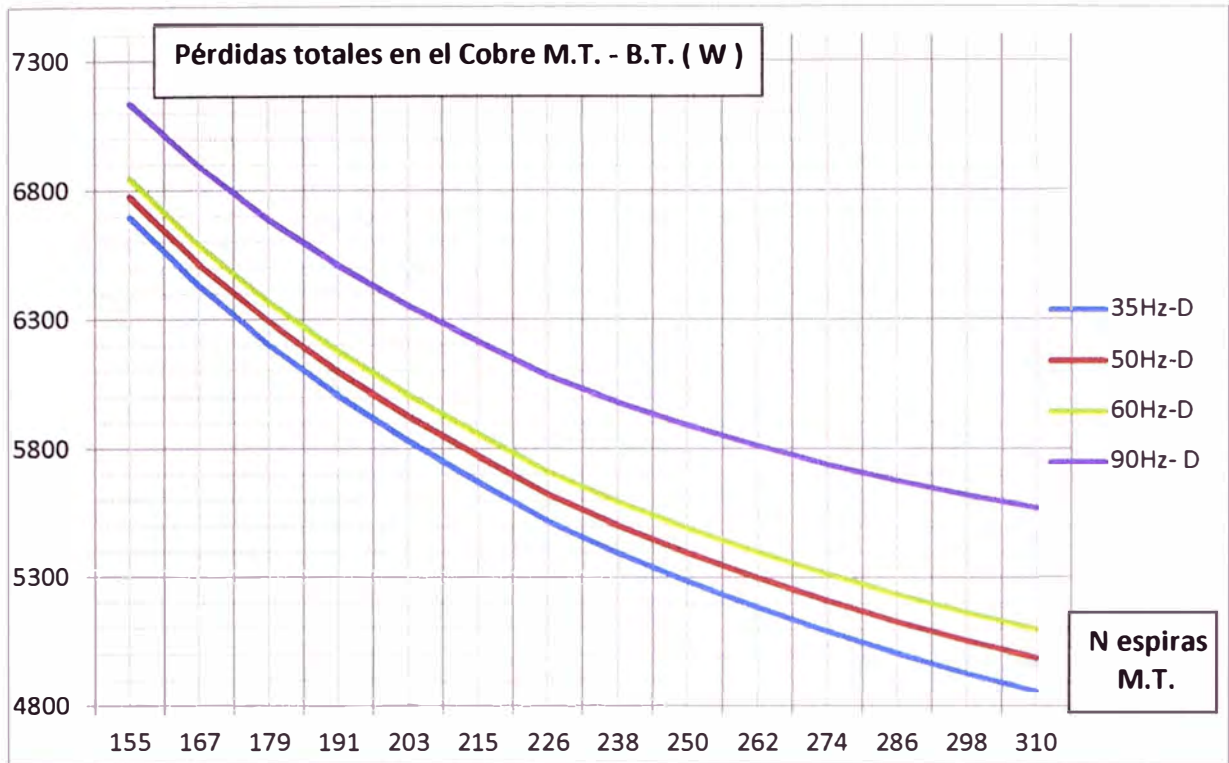
**Tabla 3.26** Pérdidas Totales en el cobre en M.T. en watts (Fuente: Propia)

N	Pérdidas totales conexión delta				Pérdidas totales conexión estrella			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	1972,88	2073,69	2160,66	2516,47	1968,06	2068,87	2155,84	2511,65
298	2042,98	2139,81	2223,34	2565,08	2037,97	2134,80	2218,33	2560,07
286	2120,13	2213,02	2293,15	2620,98	2114,91	2207,80	2287,93	2615,76
274	2205,38	2294,36	2371,14	2685,21	2199,93	2288,92	2365,69	2679,76
262	2297,60	2382,64	2456,02	2756,18	2291,90	2376,95	2450,32	2750,49
250	2398,93	2480,03	2550,01	2836,26	2392,96	2474,07	2544,04	2830,29
238	2509,33	2586,45	2652,99	2925,18	2503,07	2580,19	2646,72	2918,91
226	2633,10	2706,28	2769,41	3027,69	2626,51	2699,69	2762,82	3021,10
215	2784,30	2854,52	2915,09	3162,90	2777,34	2847,56	2908,13	3155,94
203	2942,20	3008,52	3065,73	3299,78	2934,83	3001,15	3058,36	3292,41
191	3118,35	3180,73	3234,54	3454,68	3110,52	3172,89	3226,71	3446,85
179	3316,04	3374,42	3424,80	3630,87	3307,68	3366,07	3416,44	3622,52
167	3544,96	3599,41	3646,38	3838,54	3536,01	3590,46	3637,43	3829,59
155	3809,67	3860,17	3903,74	4081,99	3800,03	3850,53	3894,11	4072,35

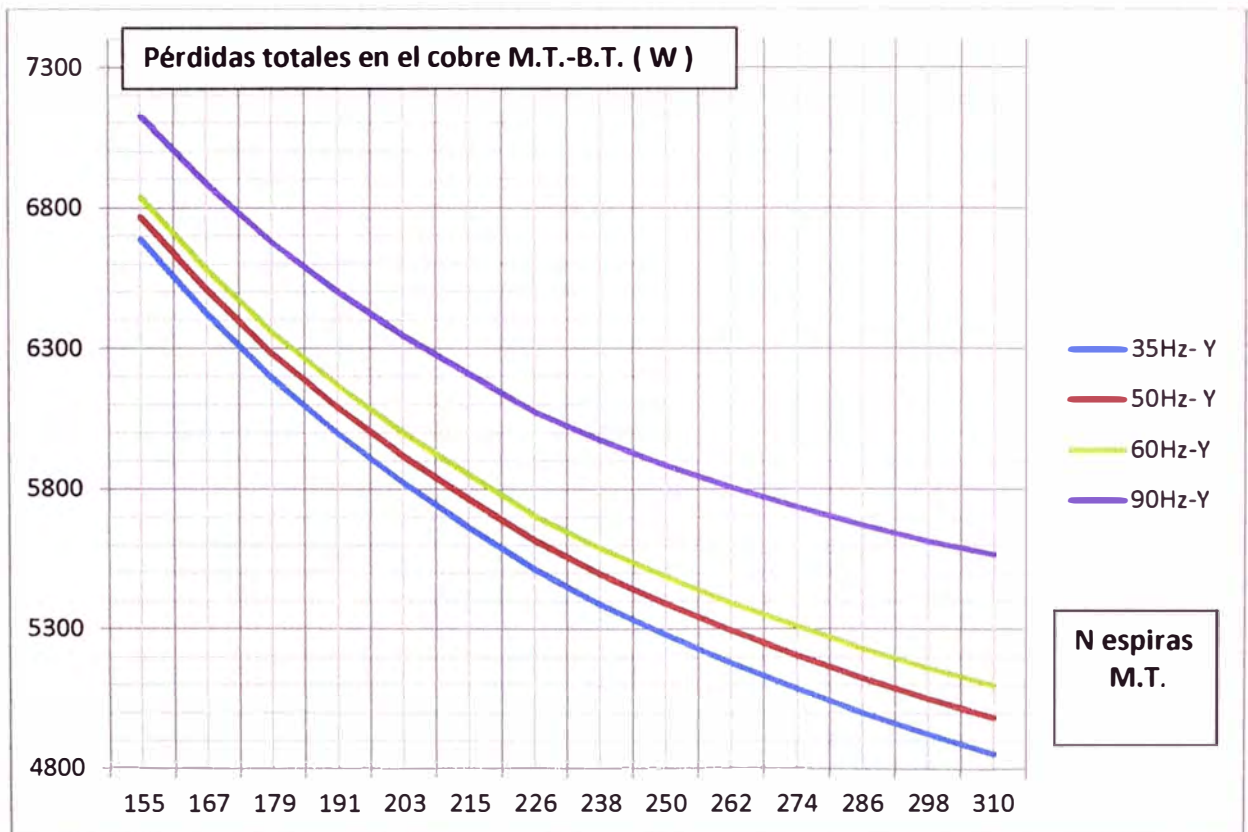
Asimismo sumando las pérdidas en M.T. y B.T. se tienen las pérdidas totales en el cobre (Tabla 3.27), también la Figura 3.13 y Figura 3.14 muestran las pérdidas totales:

**Tabla 3.27** Pérdidas Totales en el cobre en M.T.-B.T. en watts (Fuente: Propia)

N	Pérdidas totales en el Cobre M.T. (Delta) – B.T.				Pérdidas totales en el Cobre M.T. (Estrella) – B.T.			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	4860,26	4992,36	5106,33	5572,57	4855,44	4987,55	5101,52	5567,76
298	4930,37	5058,48	5169,01	5621,19	4925,36	5053,47	5164,00	5616,18
286	5007,52	5131,69	5238,83	5677,09	5002,30	5126,48	5233,61	5671,87
274	5092,76	5213,04	5316,81	5741,32	5087,32	5207,59	5311,36	5735,87
262	5184,99	5301,32	5401,69	5812,29	5179,29	5295,63	5395,99	5806,59
250	5286,32	5398,71	5495,68	5892,37	5280,35	5392,74	5489,71	5886,40
238	5396,72	5505,13	5598,66	5981,28	5390,45	5498,86	5592,39	5975,02
226	5520,49	5624,96	5715,09	6083,80	5513,89	5618,36	5708,49	6077,21
215	5671,69	5773,19	5860,76	6219,01	5664,73	5766,23	5853,80	6212,05
203	5829,59	5927,19	6011,40	6355,89	5822,22	5919,82	6004,03	6348,52
191	6005,74	6099,40	6180,21	6510,78	5997,91	6091,57	6172,38	6502,95
179	6203,42	6293,10	6370,47	6686,98	6195,07	6284,75	6362,12	6678,62
167	6432,35	6518,08	6592,05	6894,65	6423,40	6509,13	6583,10	6885,70
155	6697,05	6778,85	6849,41	7138,10	6687,42	6769,21	6839,78	7128,46



**Figura 3.13** Pérdidas totales en B.T. y M.T. conexión Delta (Fuente: Propia)



**Figura 3.14** Pérdidas totales en B.T. y M.T. conexión Estrella (Fuente: Propia)

### 3.7 Rendimiento

Se refiere a la eficiencia " $\eta$ " del transformador. En esta sección se define este factor respecto a las pérdidas obtenidas luego de la construcción. Un transformador con

menores pérdidas es más eficiente pero podría resultar mucho más costoso al momento de adquirir, lo que al final se compensaría con el tiempo, dado que el consumo de energía es menor (por ende el costo es menor) para obtener la potencia requerida.

Por otro lado, un transformador con mayores pérdidas podría resultar barato al momento de adquirirlo pero durante su tiempo de vida útil generaría mayores gastos para obtener la potencia requerida (exceso de calentamiento, exceso de consumo de energía)

La eficiencia viene dada por la Fórmula (3.17)

$$\eta = \frac{\alpha \sqrt{3} I_n V_n \text{Cos}\phi}{\alpha \sqrt{3} I_n V_n \text{Cos}\phi + P_{FE} + \alpha^2 P_{Cu}} \quad (3.17)$$

Dónde:

- $I_L$ : Corriente de carga de línea. (A)
- $I_N$ : Corriente nominal de línea. (A)
- $\alpha$ :  $I_L / I_N$  relación de corriente de carga a la corriente nominal.
- $V_n$ : Tensión nominal de línea. (V)
- $\text{Cos}\phi$ : Factor de carga
- $P_{FE}$ : Pérdidas totales en el Fierro.(W)
- $P_{Cu}$ : Suma de pérdidas totales en el cobre en B.T. y M.T. (W)

Para el caso en estudio se tiene lo siguiente:

- $I_N$  = 625,46 A
- $V_N$  = 480 V
- $\alpha$  = Calculados para 100; 75; 50 y 25% de carga
- $\text{Cos}\phi$  = Se tomará en cuenta para  $\text{Cos}\phi = 0,8$  y  $\text{Cos}\phi = 1$
- $P_{FE}$  = Se muestra en la Tabla 3.28 (watts)
- $P_{Cu}$  = Se muestra en al Tabla 3.28 (watts)

**Tabla 3.28** Resumen de pérdidas Cobre - Núcleo en watts. (Fuente: Propia)

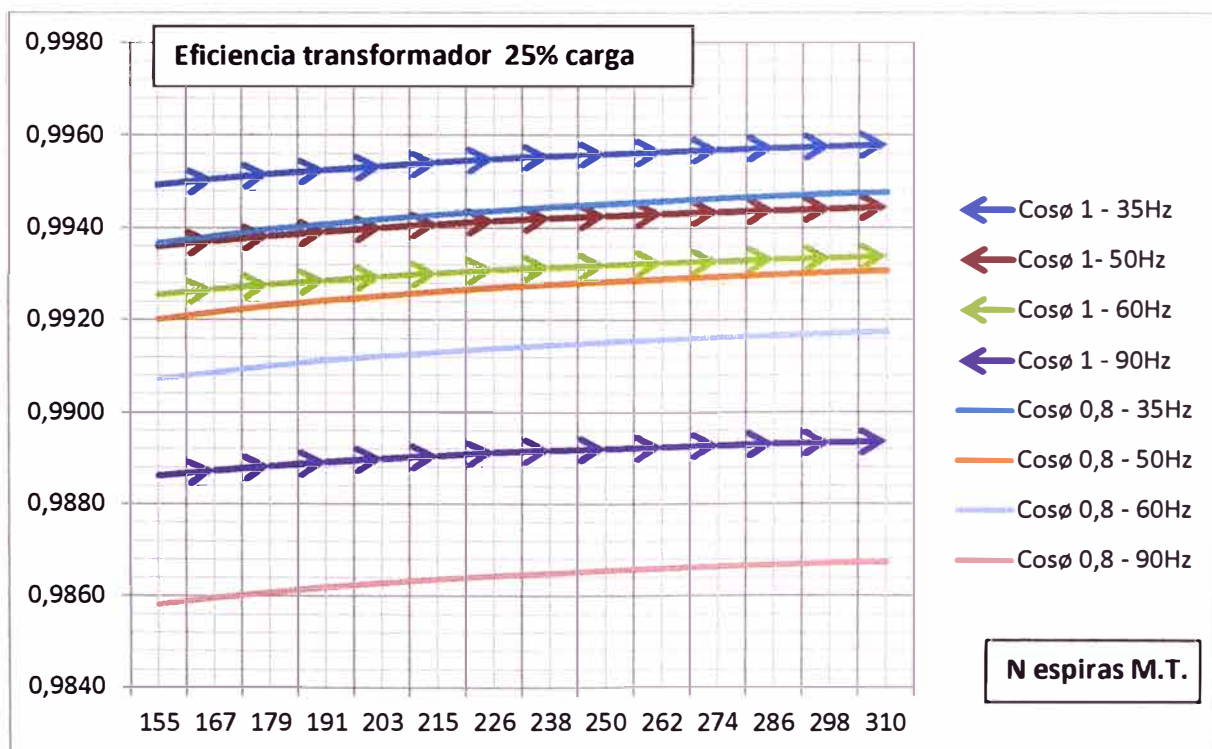
N	Pérdidas totales en el Cobre (Delta)				Pérdidas totales en el Núcleo (Inducción = 1,2 T)			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	4860,26	4992,36	5106,33	5572,57	243,66	412,10	545,73	1049,03
298	4930,37	5058,48	5169,01	5621,19	243,66	412,10	545,73	1049,03
286	5007,52	5131,69	5238,83	5677,09	243,66	412,10	545,73	1049,03
274	5092,76	5213,04	5316,81	5741,32	243,66	412,10	545,73	1049,03
262	5184,99	5301,32	5401,69	5812,29	243,66	412,10	545,73	1049,03
250	5286,32	5398,71	5495,68	5892,37	243,66	412,10	545,73	1049,03
238	5396,72	5505,13	5598,66	5981,28	243,66	412,10	545,73	1049,03
226	5520,49	5624,96	5715,09	6083,80	243,66	412,10	545,73	1049,03
215	5671,69	5773,19	5860,76	6219,01	243,66	412,10	545,73	1049,03
203	5829,59	5927,19	6011,40	6355,89	243,66	412,10	545,73	1049,03

191	6005,74	6099,40	6180,21	6510,78	243,66	412,10	545,73	1049,03
179	6203,42	6293,10	6370,47	6686,98	243,66	412,10	545,73	1049,03
167	6432,35	6518,08	6592,05	6894,65	243,66	412,10	545,73	1049,03
155	6697,05	6778,85	6849,41	7138,10	243,66	412,10	545,73	1049,03

La Tabla 3.29 y la Figura 3.15 muestran la eficiencia para una carga del 25%

**Tabla 3.29** Cálculo de rendimiento "η" del transformador.  $\alpha = 25\%$  (Fuente: Propia)

N	$\cos\phi = 1$				$\cos\phi = 0,8$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,9958	0,9945	0,9934	0,9894	0,9948	0,9931	0,9918	0,9867
298	0,9958	0,9944	0,9934	0,9893	0,9947	0,9930	0,9917	0,9867
286	0,9957	0,9944	0,9933	0,9893	0,9947	0,9930	0,9917	0,9867
274	0,9957	0,9944	0,9933	0,9893	0,9946	0,9930	0,9916	0,9866
262	0,9957	0,9943	0,9933	0,9893	0,9946	0,9929	0,9916	0,9866
250	0,9956	0,9943	0,9932	0,9892	0,9945	0,9928	0,9915	0,9866
238	0,9956	0,9942	0,9932	0,9892	0,9944	0,9928	0,9915	0,9865
226	0,9955	0,9942	0,9931	0,9891	0,9944	0,9927	0,9914	0,9864
215	0,9954	0,9941	0,9930	0,9891	0,9943	0,9926	0,9913	0,9864
203	0,9953	0,9940	0,9930	0,9890	0,9942	0,9925	0,9912	0,9863
191	0,9953	0,9939	0,9929	0,9889	0,9941	0,9924	0,9911	0,9862
179	0,9952	0,9938	0,9928	0,9888	0,9940	0,9923	0,9910	0,9861
167	0,9951	0,9937	0,9927	0,9887	0,9938	0,9922	0,9909	0,9860
155	0,9949	0,9936	0,9926	0,9886	0,9937	0,9920	0,9907	0,9858



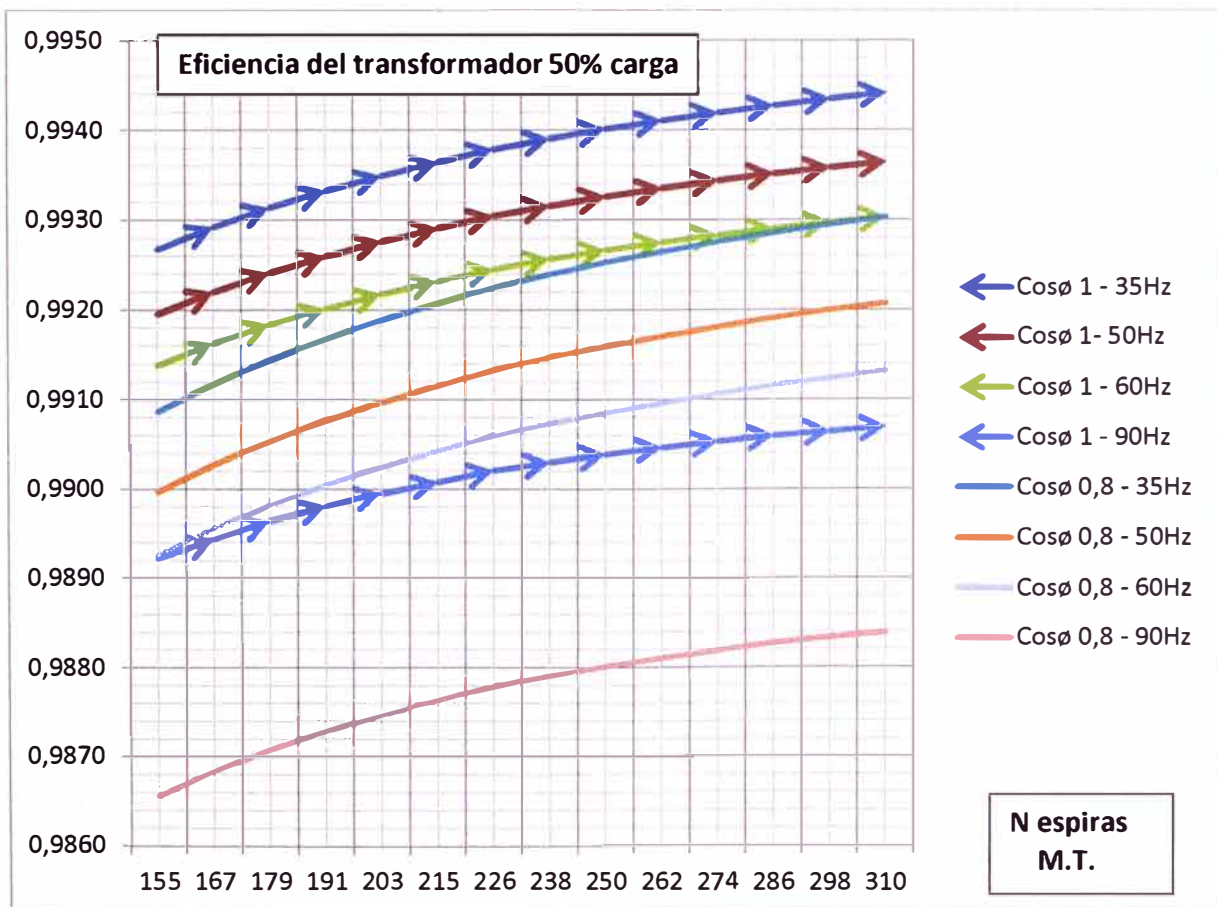
**Figura 3.15** Eficiencia del transformador a un 25% de carga (Fuente: Propia)



La Tabla 3.30 y la Figura 3.16 muestran la eficiencia para una carga del 50%

**Tabla 3.30** Cálculo de rendimiento “ $\eta$ ” del transformador.  $\alpha = 50\%$  (Fuente: Propia)

N	$\cos\phi = 1$				$\cos\phi = 0,8$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,9944	0,9937	0,9930	0,9907	0,9930	0,9921	0,9913	0,9884
298	0,9944	0,9936	0,9930	0,9906	0,9930	0,9920	0,9912	0,9883
286	0,9943	0,9935	0,9929	0,9906	0,9929	0,9919	0,9912	0,9883
274	0,9942	0,9934	0,9928	0,9905	0,9928	0,9918	0,9911	0,9882
262	0,9941	0,9934	0,9928	0,9905	0,9927	0,9917	0,9910	0,9881
250	0,9940	0,9933	0,9927	0,9904	0,9925	0,9916	0,9909	0,9880
238	0,9939	0,9932	0,9926	0,9903	0,9924	0,9915	0,9907	0,9879
226	0,9938	0,9931	0,9925	0,9902	0,9923	0,9913	0,9906	0,9878
215	0,9936	0,9929	0,9923	0,9901	0,9921	0,9912	0,9904	0,9876
203	0,9935	0,9928	0,9922	0,9900	0,9919	0,9910	0,9902	0,9875
191	0,9933	0,9926	0,9920	0,9898	0,9917	0,9908	0,9900	0,9873
179	0,9931	0,9924	0,9918	0,9896	0,9914	0,9905	0,9898	0,9871
167	0,9929	0,9922	0,9916	0,9894	0,9912	0,9903	0,9896	0,9868
155	0,9927	0,9920	0,9914	0,9892	0,9909	0,9900	0,9893	0,9866

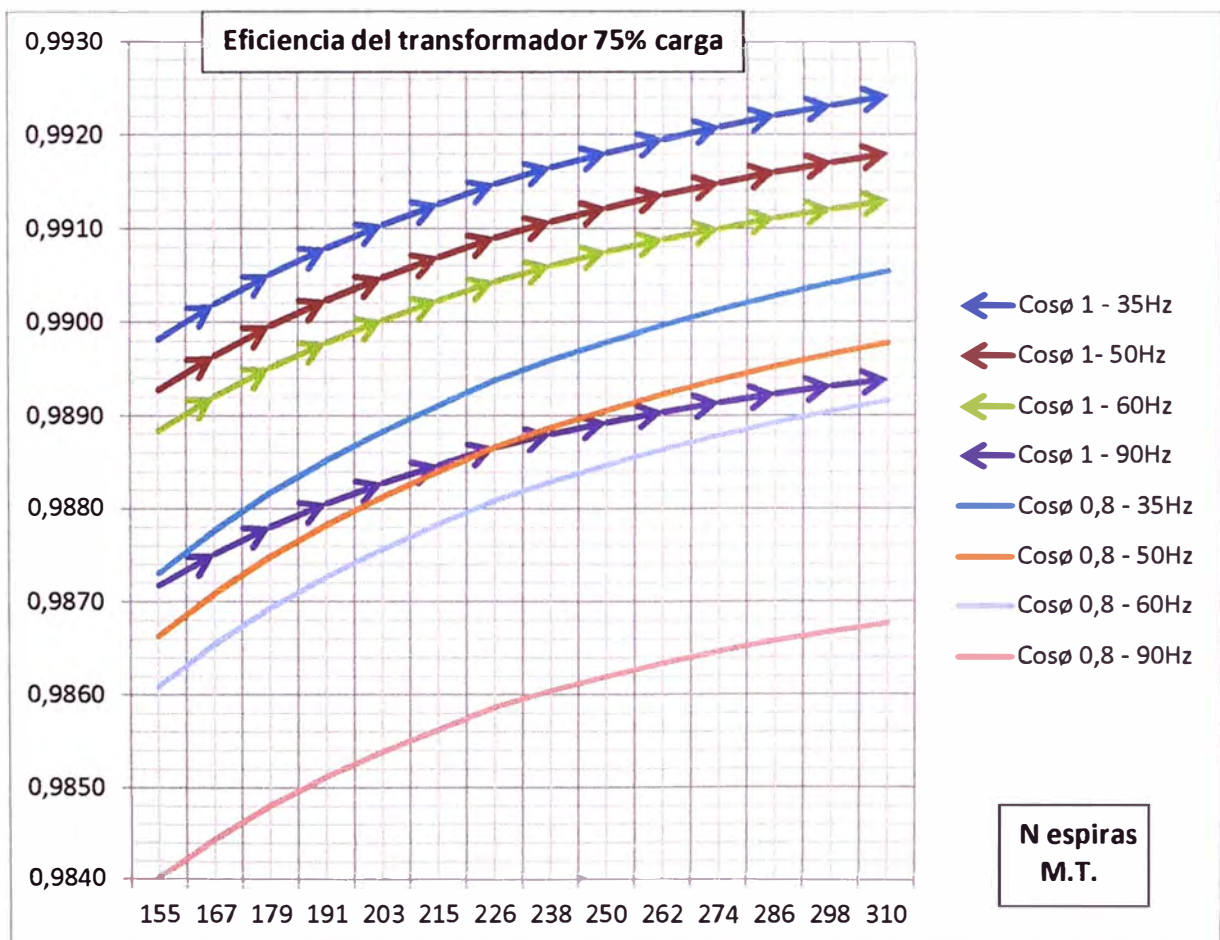


**Figura 3.16** Eficiencia del transformador a un 50% de carga (Fuente: Propia)

La Tabla 3.31y la Figura 3.17 muestran la eficiencia para una carga del 75%

**Tabla 3.31** Cálculo de rendimiento “ $\eta$ ” del transformador.  $\alpha = 75\%$  (Fuente: Propia)

N	$\cos\phi = 1$				$\cos\phi = 0,8$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,9924	0,9918	0,9913	0,9894	0,9905	0,9898	0,9892	0,9868
298	0,9923	0,9917	0,9912	0,9893	0,9904	0,9897	0,9891	0,9867
286	0,9922	0,9916	0,9911	0,9892	0,9903	0,9895	0,9889	0,9866
274	0,9921	0,9915	0,9910	0,9891	0,9901	0,9894	0,9888	0,9865
262	0,9920	0,9914	0,9909	0,9890	0,9900	0,9892	0,9886	0,9863
250	0,9918	0,9912	0,9908	0,9889	0,9898	0,9891	0,9885	0,9862
238	0,9917	0,9911	0,9906	0,9888	0,9896	0,9889	0,9883	0,9861
226	0,9915	0,9909	0,9904	0,9887	0,9894	0,9887	0,9881	0,9859
215	0,9913	0,9907	0,9902	0,9885	0,9891	0,9884	0,9878	0,9856
203	0,9910	0,9905	0,9900	0,9883	0,9888	0,9881	0,9876	0,9854
191	0,9908	0,9902	0,9898	0,9881	0,9885	0,9878	0,9873	0,9851
179	0,9905	0,9900	0,9895	0,9878	0,9882	0,9875	0,9869	0,9848
167	0,9902	0,9897	0,9892	0,9875	0,9878	0,9871	0,9865	0,9845
155	0,9898	0,9893	0,9888	0,9872	0,9873	0,9866	0,9861	0,9840

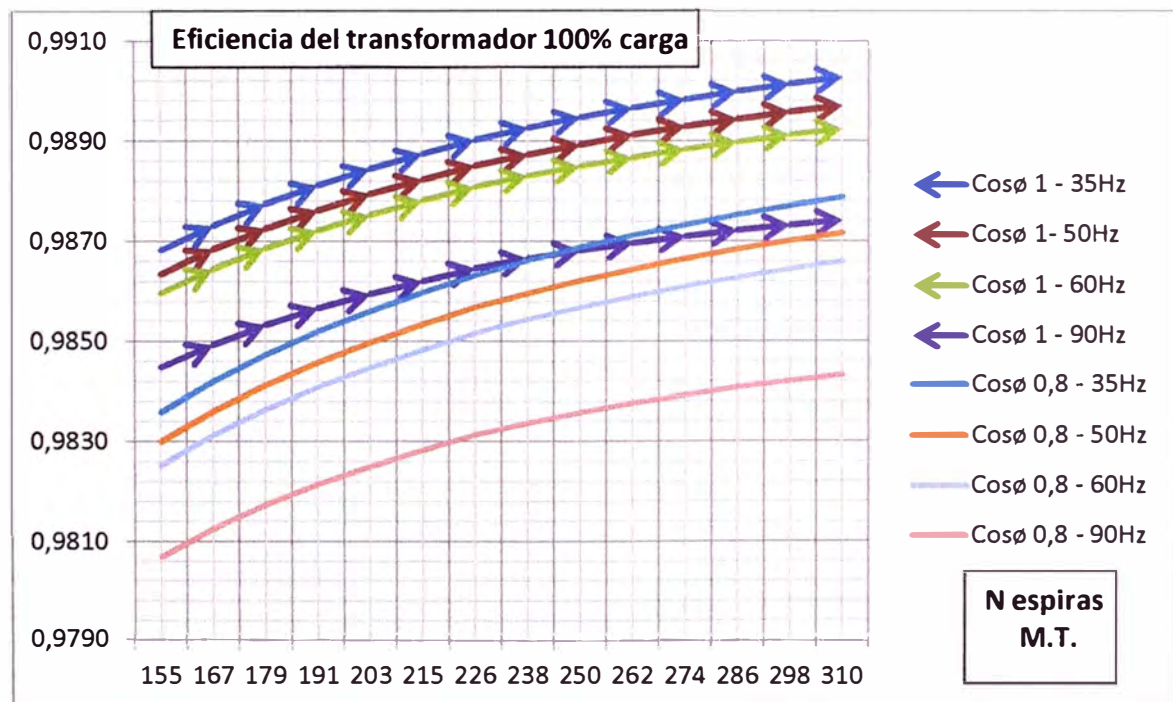


**Figura 3.17** Eficiencia del transformador a un 75% de carga (Fuente: Propia)

La Tabla 3.32 y la Figura 3.18 muestran la eficiencia para una carga del 100%

**Tabla 3.32** Cálculo de rendimiento “ $\eta$ ” del transformador.  $\alpha = 100\%$  (Fuente: Propia)

N	$\cos\phi = 1$				$\cos\phi = 0,8$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,9903	0,9897	0,9892	0,9874	0,9879	0,9872	0,9866	0,9843
298	0,9901	0,9896	0,9891	0,9873	0,9877	0,9870	0,9864	0,9842
286	0,9900	0,9895	0,9890	0,9872	0,9875	0,9868	0,9863	0,9841
274	0,9898	0,9893	0,9889	0,9871	0,9873	0,9867	0,9861	0,9839
262	0,9897	0,9891	0,9887	0,9870	0,9871	0,9865	0,9859	0,9838
250	0,9895	0,9889	0,9885	0,9868	0,9869	0,9862	0,9857	0,9836
238	0,9893	0,9887	0,9883	0,9867	0,9866	0,9860	0,9854	0,9834
226	0,9890	0,9885	0,9881	0,9865	0,9863	0,9857	0,9852	0,9831
215	0,9888	0,9882	0,9878	0,9862	0,9860	0,9853	0,9848	0,9828
203	0,9885	0,9880	0,9875	0,9860	0,9856	0,9850	0,9845	0,9825
191	0,9881	0,9876	0,9872	0,9857	0,9852	0,9846	0,9841	0,9822
179	0,9878	0,9873	0,9869	0,9853	0,9847	0,9841	0,9836	0,9817
167	0,9873	0,9868	0,9865	0,9850	0,9842	0,9836	0,9831	0,9813
155	0,9868	0,9864	0,9860	0,9845	0,9836	0,9830	0,9825	0,9807



**Figura 3.18** Eficiencia del transformador a un 100% de carga (Fuente: Propia)

De los datos de la Tabla 3.32 se puede concluir que la máxima eficiencia ocurrirá cuando se tenga el mayor número de espiras,  $\cos\phi = 1$ , la frecuencia sea la menor posible (35 Hz)

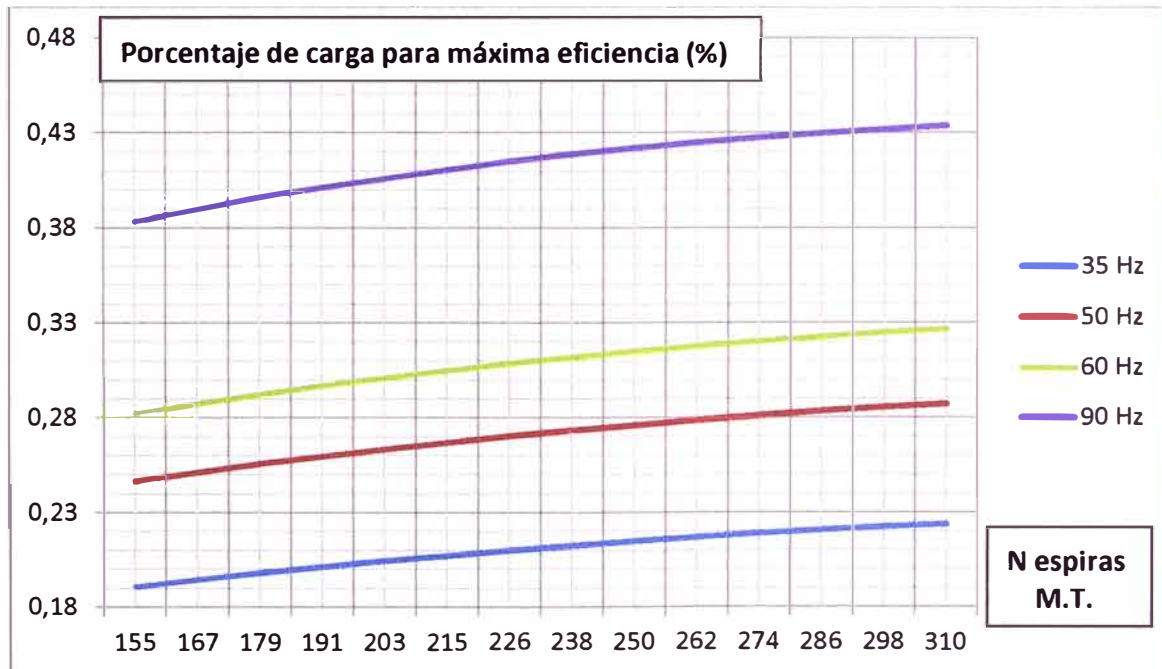
La máxima eficiencia se tiene cuando el porcentaje de carga cumple la siguiente Fórmula (3.18)

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_{FE}}{P_{CU}}} \quad (3.18)$$

La Tabla 3.33 y la Figura 3.19 muestran valores de carga para una máxima eficiencia

**Tabla 3.33** Porcentaje de carga para máxima eficiencia (Fuente: Propia)

N	Porcentaje de carga para máxima eficiencia			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,2239	0,2873	0,3269	0,4339
298	0,2223	0,2854	0,3249	0,4320
286	0,2206	0,2834	0,3228	0,4299
274	0,2187	0,2812	0,3204	0,4275
262	0,2168	0,2788	0,3179	0,4248
250	0,2147	0,2763	0,3151	0,4219
238	0,2125	0,2736	0,3122	0,4188
226	0,2101	0,2707	0,3090	0,4152
215	0,2073	0,2672	0,3051	0,4107
203	0,2044	0,2637	0,3013	0,4063
191	0,2014	0,2599	0,2972	0,4014
179	0,1982	0,2559	0,2927	0,3961
167	0,1946	0,2514	0,2877	0,3901
155	0,1907	0,2466	0,2823	0,3834



**Figura 3.19** Porcentaje de carga para máxima eficiencia (Fuente: Propia)

### 3.8 Caídas de cortocircuito

Se recomienda que la tensión de cortocircuito sea mayor para transformadores grandes para tener una mayor impedancia ante una falla o cortocircuito en el transformador. Sin embargo para los transformadores pequeños la regulación debe ser

dentro del rango establecido por norma, y una tensión de cortocircuito alto conlleva a que no se cumpla con este rango. A continuación se analiza la parte activa y la reactiva en forma porcentual de la caída de cortocircuito.

### 3.8.1 Parte activa

Es calculada mediante la siguiente Fórmula (3.19)

$$u_r = \frac{\text{Pérdidas Totales}_{Cu}}{10 \text{ Potencia}} \quad (3.19)$$

Reemplazando se obtiene  $u_r$  en la Tabla 3.34

**Tabla 3.34** Cálculo de  $u_r$  (Fuente: Propia)

N	$U_r$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,9347	0,9601	0,9820	1,0716
298	0,9481	0,9728	0,9940	1,0810
286	0,9630	0,9869	1,0075	1,0917
274	0,9794	1,0025	1,0225	1,1041
262	0,9971	1,0195	1,0388	1,1177
250	1,0166	1,0382	1,0569	1,1331
238	1,0378	1,0587	1,0767	1,1502
226	1,0616	1,0817	1,0991	1,1700
215	1,0907	1,1102	1,1271	1,1960
203	1,1211	1,1398	1,1560	1,2223
191	1,1549	1,1730	1,1885	1,2521
179	1,1930	1,2102	1,2251	1,2860
167	1,2370	1,2535	1,2677	1,3259
155	1,2879	1,3036	1,3172	1,3727

Se puede apreciar que el valor más grande corresponde al número de espiras menor, y a una frecuencia mayor.

### 3.8.2 Parte Inductiva

Viene representada por la siguiente Fórmula (3.20)

$$u_x = \frac{V_x}{V_f} 100f_1 \quad (3.20)$$

Para ello es necesario definir las siguientes fórmulas a fin de simplificar la obtención de la tensión  $V_x$  en la Fórmula (3.26)

$$f_1 = 1 + 6 \times 10^{-5} I_f \quad (3.21)$$

Dónde:  $I_f$  es corriente de fase

$$b = \frac{r_{BT}}{1000} \quad (3.22)$$

Donde  $r_{BT}$  es el radio del arrollamiento de B.T.

$$a = \frac{r_{MT}}{1000} \quad (3.23)$$

Donde  $r_{MT}$  es el radio del arrollamiento de M.T.

$$h = \frac{H_a' + H_a''}{2000} + \frac{H_a' r_{BT} + H_a'' r_{MT}}{(r_{BT} + r_{MT}) 10^3} \quad (3.24)$$

Donde  $H_a'$  y  $H_a''$  es la altura axial del arrollamiento (para B.T. y M.T. respectivamente)

$$K_r = 1 - r \left( 1 - e^{-\frac{1}{r}} \right) \quad (3.25)$$

Donde  $K_r$  es el factor de Rogowsky y  $r = (a+b+c)/(\pi h)$

Finalmente  $V_x$  viene dado por la Fórmula (3.26)

$$V_x = \psi f \left[ \left( \frac{\phi_{iBT}}{1000} + 3 \frac{b}{2} \right) \frac{b}{3} + \left( \frac{\phi_{iBT}}{1000} + 2b + C \right) C + \left( \frac{\phi_{iBT}}{1000} + 2(a+b+c) - 3 \frac{a}{2} \right) \frac{a}{3} \right] N^2 I_r \frac{K_r}{h} \quad (3.26)$$

Asimismo:

- $\psi = 2,48 \times 10^{-5}$
- $f$ : frecuencia ( Hz )
- $C$ : distancia entre B.T. y M.T. (mm)
- $\phi_{iBT}$ : Diámetro interior de B.T. (mm)
- $N$ : número de espiras del arrollamiento.

Se determinan los valores de  $u_x$ , y son mostrados en la Tabla 3.35

Tabla 3.35 Cálculo de  $u_x$  (Fuente: Propia)

N	Vf	If	$u_x$			
			35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	2656	65,27	2,4489	3,4985	4,1982	6,2973
298	2554	67,86	2,4470	3,4957	4,1949	6,2923
286	2452	70,69	2,4455	3,4936	4,1923	6,2884
274	2349	73,78	2,4455	3,4936	4,1923	6,2885
262	2247	77,14	2,4438	3,4911	4,1894	6,2841
250	2145	80,81	2,4419	3,4885	4,1862	6,2792
238	2043	84,83	2,4392	3,4845	4,1815	6,2722
226	1941	89,30	2,4369	3,4812	4,1775	6,2662
215	1839	94,26	2,4571	3,5102	4,2122	6,3183
203	1736	99,84	2,4578	3,5112	4,2134	6,3201
191	1634	106,09	2,4562	3,5089	4,2107	6,3160
179	1532	113,12	2,4535	3,5050	4,2060	6,3090
167	1430	121,20	2,4514	3,5020	4,2024	6,3035
155	1328	130,53	2,4489	3,4985	4,1982	6,2973

### 3.8.3 Cálculo de caídas de cortocircuito

Esto es obtenido de la Fórmula (3.27)

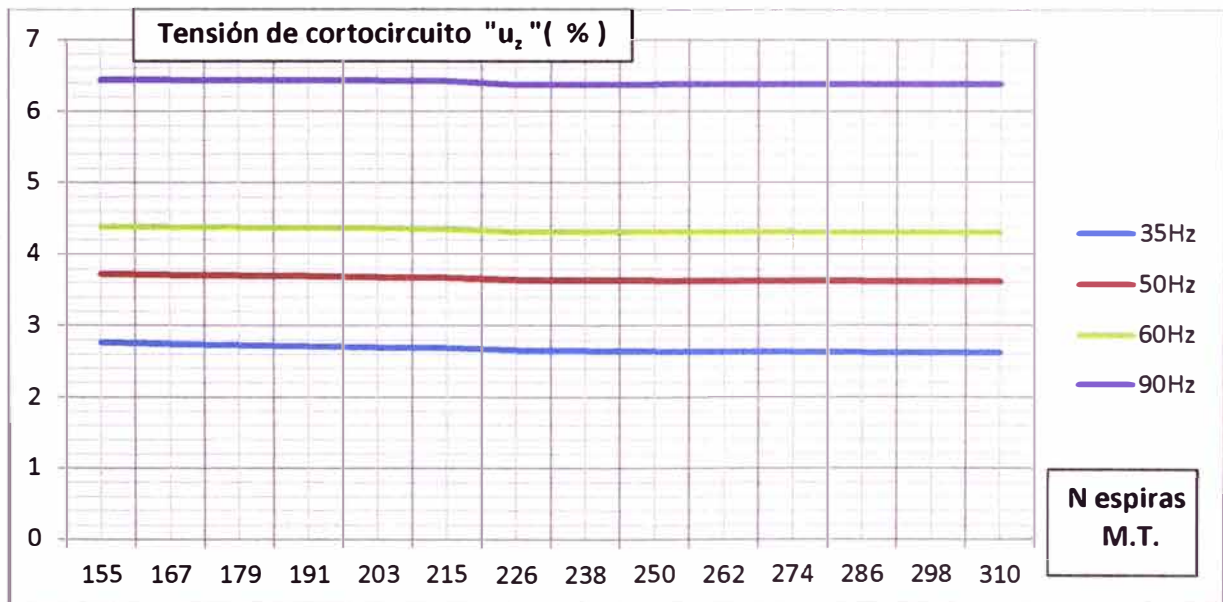
$$u_z = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \quad (3.27)$$

Para determinar los valores de  $u_z$ , y se muestran en la Tabla 3.36 y la Figura 3.20

**Tabla 3.36** Cálculo de  $u_z$  (Fuente: Propia)

N	$u_z$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	2,6212	3,6278	4,3115	6,3878
298	2,6243	3,6286	4,3110	6,3845
286	2,6283	3,6303	4,3116	6,3825
274	2,6343	3,6346	4,3152	6,3846
262	2,6394	3,6370	4,3162	6,3827
250	2,6451	3,6397	4,3175	6,3807
238	2,6508	3,6418	4,3178	6,3768
226	2,6581	3,6454	4,3197	6,3745
215	2,6883	3,6816	4,3604	6,4305
203	2,7014	3,6915	4,3691	6,4372
191	2,7142	3,6997	4,3752	6,4389
179	2,7282	3,7080	4,3808	6,4387
167	2,7458	3,7195	4,3894	6,4415
155	2,7669	3,7335	4,4000	6,4451

Se muestra a continuación el gráfico correspondiente a la Tabla 3.36



**Figura 3.20** Tensión de cortocircuito  $u_z$  (Fuente: Propia)

### 3.8.4 Regulación

Se emplea la siguiente Fórmula (3.28)

$$u = u_r \cos\phi + u_x \sin\phi + \frac{(u_x \cos\phi - u_r \sin\phi)^2}{200} \quad (3.28)$$

A continuación se definen las variables usadas:

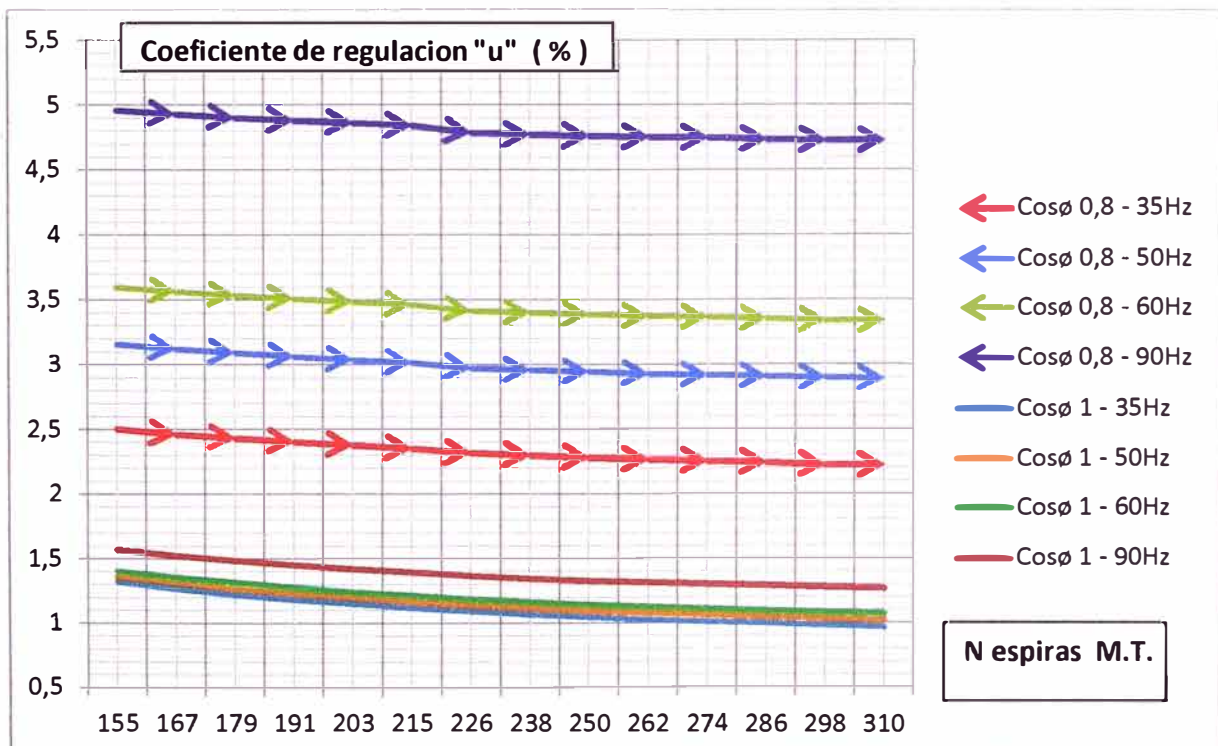
- $u$ : Coeficiente de regulación.
- $u_r$ : Caída de cortocircuito por resistencia.
- $u_x$ : Caída de cortocircuito por reactancia.
- $\phi$ : Desfase de la carga secundaria respecto a la carga primaria

Se determinan los valores de " $u$ " y se muestran en la Tabla 3.37 y Figura 3.21

**Tabla 3.37** Cálculo de " $u$ " (Fuente: Propia)

N	COS $\phi$ = 0,8				COS $\phi$ = 1			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	2,2269	2,8918	3,3428	4,7322	0,9647	1,0213	1,0701	1,2699
298	2,2364	2,9001	3,3502	4,7363	0,9781	1,0339	1,0820	1,2790
286	2,2472	2,9099	3,3591	4,7422	0,9929	1,0479	1,0953	1,2895
274	2,2602	2,9222	3,3709	4,7518	1,0093	1,0635	1,1103	1,3018
262	2,2732	2,9341	3,3819	4,7595	1,0270	1,0804	1,1265	1,3152
250	2,2875	2,9472	3,3940	4,7684	1,0464	1,0991	1,1445	1,3303
238	2,3026	2,9608	3,4066	4,7771	1,0676	1,1194	1,1641	1,3469
226	2,3200	2,9769	3,4217	4,7886	1,0913	1,1423	1,1863	1,3663
215	2,3554	3,0172	3,4652	4,8418	1,1209	1,1718	1,2158	1,3956
203	2,3799	3,0411	3,4887	4,8633	1,1513	1,2015	1,2448	1,4220
191	2,4058	3,0658	3,5125	4,8838	1,1851	1,2345	1,2772	1,4515
179	2,4342	3,0928	3,5382	4,9056	1,2231	1,2716	1,3135	1,4850
167	2,4678	3,1250	3,5694	4,9330	1,2670	1,3148	1,3560	1,5246
155	2,5067	3,1623	3,6056	4,9653	1,3179	1,3648	1,4053	1,5710

A continuación se muestra el gráfico correspondiente a la Tabla 3.34



**Figura 3.21** Coeficiente de regulación " $u$ " (Fuente: Propia)



### 3.9 Corrientes de excitación y de inserción

La corriente de excitación es la corriente de vacío necesaria para producir los VA/kg del núcleo que debe proveerse al transformador para que empiece a trabajar, la tensión es la nominal.

La corriente de inserción es el pico que alcanza la corriente al momento de energizar el transformador. Éste va decayendo con cada ciclo.

La corriente de excitación se halla de la siguiente Fórmula (3.29)

$$I_0 = \frac{VA_{\text{excitación}} \text{Peso}_{\text{núcleo}}}{3 V_f I_f} \times 100 \quad (3.29)$$

Basados en los datos de la Tabla 3.35 (para  $V_f$  e  $I_f$ ) y la Tabla 3.13 (VA de excitación en VA/kg), se obtiene la Tabla 3.38 "Corriente de excitación en porcentaje de la corriente M.T.", considerando adicionalmente el factor de manufactura 5,925.

**Tabla 3.38** Corriente de excitación en porcentaje de la corriente M.T. (Fuente: Propia)

N	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
298	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
286	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
274	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
262	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
250	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
238	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
226	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
215	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
203	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
191	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
179	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
167	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477
155	0,3014	0,4870	0,6296	1,1477

En la Tabla 3.39 se muestra el cálculo en amperes.

**Tabla 3.39** Corriente de excitación en amperes de la corriente M.T. (Fuente: Propia)

N	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	19,6677	31,7826	41,0878	74,9006
298	20,4532	33,0519	42,7287	77,8919
286	21,3041	34,4268	44,5062	81,1321
274	22,2382	35,9364	46,4577	84,6896
262	23,2477	37,5677	48,5666	88,5340
250	24,3532	39,3541	50,8760	92,7440
238	25,5690	41,3189	53,4161	97,3744
226	26,9127	43,4903	56,2231	102,4915

215	28,4054	45,9024	59,3415	108,1762
203	30,0907	48,6259	62,8624	114,5944
191	31,9691	51,6613	66,7865	121,7478
179	34,0976	55,1009	71,2331	129,8538
167	36,5297	59,0312	76,3141	139,1160
155	39,3355	63,5652	82,1755	149,8012

Para el cálculo de la corriente de inserción se hace uso de los factores indicados en [9]. Para los cálculos se toman en consideración los siguientes elementos:

- Tensión M.T.	:	V
- Grupo de conexión	:	Y o D
- Frecuencia	:	f
- Número de espiras	:	N
- Diámetro medio del arrollamiento	:	$d_m$
- Altura axial del arrollamiento	:	h
- Inducción Magnética	:	B
- Área neta del núcleo	:	$S_n$
- Inducción de saturación	:	$B_{sat} = 2,03$
- Resistencia del arrollamiento	:	R

Se calcula la resistencia 'R' mediante la Fórmula (3.30)

$$R = \frac{\rho_{cu} \text{Peso}_{fase}}{Y_{Cu} S_{Cu}^2} 10^{12} \quad (3.30)$$

Dónde:

- $\rho_{cu}$	:	Resistividad del Cu a 20 °C = $2,16 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
- $\text{Peso}_{fase}$	:	Peso del arrollamiento M.T. por fase = 116,6908 kg Peso del arrollamiento B.T. por fase = 44,799 kg
- $Y_{Cu}$	:	Peso específico del Cu = $8900 \text{ kg/m}^3$
- $S_{CuMT}$	:	Sección del Cu MT = $44,31375 \text{ mm}^2$
- $S_{CuBT}$	:	Sección del Cu BT = $126,36 \text{ mm}^2$

Reemplazando los valores se obtiene a 75° C,  $R_{MT} = 0,14448 \Omega$

$$R_{BT} = 0,006822 \Omega$$

Se calcula la reactancia  $X_s$  mediante la Fórmula (3.31)

$$X_s = \frac{\mu_0 N^2 A_w 2 \pi f}{h_w} \quad (3.31)$$

En donde  $\mu_0$  (permeabilidad magnética del vacío),  $A_w$  (área media del arrollamiento M.T.), y  $h_w$  (altura axial del arrollamiento) son reemplazados por sus valores, como es mostrado en la Fórmula (3.32)

$$X_s = \frac{(4 \pi 10^{-7}) N^2 \left( \frac{\pi}{4} \frac{d_m^2}{10^6} \right) 2 \pi f}{\frac{h_1}{10^3}} \quad (3.32)$$

De donde se obtiene los valores de 'Xs' para los valores de 'N' y 'f' variables, los cuales son mostrados en la Tabla 3.40

**Tabla 3.40** Reactancia  $X_s$  (Fuente: Propia)

N	Xs			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	3,1164	4,4520	5,3424	8,0135
298	2,8798	4,1140	4,9368	7,4051
286	2,6525	3,7893	4,5472	6,8208
274	2,4346	3,4780	4,1736	6,2604
262	2,2260	3,1800	3,8160	5,7240
250	2,0268	2,8954	3,4745	5,2117
238	1,8369	2,6241	3,1489	4,7234
226	1,6563	2,3662	2,8394	4,2591
215	1,4990	2,1414	2,5697	3,8546
203	1,3363	1,9091	2,2909	3,4363
191	1,1830	1,6900	2,0280	3,0421
179	1,0390	1,4843	1,7812	2,6718
167	0,9044	1,2920	1,5504	2,3256
155	0,7791	1,1130	1,3356	2,0034

Ahora se calcula el ángulo de saturación usando la Fórmula (3.33)

$$\theta = k_1 \cos^{-1} \left( \frac{B_{Sat} - B - B_r}{B} \right) \quad (3.33)$$

Dónde:

- $K_1$  : Factor de corrección del ángulo de saturación ( $\theta$ ) = 0,9
- $B_r$  : Inducción remanente (0,8 B)

Reemplazando se obtiene  $\theta = 1,5272$  radianes.

La corriente pico máxima de inserción para el 1er ciclo empleamos la Fórmula (3.34)

$$I_p = K_2 \frac{V_f \sqrt{2} (1 - \cos \theta)}{X_s} K_3 \quad (3.34)$$

Dónde:

- $K_2$  : Factor de corrección para el valor máximo pico = 1,15
- $V_f$  : Tensión de fase del arrollamiento M.T.(V)
- $K_3$  : 1/3 para conexión Delta; 2/3 para conexión Estrella.

De donde se obtiene los valores que se muestran en la Tabla 3.41 y la Tabla 3.42

**Tabla 3.41** Corriente pico máxima de inserción en conexión Estrella (Fuente: Propia)

N	Vf	Ip ( A )			
		35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	2656	883,7794	618,6456	515,5380	343,6920
298	2554	919,6605	643,7624	536,4686	357,6458
286	2452	958,5783	671,0048	559,1707	372,7804
274	2349	1000,5092	700,3564	583,6303	389,0869
262	2247	1046,7420	732,7194	610,5995	407,0663
250	2145	1097,4543	768,2180	640,1817	426,7878
238	2043	1153,3301	807,3311	672,7759	448,5173
226	1941	1215,2002	850,6401	708,8668	472,5779
215	1839	1272,1666	890,5166	742,0972	494,7314
203	1736	1347,0906	942,9635	785,8029	523,8686
191	1634	1432,2687	1002,5881	835,4901	556,9934
179	1532	1528,9451	1070,2615	891,8846	594,5897
167	1430	1639,6165	1147,7315	956,4429	637,6286
155	1328	1767,5587	1237,2911	1031,0759	687,3840

**Tabla 3.42** Corriente pico máxima de inserción en conexión Delta (Fuente: Propia)

N	Vf	Ip ( A )			
		35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	2656	441,8897	309,3228	257,7690	171,8460
298	2554	459,8303	321,8812	268,2343	178,8229
286	2452	479,2891	335,5024	279,5853	186,3902
274	2349	500,2546	350,1782	291,8152	194,5434
262	2247	523,3710	366,3597	305,2998	203,5332
250	2145	548,7272	384,1090	320,0908	213,3939
238	2043	576,6651	403,6655	336,3879	224,2586
226	1941	607,6001	425,3201	354,4334	236,2889
215	1839	636,0833	445,2583	371,0486	247,3657
203	1736	673,5453	471,4817	392,9014	261,9343
191	1634	716,1343	501,2940	417,7450	278,4967
179	1532	764,4725	535,1308	445,9423	297,2949
167	1430	819,8082	573,8658	478,2215	318,8143
155	1328	883,7794	618,6456	515,5380	343,6920

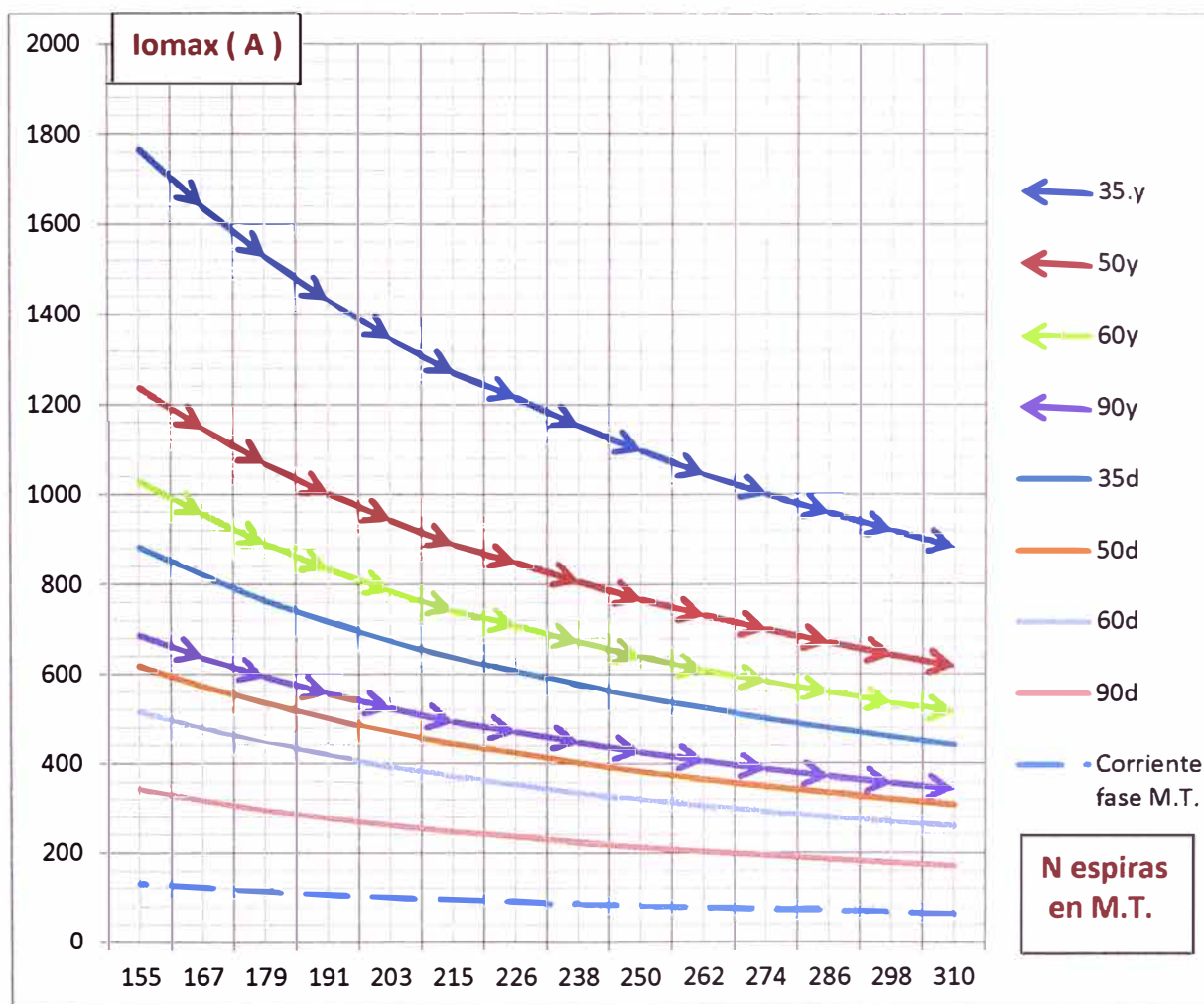
Para el cálculo de la inducción remanente de los ciclos consecuentes, se aplica un cálculo iterativo el cual proviene de una función recursiva. Ello es porque la  $B_{r, n}$  es una función que depende de  $\theta_{n-1}$ , así como del  $B_{r, n-1}$ , donde "n" es un ciclo cualquiera a partir de 2; y "n-1" es el ciclo anterior. Para el caso práctico solo se calcularán los cinco primeros ciclos. El cálculo se da con la siguiente Fórmula (3.35)

$$B_{r, n} = B_{r, n-1} - 2 B K_4 R \left( \frac{\sin \theta_{n-1} - \theta_{n-1} \cos \theta_{n-1}}{X_s} \right) \quad (3.35)$$

Las tablas obtenidas son mostradas en el Anexo D, donde se muestra la Inducción remanente, ángulo de saturación y corriente pico máxima; del segundo, tercero, cuarto y quinto ciclo (Tabla D.1; Tabla D.2; Tabla D.3; Tabla D.4), considerando N (número de espiras) desde 155 a 310, como ya fue indicado. También se considera las cuatro frecuencias (35; 50; 60 y 90 Hz) a modo de ejemplo.

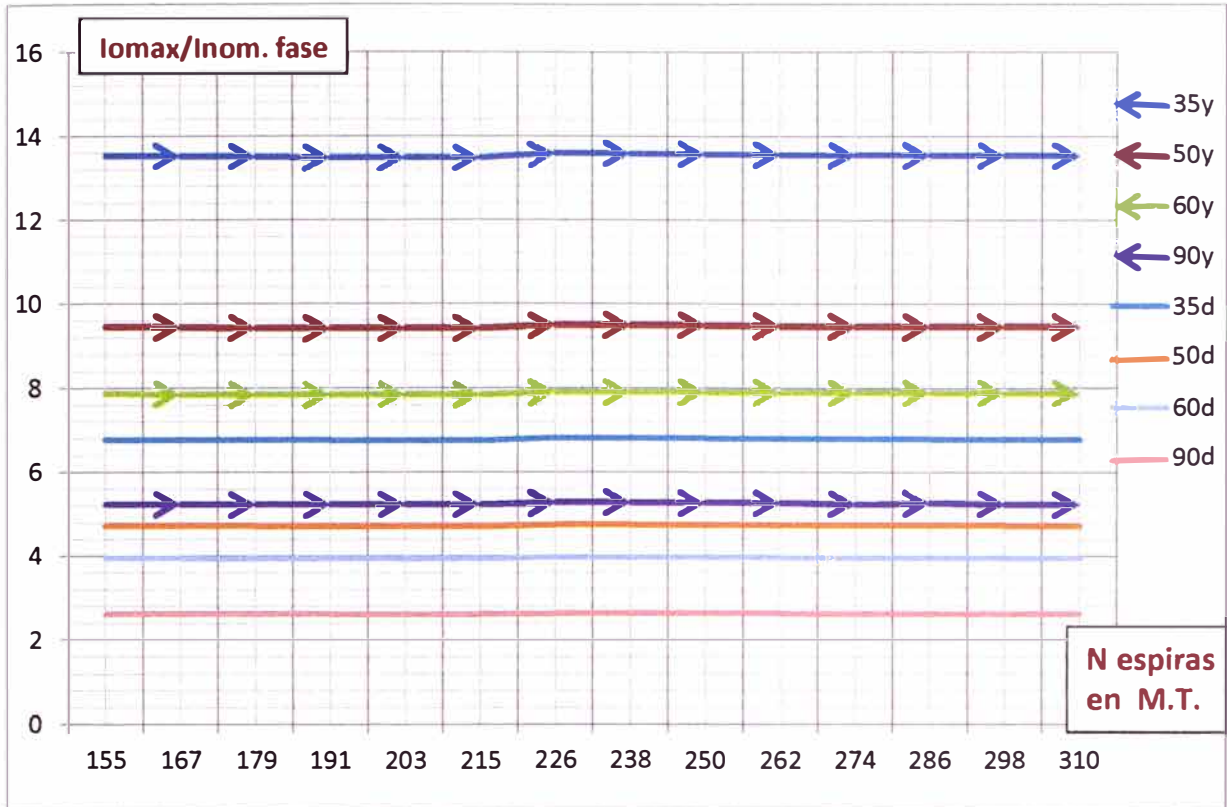
Para ilustrar los resultados se recurre a las Figuras 3.22; 3.23 y 3.24. En la Figura 3.22 se muestra la corriente pico del 1er ciclo para diferentes N espiras. Se ve que la corriente máxima se da cuando se tiene un menor número de espiras (la tensión es menor), la conexión está en estrella, la frecuencia es la menor.

Por lo que se debería tener en cuenta que para la inserción del transformador conviene tener un mayor número de espiras (mayor tensión), la conexión en delta y la frecuencia ser la máxima según el caso 90 Hz.

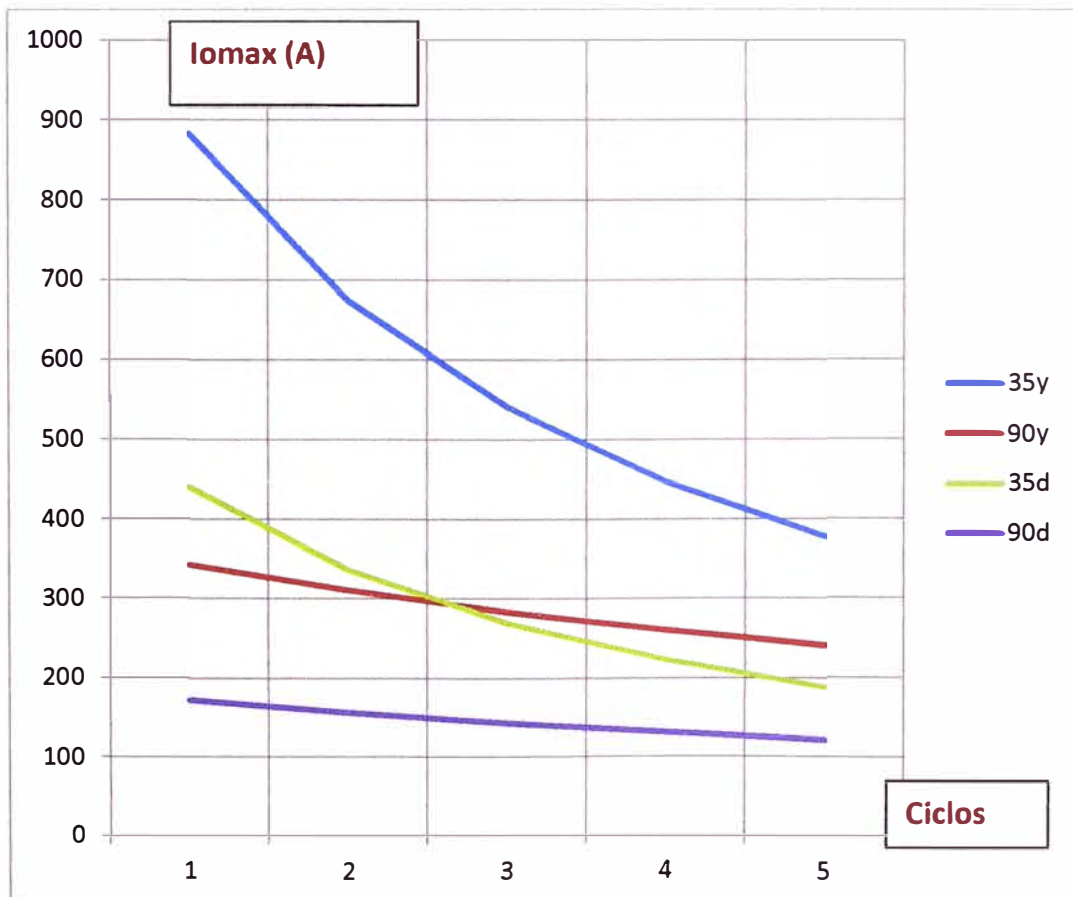


**Figura 3.22** Corriente pico del 1er ciclo para diferentes N espiras (Fuente: Propia)

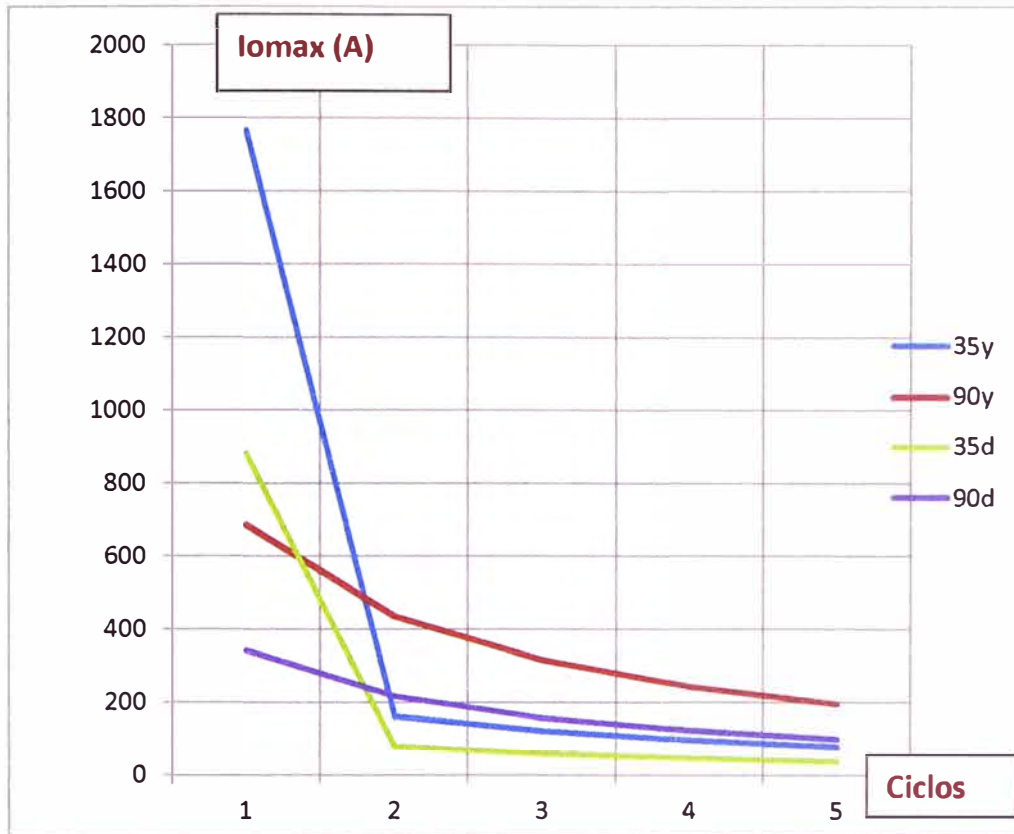
En la Figura 3.23 se muestra la relación: corriente pico del primer ciclo a la corriente nominal de fase de M.T.



**Figura 3.23** Relación de la corriente pico del primer ciclo a la corriente nominal de M.T. para N = 310 espiras (Fuente: Propia)



**Figura 3.24** Corriente pico del ciclo 1 al 5 para N = 310 (Fuente: Propia)



**Figura 3.25** Corriente pico del ciclo 1 al 5 para N = 155 (Fuente: propia)

En la Figura 3.24 y 3.25 se muestran las corrientes pico del ciclo 1 al 5 para N = 310 y N = 155 espiras respectivamente (Curva de daño térmico), con lo cual se ve que el primer pico de corriente es la mayor, pero a medida que pasan los ciclos esta va disminuyendo hasta que se tenga la corriente nominal de funcionamiento propio del transformador.

### 3.10 Cálculo del calentamiento en los arrollamientos

El arrollamiento y el núcleo producen calor por las pérdidas mencionadas. Ese calor debe ser disipado mediante la transferencia de calor bobina-aceite-tanque-aletas-aire. La temperatura de operación debe ser reducida a lo establecido por norma a fin de procurar mantener el tiempo de vida útil del transformador (20 años). El calor en sí afecta a todas las partes interiores, principalmente a los aislamientos papel y aceite que pierden sus características dieléctricas. En esta sección se hace el cálculo del calentamiento de los arrollamientos. El Anexo G complementa el cálculo del calentamiento del tanque.

#### 3.10.1 Fórmulas involucradas

El cálculo del gradiente total de temperatura se expresa en la Fórmula (3.36)

$$G_t = G_p + G_c \quad (3.36)$$

Dónde:

- $G_c$ : Gradiente de temperatura en el conductor ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $G_p$ : Gradiente de temperatura en el papel ( $^{\circ}\text{C}$ )

A su vez  $G_c$  y  $G_p$  se calculan con la Fórmula (3.37) y la Fórmula (3.38)

$$G_p = \frac{W_u E_p}{(10^3 C_p)} \quad (3.37)$$

$$G_c = \frac{W_u}{A_{\alpha\alpha}} \quad (3.38)$$

Dónde:

- $W_u$ : Carga térmica ( $W/m^2$ )
- $E_p$ : Espesor de papel en el conductor (mm)
- $C_p$ : Conductividad en papel ( $W / (m \cdot ^\circ C)$ )
- $A_{\alpha\alpha}$ : Coeficiente de transmisión de calor ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ )

El Coeficiente de transmisión de calor ( $A_{\alpha\alpha}$ ) se calcula con la Fórmula (3.39), con lo cual se puede inferir que el cálculo de  $G_c$  es una función que depende solo de la  $W_u$ :

$$A_{\alpha\alpha} = 10^4 \left( 0,01391 - \frac{1}{\left( 7742 \left( \frac{W_u}{10^4} \right)^2 + 117 \right)} \right) \quad (3.39)$$

Por otro lado la carga térmica  $W_u$  se obtiene de la Fórmula (3.40)

$$W_u = \frac{W_{t1}}{SL_{d1}(1-S_r)} \quad (3.40)$$

Dónde:

- $SL_{d1}$ : Superficie lateral de disipación en un metro de longitud de conductores considerados ( $m^2$ )
- $W_{t1}$ : Pérdidas totales por metro de longitud de conductor ( $W / m$ )
- $S_r$ : Porcentaje de superficie de recubrimiento.

$SL_{d1}$  es equivalente numéricamente al Perímetro de la superficie de disipación ( $P_{sd}$  en mm), por lo que se muestra en la Fórmula (3.41)

$$SL_{d1} = P_{sd} \quad (3.41)$$

Las pérdidas totales por metro de longitud de conductor ( $W_{t1}$ ) se calculan de la Fórmula (3.42)

$$W_{t1} = N_{sd} W_{os1} \quad (3.42)$$

Dónde:

- $N_{sd}$  : Número de conductores en la superficie de disipación.
- $W_{os1}$  : Pérdidas óhmicas y suplementarias por metro de longitud de conductor ( $W/m$ )

$W_{os1}$  es la suma de las pérdidas óhmicas y suplementarias (por metro) y se expresa con la Fórmula (3.43)

$$W_{os1} = W_{o1} + W_{s1} \quad (3.43)$$



Dónde:

- $W_{s1}$ : Pérdidas suplementarias por metro de longitud (W/m)
- $W_{o1}$ : Pérdidas óhmicas por metro de longitud (W/m)

Estas a su vez se relacionan de la siguiente manera:

$$W_{s1} = W_{o1}\alpha \quad (3.44)$$

Donde

- $\alpha$  = Pérdidas suplementarias del arrollamiento, en valor p.u.

Las pérdidas óhmicas por unidad de longitud ( $W_{o1}$ ) se calculan de:

$$W_{o1} = W_1 P_e \quad (3.45)$$

Dónde:  $W_1$  es el Peso por metro de longitud de conductor (kg/m), y se calcula de:

$$W_1 = \frac{8,9 S}{10^3} \quad (3.46)$$

Dónde: S es la Sección del conductor ( $\text{mm}^2$ )

Finalmente las pérdidas específicas ( $P_e$ ) se obtienen de la siguiente relación:

$$P_e = 2,43137 J^2 \quad (3.47)$$

Dónde: J es la densidad de corriente en el conductor ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )

Por ello, para el cálculo de la  $G_t$  en la Fórmula (3.34), se debe primero y en orden inverso, ir resolviendo desde la Fórmula (3.45) hasta la Fórmula (3.35); así se obtienen los gradientes de temperatura de los arrollamientos en M.T. y B.T.

### 3.10.2 Calentamiento en el devanado de B.T.

Se tiene los siguientes valores de ingreso:

- $S = 126,36 \text{ mm}^2$
- $J = 2,8578 \text{ A}/\text{mm}^2$
- Pérdidas suplementarias del arrollamiento en p.u. se muestra en la Tabla 3.43

**Tabla 3.43** Pérdidas suplementarias del arrollamiento en p.u.

N	$\alpha$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
56	0,4348	0,8873	1,2777	2,8749

- $N_{sd} = 23$
- $P_{sd} = 2 * (7,36 + 630) = 1,27472 \text{ m}$
- $S_r = 23,7988\%$
- $E_p = 0,6 \text{ mm}$
- $C_p = 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

Reemplazando los valores en las Fórmulas respectivas, se obtienen:

- $P_e = 19,85702 \text{ W}/\text{kg}$
- $W_1 = 1,1246 \text{ kg}$

- $W_{o1} = 22,33128 \text{ W}$
- $SL_{d1} = 1,27472 \text{ m}^2$

**Tabla 3.44** Valores obtenidos en B.T. de las Fórmulas descritas (Fuente: Propia)

	$\alpha$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
Wos1	22,428	22,529	22,617	22,973
Wt1	515,853	518,177	520,182	528,385
Wu	532,802	535,203	537,274	545,747
Al	67,146	67,249	67,337	67,701
Gc	7,935	7,959	7,979	8,061
Gp	1,305	1,311	1,316	1,337
Gt	9,240	9,270	9,295	9,398

### 3.10.3 Calentamiento en el devanado de M.T.

Se tiene los siguientes valores de ingreso:

- $S = 44,31375 \text{ mm}^2$
- J para diferentes N (Tabla 3.45)

**Tabla 3.45** Densidad de corriente (J) en M.T.

Nº espiras	Densidad J (A/mm <sup>2</sup> )
310	1,473
298	1,531
286	1,595
274	1,665
262	1,741
250	1,824
238	1,914
226	2,015
215	2,127
203	2,253
191	2,394
179	2,553
167	2,735
155	2,946

Pérdidas suplementarias del arrollamiento en p.u. (Tabla 3.46)

**Tabla 3.46** Pérdidas suplementarias del arrollamiento en p.u.

N	$\alpha$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	4,7844	9,7640	14,0601	31,6353
298	4,4211	9,0227	12,9927	29,2336
286	4,0722	8,3107	11,9674	26,9266

274	3,7377	7,6279	10,9842	24,7144
262	3,4175	6,9744	10,0431	22,5970
250	3,1116	6,3502	9,1442	20,5745
238	2,8200	5,7552	8,2874	18,6467
226	2,5428	5,1894	7,4728	16,8138
215	2,3013	4,6966	6,7631	15,2169
203	2,0516	4,1869	6,0292	13,5657
191	1,8162	3,7066	5,3374	12,0092
179	1,5952	3,2554	4,6878	10,5476
167	1,3885	2,8336	4,0804	9,1808
155	1,1961	2,4410	3,5150	7,9088

-  $N_{sd} = 113$

-  $P_{sd} = 2 * (11,22 + 615,25) = 1,25294 \text{ m}$

-  $S_r = 27,8082\%$

-  $E_p = 0,6 \text{ mm}$

-  $C_p = 0,2 \text{ W/ (m.}^\circ\text{C)}$

Reemplazando los valores en las fórmulas respectivas, se obtienen:

$W_1 = 0,394392 \text{ kg}$

$SL_{d1} = 1,25294 \text{ m}^2$

**Tabla 3.47** Pérdidas óhmicas y suplementarias por metro de longitud de conductor.

N	J (A/mm <sup>2</sup> )	Pe	Wo1	Ws1				Wos1			
				35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	1,47	5,2741	2,0800	0,0995	0,2031	0,2925	0,6580	2,1796	2,2831	2,3725	2,7381
298	1,53	5,7020	2,2488	0,0994	0,2029	0,2922	0,6574	2,3483	2,4517	2,5410	2,9063
286	1,60	6,1872	2,4402	0,0994	0,2028	0,2920	0,6571	2,5396	2,6430	2,7322	3,0973
274	1,67	6,7404	2,6584	0,0994	0,2028	0,2920	0,6570	2,7577	2,8611	2,9504	3,3154
262	1,74	7,3674	2,9056	0,0993	0,2027	0,2918	0,6566	3,0049	3,1083	3,1975	3,5622
250	1,82	8,0862	3,1891	0,0992	0,2025	0,2916	0,6561	3,2884	3,3916	3,4807	3,8453
238	1,91	8,9104	3,5142	0,0991	0,2022	0,2912	0,6553	3,6133	3,7165	3,8054	4,1695
226	2,02	9,8733	3,8940	0,0990	0,2021	0,2910	0,6547	3,9930	4,0960	4,1850	4,5487
215	2,13	11,0012	4,3388	0,0998	0,2038	0,2934	0,6602	4,4386	4,5426	4,6322	4,9990
203	2,25	12,3422	4,8677	0,0999	0,2038	0,2935	0,6603	4,9675	5,0715	5,1612	5,5280
191	2,39	13,9344	5,4956	0,0998	0,2037	0,2933	0,6600	5,5954	5,6993	5,7889	6,1556
179	2,55	15,8438	6,2487	0,0997	0,2034	0,2929	0,6591	6,3483	6,4521	6,5416	6,9077
167	2,74	18,1890	7,1736	0,0996	0,2033	0,2927	0,6586	7,2732	7,3769	7,4663	7,8322
155	2,95	21,0962	8,3202	0,0995	0,2031	0,2925	0,6580	8,4197	8,5233	8,6126	8,9782

Asimismo se muestran los valores de las Tabla 3.48 y Tabla 3.49

**Tabla 3.48** Carga Térmica  $W_u$  y Coeficiente de transmisión de calor  $A_{\alpha\alpha}$ 

$W_{H1}$				$W_u$				$A_{\alpha\alpha}$			
35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
246,291	257,995	268,093	309,402	270,029	282,861	293,932	339,223	57,56	57,93	58,25	59,68
265,354	277,047	287,136	328,407	290,929	303,750	314,810	360,059	58,16	58,55	58,89	60,38
286,970	298,658	308,741	349,989	314,629	327,443	338,498	383,722	58,88	59,29	59,65	61,22
311,622	323,308	333,390	374,635	341,657	354,469	365,523	410,743	59,76	60,19	60,57	62,21
339,559	351,238	361,313	402,533	372,286	385,091	396,138	441,330	60,81	61,27	61,67	63,39
371,584	383,255	393,324	434,515	407,398	420,194	431,233	476,395	62,09	62,57	62,99	64,79
408,304	419,959	430,015	471,153	447,657	460,436	471,461	516,564	63,64	64,14	64,59	66,46
451,208	462,854	472,901	514,003	494,697	507,465	518,480	563,544	65,54	66,07	66,54	68,47
501,567	513,311	523,443	564,890	549,910	562,785	573,893	619,336	67,88	68,44	68,92	70,93
561,332	573,077	583,211	624,665	615,435	628,312	639,422	684,872	70,76	71,33	71,83	73,87
632,282	644,021	654,149	695,581	693,223	706,094	717,198	762,623	74,25	74,83	75,33	77,38
717,362	729,085	739,199	780,575	786,503	799,356	810,445	855,809	78,45	79,03	79,52	81,53
821,871	833,585	843,692	885,037	901,085	913,928	925,009	970,339	83,50	84,05	84,53	86,44
951,426	963,130	973,228	1014,538	1043,127	1055,959	1067,031	1112,322	89,41	89,92	90,35	92,11

**Tabla 3.49** Gradientes de temperatura del conductor, papel y Total

$G_c$				$G_p$				$G_t$			
35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
4,69	4,88	5,05	5,68	0,75	0,78	0,82	0,94	5,44	5,67	5,86	6,63
5,00	5,19	5,35	5,96	0,81	0,84	0,87	1,00	5,81	6,03	6,22	6,96
5,34	5,52	5,67	6,27	0,87	0,91	0,94	1,06	6,22	6,43	6,61	7,33
5,72	5,89	6,03	6,60	0,95	0,98	1,01	1,14	6,67	6,87	7,05	7,74
6,12	6,29	6,42	6,96	1,03	1,07	1,10	1,22	7,16	7,35	7,52	8,19
6,56	6,72	6,85	7,35	1,13	1,17	1,20	1,32	7,69	7,88	8,04	8,67
7,03	7,18	7,30	7,77	1,24	1,28	1,31	1,43	8,28	8,46	8,61	9,21
7,55	7,68	7,79	8,23	1,37	1,41	1,44	1,56	8,92	9,09	9,23	9,79
8,10	8,22	8,33	8,73	1,53	1,56	1,59	1,72	9,63	9,78	9,92	10,45
8,70	8,81	8,90	9,27	1,71	1,74	1,77	1,90	10,41	10,55	10,68	11,17
9,34	9,44	9,52	9,86	1,92	1,96	1,99	2,12	11,26	11,40	11,51	11,97
10,03	10,11	10,19	10,50	2,18	2,22	2,25	2,37	12,21	12,33	12,44	12,87
10,79	10,87	10,94	11,23	2,50	2,54	2,57	2,69	13,29	13,41	13,51	13,92
11,67	11,74	11,81	12,08	2,89	2,93	2,96	3,09	14,56	14,67	14,77	15,16

### 3.11 Rango de conmutación y conexiones Yd11 - Dd0

Esta sección se enfoca en explicar la obtención de los niveles de tensión requeridos (14 básicos y 14 extendidos), los cuales son realizados, como se mencionó, mediante la utilización de dos juegos de conmutadores y la de los aisladores externos de M.T.

En la Tabla 3.50 se muestra la Hoja de Cálculo Excel del transformador Multitap, que se ha determinado con los requerimientos del cliente. Se detallan los valores de prueba en laboratorio, para las pruebas dieléctricas y de resistencia de los arrollamientos,

además de tener allí los datos constructivos y cantidades y pesos que conforman este transformador Multitap.

En la Figura 3.25 se muestra el diagrama de bobinado. Se observa la distribución de los 2 arrollamientos con sus respectivas capas; en la Baja Tensión se tiene 5 capas de 11,5 espiras en las 4 primeras capas y la última capa tiene 10 espiras totalizando 56 espiras. La platina empleada es de 2,7 x 12 mm

Se tienen 2 canales de refrigeración de 3,5 mm cada, una entre la primera y segunda capa y la otra entre la tercera y cuarta capa, las platinas están conformadas axialmente o juntos de a 4 y radialmente o superpuestos de a 1 con su aislamiento de 0,3 mm de espesor y biespesor de 0,6 mm papel Kraft de 0,05 mm de espesor para el forrado, con esto se tendrá una espira de 3,3 x 50,4 mm; el papel entre capas es de 0,38 mm; se ha colocado unas lengüetas Nomex a los principios y salidas del arrollamiento para aislarlo adecuadamente este conductor para cuando se haga el peinado y llevado hacia el aislador respectivo, la separación entre M.T. y B.T. está conformada de un canal de 3,5 mm y de 4 cartones presspan de 1 mm cada uno, totalizando una separación de 7,5 mm

En la Media Tensión se muestra conformada de 6 capas, de las cuales las primeras 4 primeras están conformadas de 56,5 espiras y las 2 últimas capas de 42 espiras cada una, esto con la finalidad de colocar un separador axial (relleno) de 50 mm en la quinta y sexta capa, para aislar la derivación "A" de la derivación "B" y en la última capa de la derivación "2" y la derivación "1". La platina empleada es de 4,5 x 10,1 mm

Se tienen 2 canales de refrigeración de 3,5 mm cada una, una entre la segunda y tercera capa y la otra entre la cuarta y la quinta capa, las platinas están conformadas axialmente o juntos de a 1 y radialmente o superpuestos de a 1 con su aislamiento de 0,3 mm de espesor y biespesor de 0,6 mm papel Kraft de 0,05 mm de espesor para el forrado, con esto se tendrá una espira de 5,1 x 10,7 mm; el papel entre capas es de 0,51 mm, se ha colocado unas lengüetas Nomex a los principios del arrollamiento para aislarlo adecuadamente este conductor, para cuando se haga el peinado y llevado hacia el aislador respectivo.

En la Figura 3.26 se muestra el diagrama de conexionado. Se puede apreciar los 2 conmutadores que mediante el cambio de los Tap's respectivos se tendrá un rango de 14 tensiones (2 posiciones x 7 posiciones = 14 posiciones) y que si se realiza un cambio del conexionado de M.T. externamente con puentear V'-W'-U' se tiene el grupo de conexionado Yd11 con tensiones en línea en las fases U;V;W desde 2300 V hasta 4600 V y si se puentea UV'-VW'-WU' se obtiene el grupo de conexionado Dd0 con otro rango de 14 valores de tensiones en línea en las fases U;V;W desde 2656 V hasta 1328 V.

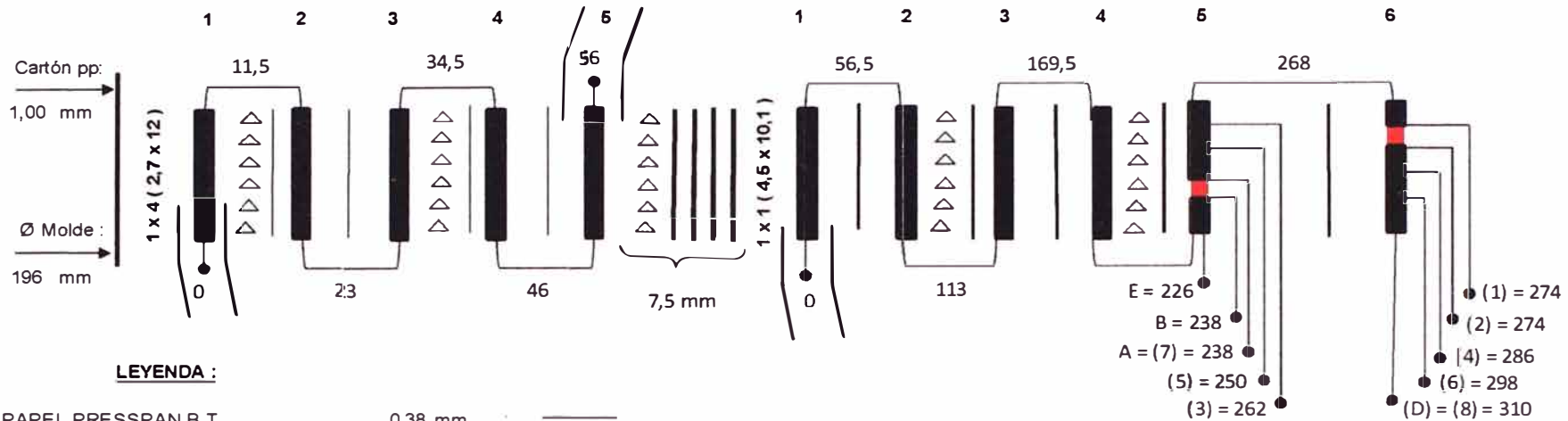
Tabla 3.50 Hoja de cálculo del transformador Multitap

CÁLCULO DE TRANSFORMADOR MULTITAP					
<b>Producto :</b>	<b>TD30 520KVA 480/2300-4600V Yd11-Dd0 1000 m.s.n.m. 35-90HZ</b>				
<b>1.-DATOS TÉCNICOS :</b>					
<b>Potencia</b>	520	kVA	<b>Tipo:</b>	DISTRIBUCIÓN	
<b>Tensión Primaria</b>	4069	V	<b>Enfriamiento</b>	ONAN	
<b>Tensión Secundaria</b>	480	V	<b>Clase de Aislamiento</b>	A	
<b>Intensidad Primaria</b>	73,78	A	<b>Montaje</b>	EXT.	
<b>Intensidad Secundaria</b>	625,46	A	<b>Nivel aislamiento Interior BT (kV)</b>	1,1 / 3 / -	
<b>Nro. de Tap's MT</b>	28	posiciones	<b>Nivel aislamiento Interior MT (kV)</b>	7,2 / 20 / 60	
<b>Regulación en MT</b>		%	<b>Aislamiento Exterior B.T.</b>		
<b>Grupo de conexión</b>	Yd11 - Dd0		<b>Aislamiento Exterior M.T.</b>		
<b>Altura de trabajo</b>	1000	m.s.n.m.	<b>DT °C cobre - max</b>	9,28	
<b>Nro. de fases</b>	3	Ø	<b>Normas:</b>	IEC - 76	
<b>Frecuencia</b>	60	Hz	<b>Fecha :</b>	2013/04/13	
<b>2.- CÁLCULO DE BOBINADO</b>					
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>SECUNDARIO</b>	<b>PRIMARIO</b>	<b>BOBINA DE CHOQUE - PRIMARIO</b>		
<b>UBICACIÓN</b>	INT	EXT	-----	Nro.Capas - Esp /Cap	-----
<b>CONEXIÓN</b>	D	YN	-----	Øaisl - Altura Radial	-----
<b>TENSION DE FASE ( V )</b>	480,00	2349,24	-----	Ømedio - PESO (kg)	-----
<b>CORRIENTE DE FASE ( A )</b>	361,11	73,78	<b>DERIVACIONES EN EL PRIMARIO</b>		
<b>CONDUCTOR</b>	PLATINA	PLATINA	<b>Posic</b>	<b>volt / esp.</b>	8,5714
<b>CALIBRE</b>	2,7 x 12	4,5 x 10,1	<b>Tap's</b>	<b>volts</b>	<b>espiras</b>
<b>JUNTOS</b>	4	1	13,05%	4600	310
<b>SUPERP</b>	1	1	8,70%	4423	298
<b>Alto Desn ( 1 Plet ) (mm)</b>	48	10,1	4,35%	4246	286
<b>Anch Desn ( 1 Plet ) (mm)</b>	2,7	4,5	0,00%	4069	274
<b>Alto Aislad ( 1 Plet ) (mm)</b>	12,6	10,7	-4,35%	3892	262
<b>Anch Aislad ( 1 Plet ) (mm)</b>	3,3	5,1	-8,70%	3715	250
<b>Bi - espesor plet (mm)</b>	0,6	0,6	-13,05%	3538	238
<b>RDC (OHM) a 20 °C</b>	0,00682	0,14448	<b>3.-DATOS DEL NÚCLEO</b>		
<b>DENSIDAD Teórica (A/mm<sup>2</sup>)</b>	2,86	1,67	<b>B Teórico (Gauss)</b>	12000	
<b>SECCION REAL ( mm<sup>2</sup>)</b>	126,36	44,31	<b>D Teórico (mm)</b>	191	
<b>DENSIDAD REAL (A/mm<sup>2</sup>)</b>	2,86	1,67	<b>Nro. Escalones</b>	10	
<b>ESP / COL TOTAL</b>	56	310	<b>FACT FE</b>	0,93	
<b>Nro. Capas</b>	5	6	<b>FACT APIL</b>	0,98	
<b>ESP /CAP (Bob. Normal)</b>	11,5	56,5	<b>ESP CHAPA</b>	0,265	
<b>NRO CAP (Bob. Normal)</b>	4	5	<b>VA / kg</b>	4,11	
<b>ESP/CAP(ultimo) (Bob.N)</b>	10	27,5	<b>W / kg</b>	0,69	
<b>Nro. CAP (ultimo) (Bob.N)</b>	1	1	<b>Factor- Manufactura</b>	1	
<b>NRO DE CANALES RADIALES</b>	2	2	<b>D (mm)</b>	191,0	
<b>UBIC CANAL</b>	0	0	<b>L (mm)</b>	690	

Ancho C/CANAL RADIAL (mm)	3,5	3,5	<b>M</b>	(mm)	365
Ancho TOT CANAL RADIAL (mm)	7	0	<b>a</b>	(mm)	175
NRO DE CANALES AXIALES	0	0	<b>B real</b>	(Gauss)	12 124,82
Ancho C/CANAL AXIAL (mm)	0	0	Sfe geom	(cm <sup>2</sup> )	270,60
Ancho TOT CANAL AXIAL (mm)	0	0	Sfe eff	(cm <sup>2</sup> )	265,19
SEP/CAP TEÓRICA (mm)	0,039	0,194	Peso FeSi	(kg)	812,58
SEP/CAP REAL (mm)	0,38	0,51			
ALT RADIAL NETA (mm)	18,02	33,15	<b>4.-Ecc y PÉRDIDAS :</b>		
ALT RADIAL TOTAL (mm)	25,02	40,15	Ex	(%)	4,65
DIÁMETRO - MOLDE (mm)	196	255,04	Er	(%)	1,10
SEP LIBRE NUCL- BT (mm)	2,5	-----	<b>Ecc</b>	(%)	4,77
ESP CIL- BASE (mm)	<b>1,00</b>	-----	<b>Pérdidas Cu 75°C</b>	(Watt)	5773,39
SEP (AC) BT - MT (mm)	<b>SEPARADOR: 3,50</b>		<b>Pérdidas Fe</b>	(Watt)	557,62
SEP (PAP) BT-MT (mm)	<b>CARTON-PAPEL: 4 --</b>		<b>Pérdidas Totales</b>	(Watt)	6331,02
SEP (AC) BT - MT (mm)	<b>SEPARADOR: 0,00</b>		Pérdidas Totales	(%)	1,218
SEP (PAP) BT-MT (mm)	<b>CARTON-PAPEL: --</b>		Eficiencia	(%)	98,782
DIAM INTERIOR (mm)	198,00	263,04	lo eff	(%)	0,64
DIAM EXTERIOR (mm)	248,04	343,34	Esfuerzo Radial MT/BT- max (kg/cm <sup>2</sup> )		<b>300,73</b>
DIAM MEDIO (mm)	223,02	303,19	Temperatura final MT-BT(°C)		<b>117--139</b>
LONG AXIAL NETA (mm)	630,00	615,25	<b>5.- PESOS DEL TRANSFORMADOR</b>		
LONG AXIAL TOTAL (mm)	660	660	Parte Activa	(kg)	1557
RELLENO (mm)	15,00	22,38	Tanque	(kg)	466
DISTANCIA/ BOB MT (mm)	<b>21,66</b>		Aceite	(kg)	970
DT - Cu - Ac (°C)	9,28	7,40	Accesorios	(kg)	115
PESO COBRE (kg)	134,40	350,07	<b>TOTAL</b>	<b>(kg)</b>	<b>3108</b>

B.T. : 480 V

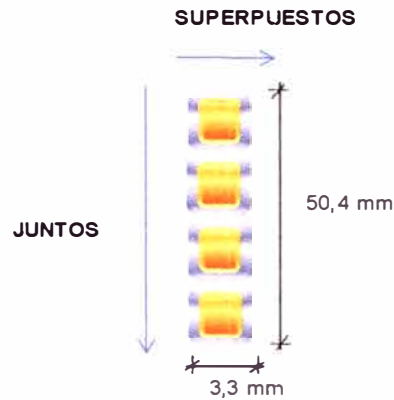
M.T. : 1328 - 4600 V



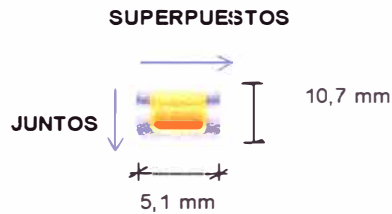
**LEYENDA :**

PAPEL PRESSPAN B.T.	0,38 mm	
SEPARADOR B.T.	3,6 mm	
SEPARADOR M.T.-B.T.	3,5 mm	
CARTON PRESSPAN M.T.-B.T.( 4 )	4x1 mm	
PAPEL PRESSPAN M.T.	0,51 mm	
SEPARADOR M.T.	3,6 mm	
RELLENO (SEPARACION)	50 mm	
LENGUETA- MOMEX M.T.-B.T.	0,9x70x120 mm	

**ESQUEMA DE PLATINAS DE B.T.**



**ESQUEMA DE PLATINAS DE M.T.**



DESCRIPCION	DATOS DE DISEÑO	
	B.T. : 480 V	M.T. : 1328 - 4600 V
CALIBRE	2,7 x 12	4,6 x 10,1
CONDUCTOR AIS	3,3 x 12,6	5,1 x 10,7
JUNTOS	4	1
SUPERP	1	1
ESPIRAS-TOT	56	310
NRO CAPAS-TOT	5	6
SEP (AC) MT-BT		3,5
SEP (PAP) MT-BT		4 -
SEP (AC) MT-BT		0
SEP (PAP) MT-BT		--
NRO CANALES	2	2
ANCHO CANALES	3,5	3,5
DIAM MOLDE	196	
DIAM INTERIOR	198	263,04
DIAM EXTERIOR	248,04	343,34
LONG. TOT. BOB	660	
LONG. NETA BOB	630	615,25
PESO COBRE	134,40	360,07

**Figura 3.25** Diagrama de bobinado (Fuente: Propia)



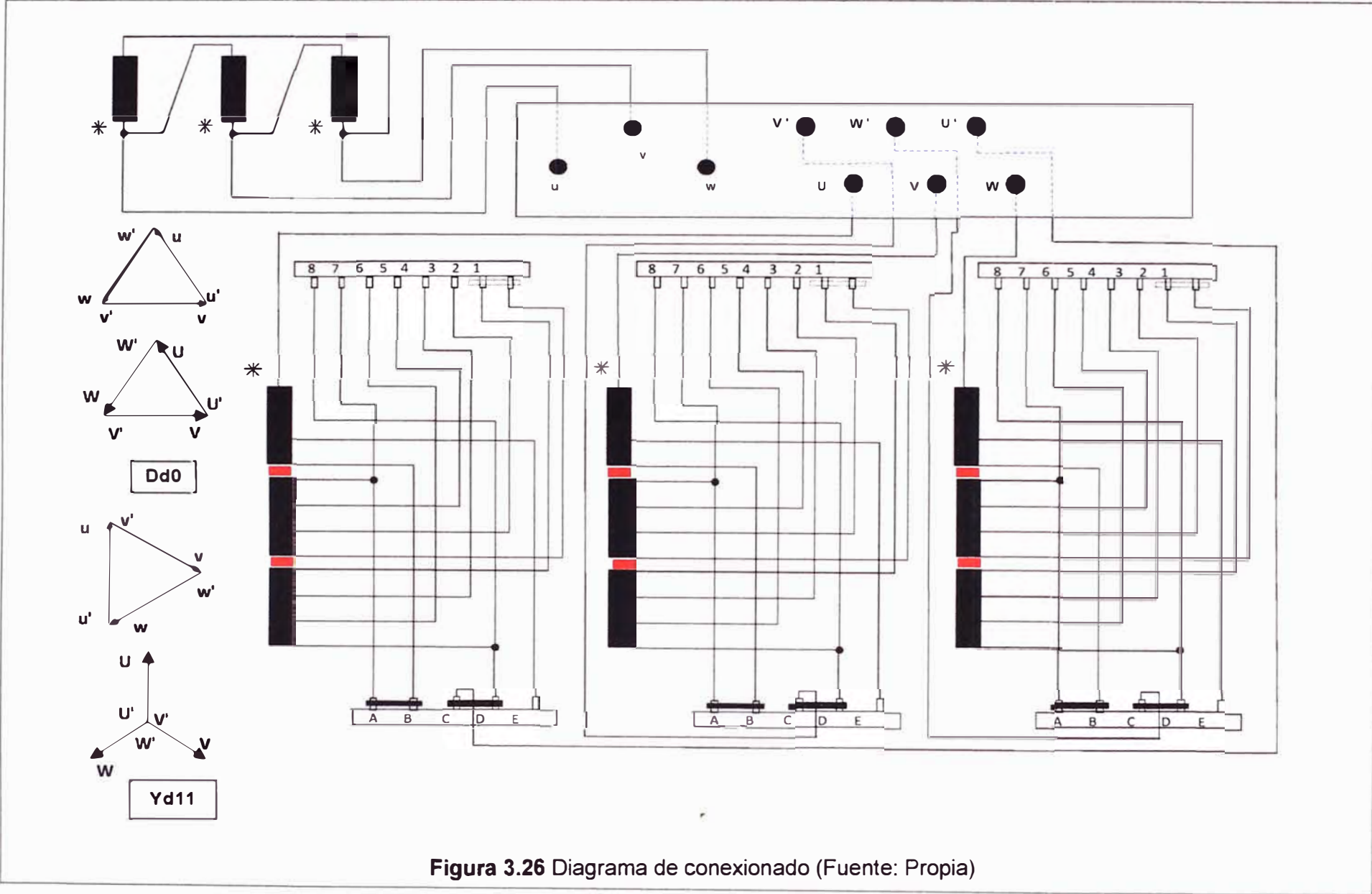


Figura 3.26 Diagrama de conexionado (Fuente: Propia)

Se muestra la Tabla 3.51 con los valores de tensiones correspondientes según el grupo de conexionado externo de los aisladores de M.T. y asimismo para los cambios de los Tap's de los conmutadores de 2 y 7 posiciones:

**Tabla 3.51** Cambio de las tensiones según los Tap's de los conmutadores y del grupo de conexionado externo en M.T.

Tap's del conmutador de 2 posiciones	Tap's del conmutador de 7 posiciones	Yd11	Dd0
SUMA POSICION 1	1 - 2	4600	2656
	2 - 3	4424	2554
	3 - 4	4247	2452
	4 - 5	4069	2349
	5 - 6	3892	2247
	6 - 7	3715	2145
	7 - 8	3539	2043
RESTA POSICION 2	8 - 7	3362	1941
	7 - 6	3185	1839
	6 - 5	3007	1736
	5 - 4	2830	1634
	4 - 3	2654	1532
	3 - 2	2477	1430
	2 - 1	2300	1328

Se aprecia que realizando el cambio del conmutador de 2 posiciones (SUMA y RESTA) y el cambio del conmutador de 7 posiciones se obtiene un rango de 14 valores de tensiones solicitados por el cliente, y que realizando el cambio externo del puente de los aisladores de M.T. se obtienen 14 valores adicionales de tensiones.

A su vez cambiando el grupo de conexiones de Yd11 ( no se considera el neutro creado de las fases V'-W'-U') a Dd0 se completa otro rango de 14 tensiones adicionales, los cuales en su totalidad conforman las 28 tensiones requeridas.

### 3.12 Pruebas de validación

Se refieren a las diferentes pruebas que se hacen al transformador, como son los de rutina y los especiales.

#### 3.12.1 Pruebas de rutina

Dentro de los de rutina se mencionan:

- Prueba de resistencia de los arrollamientos (Megado)
- Prueba de relación de transformación.
- Prueba de vacío (pérdidas en el fierro)
- Prueba de corto circuito (pérdidas en el cobre)
- Prueba de tensión inducida (aislamiento entre espiras)

- Prueba de tensión aplicada (aislamiento de un arrollamiento hacia masa o al otro arrollamiento)

**a. Prueba de medición de resistencia de los arrollamientos (Megado)**

Se realiza esta prueba para comprobar que todas las conexiones internas efectuadas en los devanados, fueron sujetadas firmemente, así como, también información para determinar las pérdidas en el cobre.

**b. Prueba de relación de transformación**

Esta prueba da una indicación si el transformador ha sido fabricado con la relación adecuada de espiras en los devanados primario y secundario, y si el transformador tiene un diferencial porcentual adecuado entre tomas.

**c. Prueba de vacío (pérdidas en el hierro)**

La prueba de vacío, tiene como objetivo determinar la pérdida de potencia en el hierro, a través de las medidas de tensión, intensidad y potencia en el bobinado primario. El bobinado secundario queda abierto, y por lo tanto, no circula ninguna intensidad por este bobinado.

**d. Prueba de corto circuito (pérdidas en el cobre)**

La prueba de corto circuito determina la pérdida de potencia en los bobinados primario y secundario, sometidos a la intensidad nominal. Al aplicar una pequeña tensión al primario y cortocircuitando el secundario, obtenemos la intensidad de cada bobinado.

**e. Prueba de tensión inducida (aislamiento entre espiras)**

Prueba al sistema de aislamiento espira a espira y bobina a bobina; con ondas de más alta frecuencia (120 a 400 Hz) para evitar tensiones excesivas entre fases.

**d. Prueba de tensión aplicada (aislamiento de un arrollamiento hacia masa o al otro arrollamiento)**

El aislamiento mayor se somete a prueba a una tensión de baja frecuencia (60 Hz) sin excitar el núcleo, durante un minuto. La norma IEEE C57.12.90- Código de pruebas para transformadores de distribución, de potencia y de regulación inmersos en líquido, describe el modo de falla, como presencia de humo o como una elevación en la corriente de fuga.

**3.12.2 Pruebas especiales**

Dentro de las pruebas especiales se encuentran:

- La de calentamiento.(Verifica el buen funcionamiento del sistema de refrigeración)
- La de impulso.(Resistencia del transformador a sobretensiones atmosféricas, tipo rayo)
- La de ruido.(verifica la presión acústica del transformador)
- Tangente delta (mide el aislamiento hacia el tanque o entre arrollamientos)
- La de barrido de frecuencia.(desplazamientos de núcleo o bobinas)

**a. Prueba de calentamiento.**

Esta prueba se realiza en fábrica y ha sido diseñada para determinar, si las elevaciones de temperatura de los devanados, del aceite y otros componentes corresponden a los valores de diseño, se realiza para las mayores pérdidas.

**b. Prueba de impulso.**

Las pruebas de impulso están diseñadas para simular lo que pudiera experimentar muchas veces el transformador durante su ciclo de vida.

- Una onda completa reducida, establece el patrón de la onda.
- Una onda cortada, simula el colapso de la tensión o la descarga de una onda viajera a través de la superficie de un aislador.
- Ondas completas, simula una descarga de un rayo lejano.
- Un frente de onda, simula el impacto directo de un rayo.

**c. Prueba de nivel de ruido.**

En caso de que se requiera que estén en servicio en un área residencial en la que el ruido puede constituir una preocupación, se deben especificar esta prueba. En la norma IEC60076-10, existe mayor información acerca de los procedimientos de prueba.

**d. Prueba Capacitancia y Tangente delta**

El objetivo es determinar el estado del aislamiento al transformador completamente armado, también sirve como línea de referencia para monitoreo en campo después de fallas ya que al comparar valores de capacitancias se detectan desplazamientos de los devanados. La prueba es realizada a Transformadores, Aceite y Aisladores.

**e. Prueba de barrido de frecuencia**

Indica desplazamientos en el núcleo o devanados.

Aseguramiento de la calidad: se pretende asegurar que transformadores del mismo diseño tengan características idénticas, línea de referencia para futuros análisis: se usa como referencia para comparar cuando han ocurrido incidentes y se requieren tomar acciones. Evaluación de transporte de transformadores: algunos clientes deciden hacer una prueba sobre camión antes de iniciar el transporte y comparar al llegar, para poder hacer esto deben dejar unos pasatapas acondicionados para tal efecto Una prueba de barrido en frecuencia es un diagrama de Bode donde se representa una respuesta del transformador a diferentes frecuencias, la respuesta puede ser medida en Hz o volts o decibeles.

Las pruebas realizadas y los valores obtenidos para el caso del transformador Multitap en el laboratorio se describen de manera aproximada en las pruebas de laboratorio, asimismo las pruebas para las pérdidas y tensión de cortocircuito se corrigieron para 75 °C y se evaluaron considerando la frecuencia a 60 Hz:

### 3.12.3 Pruebas de laboratorio

#### 1.-MEDIDA DE LA RELACION DE TRANSFORMACION.

Se ha probado en las 28 posiciones posibles realizando las combinaciones de los 2 conmutadores y de acuerdo al grupo de conexión en Delta o Estrella, según la Tabla 3.51, obteniéndose un error de relación máximo de 0,19%, según normas está dentro de lo requerido (El error máximo permitido es de 0,5%)

#### 2.-PRUEBA DE VACÍO Y PÉRDIDAS EN EL FIERRO.

Se ha realizado teniendo en consideración la alimentación por el lado de M.T. y la B.T. en circuito abierto con una corriente pequeña alrededor del 0,8% tal que la tensión en el lado de B.T. sea 480 V (tensiones nominales en los arrollamientos), obteniéndose las pérdidas en el Fierro igual a 531 W.

#### 3.-PRUEBA DE CORTOCIRCUITO Y PÉRDIDAS EN EL COBRE.

Se ha realizado teniendo en consideración la alimentación por el lado de B.T. y la M.T. en cortocircuito con corrientes nominales por los arrollamientos y para el TAP mayor o mayor número de espiras tal que la corriente en el lado de M.T. sea 65,26 A; obteniéndose una tensión alrededor del 4,6% y las pérdidas en el Cobre igual a 5041 W.

#### 4.-PRUEBA DE AISLAMIENTO.-

Se realizó esta prueba para medir si los aislamientos se encontraban adecuadamente bien, con un alto valor. Se obtuvieron los siguientes valores muy aceptables:

M.T.- Masa 9000 M $\Omega$

B.T.- Masa 8000 M $\Omega$

M.T.- B.T. 60000 M $\Omega$

#### 5.-MEDIDA DE RESISTENCIA.-

Se hizo la prueba para ver el valor resistivo de cada arrollamiento, tanto en M.T. como en B.T., obteniéndose los siguientes valores: B.T. : 0,0049  $\Omega$  ; M.T.: 0,048  $\Omega$

#### 6.-PRUEBA DE TENSION APLICADA.-

Se obtuvieron los valores siguientes: en M.T. 20 kV durante 01 minuto. Esto por el nivel de aislamiento según normas: 7,2/20/60 kV; y asimismo en B.T. 3 kV durante 01 minuto. Esto por el nivel de aislamiento según normas: 1,1/3/- kV

#### 7.-PRUEBA DE TENSION INDUCIDA.-

Se realizó la prueba a 960 V y a 120 Hz durante 01 minuto, esto parecido a la prueba en vacío, en el lado de B.T.

#### 8.-PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA.-

En 05 pruebas según la norma ASTM D1816, se tuvo 60 kV / 2 mm.

De fábrica sale el transformador en 4600 V.

## **CAPÍTULO IV EVALUACIÓN ECONÓMICA**

En el diseño de transformadores es posible obtener soluciones técnicas en una variedad de combinaciones de cantidad de materiales básicos y solicitaciones específicas. Esto es: Diferentes alternativas de pesos y pérdidas, tanto para el hierro magnético, como para el cobre. Los pesos de los materiales inciden directamente en el costo de adquisición y las pérdidas, en los gastos operativos del transformador.

La alternativa más económica para el usuario será aquella que arroje un mínimo para el costo de adquisición, más el valor actualizado de los gastos operativos, durante la explotación.

En este capítulo se explica un procedimiento de análisis económico considerando la Capitalización de las Pérdidas de los transformadores.

### **4.1 Pérdidas en el transformador**

Las pérdidas se dividen para el caso de evaluación económica en dos partes, en Vacío  $P_o$  (en el Núcleo) y en carga  $P_c$  (en el Cobre), siendo estos valores los que se describen.

Se toman de la Tabla 3.27 y la Tabla 3.14 ("Pérdidas Totales en el cobre en M.T. - B.T. en watts"; "Pérdidas en el núcleo en watts". Considerando el caso crítico para ambas pérdidas, se tiene:

-  $P_o = 1,049029$  kW (90 Hz)

-  $P_c = 7,138097$  kW (90 Hz)

### **4.2 Factores del tipo de servicio**

Son aquellas variables que intervienen para la formulación de la evaluación económica del transformador. Siendo estos:

- H: Horas de utilización al año.

-  $H_f$ : Horas fuera de punta en el día.

-  $H_p$ : Horas en punta en el día.

-  $F_c$ : Factor de Carga: Carga media / Carga máxima.

-  $F_p$ : Factor de pérdidas: Valor medio cuadrático del Diagrama de Carga, en las 24 horas del día.

-  $F_{pp}$ : Factor de pérdidas, en hora de punta: Parte de  $f_p$  correspondiente a las

horas de punta.

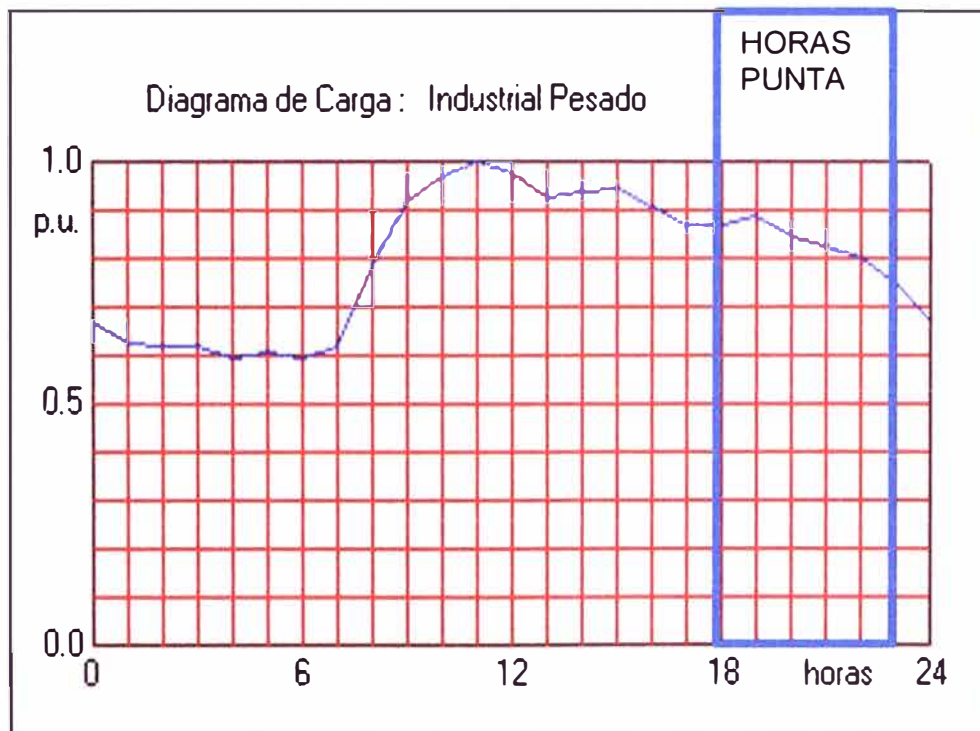
- $F_{pf}$ : Factor de pérdidas, fuera de punta =  $F_p - F_{pp}$
- $F_U$ : Factor de utilización = Potencia máxima / Potencia nominal

El diagrama que se usará para el caso en estudio es referencial y se muestra en el siguiente cuadro (Industrial pesado)

Donde las horas fuera de punta que se considera es de 24 a 18 (19 horas) y las horas en punta de 18 a 23 (5 horas); y la cargabilidad está en p.u.

**Tabla 4.1** Cargabilidad del transformador durante las 24 horas del día

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cargabilidad pu	0,63	0,62	0,62	0,6	0,61	0,6	0,62	0,79	0,92	0,97	1	0,98
Horas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Cargabilidad pu	0,93	0,94	0,95	0,91	0,87	0,87	0,89	0,85	0,83	0,8	0,75	0,67



**Figura 4.1** Diagrama de carga de funcionamiento del transformador

### 4.3 Tarifas eléctricas

Para el nivel de tensiones de suministro, comprendido en el caso de estudio de 1,328 a 4,6 kV se tiene:

- $C_d$ : Costo mensual, por demanda máxima.
- $C_{ef}$ : Costo de la energía eléctrica en horas fuera de punta.
- $C_{ep}$ : Costo de la energía en horas punta.

Teniendo en cuenta que el transformador será instalado en la selva del Perú, se usará las tarifas en media Tensión MT3 del departamento de Loreto de la empresa Electro Oriente, cuyos datos del costo proporcionados por Osinergmin, son:

Tabla 4.2 Tarifario MT3 (Loreto)

TARIFA CON DOBLE MEDICIÓN DE ENERGÍA ACTIVA Y CONTRATACIÓN O MEDICIÓN DE UNA POTENCIA 2E1P			
TARIFA MT3:	Cargo Fijo Mensual	S./mes	5,08
	Cargo por Energía Activa en Punta	ctm. S./kW-h	23,02
	Cargo por Energía Activa Fuera de Punta	ctm. S./kW-h	23,02
	<b>Cargo por Potencia Activa de generación para Usuarios:</b>		
	Presentes en Punta	S./kW-mes	13,14
	Presentes Fuera de Punta	S./kW-mes	7,4
	<b>Cargo por Potencia Activa de redes de distribución para Usuarios:</b>		
	Presentes en Punta	S./kW-mes	9,19
	Presentes Fuera de Punta	S./kW-mes	9,27
	Cargo por Energía Reactiva que exceda el 30% del total de la Energía Activa	ctm.S./kVar-h	3,18

#### 4.4 Factores financieros

Se tiene los siguientes factores financieros:

##### 4.4.1 Factor de amortización

Es la fracción del capital que debe pagarse anualmente para restituirlo, con sus intereses, al término del proyecto, se muestra la Fórmula (4.1)

$$F_a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.1)$$

##### 4.4.2 Factor de capitalización

Es el múltiplo de un pago anual, equivalente al capital actual, el cual será restituido, con sus intereses, al término del proyecto, se muestra la Fórmula (4.2)

$$F_c = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (4.2)$$

Dónde:

l: Interés anual del capital en %

n: Duración del proyecto en años.

#### 4.5 Coeficientes de Capitalización

Valor a multiplicar por las pérdidas, para obtener el capital actual equivalente a los gastos operativos en \$/kWh.

Coeficiente de Capitalización de Pérdidas en Vacío, se emplea la Fórmula (4.3)

$$K_0 = (12 C_d + H (C_{ef} H_f + C_{ep} H_p)) / 24) F_c \quad (4.3)$$

Coeficiente de Capitalización de Pérdidas con Carga, se emplea la Fórmula (4.4)

$$K_c = (12 C_d + H (C_{ef} F_{pf} + C_{ep} F_{pp})) F_u^2 F_c \quad (4.4)$$

Considerando:  $F_u = 1$ ;  $H = 8760$ ;  $i = 0,08$ ;  $n = 20$ ;  $H_p = 5$ ;  $H_f = 19$ ; El tipo de cambio del



dólar: S/. 2,61 la compra y S/. 2,54 la venta al 13 de Abril del 2013; Considerando un cliente fuera de punta.

Asimismo de la Tabla 4.2 (Tarifario MT3) los costos de energía, vienen dados por:

$$C_{ef} = 0,0906299 \text{ \$/kW-h}; C_{ep} = 0,0906299 \text{ \$/kW-h}; C_d = 6,563 \text{ \$/kW}$$

Con estos datos se obtienen:

- $F_c = 9,818$
- $F_{pf} = 0,518$
- $F_{pp} = 0,142$
- $K_o = 8568,042 \text{ \$/kW-h}$
- $K_c = 5917,808 \text{ \$/kW-h}$

Luego el costo del Transformador capitalizado será dado por la Fórmula (4.5)

$$CT = C_o + K_o P_o + K_c P_c \quad (4.5)$$

El costo inicial  $C_o$  del transformador considerando la fabricación total los insumos, gastos administrativos y otros es de \$ 19 140 + IGTV, total al cliente le costara: \$ 22 777. Y teniendo en consideración las pérdidas en el transformador:  $CT = \$ 74 007,07$

#### 4.6 Optimización del transformador Multitap

De los datos de diseño del transformador Multitap se obtendrán los valores de las dimensiones físicas del transformador optimizado, para los casos del costo de material mínimo, pérdidas mínimas y costo de operación mínimo. Para el peso del núcleo, no se considerará el factor de apilamiento 0,98; la Tabla 4.3 muestra los datos del transformador Multitap. El costo de complementos es referido a los materiales e insumos complementarios y otros gastos fijos como los administrativos.

**Tabla 4.3** Datos del transformador Multitap.

Datos transformador Multitap	Valores
Potencia (kVA)	520
Frecuencia (Hz)	60
Densidad Cu (A/mm <sup>2</sup> )	2,92153112
Densidad Flujo (T)	1,212482235
Factor Plenitud (Ffe)	0,925561091
Factor Plenitud (Fcu)	0,346717016
Precio Fe (\$/kg)	3,2
Precio del Cu (\$/kg)	9,8
Pcu (W)	7138,10
Pfe (W)	1049,03
Pérdidas Especificas Fe (W/kg)	1,32
Pérdidas Especificas Cu (W/kg)	14,73
Valorización Pfe (\$/W)	8,568042125
Valorización Cu (\$/W)	5,917808413

La densidad del cobre se ha considerado tomando en cuenta que las pérdidas máximas se producen cuando se tiene la menor cantidad de espiras (155 en M.T.), existiendo una máxima densidad de corriente, para el caso de diseño Multitap aún se debe considerar el peso máximo de cobre en M.T. y el número total de espiras aun 310. (Ver la Tabla 3.16) Por lo que se tiene:

- Espiras en M.T. = 310; Espiras en B.T. = 56
- Densidad corriente en M.T. = 2,946 A/mm<sup>2</sup>; Densidad corriente en B.T. = 2,8578 A/mm<sup>2</sup>
- Peso en M.T. = 350,072 kg; Peso en B.T. = 134,4 kg

Con lo cual se procede a calcular una densidad equivalente de M.T. y B.T. como se indica en la Fórmula (4.6)

$$\delta_{eq.} = \frac{\delta_{MT} \text{Peso}_{MT} + \delta_{BT} \text{Peso}_{BT}}{\text{Peso}_{MT} + \text{Peso}_{BT}} \quad (4.6)$$

Reemplazando los valores:  $\delta_{eq.} = 2,92153112 \text{ A/mm}^2$ . El factor de plenitud del Fierro se considera de la Fórmula (4.7); siendo el Área neta del núcleo = 265,19 cm<sup>2</sup> = 26 519 mm<sup>2</sup>. Diámetro del núcleo = 191 mm

$$F_{fe.} = \frac{\text{Area neta núcleo}}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (4.7)$$

Reemplazando los valores:  $F_{fe} = 0,92555$ ; El factor de plenitud del Cobre se considera de la Fórmula (4.8); siendo:  $N_{MT} = 310$ ;  $S_{MT} = 44,31375 \text{ mm}^2$ ;  $N_{BT} = 56$ ;  $S_{BT} = 126,36 \text{ mm}^2$ ,  $M = 365 \text{ mm}$ ;  $D = 191 \text{ mm}$ ;  $H_v = 690 \text{ mm}^2$

$$F_{Cu} = \frac{2 ( N_{MT} S_{MT} + N_{BT} S_{BT} )}{( M - D ) H_v} \quad (4.8)$$

Reemplazando los valores:  $F_{Cu} = 0,346717016$

La Tabla 4.4 muestra los datos obtenidos de los transformadores optimizados. Se muestran los resultados de haber realizado los diseños óptimos, utilizando el método del **software TRAFOTEC** del curso de diseño de transformadores **EE 235-M**, para finalmente comparar con el diseño del transformador Multitap realizado en el presente informe.

**Tabla 4.4** Datos obtenidos y optimización del transformador Multitap.

Geometría del transformador	Diseño Costo material mínimo	Diseño Costo pérdidas mínimas	Diseño costo de operación mínima	Diseño Multitap
Entre ejes "M"	329,57	300,25	304,33	365
Diámetro núcleo(mm)	202,34	250,36	242,2	191
Ancho Ventana (mm)	139,57	110,25	114,33	175
Altura Ventana(mm)	509,84	421,57	434,34	690
Relación en ventana	3,65	3,82	3,8	3,94
Peso Fe (kg)	751,74	1118,16	1048,35	794,45
Peso Cu (kg)	281,57	206,46	216,19	489,01

Pérdidas Fe (W)	992,64	1476,47	1384,29	1049,03
Pérdidas Cu (W)	4148,55	3041,93	3185,24	7205,01
Costo Fe (\$)	2405,57	3578,1	3354,71	2542,24
Costo Cu (\$)	2759,35	2023,3	2118,62	4792,31
Total (Fe + Cu) (\$)	5164,92	5601,4	5473,32	7334,54
Costo Pérdidas Fe (\$)	8504,94	12650,47	11860,64	8988,13
Costo Pérdidas Cu (\$)	24550,32	18001,58	18849,65	42637,85
Total Pérdidas (Fe + Cu) (\$)	33055,26	30652,05	30710,29	51625,98
Costo Total (\$)	38220,18	36253,45	36183,61	58960,52
Costo complementos (\$)	15046,54	15046,54	15046,54	15046,54
Costo Inicial Multitap (\$)	20211,46	20647,94	20519,86	22381,08
Costo final Multitap (\$)	53266,72	51299,99	51230,15	74007,06

La optimización de diseño del transformador Multitap se puede visualizar según el gráfico de la Figura 4.2; donde el costo total capitalizado del transformador Multitap supera ampliamente a los costos de los diseños óptimos obtenidos mediante el uso del software TRAFOTEC.

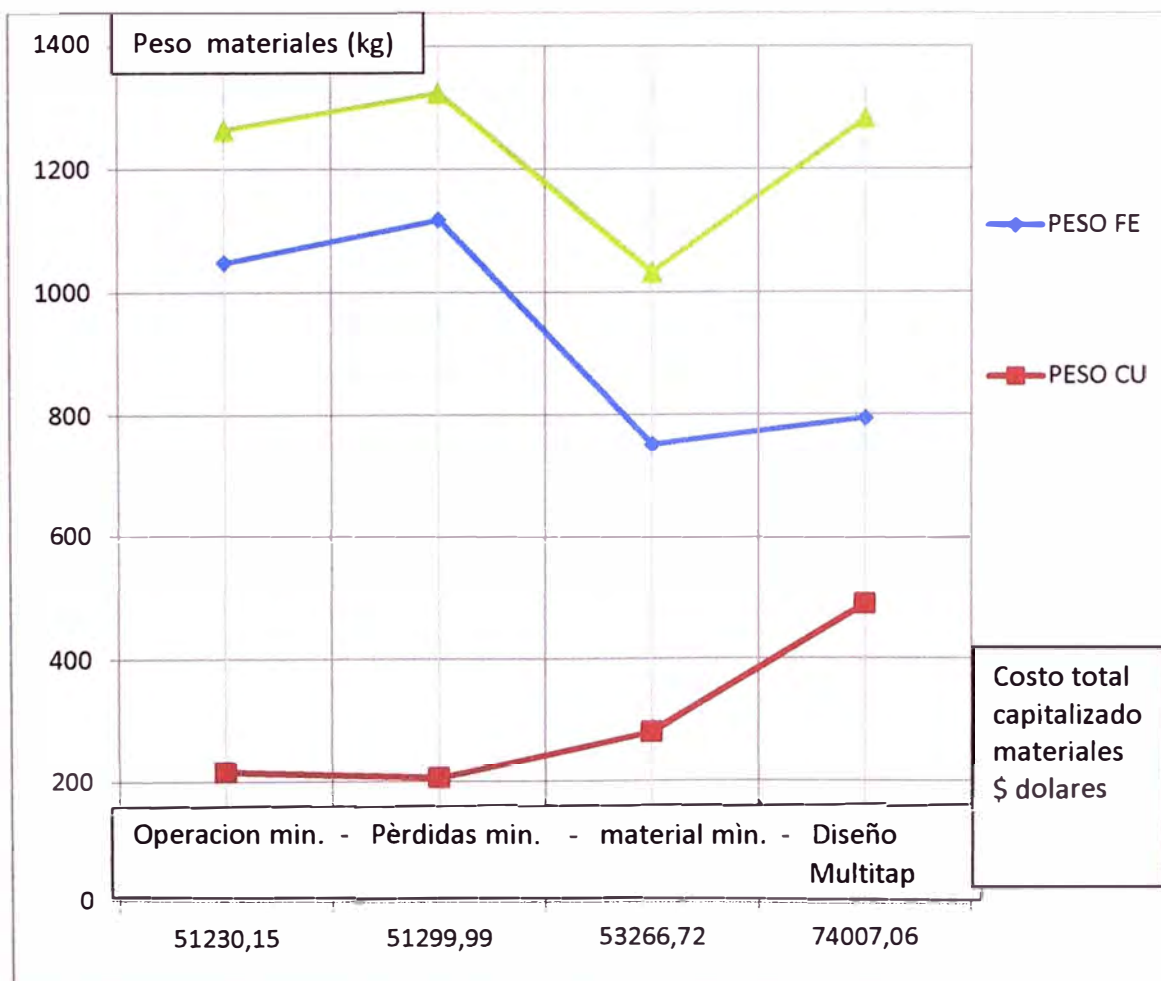


Figura 4.2 Curvas de optimización del diseño del transformador

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se cumplió con el objetivo de diseñar y poner en servicio satisfactoriamente, un transformador para uso en pozos petroleros según los requerimientos, es decir tipo Multitap trifásico de 520 kVA con un rango de transformación de 0,48 / 1,328 – 4,6 kV para una salida de 28 niveles de tensión, para los grupos de conexiones Yd11 – Dd0, y un rango de frecuencias de 35 a 90 Hz. El cliente así satisfizo su necesidad de contar con un transformador de manufactura local con el debido y oportuno respaldo técnico.
2. Se han obtenido pérdidas en el Cobre y Fierro a una determinada frecuencia y temperatura de 75 °C muy cercanas a las pérdidas obtenidas en laboratorio según 3.12.3 (pruebas de laboratorio)

### Recomendaciones

1. Utilizar material de alta calidad. El papel, fierro, cobre, aceite deben cumplir las normas correspondientes. Lo que le garantiza un mayor tiempo de vida útil.
2. Se debe someter el transformador a las pruebas que garanticen el desempeño para el que fue solicitado.
3. Optimizar el diseño para la obtención de un transformador rentable y que cumpla las exigencias de los datos de partida.

## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**DATOS TÉCNICOS DEL ACEITE**

## Aceite de aislamiento eléctrico

Nyro Izar I es un aceite para transformadores ASTM D3487 tipo I. Nyro Izar I, desarrollado y formulado para una gran resistencia a la degradación de aceite, proporciona buena estabilidad a la oxidación que alarga la vida útil de los transformadores y reduce las necesidades de mantenimiento.

### Diseñado para gran rendimiento

Este producto ha sido especialmente desarrollado para aplicaciones en equipos eléctricos con aceite; como transformadores de alimentación y distribución, rectificadores, disyuntores y conmutadores.

### Prestaciones y ventajas

Buena transferencia de calor. Este aceite de calidad estándar, por su baja viscosidad y bajo índice de viscosidad, tiene unas características de transferencia de calor extremadamente buenas y garantiza una eficaz eliminación del calor del núcleo y los devanados.

Estabilidad a la oxidación fiable. Esta calidad, desarrollada y formulada para una buena resistencia a la degradación de aceite, proporciona buena estabilidad a la oxidación que fomenta la vida útil de los transformadores y reduce al mínimo las necesidades de mantenimiento.

Excelentes propiedades a baja temperatura. Las características nafténicas permiten poner en marcha el transformador a la temperatura más baja posible sin usar reductores de temperatura de descongelación.

Alta resistencia dieléctrica. Este aceite aislante cumple y sobrepasa las demandas más severas de resistencia dieléctrica cuando es almacenado y manipulado correctamente.

### Descripción del producto

Nyro Izar I es un aceite con trazas de inhibidos que cumple los requisitos de ASTM D 3487 tipo I. Nynas clasifica este producto en la gama High Grade.

Nyro Izar I es sometido a rigurosos análisis y a las siguientes pruebas de corrosión:

- ASTM D1275, método B
- IEC 62535
- DIN 51353

PCB: No detectable según ASTM D 4059

DBDS: No detectable según el método usando GC-AED.

### Nuestra oferta es muy variada

Estamos encantados de que haya elegido uno de nuestros aceites para transformadores. Si desea consultar algo sobre otros productos y servicios, puede ponerse en contacto con el representante local de Nynas. Además de aceites de gran calidad, ofrecemos una amplia gama de servicios; por ejemplo, entregas rápidas en todo el mundo, análisis de muestras, formación, seminarios y mucho más. No tiene más que preguntar. Para más información, visite [www.nynas.com](http://www.nynas.com)

# Nytro Izar I

PROPERTY	UNIT	TEST METHOD ASTM	SPECIFICATION LIMITS		TYPICAL DATA
			MIN	MAX	
<b>Physical</b>					
Appearance		D 1524	Clear and bright		complies
Density, 15 °C	kg/dm <sup>3</sup>	D 1298		0.91	0.883
Viscosity, 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	D 445		12.0	9.5
Viscosity, 100 °C	mm <sup>2</sup> /s	D 445		3.0	2.4
Viscosity, 0 °C	mm <sup>2</sup> /s	D 445		76	66
Flash Point, COC	°C	D 92	145		152
Pour Point	°C	D 97		-40	-48
Aniline Point	°C	D 611	63	84	76
Colour		D 1500		0.5	<0.5
Interfacial tension at 25 °C	mN /m	D 971	40		47
<b>Chemical</b>					
Total acid No.	mg KOH/g	D 974		0.03	<0.01
Corrosive sulphur		D 1275 B	non-corrosive		non-corrosive
Antioxidant, phenols	Wt %	D 2668		0.08	≤0.08
Water content	ppm	D 1533		35	<20
PCB Content	ppm	D 4059	not detectable		not detectable
<b>Electrical</b>					
Dielectric dissipation factor at 100 °C	%	D 924		0.3	<0.1
Breakdown voltage					
- As received	kV	D877	30		>40
- As received	kV	D 1816 (0.08"gap)	35		>50
- As processed	kV	D 1816 (0.08"gap)	56		>70
- Impulse breakdown	kV	D 3300	145		>300
Gassing tendency	µl /min	D 2300B		+30	+12
<b>Oxidation Stability</b>					
After 72 h		D 2440			
- Sludge	Wt %			0.15	0.01
- Neutralization No.	mg KOH/g			0.5	0.02
After 164 h					
- Sludge				0.3	0.09
- Neutralization No.				0.6	0.07
Rotating Bomb test	minutes	D 2112			220

Nytro Izar I is an insulating oil meeting ASTM D 3487 Type I.

Severely Hydrotreated Insulating Oil  
Issuing date: 2012-08-01



**ANEXO B**  
**DATOS TÉCNICOS PAPEL AISLANTE**


**INFORMACION TECNICA**

Edición:17.03.05

## PRESSPAN

El PRESSPAN, es un cartón prensado de primera calidad, que en su fabricación, emplea solamente fibras de celulosa de elevadas características técnicas.

### CAMPO DE APLICACION

El PRESSPAN es empleado en la fabricación de transformadores, condensadores, interruptores, bobinas, etc.

### CARACTERISTICAS FISICAS

### ROLLOS (PSP 3055)

### PLANCHAS (PSP 3050)

Densidad (grs/cm <sup>3</sup> ).....	1.20-1.30	1.15-1.25
Humedad en estado de suministro (%).....	6-8	6-8
Cenizas (%).....	0.5	0.5-1
Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> ).....		
Longitudinal .....	70-100	100-120
Transversal .....	50-60	70-80
Alargamiento a la rotura (%).....		
Longitudinal .....	3-5	8-11
Transversal .....	7-10	9-12
Coefficiente de máxima contracción en aire (%).....		
Longitudinal .....	0.7	0.6
Transversal .....	1.2	1.2
Perpendicular .....	4.0	3.5
Absorción de aceite.....	20-10	12-20
Clase térmica .....	"A"(105°C)	"A"(105°C)

Tensión de perforación ESPESOR (mm)	EN AIRE (Kv)	EN ACEITE (Kv)	GRAMAJE (grs x m <sup>2</sup> )
0.1	1.3	10	135
0.2	2.8	14	246
0.25	3.5	16	306
0.3	3.9	18	367
0.4	4.5	22	466
0.5	5.0	25	570
1.0	12.5	22	
1.5	18.0	28	
2.0	23.0	35	
3.0	31.0	44	
4.0	37.0	53	
5.0	41.0	60	

### FORMA DE SUMINISTRO:

En bobinas de 10 y 40 Kg aprox. (ancho 1000 mm). Bajo demanda se puede suministrar en bobinas de mayor peso y también cortado en rollos.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**

Tel: 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)

**INFORMACION TECNICA**

Edición:17.03.05

**TERCOTT "K" KRAFT****CLASE TERMICA B (130°C)****LAMINADO AISLANTE FLEXIBLE**

El aislante flexible TERCOTT "K" está compuesto por un Film de Poliéster (PETP), un soporte de papel Kraft dieléctrico calandrado y un adhesivo termoestable. El aislante así formado, posee una buena rigidez mecánica, acompañada de cierta flexibilidad. Se utiliza en el aislamiento de entre-fase de transformadores y reactancias. También en la ranura de motores.

**CARACTERISTICAS TECNICAS** (Espesor 0.12 mm)

Perforación dieléctrica NFC 26225 (KV).....	6
Constante dieléctrica 50 Hz 25°C ASTM 150-65.....	nc
Factor de disipación tg 50 Hz 25°C NFC 26230.....	nc
Resistencia específica a 25°C NFC 26230 y NFC 26143.....	nc
Punto de fusión FISHER JONES (°C) .....	>250
Punto de reblandecimiento ASTM D 876-65 (°C) .....	>245
Temperatura de utilización continua NFC 26205 (°C).....	130
Temperatura de utilización discontinua NFC 26205 (°C).....	150
Temperatura mínima de utilización NFC 26205 (°C).....	nc
Calor específico NF PRG 62011 y ASTM C 518 (cal/g °C).....	nc
Conductividad térmica NF PRG 62011 y ASTM C 518 (W/m °C).....	nc
Coefficiente de dilatación lineal. 30 a 50°C ASTM D 696-44 (mm/°C).....	3 .10 <sup>-5</sup>
Resistencia a la tracción en sentido longitudinal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ) .....	690
Resistencia a la tracción en sentido transversal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ) .....	nc
Alargamiento a la rotura en sentido longitudinal NF 26143 (%) .....	90
Alargamiento a la rotura en sentido transversal NF 26143 (%) .....	nc
Contracción 30 min. a 130°C (%) ... ..	1
Absorción al agua (%) .....	nc

**ESPESOR TOTAL****ESPESOR FILM GRAMAJE  
PRESENTACION****AISLAMIENTO**

REF. (mm)	(micras)	(grs/m <sup>2</sup> )	(V)	
0.03 +- 10%	12	45 +- 10%	4800	204 ml x 640 mm
0.05 +- 10%	23	60 +- 10%	6000	204 ml x 640 mm
0.07 +- 10%	36	77 +- 10%	7000	204 ml x 640 mm
0.12 +- 10%	23	120 +- 10%	6000	200 ml x 650 mm
0.15 +- 10%	36	145 +- 10%	7000	200 ml x 650 mm
0.25 "S" +- 10%	36	230 +- 10%	8000	200 ml x 650 mm
0.30 "S" +- 10%	75	290 +- 10%	10000	200 ml x 650 mm

**CORTE**

Bajo demanda puede suministrarse en rollos, formatos o piezas troqueladas.

La tolerancia de corte es: +0.2 -0.2mm.

En el caso de que la suma total de los anchos de los rollos, sea inferior al ancho standard de la bobina, la merma superior a 20 mm., será bobinada y servida con los rollos.

El diámetro interior standard de los tubos de cartón es de 70 mm.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

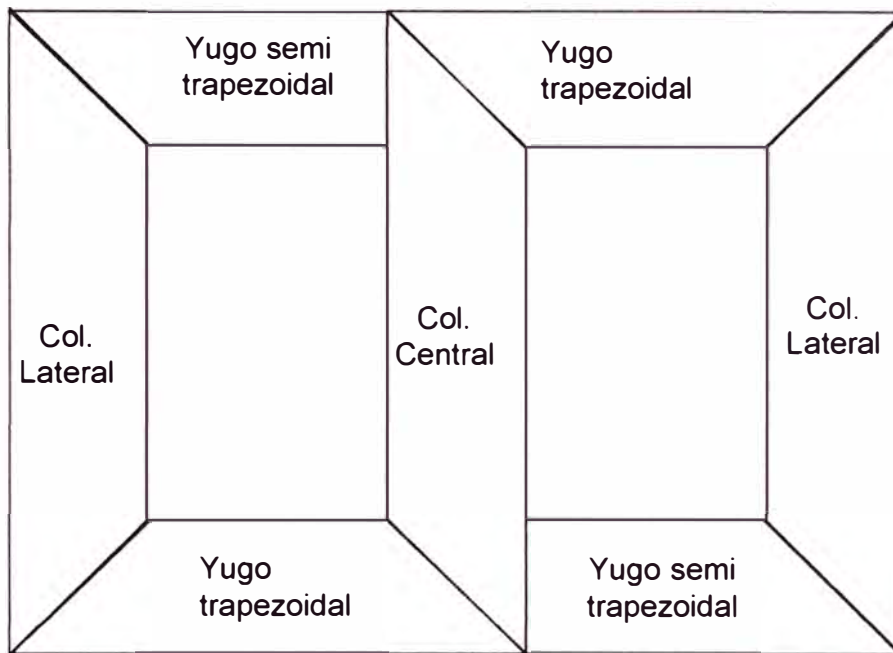
Tel- 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)

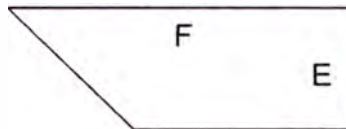
**ANEXO C**  
**DETALLE DE ESCALONES DEL NÚCLEO**

La Figura C.1 muestra los componentes para un escalón del transformador



**Figura C.1** Componentes de escalón (Fuente: Propia)

Las Figuras C.2; C.3; C.4 y C.5 muestran las dimensiones usadas en el diseño.



**Figura C.2** Yugo semitrapezoidal (Fuente: Propia)



**Figura C.3** Yugo trapezoidal (Fuente: Propia)



**Figura C.4** Columna Lateral (Fuente: Propia)



**Figura C.5** Columna central (Fuente: Propia)

Las mismas ya fueron indicadas en las Tabla 3.5 "Dimensiones geométricas escalones del núcleo" en el capítulo 3.

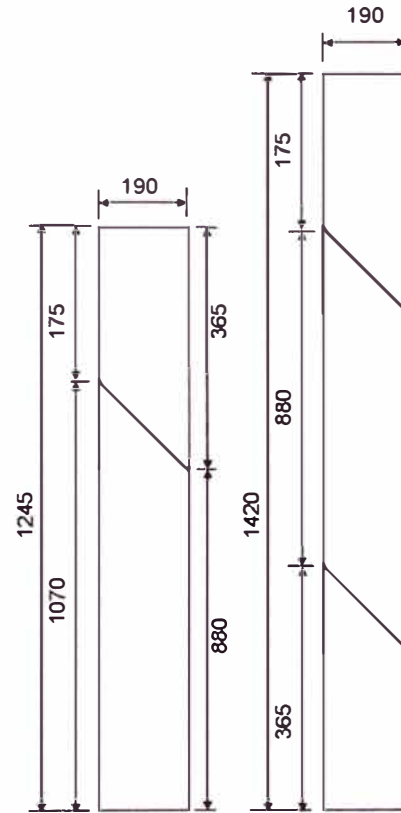
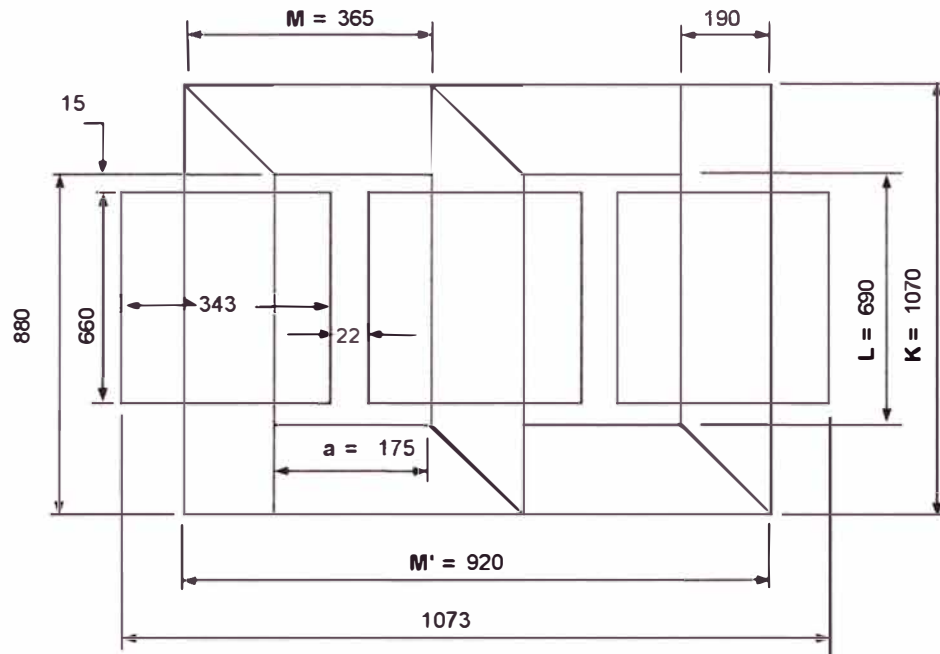
En la Figura C.6 se muestra el plano de corte del núcleo mecanizado que está conformado de un corte  $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$  que se realiza con una guillotina muy afilada para evitar las rebarbas en los extremos del corte, este tipo de núcleo tiene su conformación de acuerdo a las 2 tiras cortadas que se muestran en la Figura C.6, para los diferentes escalones que lo conforman, variando su ancho en cada una de ellas.

En la Figura C.7 se muestra el plano de corte del núcleo automatizado que está conformado de un corte  $45^{\circ}$ - $45^{\circ}$  que es realizado con un robot que corta el yugo superior e inferior en "V", esto con la finalidad de que todo el flujo magnético no se desvíe del recorrido a través de la plancha del núcleo, por esta razón este tipo de corte presenta mejores propiedades que el corte mecanizado.

D	(mm)	191
Area	(cm <sup>2</sup> )	265,19
Peso	(kg)	812,58
Espesor	(mm)	0,265
Paquete	(mm)	181,33
Nro. Escalones		10

**LEYENDA :**

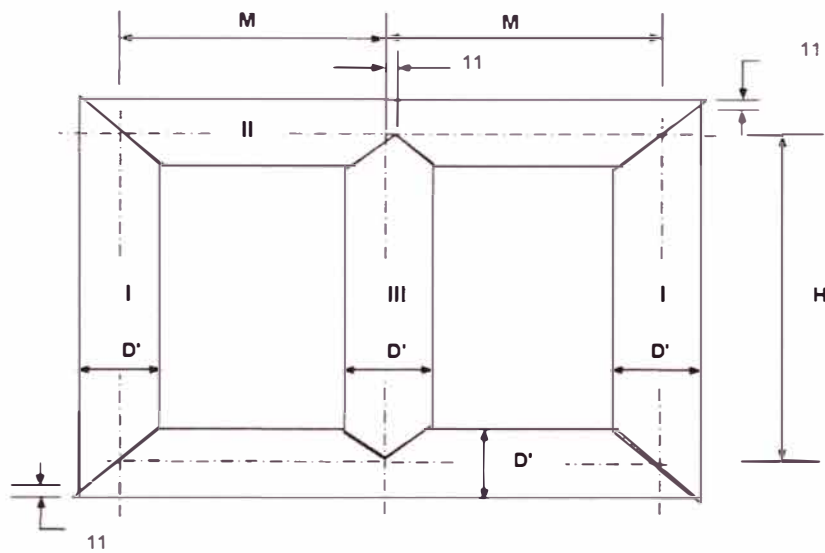
D : DIÁMETRO DE COLUMNA  
M : DISTANCIA ENTRE EJES  
L : ALTURA DE VENTANA  
K : ALTURA DEL NÚCLEO  
M' : LARGO DEL NÚCLEO  
a : ANCHO DE VENTANA



ANCHO	LARGO	CANT	kg
190	1245	147	70,64
180	1245	335	152,11
170	1245	175	75,08
160	1245	130	52,55
150	1245	105	39,80
130	1245	164	53,71
110	1245	122	33,97
90	1245	93	21,13
70	1245	70	12,33
60	1245	27	4,14
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

190	1420	74	40,29
180	1430	167	87,36
170	1440	87	43,42
160	1450	65	30,60
150	1460	53	23,34
130	1480	82	31,93
110	1500	61	20,46
90	1520	46	12,90
70	1540	35	7,62
60	1550	14	2,58
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

**Figura C.6** Plano del corte de Núcleo mecanizado (Fuente: Propia)



Diámetro (mm)	191,00
Area (cm <sup>2</sup> )	265,19
Peso (kg)	812,58
Espesor (mm)	0,265
Paquete (mm)	181,33
Nro. Escalones	10
DEF (mm)	11

**CUADRO DE DIMENSIONES**

Nro. de Escalones	D'	M	H	I	II	III	PAQUETE	PESO
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg
1	190	365	880	147	147	74	19,52	114,00
2	180	365	880	335	335	167	22,18	243,66
3	170	365	880	175	175	87	11,59	119,38
4	160	365	880	130	130	65	8,62	82,94
5	150	365	880	105	105	53	6,96	62,34
6	130	365	880	164	164	82	10,85	82,87
7	110	365	880	122	122	61	8,11	51,61
8	90	365	880	93	93	46	6,16	31,59
9	70	365	880	70	70	35	4,62	18,14
10	60	365	880	27	27	14	1,81	6,04
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura C.7** Plano de corte del núcleo automatizado (Fuente: Propia)



**ANEXO D**  
**TABLAS DE CORRIENTE DE INSERCIÓN**

**Tabla D.1** Inducción remanente, ángulo de saturación y corriente pico máx. del segundo ciclo (Fuente: Propia)

N	Br				$\theta$				Ip (Estrella)				Ip (Delta)			
	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90
310	0,66	0,75	0,79	0,85	1,30	1,37	1,39	1,44	674,50	515,55	443,79	311,69	337,25	257,78	221,89	155,84
298	0,64	0,74	0,78	0,84	1,28	1,35	1,38	1,43	684,32	527,79	455,75	321,63	342,16	263,89	227,87	160,81
286	0,61	0,72	0,76	0,83	1,26	1,34	1,37	1,42	692,68	539,92	467,91	332,05	346,34	269,96	233,96	166,02
274	0,57	0,69	0,74	0,82	1,23	1,32	1,36	1,41	698,66	551,49	479,97	342,80	349,33	275,74	239,99	171,40
262	0,54	0,67	0,72	0,80	1,20	1,30	1,34	1,40	702,03	562,62	492,14	354,15	351,01	281,31	246,07	177,08
250	0,50	0,64	0,69	0,79	1,17	1,28	1,32	1,39	701,37	572,67	503,97	365,92	350,69	286,34	251,98	182,96
238	0,45	0,60	0,66	0,77	1,13	1,25	1,30	1,38	695,18	581,01	515,08	378,02	347,59	290,50	257,54	189,01
226	0,39	0,56	0,63	0,74	1,09	1,22	1,27	1,36	681,33	586,74	524,94	390,31	340,66	293,37	262,47	195,15
215	0,33	0,52	0,60	0,72	1,04	1,19	1,25	1,34	656,38	585,93	529,75	399,70	328,19	292,97	264,87	199,85
203	0,25	0,47	0,55	0,69	0,98	1,15	1,21	1,32	618,27	582,19	534,19	411,18	309,14	291,09	267,09	205,59
191	0,16	0,40	0,50	0,65	0,89	1,10	1,17	1,29	560,49	570,67	534,14	421,93	280,25	285,33	267,07	210,97
179	0,04	0,32	0,43	0,61	0,79	1,03	1,12	1,26	474,33	547,25	526,81	430,83	237,17	273,62	263,40	215,41
167	-0,09	0,23	0,35	0,56	0,65	0,95	1,06	1,22	347,34	506,16	508,39	436,44	173,67	253,08	254,19	218,22
155	-0,27	0,11	0,25	0,49	0,42	0,85	0,97	1,17	160,61	438,54	472,92	436,47	80,30	219,27	236,46	218,24

**Tabla D.2** Inducción remanente, ángulo de saturación y corriente pico máx. del tercer ciclo (Fuente: Propia)

N	Br				θ				Ip (Estrella)				Ip (Delta)			
	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90
310	0,46	0,59	0,65	0,75	1,14	1,24	1,29	1,36	540,72	439,60	388,05	284,58	270,36	219,80	194,03	142,29
298	0,42	0,56	0,62	0,73	1,12	1,22	1,27	1,35	539,85	444,59	394,38	291,55	269,93	222,30	197,19	145,77
286	0,39	0,53	0,60	0,71	1,09	1,20	1,25	1,33	536,88	448,69	400,23	298,57	268,44	224,34	200,12	149,29
274	0,35	0,50	0,57	0,69	1,06	1,18	1,23	1,32	531,13	451,42	405,23	305,45	265,57	225,71	202,62	152,72
262	0,30	0,47	0,54	0,67	1,02	1,15	1,20	1,30	522,51	452,83	409,47	312,33	261,25	226,41	204,73	156,16
250	0,26	0,43	0,50	0,64	0,98	1,12	1,18	1,28	510,15	452,28	412,45	318,94	255,07	226,14	206,23	159,47
238	0,21	0,38	0,46	0,61	0,94	1,08	1,15	1,26	493,32	449,26	413,77	325,11	246,66	224,63	206,88	162,56
226	0,15	0,33	0,42	0,58	0,89	1,05	1,11	1,23	471,14	443,10	412,89	330,57	235,57	221,55	206,44	165,29
215	0,10	0,29	0,37	0,54	0,84	1,01	1,08	1,21	443,21	432,02	407,71	333,12	221,60	216,01	203,86	166,56
203	0,03	0,23	0,32	0,50	0,78	0,96	1,03	1,17	407,57	417,16	400,34	335,84	203,79	208,58	200,17	167,92
191	-0,04	0,16	0,26	0,45	0,71	0,90	0,98	1,14	363,08	396,59	388,57	336,62	181,54	198,30	194,28	168,31
179	-0,11	0,09	0,19	0,39	0,63	0,84	0,92	1,09	306,72	368,69	370,96	334,46	153,36	184,34	185,48	167,23
167	-0,19	0,01	0,12	0,33	0,53	0,76	0,86	1,04	232,19	331,71	345,98	328,25	116,09	165,85	172,99	164,13
155	-0,30	-0,07	0,03	0,25	0,36	0,67	0,78	0,98	120,68	283,04	311,73	316,56	60,34	141,52	155,86	158,28

**Tabla D.3** Inducción remanente, ángulo de saturación y corriente pico máx. del cuarto ciclo (Fuente: Propia)

N	Br				θ				Ip (Estrella)				Ip (Delta)			
	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90
310	0,31	0,46	0,53	0,66	1,03	1,15	1,20	1,29	446,99	381,07	343,37	261,30	223,49	190,54	171,69	130,65
298	0,28	0,43	0,50	0,64	1,00	1,12	1,18	1,28	441,08	381,68	345,99	266,01	220,54	190,84	172,99	133,01
286	0,24	0,40	0,47	0,61	0,97	1,10	1,15	1,26	433,18	381,14	347,82	270,52	216,59	190,57	173,91	135,26
274	0,20	0,36	0,44	0,58	0,93	1,07	1,13	1,24	422,82	379,04	348,52	274,59	211,41	189,52	174,26	137,30
262	0,16	0,32	0,40	0,56	0,90	1,04	1,10	1,22	410,07	375,43	348,15	278,34	205,03	187,72	174,07	139,17
250	0,11	0,28	0,36	0,52	0,85	1,00	1,07	1,19	394,40	369,83	346,27	281,48	197,20	184,92	173,14	140,74
238	0,07	0,24	0,32	0,49	0,81	0,96	1,03	1,16	375,50	361,88	342,56	283,79	187,75	180,94	171,28	141,90
226	0,02	0,19	0,27	0,45	0,76	0,92	0,99	1,13	353,01	351,15	336,63	285,03	176,51	175,58	168,31	142,51
215	-0,03	0,14	0,23	0,41	0,72	0,88	0,95	1,10	327,44	336,95	327,34	283,60	163,72	168,47	163,67	141,80
203	-0,08	0,08	0,17	0,36	0,66	0,83	0,91	1,06	296,97	319,46	315,63	281,52	148,48	159,73	157,81	140,76
191	-0,14	0,03	0,11	0,30	0,60	0,77	0,86	1,02	261,85	298,05	300,44	277,29	130,92	149,02	150,22	138,64
179	-0,19	-0,03	0,05	0,24	0,53	0,71	0,80	0,97	220,66	272,04	281,01	270,16	110,33	136,02	140,51	135,08
167	-0,25	-0,10	-0,01	0,18	0,45	0,64	0,73	0,91	169,75	240,87	256,78	259,42	84,87	120,44	128,39	129,71
155	-0,32	-0,16	-0,08	0,11	0,32	0,57	0,66	0,85	94,75	203,60	227,12	244,28	47,37	101,80	113,56	122,14

**Tabla D.4** Inducción remanente, ángulo de saturación y corriente pico máx. del Quinto ciclo (Fuente: Propia)

N	Br				θ				Ip (Estrella)				Ip (Delta)			
	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90	f = 35	f = 50	f = 60	f = 90
310	0,21	0,36	0,44	0,58	0,94	1,07	1,13	1,24	377,65	334,57	306,73	241,08	188,83	167,28	153,37	120,54
298	0,17	0,33	0,40	0,55	0,91	1,04	1,10	1,22	369,27	332,42	306,82	244,05	184,64	166,21	153,41	122,03
286	0,13	0,29	0,37	0,53	0,87	1,01	1,07	1,19	359,18	329,09	306,01	246,65	179,59	164,54	153,01	123,32
274	0,09	0,26	0,33	0,50	0,84	0,98	1,05	1,17	347,05	324,23	303,99	248,66	173,53	162,12	152,00	124,33
262	0,05	0,22	0,30	0,46	0,80	0,95	1,01	1,15	333,03	317,93	300,83	250,16	166,52	158,97	150,41	125,08
250	0,01	0,17	0,25	0,43	0,76	0,91	0,98	1,12	316,82	309,82	296,17	250,88	158,41	154,91	148,08	125,44
238	-0,03	0,13	0,21	0,39	0,72	0,87	0,94	1,09	298,29	299,67	289,77	250,61	149,15	149,84	144,88	125,31
226	-0,07	0,08	0,16	0,34	0,67	0,83	0,90	1,05	277,34	287,25	281,36	249,13	138,67	143,63	140,68	124,56
215	-0,11	0,04	0,12	0,30	0,63	0,78	0,86	1,02	254,76	272,41	270,41	245,32	127,38	136,21	135,20	122,66
203	-0,15	-0,01	0,07	0,25	0,58	0,74	0,81	0,98	228,86	254,87	257,21	240,49	114,43	127,44	128,60	120,24
191	-0,20	-0,06	0,01	0,20	0,52	0,68	0,76	0,93	200,36	234,65	241,36	233,63	100,18	117,32	120,68	116,81
179	-0,24	-0,11	-0,04	0,14	0,46	0,62	0,71	0,88	168,50	211,46	222,48	224,20	84,25	105,73	111,24	112,10
167	-0,28	-0,17	-0,10	0,07	0,39	0,56	0,64	0,82	130,89	185,20	200,42	211,78	65,44	92,60	100,21	105,89
155	-0,33	-0,22	-0,15	0,01	0,29	0,50	0,58	0,76	76,73	155,50	175,02	195,97	38,37	77,75	87,51	97,98

**ANEXO E**  
**PLANOS DEL TRANSFORMADOR**

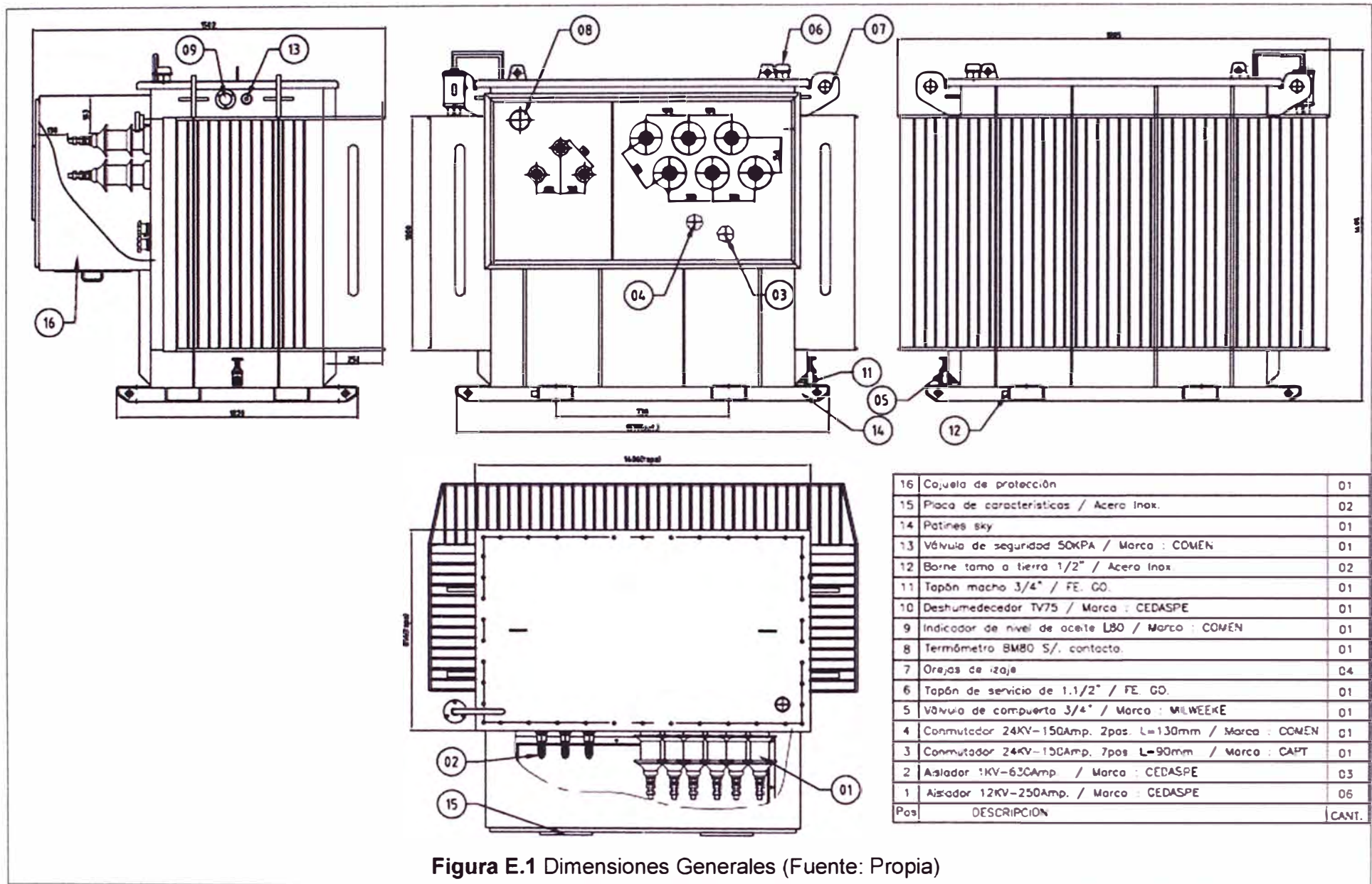


Figura E.1 Dimensiones Generales (Fuente: Propia)

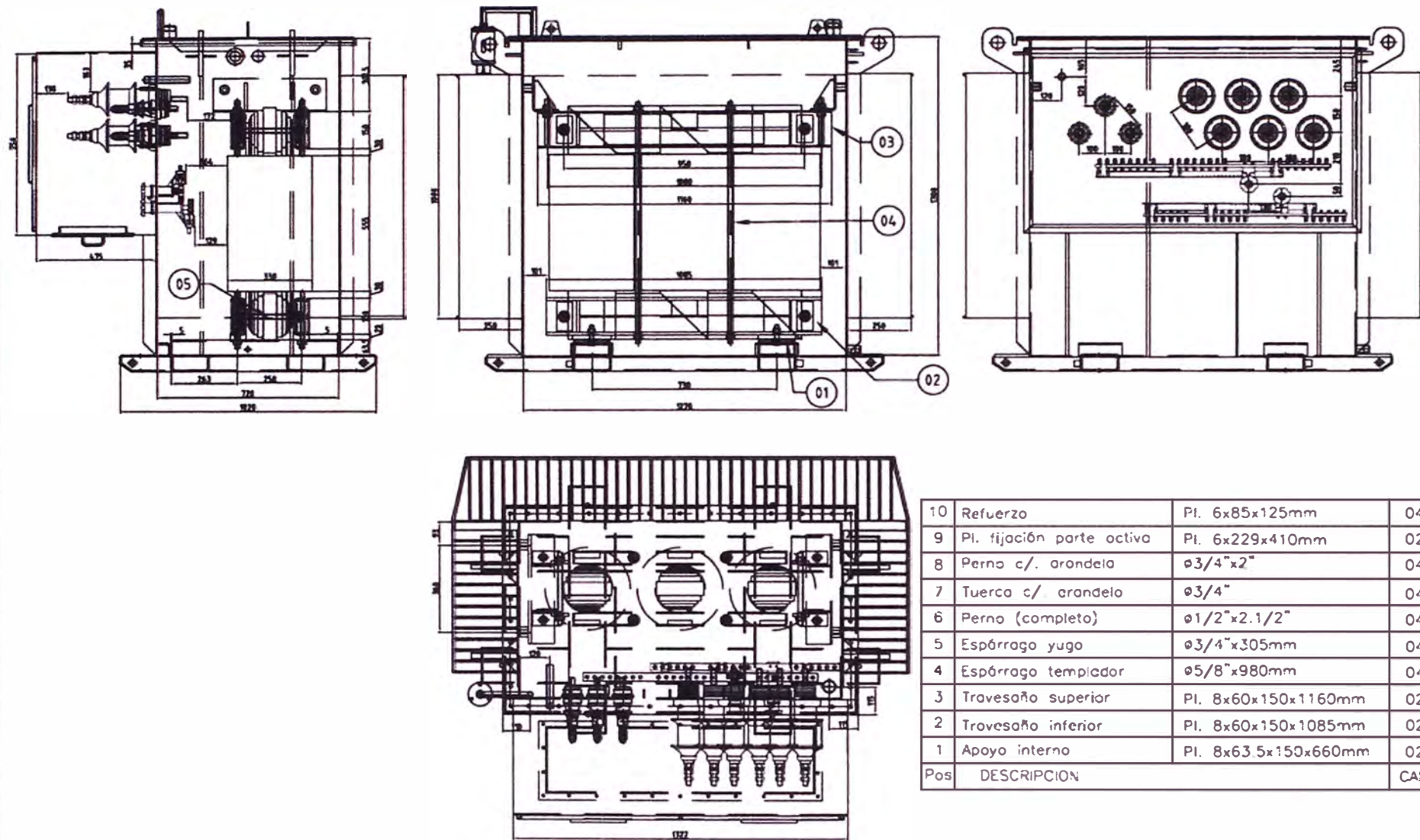
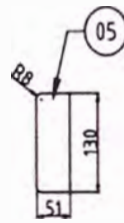
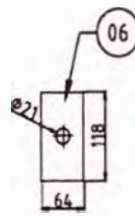
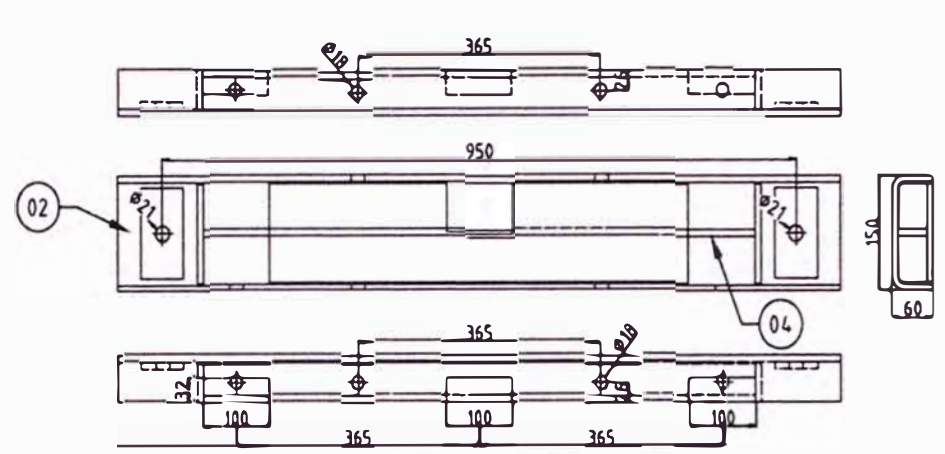
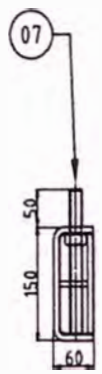
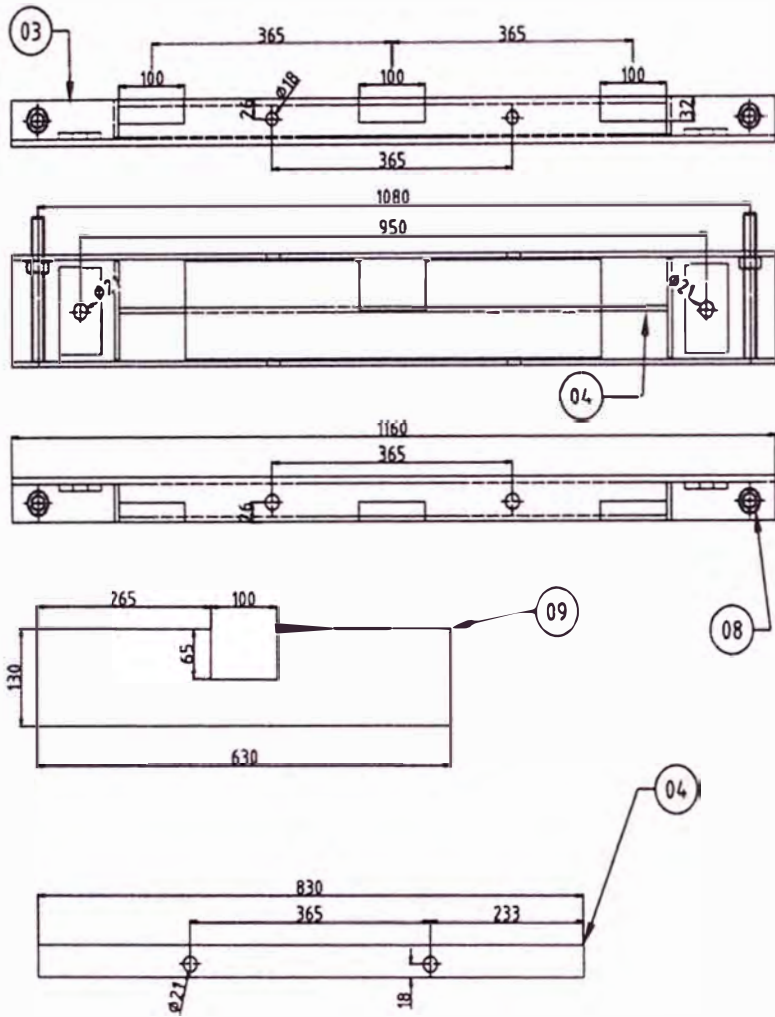


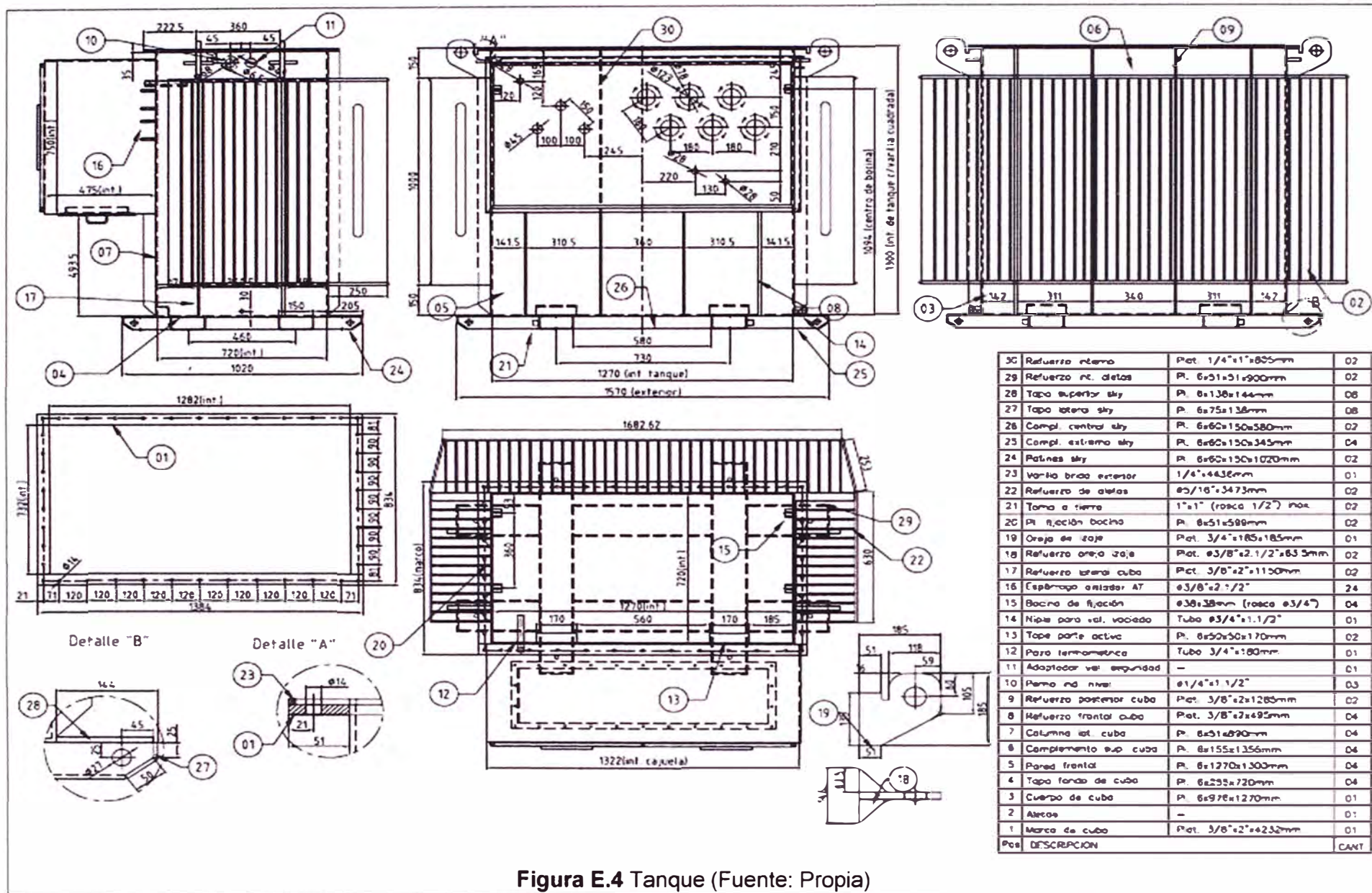
Figura E.2 Armado de Transformador (Fuente: Propia)

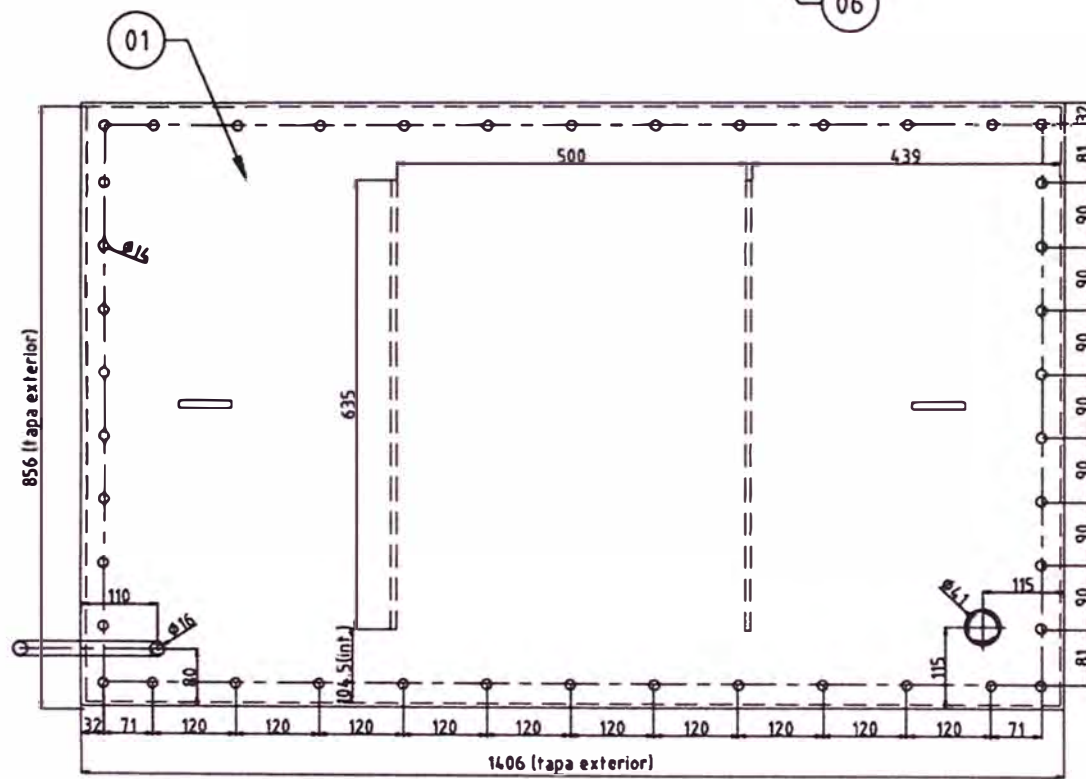
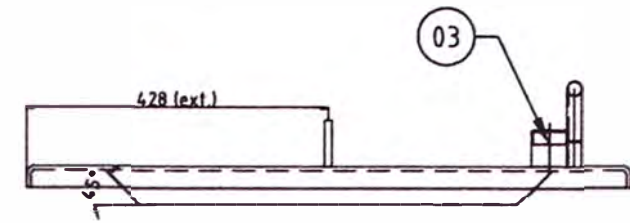
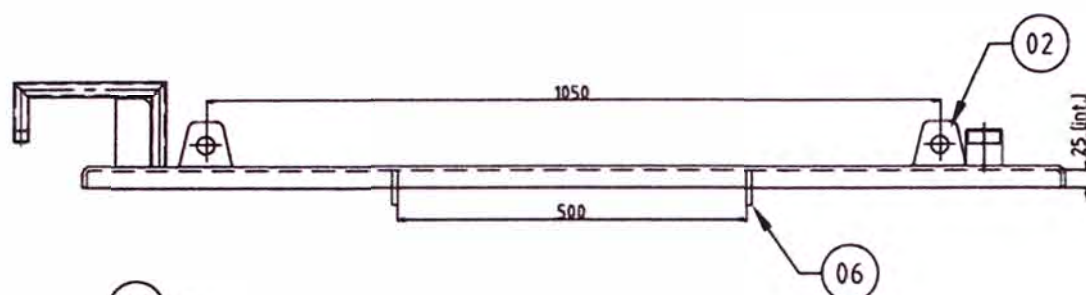




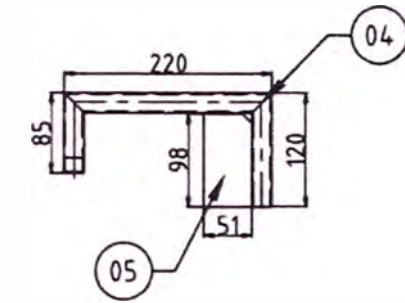
9	Tapa de travesaño	Pl. 8x130x630mm	04
8	Tuerca	ø3/4"	04
7	Espárrago tirante	ø3/4"x192mm	04
6	Refuerzo de yugo	Plat. 3/8"x2.1/2"x118mm	08
5	Refuerzo vertical	Pl. 8x51x130mm	08
4	Vena travesaño	Pl. 8x43x830mm	04
3	Travesaño superior	Pl. 8x60x150x1160mm	02
2	Travesaño inferior	Pl. 8x60x150x1085mm	02
1	Apoyo interno	Pl. 8x63.5x150x660mm	02
Pos	DESCRIPCION		CANT.

Figura E.3 Travesaños (Fuente: Propia)





Detalle de niple p/. deshumecedor



6	Vena refuerzo de tapa	Pl. 8x50x635mm	02
5	Refuerzo p/. niple desh.	Pl. 6x51x98mm	01
4	Niple p/. deshumecedor	ø1/2"x435mm	01
3	Niple de llenado	ø1.1/2"x50mm	01
2	Orejas de izaje	Plat. 3/8"x2.1/2"x3"	02
1	Tapc	Pl. 6x896x1446mm	01
Pos	DESCRIPCION		CANT.

Figura E.5 Tapa (Fuente: Propia)

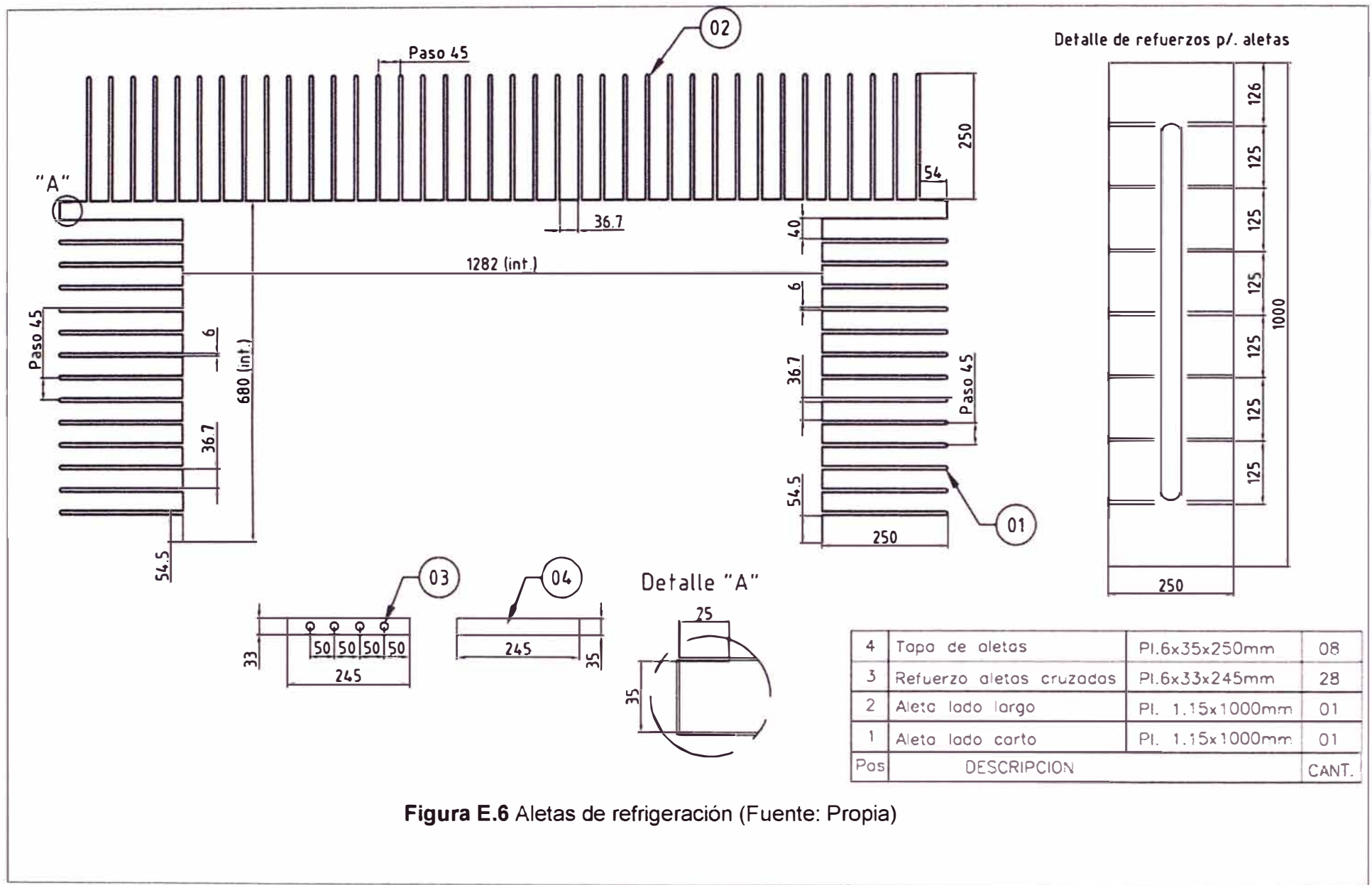


Figura E.6 Aletas de refrigeración (Fuente: Propia)

**ANEXO F**  
**CÁLCULO DEL CALENTAMIENTO DEL TANQUE**

**Tabla F.1** Datos del tanque

Altura de operación	1000	m.s.n.m.	
<b>Lado Mayor Tanque</b>			
Nº de aletas /cara	n	38	
Profundidad de cada aleta	h	250	mm
paso entre aletas	p	45	mm
Nº de caras aleteadas	nca	1	
<b>Lado Menor Tanque</b>			
Nº de aletas / cara	n'	13,5	
Profundidad de cada aleta	h'	250	mm
paso entre aletas	p'	45	mm
Nº de caras aleteadas	nca'	2	
altura de aletas	H	1000	mm
altura del marco	Hm	55	mm
altura del fondo	Hf	245	mm
Altura total interior	Hi	1300	mm
Longitud interior	L	1270	mm
Ancho interior	A	720	mm

**Tabla F.2** Cálculo de la superficie del Tanque

Hipotenusa entre aletas de esquinas	X	332,91562	mm
Área perimetral tanque (Radiación)	Ap	6,4623195	mm
Superficie Desarrollada del tanque (Convección)	STQ	32,60648	mm

Temperatura máxima del aceite, se muestra en la Fórmula (F.1)

$$\theta_{MA} = \frac{0,23 W_T}{A_P + 0,8 S_{TQ} + 0.001 W_T} \quad (F.1)$$

Temperatura media del tanque, se muestra en la Fórmula (F.2)

$$\theta_{msup} = \frac{0,13 W_T}{A_P + 0,8 S_{TQ}} \quad (F.2)$$

Temperatura aceite en contacto del Cobre, se muestra en la Fórmula (F.3)

$$\theta_{mac} = \frac{\theta_{MA} + \theta_{msup}}{2} \quad (F.3)$$

Temperatura media del cobre de B.T., se muestra en la Fórmula (F.4)

$$\theta_{mBT} = \theta_{BT} + \theta_{mac} \quad (F.4)$$

Temperatura media del cobre de M.T., se muestra en la Fórmula (F.5)

$$\theta_{mMT} = \theta_{MT} + \theta_{mac} \quad (F.5)$$

Dónde, según los datos del tanque para el caso en estudio se obtienen los siguientes

valores:

- $A_p$  : área perimetral del tanque (disipación por Radiación) = 6,462319 m<sup>2</sup>
- $S_{TQ}$  : área superficial desarrollada del tanque (disipación por Convección) = 32,60648 m<sup>2</sup>
- $W_T$  : Pérdidas totales en la peor condición del Fierro y el Cobre (90 Hz )

Según norma europea para una mayor altitud de los 1000 m.s.n.m. se emplearía la corrección, para la temperatura media del bobinado  $\theta_m$  según la Fórmula (F.6) y la temperatura máxima del aceite  $\theta_{MA}$  según la Fórmula (F.7)

$$\theta_m = 65 - \left( \frac{H-1000}{4} \right) \quad (F.6)$$

$$\theta_{MA} = 60 - \left( \frac{H-1000}{4} \right) \quad (F.7)$$

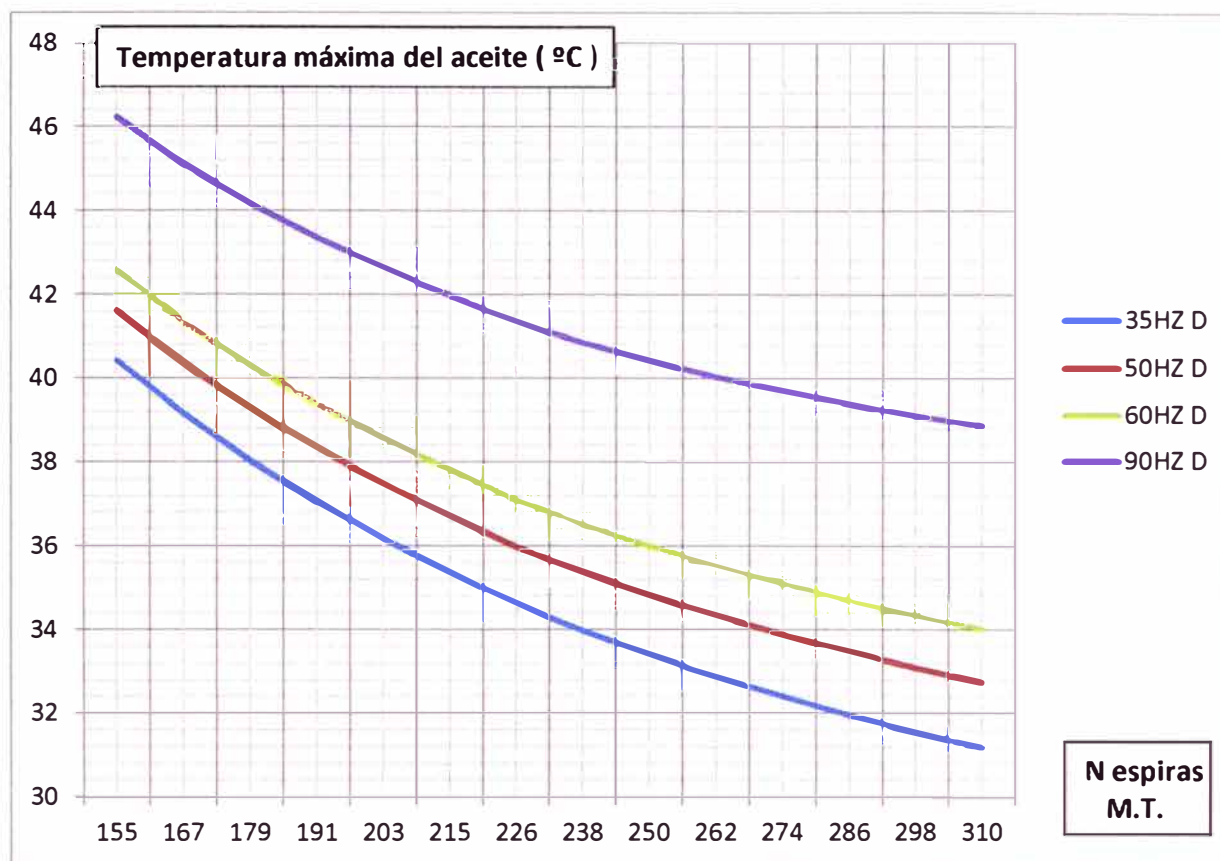
Dónde:

H: altitud de operación del transformador (mayor o igual a 1000 m.s.n.m.)

Con estos datos y haciendo uso de las pérdidas totales (fierro, arrollamiento B.T. y arrollamiento M.T.) De la Tabla 3.14, Tabla 3.24 y Tabla 3.26 se evalúan las temperaturas medias en el cobre para la B.T y la M.T. y la temperatura máxima del aceite.

**Tabla F.3** Temperatura máxima del aceite en °C

N	$\theta_{MA}$ Delta				$\theta_{MA}$ Estrella			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	31,18	32,75	34,03	38,88	31,15	32,73	34,01	38,86
298	31,55	33,10	34,35	39,12	31,52	33,07	34,33	39,09
286	31,95	33,47	34,71	39,39	31,93	33,45	34,68	39,37
274	32,40	33,89	35,10	39,70	32,37	33,86	35,08	39,68
262	32,88	34,35	35,53	40,04	32,85	34,32	35,51	40,02
250	33,40	34,84	36,01	40,43	33,37	34,81	35,98	40,40
238	33,97	35,38	36,52	40,86	33,94	35,35	36,49	40,83
226	34,60	35,99	37,11	41,34	34,57	35,95	37,07	41,31
215	35,37	36,73	37,83	41,98	35,34	36,69	37,79	41,95
203	36,17	37,49	38,57	42,63	36,13	37,46	38,53	42,59
191	37,05	38,34	39,39	43,35	37,01	38,30	39,35	43,32
179	38,03	39,29	40,31	44,17	37,99	39,25	40,27	44,13
167	39,15	40,38	41,37	45,12	39,10	40,33	41,33	45,08
155	40,43	41,62	42,58	46,23	40,38	41,57	42,54	46,18



**Figura F.1** Temperatura máxima del aceite (Fuente: Propia)

**Tabla F.4** Temperatura media del tanque en °C

N	Ømsup Delta				Ømsup Estrella			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	20,39	21,59	22,58	26,45	20,37	21,57	22,56	26,43
298	20,67	21,85	22,83	26,64	20,65	21,83	22,81	26,62
286	20,97	22,14	23,10	26,87	20,95	22,12	23,08	26,84
274	21,31	22,47	23,42	27,12	21,29	22,45	23,39	27,10
262	21,68	22,82	23,75	27,41	21,66	22,80	23,73	27,38
250	22,09	23,21	24,13	27,73	22,06	23,19	24,11	27,70
238	22,53	23,63	24,54	28,08	22,50	23,61	24,52	28,06
226	23,02	24,11	25,01	28,49	23,00	24,09	24,98	28,46
215	23,63	24,71	25,59	29,03	23,60	24,68	25,56	29,00
203	24,26	25,32	26,19	29,58	24,23	25,29	26,16	29,55
191	24,96	26,01	26,86	30,20	24,93	25,98	26,83	30,16
179	25,75	26,78	27,62	30,90	25,72	26,75	27,59	30,87
167	26,67	27,68	28,51	31,73	26,63	27,64	28,47	31,69
155	27,72	28,72	29,54	32,70	27,68	28,68	29,50	32,66

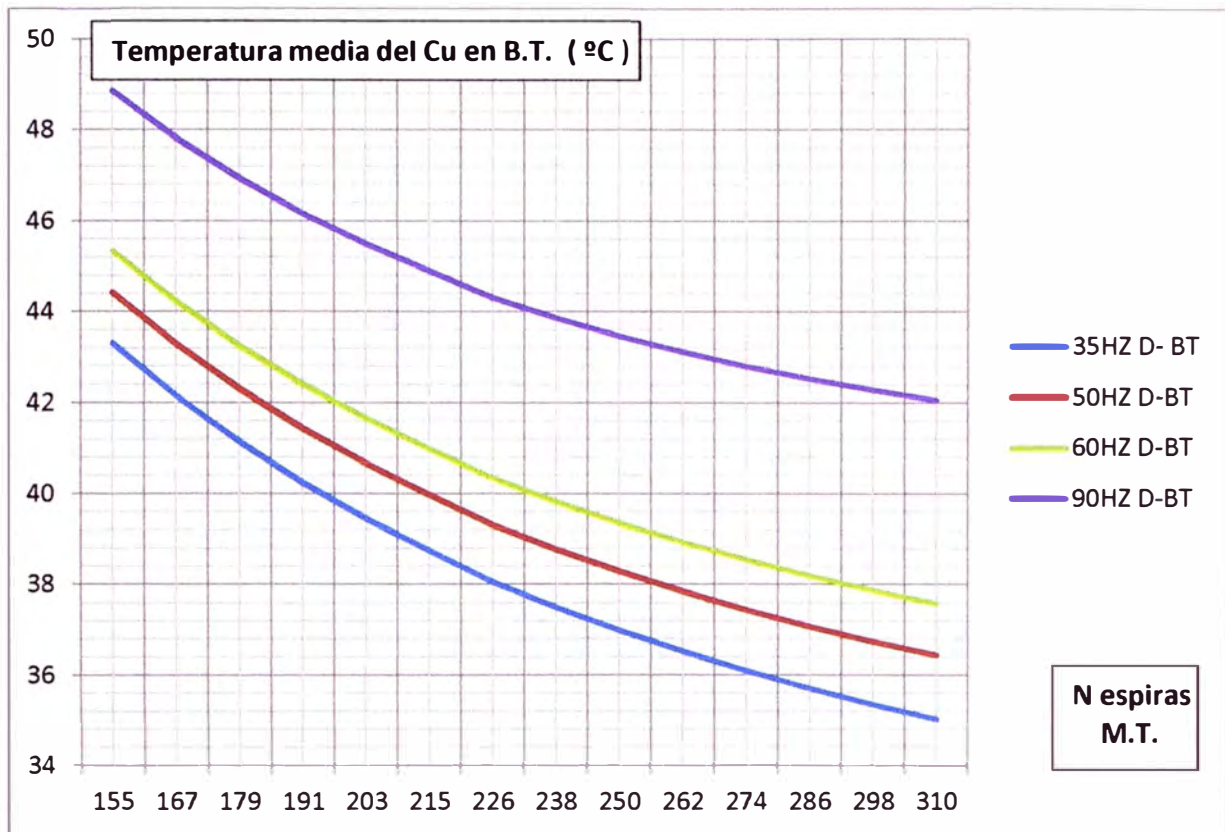


**Tabla F.5** Temperatura aceite contacto del cobre en °C

N	Ømac Delta				Ømac Estrella			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	25,78	27,17	28,30	32,66	25,76	27,15	28,28	32,64
298	26,11	27,47	28,59	32,88	26,08	27,45	28,57	32,86
286	26,46	27,81	28,91	33,13	26,44	27,78	28,88	33,10
274	26,86	28,18	29,26	33,41	26,83	28,16	29,24	33,39
262	27,28	28,58	29,64	33,72	27,25	28,56	29,62	33,70
250	27,75	29,03	30,07	34,08	27,72	29,00	30,04	34,05
238	28,25	29,51	30,53	34,47	28,22	29,48	30,50	34,44
226	28,81	30,05	31,06	34,92	28,78	30,02	31,03	34,89
215	29,50	30,72	31,71	35,51	29,47	30,69	31,68	35,48
203	30,21	31,41	32,38	36,10	30,18	31,37	32,35	36,07
191	31,00	32,18	33,13	36,77	30,97	32,14	33,09	36,74
179	31,89	33,04	33,97	37,53	31,85	33,00	33,93	37,50
167	32,91	34,03	34,94	38,43	32,87	33,99	34,90	38,39
155	34,07	35,17	36,06	39,46	34,03	35,13	36,02	39,42

**Tabla F.6** Temperatura media del cobre en B.T. en °C

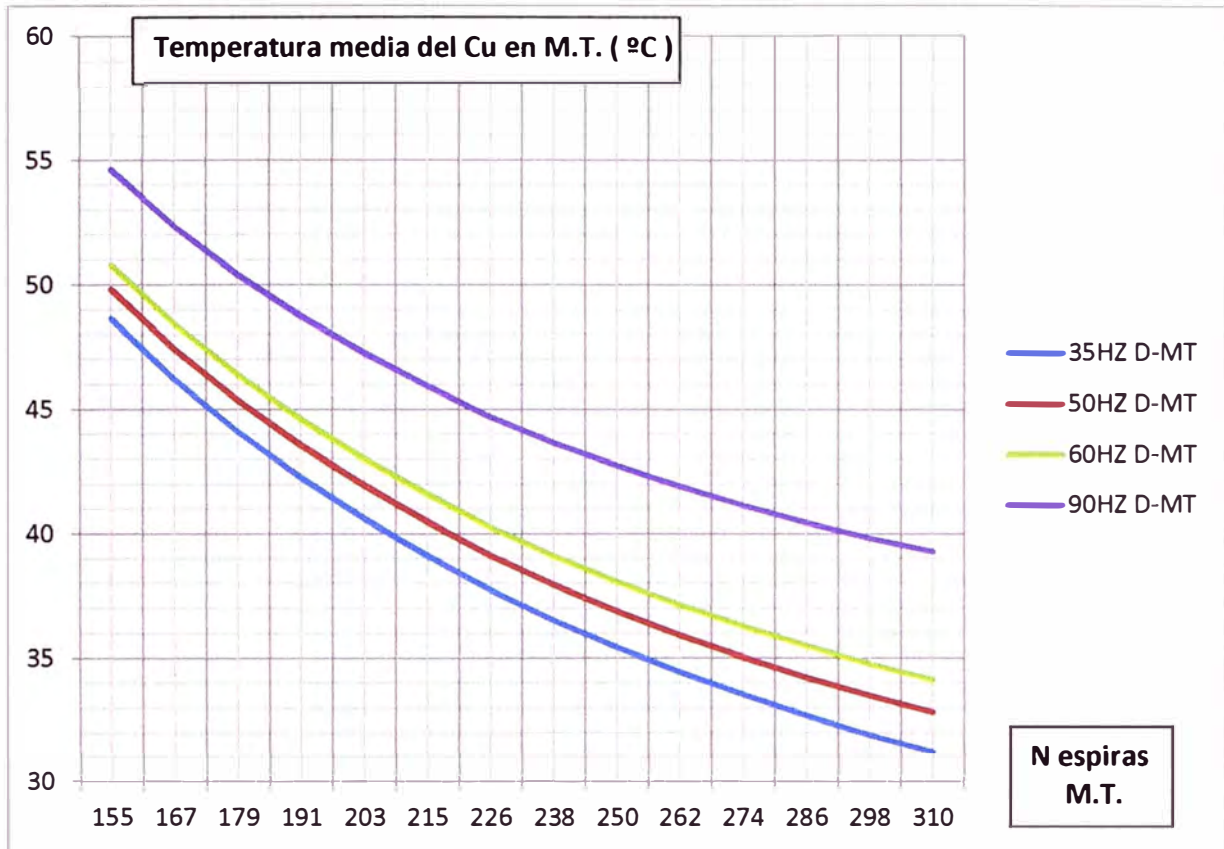
N (M.T.)	ØmBT (Delta en M.T.)				ØmBT (Estrella en M.T.)			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	35,02	36,44	37,60	42,06	35,00	36,42	37,58	42,04
298	35,35	36,74	37,88	42,28	35,32	36,72	37,86	42,26
286	35,70	37,08	38,20	42,53	35,68	37,05	38,18	42,50
274	36,10	37,45	38,56	42,81	36,07	37,43	38,53	42,79
262	36,52	37,85	38,94	43,12	36,49	37,83	38,91	43,10
250	36,99	38,30	39,36	43,48	36,96	38,27	39,34	43,45
238	37,49	38,78	39,83	43,87	37,46	38,75	39,80	43,84
226	38,05	39,32	40,35	44,32	38,02	39,29	40,32	44,29
215	38,74	39,99	41,00	44,91	38,71	39,96	40,97	44,88
203	39,45	40,68	41,67	45,50	39,42	40,64	41,64	45,47
191	40,25	41,45	42,42	46,17	40,21	41,41	42,39	46,14
179	41,13	42,31	43,26	46,93	41,09	42,27	43,22	46,90
167	42,15	43,30	44,23	47,82	42,11	43,26	44,19	47,79
155	43,31	44,44	45,36	48,86	43,27	44,40	45,31	48,82



**Figura F.2** Temperatura media del cobre B.T. (Fuente: Propia)

**Tabla F.7** Temperatura media del cobre en M.T. en °C

N	ØmMT Delta				ØmMT Estrella			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	31,22	32,84	34,16	39,29	31,20	32,82	34,14	39,27
298	31,92	33,50	34,81	39,84	31,89	33,48	34,79	39,82
286	32,68	34,24	35,52	40,46	32,66	34,22	35,50	40,44
274	33,52	35,05	36,31	41,15	33,50	35,03	36,28	41,13
262	34,44	35,94	37,17	41,91	34,41	35,91	37,14	41,89
250	35,44	36,91	38,11	42,75	35,41	36,88	38,08	42,73
238	36,53	37,96	39,14	43,67	36,50	37,94	39,11	43,65
226	37,73	39,14	40,29	44,71	37,70	39,11	40,26	44,68
215	39,13	40,50	41,63	45,96	39,10	40,47	41,60	45,93
203	40,62	41,96	43,05	47,27	40,59	41,93	43,02	47,24
191	42,26	43,57	44,64	48,75	42,23	43,54	44,60	48,71
179	44,10	45,37	46,41	50,41	44,06	45,33	46,37	50,37
167	46,20	47,44	48,45	52,34	46,16	47,40	48,41	52,31
155	48,64	49,84	50,83	54,63	48,59	49,80	50,79	54,59



**Figura F.3** Temperatura media del cobre M.T. (Fuente: Propia)

**ANEXO G**  
**FÓRMULAS DE LAS DISTANCIAS ELÉCTRICAS**

### Aislamientos entre bobinas M.T. - B.T. y aislamiento entre B.T.-núcleo.

Para determinar el gradiente del aceite  $E_{1\max.ac.}$  (kV/mm) de la Tabla 3.6 y la Tabla 3.8 se empleó la siguiente Fórmula (G.1)

$$E_{1\max.ac.} = \frac{U_p}{r_1 \epsilon_a \left( \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{\epsilon_p} + \frac{\ln\left(\frac{R}{r_1}\right)}{\epsilon_a} \right)} F_s \quad (G.1)$$

### Aislamiento entre devanados concéntricos M.T. - M.T

Para determinar el gradiente del aceite  $E_{1\max.ac.}$  (kV/mm) de la Tabla 3.7 se empleó la siguiente Fórmula (G.2)

$$E_{1\max.ac.} = \frac{U_p}{2r_1 \sqrt{\left(\frac{\frac{C}{2r_1}-1}{\frac{C}{2r_1}+1}\right) \ln\left(\frac{C}{2r_1} + \sqrt{\left(\frac{C}{2r_1}\right)^2 - 1}\right) + \frac{\epsilon_a}{\epsilon_p} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}} F_s \quad (G.2)$$

**Distancia entre los bobinados y la cuba, para determinar el gradiente del aceite**  $E_{1\max.ac.}$  (kV/mm) de la Tabla 3.9 se empleó la siguiente Fórmula (G.3)

$$E_{1\max.ac.} = \frac{U_p}{2r_1 \sqrt{\left(\frac{\frac{R}{r_1}-1}{\frac{R}{r_1}+1}\right) \ln\left(\frac{R}{r_1} + \sqrt{\left(\frac{R}{r_1}\right)^2 - 1}\right) + \frac{\epsilon_a}{\epsilon_p} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}} F_s \quad (G.3)$$

**Distancia entre planos (usada para abreviar los cálculos), se pueden aproximar las otras fórmulas cuando las medidas de los radios son muy grandes.**

$$E_{1\max.ac.} = \frac{U_p}{\epsilon_a \left( \frac{d_p}{\epsilon_p} + \frac{d_a}{\epsilon_a} \right)} F_s \quad (G.4)$$

Dónde:

$E_{1\max.ac.}$ :	Valor calculado para el gradiente del aceite (kV/mm)
$U_p$ :	Tensión de prueba (kV)
$r_1$ :	Radio del cilindro aislado (mm)
$r_0$ :	Radio del cilindro sin aislar (mm)
R:	Distancia del centro del arrollamiento hasta el punto a evaluar (mm)
$\epsilon_a$ :	Permitividad del aceite
$\epsilon_p$ :	Permitividad del papel
FS:	Factor de seguridad.
C:	Distancia / ejes cilindros (mm)
$d_a$ :	Distancia de aceite (mm)
$d_p$ :	Distancia de papel (mm)

**ANEXO H**  
**APTITUD TÉRMICA PARA SOPORTAR CORTOCIRCUITOS**

Es importante considerar la característica del transformador para soportar térmicamente un cortocircuito, Ante un fallo externo el transformador debe ser capaz de soportar según norma IEC 60076 – 5 para el material del arrollamiento para la clase térmica A y el conductor del arrollamiento Cobre, debe según norma alcanzar el arrollamiento luego de 2 segundos la temperatura máxima de 250 °C, para esto se obtienen según las condiciones del transformador en estudio, las siguientes tablas y cuadros de valores correspondientes en cada caso.

Temperatura máxima del medio ambiente  $\theta_{ambiente}$  : 40°C

Sección del Cobre en B.T.: 126,36 mm<sup>2</sup>

Sección del Cobre en M.T.: 44,31375 mm<sup>2</sup>

**Tabla H.1** kv/ fase, en los arrollamientos B.T. y M.T.

kv/fase B.T.	kv/fase M.T.	N (M.T.)
0,480	2,656	310
	2,554	298
	2,452	286
	2,349	274
	2,247	262
	2,145	250
	2,043	238
	1,941	226
	1,839	215
	1,736	203
	1,634	191
	1,532	179
	1,43	167
	1,328	155

Se consideran las temperaturas iniciales de los arrollamientos al inicio del cortocircuito:

Temperatura inicial del arrollamiento en B.T., se da en la Fórmula (H.1) y la Tabla H.2

$$\theta_{omBT} = \theta_{ambiente} + \theta_{mBT} \quad (H.1)$$

Temperatura inicial del arrollamiento en M.T., se da en la Fórmula (H.2) y la Tabla H.3

$$\theta_{omMT} = \theta_{ambiente} + \theta_{mMT} \quad (H.2)$$

**Tabla H.2** Temperatura inicial en el arrollamiento B.T. en °C

N	$\theta_{omBT}$ (Delta)				$\theta_{omBT}$ (Estrella)			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	75,022	76,439	77,598	82,063	75,000	76,417	77,576	82,042
298	75,347	76,743	77,884	82,279	75,324	76,720	77,861	82,256
286	75,704	77,078	78,202	82,526	75,680	77,054	78,178	82,503
274	76,097	77,450	78,556	82,810	76,072	77,425	78,531	82,786

262	76,521	77,853	78,940	83,123	76,495	77,827	78,914	83,098
250	76,986	78,296	79,365	83,476	76,958	78,268	79,338	83,449
238	77,490	78,778	79,828	83,866	77,462	78,750	79,800	83,839
226	78,054	79,320	80,351	84,315	78,024	79,290	80,322	84,286
215	78,740	79,987	81,003	84,905	78,709	79,956	80,972	84,875
203	79,453	80,677	81,674	85,501	79,420	80,644	81,641	85,469
191	80,245	81,445	82,422	86,172	80,210	81,411	82,388	86,138
179	81,129	82,305	83,262	86,932	81,092	82,268	83,225	86,896
167	82,146	83,298	84,234	87,823	82,107	83,258	84,195	87,785
155	83,315	84,441	85,355	88,862	83,272	84,399	85,314	88,821

**Tabla H.3** Temperatura inicial en el arrollamiento M.T. en °C

N	θ <sub>omMT</sub> (Delta)				θ <sub>omMT</sub> (Estrella)			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	71,22	72,84	74,16	79,29	71,20	72,82	74,14	79,27
298	71,92	73,50	74,81	79,84	71,89	73,48	74,79	79,82
286	72,68	74,24	75,52	80,46	72,66	74,22	75,50	80,44
274	73,52	75,05	76,31	81,15	73,50	75,03	76,28	81,13
262	74,44	75,94	77,17	81,91	74,41	75,91	77,14	81,89
250	75,44	76,91	78,11	82,75	75,41	76,88	78,08	82,73
238	76,53	77,96	79,14	83,67	76,50	77,94	79,11	83,65
226	77,73	79,14	80,29	84,71	77,70	79,11	80,26	84,68
215	79,13	80,50	81,63	85,96	79,10	80,47	81,60	85,93
203	80,62	81,96	83,05	87,27	80,59	81,93	83,02	87,24
191	82,26	83,57	84,64	88,75	82,23	83,54	84,60	88,71
179	84,10	85,37	86,41	90,41	84,06	85,33	86,37	90,37
167	86,20	87,44	88,45	92,34	86,16	87,40	88,41	92,31
155	88,64	89,84	90,83	94,63	88,59	89,80	90,79	94,59

Potencia del sistema: 500 MVA

Potencia del transformador: 0,52 MVA

Impedancia del transformador  $Z_T$ , se muestra en la Fórmula (H.3)

$$Z_T = \frac{3(kv/fase)^2}{POT.trafo} u_z \quad (H.3)$$

Impedancia del sistema  $Z_S$  se muestra en la Fórmula (H.4)

$$Z_S = \frac{3(kv/fase)^2}{POT.SIS.} \quad (H.4)$$

Impedancia equivalente  $Z_{EQ}$ , se muestra en la Fórmula (H.5)

$$Z_{EQ} = Z_T + Z_S \quad (H.5)$$

Dónde:



kV/fase: kilovolts por fase del arrollamiento

POT.trafo: potencia del transformador en MVA

$u_2$ : tensión de cortocircuito del transformador

POT.SIS: potencia del sistema en MVA

$Z_T$ ,  $Z_S$  y  $Z_{EQ}$ : impedancias del transformador, del sistema y equivalente respectivamente en Ohmios.

Se elabora la Tabla H.4 con las impedancias de los arrollamientos:

**Tabla H.4** Impedancias del transformador, sistema y equivalente en  $\Omega$

N	$Z_T$				$Z_S$	$Z_{EQ}$			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz		35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	1,067	1,476	1,755	2,600	0,042	1,109	1,519	1,797	2,642
298	0,988	1,366	1,622	2,403	0,039	1,027	1,405	1,661	2,442
286	0,912	1,259	1,496	2,214	0,036	0,948	1,295	1,532	2,250
274	0,839	1,157	1,374	2,032	0,033	0,872	1,190	1,407	2,066
262	0,769	1,059	1,257	1,859	0,030	0,799	1,090	1,288	1,890
250	0,702	0,966	1,146	1,694	0,028	0,730	0,994	1,174	1,721
238	0,638	0,877	1,040	1,536	0,025	0,663	0,902	1,065	1,561
226	0,578	0,792	0,939	1,386	0,023	0,600	0,815	0,962	1,408
215	0,525	0,718	0,851	1,255	0,020	0,545	0,739	0,871	1,275
203	0,470	0,642	0,760	1,119	0,018	0,488	0,660	0,778	1,137
191	0,418	0,570	0,674	0,992	0,016	0,434	0,586	0,690	1,008
179	0,369	0,502	0,593	0,872	0,014	0,383	0,516	0,607	0,886
167	0,324	0,439	0,518	0,760	0,012	0,336	0,451	0,530	0,772
155	0,282	0,380	0,448	0,656	0,011	0,292	0,390	0,458	0,666

Corriente de cortocircuito en arrollamiento de M.T.  $I_{CCMT}$ , se muestra en la Fórmula (H.6)

$$I_{CCMT} = \frac{kv / \text{fase}}{Z_{EQ}} \quad (H.6)$$

Corriente de cortocircuito en arrollamiento de B.T.  $I_{CCBT}$ , se muestra en la Fórmula (H.7)

$$I_{CCBT} = I_{CCMT} \frac{I_{\text{fase BT}}}{I_{\text{fase MT}}} \quad (H.7)$$

De estas últimas expresiones se obtiene la Tabla H.5 siguiente:

**Tabla H.5** Corrientes de cortocircuito en M.T. y B.T. en amperes (Fuente: Propia)

N	ICC(A) M.T.				ICC(A) B.T.			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	2394,70	1748,77	1478,00	1005,29	13249,71	9675,87	8177,71	5562,19
298	2487,55	1818,26	1537,19	1045,97	13236,88	9675,38	8179,74	5565,84
286	2587,24	1893,01	1600,91	1089,81	13216,54	9670,18	8178,01	5567,13
274	2694,72	1973,75	1669,77	1137,22	13188,61	9660,03	8172,27	5565,84
262	2811,84	2062,04	1745,15	1189,20	13163,22	9653,12	8169,67	5567,07
250	2939,45	2158,52	1827,61	1246,14	13134,79	9645,23	8166,59	5568,32

238	3079,82	2264,99	1918,72	1309,14	13110,03	9641,52	8167,50	5572,69
226	3233,10	2381,72	2018,72	1378,42	13074,21	9631,34	8163,41	5574,12
215	3375,48	2489,84	2111,25	1442,41	12931,33	9538,47	8088,12	5525,82
203	3559,06	2630,63	2232,15	1526,43	12872,63	9514,60	8073,38	5520,87
191	3764,06	2788,81	2368,27	1621,29	12812,73	9492,99	8061,50	5518,79
179	3994,91	2968,01	2522,80	1729,28	12752,81	9474,67	8053,44	5520,32
167	4253,36	3170,16	2697,56	1851,85	12672,33	9445,06	8037,01	5517,33
155	4546,33	3401,26	2897,94	1992,97	12577,27	9409,48	8017,07	5513,49

Densidad de corriente de cortocircuito en M.T. y B.T.  $J_{cc}$ , se da en la Fórmula (H.8)

$$J_{cc} = \frac{I_{cc}}{S} \quad (H.8)$$

Dónde:

$I_{cc}$ : Corriente de cortocircuito en el arrollamiento respectivo (M.T. o B.T.)

S: Sección del conductor del arrollamiento respectivo (M.T. o B.T.)

Y de esta evaluación se obtiene la Tabla H.6 siguiente:

**Tabla H.6** Densidad de corrientes de cortocircuito en M.T. y B.T. (Fuente: Propia)

N	J (A/mm <sup>2</sup> ) M.T.				J (A/mm <sup>2</sup> ) B.T.			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	54,04	39,46	33,35	22,69	104,86	76,57	64,72	44,02
298	56,14	41,03	34,69	23,60	104,76	76,57	64,73	44,05
286	58,38	42,72	36,13	24,59	104,59	76,53	64,72	44,06
274	60,81	44,54	37,68	25,66	104,37	76,45	64,67	44,05
262	63,45	46,53	39,38	26,84	104,17	76,39	64,65	44,06
250	66,33	48,71	41,24	28,12	103,95	76,33	64,63	44,07
238	69,50	51,11	43,30	29,54	103,75	76,30	64,64	44,10
226	72,96	53,75	45,56	31,11	103,47	76,22	64,60	44,11
215	76,17	56,19	47,64	32,55	102,34	75,49	64,01	43,73
203	80,32	59,36	50,37	34,45	101,87	75,30	63,89	43,69
191	84,94	62,93	53,44	36,59	101,40	75,13	63,80	43,68
179	90,15	66,98	56,93	39,02	100,92	74,98	63,73	43,69
167	95,98	71,54	60,87	41,79	100,29	74,75	63,60	43,66
155	102,59	76,75	65,40	44,97	99,54	74,47	63,45	43,63

Se consideran las temperaturas finales de los arrollamientos luego de  $t = 2$  s. y se muestran en la Fórmula (H.9)

$$\theta_f = \theta_o + 2 \frac{(\theta_o + 235)}{\left(\frac{106000}{J^2 t} - 1\right)} \quad (H.9)$$

Dónde:

$\theta_f$ : Temperatura final del arrollamiento alcanzado luego de  $t = 2$  segundos.

$\theta_o$ : Temperatura inicial del arrollamiento al inicio del cortocircuito.

J: Densidad de corriente de cortocircuito

t: Tiempo analizado para el cortocircuito.

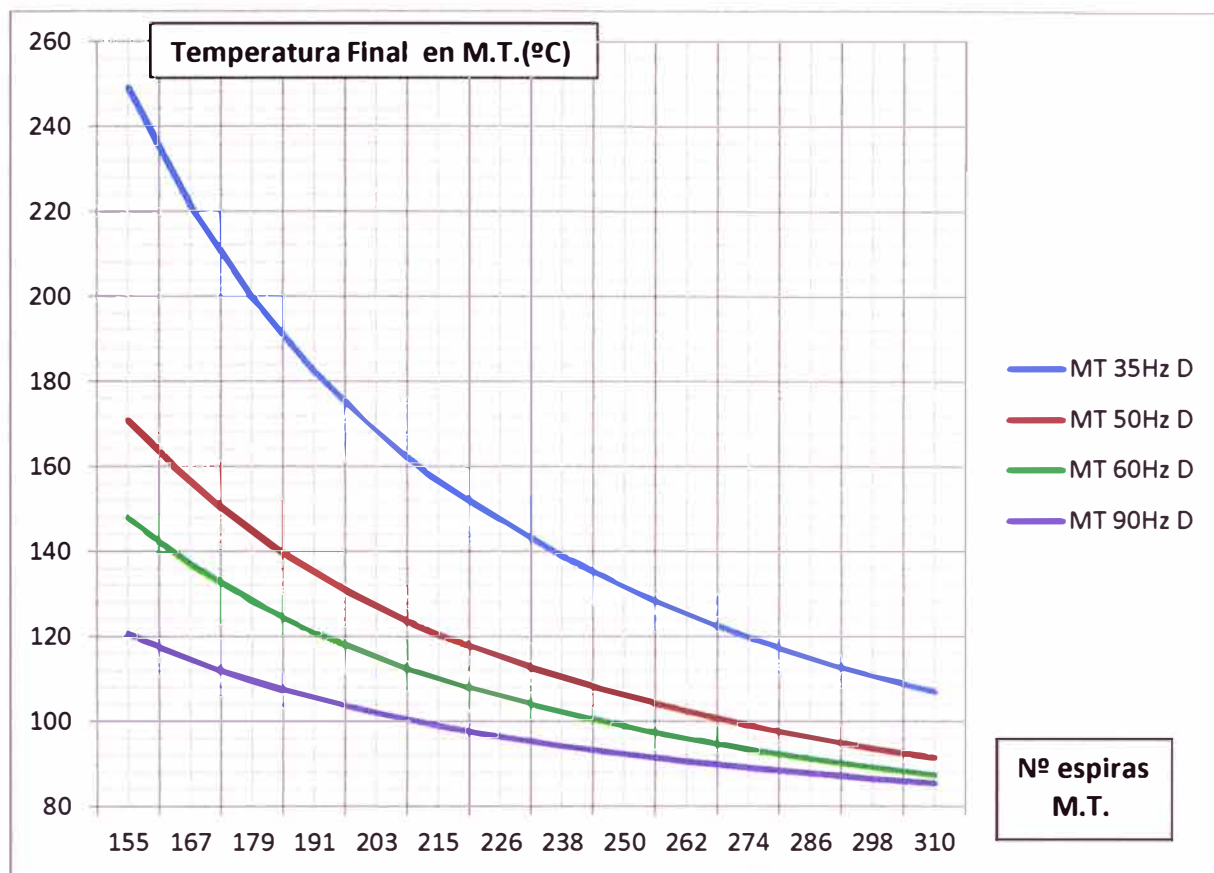
Al evaluar la Fórmula (H.9) se obtienen la Tabla H.7 y Tabla H.8

**Tabla H.7** Temperatura final en B.T. luego del cortocircuito de 2 s. (Fuente: Propia)

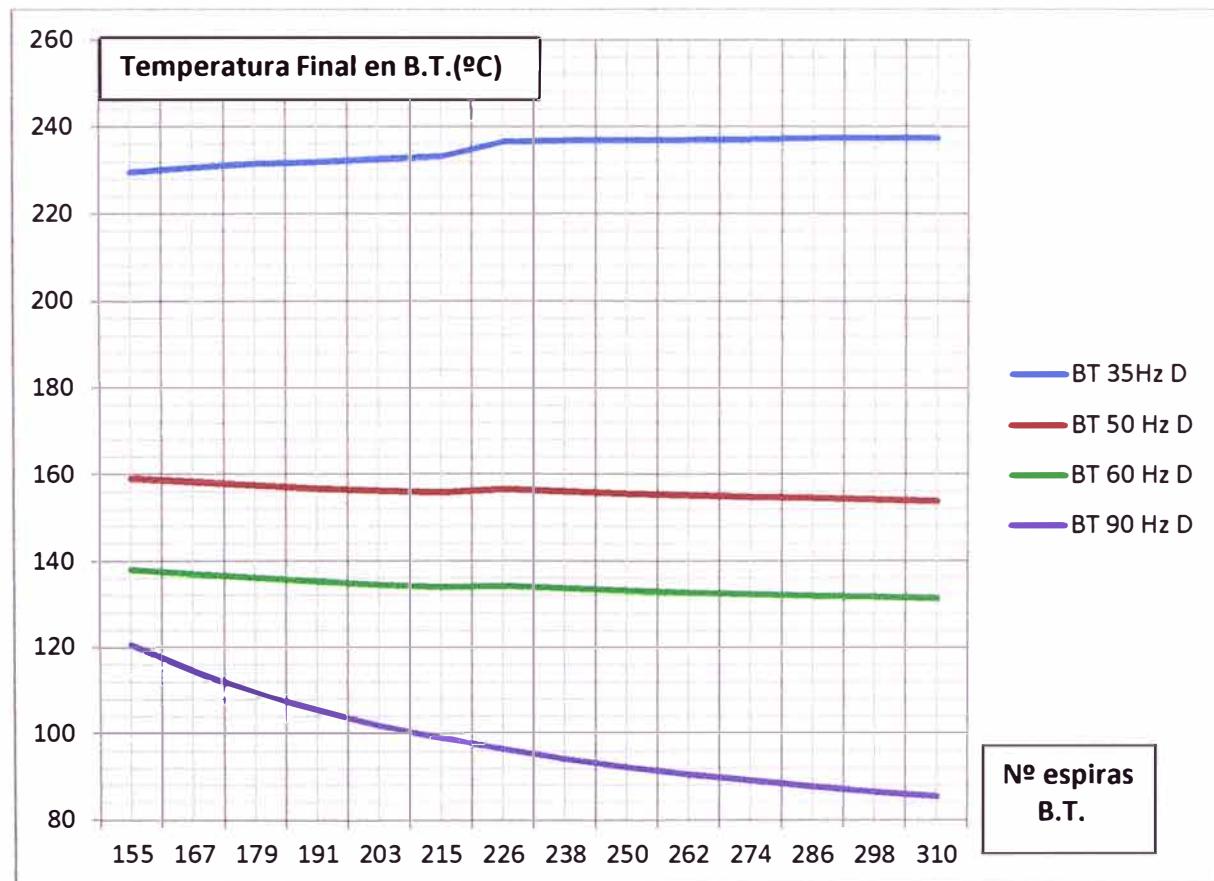
N	Øf BT (DELTA)				Øf BT (ESTRELLA)			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	237,32	153,92	131,24	106,13	237,29	153,89	131,22	106,10
298	237,42	154,29	131,61	106,39	237,38	154,26	131,58	106,37
286	237,33	154,62	131,96	106,67	237,30	154,59	131,93	106,64
274	237,07	154,90	132,29	106,96	237,03	154,87	132,26	106,94
262	236,94	155,28	132,70	107,31	236,90	155,24	132,67	107,28
250	236,77	155,69	133,15	107,70	236,73	155,65	133,12	107,67
238	236,78	156,22	133,71	108,16	236,73	156,19	133,68	108,13
226	236,54	156,71	134,26	108,66	236,49	156,68	134,23	108,63
215	233,27	155,88	133,95	108,86	233,22	155,84	133,92	108,82
203	232,59	156,31	134,53	109,45	232,54	156,27	134,49	109,42
191	231,99	156,87	135,23	110,15	231,94	156,83	135,19	110,12
179	231,55	157,61	136,10	110,98	231,49	157,57	136,05	110,95
167	230,70	158,31	137,00	111,92	230,65	158,27	136,95	111,87
155	229,68	159,09	138,02	113,00	229,62	159,04	137,97	112,95

**Tabla H.8** Temperatura final en M.T. luego del cortocircuito de 2 s (Fuente: Propia)

N	Øf MT (DELTA)				Øf MT (ESTRELLA)			
	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz	35 Hz	50 Hz	60 Hz	90 Hz
310	106,94	91,48	87,42	85,45	106,91	91,45	87,40	85,43
298	110,72	93,75	89,20	86,53	110,69	93,72	89,18	86,51
286	114,98	96,29	91,20	87,74	114,95	96,27	91,17	87,72
274	119,80	99,17	93,45	89,11	119,77	99,14	93,42	89,09
262	125,32	102,43	95,99	90,64	125,28	102,40	95,96	90,62
250	131,65	106,14	98,88	92,38	131,62	106,11	98,85	92,35
238	139,00	110,42	102,18	94,35	138,97	110,39	102,15	94,32
226	147,57	115,36	105,98	96,60	147,53	115,32	105,95	96,57
215	156,36	120,47	109,96	99,05	156,32	120,43	109,93	99,02
203	168,09	127,11	115,04	102,03	168,05	127,07	115,00	102,00
191	182,26	135,03	121,05	105,52	182,21	134,99	121,01	105,49
179	199,68	144,62	128,28	109,66	199,63	144,57	128,24	109,62
167	221,36	156,36	137,08	114,65	221,30	156,32	137,03	114,61
155	249,04	171,09	148,03	120,78	248,97	171,04	147,98	120,74



**Figura H.1** Temperatura final del cobre M.T. (Fuente: Propia)



**Figura H.2** Temperatura final del cobre B.T. (Fuente: Propia)

**ANEXO I**  
**TABLAS COMPLEMENTARIAS DE DISEÑO**

## 11.-Límites de temperatura de los arrollamientos según la clase térmica de los aislantes (60076- 11 © IEC: 2004)

Table 2 – Winding temperature-rise limits

Insulation system temperature (see Note 1) °C	Average winding-temperature rise limits at rated current (see Note 2) K
105 (A)	60
120 (E)	75
130 (B)	80
155 (F)	100
180 (H)	125
200	135
220	150

NOTE 1 Letters refer to the temperature classifications given in IEC 60085.  
NOTE 2 Temperature rise measured in accordance with Clause 23.

## 21.-Tensiones máximas sometidas a las bobinas del transformador (60076- 3 ©IEC: 2000)

Table 2 – Rated withstand voltages for transformer windings with highest voltage for equipment  $U_m \leq 170$  kV – Series I based on European practice

Highest voltage for equipment $U_m$ kV r.m.s.	Rated lightning impulse withstand voltage kV peak	Rated short duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s.
3.6	20	10
7.2	40	20
12	60	28
17.5	75	38
24	95	50
	125	
36	145	70
	170	
52	250	95
60	280	115
72.5	325	140
100	380	150
123	450	185
145	550	230
170	650	275
	750	325

NOTE Dotted lines may require additional phase-to-phase withstand tests to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met.

**31.-Distancias mínimas recomendadas de fase a tierra, fase a fase, fase a neutro de las partes externas en transformadores de potencia con alta tensión. (60076- 3 ©IEC: 2000)**

**Table 5 – Recommended minimum clearances phase-to earth, phase-to-phase, phase-to-neutral and to lower voltage windings from bushing live parts on power transformers having windings with highest voltage for equipment  $U_m \leq 170$  kV – Series I based on European practice**

Highest voltage for equipment $U_m$ kV r.m.s	Rated lightning impulse withstand voltage kV peak	Minimum clearance mm
3.6	20	-
7.2	40	60
12	60	90
17.5	75	110
24	95	170
36	125	210
52	145	275
72.5	170	280
100	250	450
123	325	630
145	450	830
170	550	900
	650	1250
	750	1450

**41.-Tabla de Índices de protección IP según norma IEC 60529, para agua y polvo, la tercera columna comúnmente no se aplica.**

	Primer Número - Protección contra	Segundo Número - Protección contra líquidos	Tercer Número - Protección contra
0	Sin Protección	Sin Protección	Sin Protección
1	Protegido contra objetos sólidos de más	Protegido contra gotas de agua que caigan verticalmente	Protegido contra impactos de 0,225 joule
2	Protegido contra objetos sólidos de más	Protegido contra rocíos directos a hasta 15° de la vertical	Protegido contra impactos de 0,375 joule
3	Protegido contra objetos sólidos de más	Protegido contra rocíos directos a hasta 60° de la vertical	Protegido contra impactos de 0,5 joule
4	Protegido contra objetos sólidos de más	Protegido contra rocíos directos de todas las direcciones - entrada limitada permitida	Protegido contra impactos de 2,0 joule
5	Protegido contra polvo - entrada limitada	Protegido contra chorros de agua a baja presión de todas las direcciones -	Protegido contra impactos de 6,0 joule
6	Totalmente protegido contra polvo	Protegido contra fuertes chorros de agua de todas las direcciones - entrada limitada	Protegido contra impactos de 20,0 joule
7		Protegido contra los efectos de la inmersión de 15cm - 1m	
8		Protegido contra largos periodos de inmersión bajo presión	

### 51.-Características eléctricas de los aisladores CEDASPE. Tensiones máximas

Rated voltage Ur kV(r.m.s.)	One minute power frequency withstand voltage wet and dry kV(r.m.s.)	Dry lightning impulse withstand voltage dry (1,2/50ms)kV
1	10	20
3,6	10	40
12	28	75
24	50	125
36	70	170
52	95	250

### 61.-Tabla de impedancias de cortocircuito de acuerdo a las potencias del transformador. (60076- 5 ©IEC: 2000)

Tabla 1

Valores mínimos característicos de impedancia de cortocircuito para transformadores con dos arrollamientos separados

Impedancia de cortocircuito a corriente asignada		
Potencia asignada kVA		Impedancia de cortocircuito mínima %
Hasta	630	4,0
	631 a 1 250	5,0
	1 251 a 2 500	6,0
	2 501 a 6 300	7,0
	6 301 a 25 000	8,0
	25 001 a 40 000	10,0
	40 001 a 63 000	11,0
	63 001 a 100 000	12,5
Mayor que	100 000	> 12,5

NOTA 1 – Los valores para potencias asignadas mayores de 100 000 kVA están sujetos generalmente a un acuerdo entre fabricante y comprador.

NOTA 2 – En el caso de unidades monofásicas conectadas en banco trifásico, los valores de la potencia asignada se aplican al banco trifásico.

### 71.-Cuadro de partes que comprende la norma CEI 60076

La Norma CEI 60076 comprende las siguientes partes		
Parte 1:	2000	Generalidades
Parte 2:	1993	Calentamiento
Parte 3:	2000	Niveles de aislamiento y ensayos dieléctricos
Parte 4:	2002	Guía para el ensayo de impulso tipo rayo e impulso tipo maniobra. Transformadores de potencia y reactancias
Parte 5:	2000	Aptitud para soportar cortocircuitos
Parte 6:	2007	Reactores
Parte 7:	2005	Guía de carga para transformadores de potencia sumergidos en aceite
Parte 8:	1997	Transformadores de potencia. Guía de aplicación
Parte 10:	2005	Determinación de los niveles de sonido. Guía de aplicación
Parte 11:	2004	Transformadores tipo seco
Parte 12:	2008	Guía de carga para transformadores de potencia de tipo seco
Parte 13:	2006	Transformadores en líquido autoprottegidos.
Parte 14:	2009	Diseño y aplicación de transformadores sumergidos en líquido utilizando materiales aislantes de alta temperatura
Parte 15:	2008	Transformadores de potencia llena de gas



## 8I.-Normas técnicas de los principales aceros.

## ACEROS DE CALIDAD COMERCIAL

NORMA TÉCNICA	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) MAX					PROPIEDADES MECÁNICAS (VALORES MÍNIMOS)		
	C	Mn	Si	P	S	F kg/mm <sup>2</sup>	R kg/mm <sup>2</sup>	A %
ASTM A-1008 CS TIPO B* LAF	0.02 0.15	0.60	0.03	0.03	0.035	14 - 28	---	30
ASTM A-1011 CS TIPO B** LAC	0.02 0.15	0.60	0.05	0.03	0.035	21 - 34	---	25
JIS G-3131 SPHC	0.15	0.60	---	0.05	0.05	---	27	29
SAE 1008	0.10	0.50	0.10	0.05	0.050	---	28	35
SAE 1010	0.03 0.13	0.60	0.10	0.04	0.050	---	28	31

\* Reemplaza a la ASTM A-366

\*\* Reemplaza a la ASTM A-569

## ACEROS PARA USO ESTRUCTURAL

ESPECIFICACIÓN	NORMA TÉCNICA	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) MAX					PROPIEDADES MECÁNICAS (VALORES MÍNIMOS)		
		C	Mn	Si	P	S	F kg/mm <sup>2</sup>	R kg/mm <sup>2</sup>	A %
BAJA RESISTENCIA MECÁNICA	ASTM A-283 Grado C	0.24	0.90	0.40	0.035	0.04	21	39 - 53	23
	ASTM A-36	0.25	0.8 1.2	0.40	0.040	0.05	25.3	41	20
MEDIANA RESISTENCIA MECÁNICA	ASTM A-131 Grado A*	0.21	2.5 C Min	0.50	0.035	0.035	24	41	21
	ASTM A-1011	0.25	0.90	---	0.035	0.04	25.3	37	17
	SS Grado 36	0.25	1.35	---	0.035	0.04	25.3	41 - 56	16
	ASTM A-1018	0.25	1.50	---	0.035	0.04	25.3	37	15
	SS GRADO 36	0.25	0.8 / 1.2	---	0.035	0.04	25.3	41 - 56	18
	JIS G-3101 SS 400	---	---	---	0.05	0.05	25	41 - 52	21
	DIN 17100 St 37-2	0.17 0.2	1.50	0.50	0.050	0.05	24.0	35	22
	EN 10025-2 S 235	0.17	1.4	---	0.045	0.045	24.0	35	26
GB / T3274 Q235B	0.12 0.2	0.3 0.7	0.30	0.045	0.045	24.0	38 - 51	26	

## ACEROS PARA TUBOS REDONDOS ESTRUCTURALES

NORMA TÉCNICA	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) MAX					PROPIEDADES MECÁNICAS (VALORES MÍNIMOS)		
	C	Mn	Si	P	S	F kg/mm <sup>2</sup>	R kg/mm <sup>2</sup>	A %
ASTM A-53 GRADO A	0.25	0.95	---	0.05	0.045	21	34	23
ASTM A-53 Grado B	0.30	1.20	---	0.05	0.045	25	42	18
ASTM A-106 Grado B	0.30	0.29 1.06	0.10	0.035	0.035	25	42	18
API 5L B	0.27	1.15	---	0.03	0.03	25	42	19
ASTM A-500 Grado A	0.30	1.35	---	0.035	0.035	23.5	31.5	25

## SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
COPANT	Comisión Panamericana de Normas Técnicas
DIN	Deutsche Industrie Normen
EN	Norma Europea
GB	National Standard (China)
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standard
LRS	Lloyd's Register of Shipping
NTP	Norma Técnica Peruana
SAE	Society of Automotive Engineers

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ushiña Gusque. Angel Fernando. "Diseño de una solución para la reducción de la distorsión armónica producida por los variadores de frecuencia instalados en los pozos de producción de petróleo en el campo Libertador de Petroproducción". Biblioteca Digital de la Escuela Politécnica Nacional de Quito. diciembre 2007. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/970/1/CD-1273.pdf>
- [2] Yébenes Cabrejas. José F. "Gestión de la cargabilidad de transformadores de potencia". Universidad Carlos III de Madrid- Escuela Politécnica Superior. junio 2009.
- [3] Delcrosa. ""Manuel de montaje. operación y mantenimiento- SERIE Nº 162219 T1- Cliente : Electro Ucayali S.A. ". Mayo 2007.
- [4] AK Steel. "Product Data Bulletin TRAN-COR H"  
[http://www.aksteel.com/pdf/markets\\_products/electrical/TCH\\_PDB\\_Dec\\_2010.pdf](http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/TCH_PDB_Dec_2010.pdf)
- [5] Rojas Junes. Manuel "Informe de Suficiencia- Aplicación de Análisis Cromatográfico en Aceite de Transformadores". Biblioteca FIEE. 2010.
- [6] Nynas. Nytro Izar I Electrical insulating Oil.  
[https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wnpds/Nytro\\_Izar\\_I\\_ASTM\\_\\_ASTM/\\$File/PDS\\_Nytro\\_Izar\\_I\\_ASTM\\_EN.pdf](https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wnpds/Nytro_Izar_I_ASTM__ASTM/$File/PDS_Nytro_Izar_I_ASTM_EN.pdf)
- [7] IEC 60529 "Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)".
- [8] Rudolf Richter. Robert Brüderlink. "Elektrische Maschinen: Die Transformatoren". Ed. Birkhäuser. 2009
- [9] S. V. Kulkarni. S. A. Khaparde. "Transformer Engineering Design & Practice". Marcel Dekker. Inc.. New York. 2004.
- [10] Nynas, "Nytro Izar I" Aceite mineral aislante  
<http://www.nynas.com/en/Segment/Transformer-oils/The-offering/Transformer-oils/#productlist>
- [11] Royal Diamond "Aislantes eléctricos- Presspan y Kraft".  
<http://www.royaldiamond.es/>
- [12] Osinergmin "Tarifario Empresa: Electro-Oriente LORETO"  
<http://www2.osinerg.gob.pe>
- [13] Carranza, Manuel "Diapositivas de Evaluación Económica"; "Diseño Optimo", etc. Décimo-séptimo programa de titulación por actualización de conocimientos en la especialidad de Ingeniería Eléctrica.