



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

**Título del trabajo**

**“Análisis y diseño de un transformador eléctrico seco”**

**“Analysis and design of a dry electric transformer”**

Autor

ALBERTO EREZA SERRANO  
NIA: 716119

Director

JESÚS CUARTERO

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA  
2019/20

Fecha

20 de enero de 2020

# ÍNDICE

Título del trabajo .....	0
“Análisis y diseño de un transformador eléctrico seco” .....	0
“Analysis and design of a dry electric transformer” .....	0
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. PRINCIPALES DATOS DEL TRANSFORMADOR .....	4
3. PLANOS Y CÁLCULOS ELECTROMAGNÉTICOS DEL TRANSFORMADOR .....	4
3.1. DISEÑO ELECTROMAGNÉTICO DEL TRANSFORMADOR .....	4
3.2. DISPOSICIÓN DE LOS ARROLLAMIENTOS Y EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR.....	5
3.3. CÁLCULO DE LOS VALORES DE CORTOCIRCUITO.....	7
3.3.1. Valor de la corriente de cortocircuito. ....	7
3.4. VALOR PICO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO .....	7
3.5. CÁLCULO DE LAS PRINCIPALES FUERZAS DE CORTOCIRCUITO .....	9
3.5.1. Fuerzas radiales en cada arrollamiento. ( $F_{rad} *$ ).....	10
3.5.2. Fuerzas axiales en cada arrollamiento .....	11
3.5.2.1. Fuerzas máximas de compresión en cada arrollamiento. ( $F_{sp} *$ )	11
3.5.2.2. Máxima fuerza axial de empuje en cada uno de los extremos de los devanados ( $F_{ax} *$ ).....	13
3.5.2.3. Máxima fuerza axial por extremidad en los bloques de presión y en las abrazaderas del núcleo. ( $F_{ax,t} *$ ) .....	14
3.6. CÁLCULO DE LAS TENSIONES MECÁNICAS EN LOS ARROLLAMIENTOS Y ESTRUCTURAS DEL TRANSFORMADOR .....	15
3.6.1. Esfuerzo medio de tracción en el arrollamiento exterior ( $\sigma_t *$ ) .....	15
3.6.2. Esfuerzo medio de compresión en el arrollamiento interior ( $\sigma_c *$ ) .	16
3.6.3. Estrés producido debido a la flexión radial de los conductores en el tramo entre las barras axiales y los espaciadores usados para generar los conductos de enfriamiento dentro del ancho del devanado de baja tensión. ( $\sigma_{br} *$ )	17
3.6.4. Tensión de compresión en los separadores radiales de los bobinados de tipo cinta ( $\sigma_{sp} *$ ).....	19
3.6.5. Tensión de compresión o tracción en las capas aislantes de los bobinados de tipo banda ( $\sigma_{pi} *$ ).....	20
3.6.6. Tensión de compresión en estructuras de aislamiento ( $\sigma_{es} *$ ).....	20

3.6.7. Esfuerzos de compresión en los tacos de soporte de las bobinas ( $\sigma_{pr}$ *)	21
3.6.8. Tensión de tracción en las pletinas del núcleo ( $\sigma_{rod}$ )	21
4. ESTRUCTURA Y DISEÑO DEL TRANSFORMADOR	22
5. EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO	23
5.1. FUERZAS PERMITIDAS Y TENSIONES LÍMITE	23
6. CONCLUSIONES	28
7. BIBLIOGRAFÍA	29
ANEXO I	30
(PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE DISEÑO DEL TRANSFORMADOR)	30
ANEXO II	51
(CÁLCULOS Y DISEÑO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR)	51
ANEXO III	75
(CÁLCULO DE LAS FUERZAS ELECTROMAGNETICAS)	75
ANEXO IV	95
(CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS MECÁNICOS GENERADOS POR LAS FUERZAS DE CORTOCIRCUITO)	95
ANEXO V	127
(CRITERIOS DE EVALUACION DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO)	127
ANEXO VI	137
(CAPACIDAD TÉRMICA DEL TRANSFORMADOR)	137
ANEXO VII	141
(PLANOS DEL TRANSFORMADOR)	141

## 1. INTRODUCCIÓN

La idea de este trabajo de fin de grado surgió a partir de unas prácticas realizadas en verano en la empresa ABB Power Grids, fue allí donde me propusieron poder hacer el TFG con ellos y yo no dudé en aceptar la propuesta.

El primer paso fue la elección del transformador de diseño, fue allí cuando mi tutor de empresa me propuso lo que a continuación os voy a exponer y explicar, se trata de uno de los transformadores mas grandes y de mayor potencia que se han diseñado en la empresa de Zaragoza, esta fue una de las causas que mas me motivo para empezar a hacer este proyecto.

Una vez ya elegido el modelo de transformador, comencé a realizar los cálculos eléctricos, al principio y sin estar muy puesto en el mundo de los transformadores eléctricos secos, pensé que esta parte eléctrica iba a ocupar una parte mas extensa de la que en verdad tiene en este trabajo.

Con los cálculos eléctricos ya realizados comencé el aprendizaje de los programas de simulación electromagnética, que la propia empresa utiliza para el calculo de las fuerzas a las que esta sometido el transformador en carga y principalmente en caso de cortocircuito, ensayo mas importante y obligatorio que deben superar todos los transformadores antes de salir de fábrica.

Con las fuerzas ya calculadas, es cuando comienza la parte mas extensa del trabajo, parte principalmente mecánica, que supone el análisis de estas fuerzas obtenidas, cálculo de los esfuerzos que estas fuerzas producen sobre el propio transformador y el análisis y elección de los materiales de diseño para que estos puedan soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos.

Finalmente, solo nos queda analizar y comparar los esfuerzos obtenidos con los valores límite que la norma establece no solo para cumplir el valor crítico de cada material, sino también cumplir con los coeficientes de seguridad que la empresa o la propia norma establecen.

Además, cabe destacar que para aquellos casos donde los valores de los esfuerzos obtenidos son muy cercanos a los valores límite, se ha realizado una simulación mediante los programas de simulación, a partir de elementos finitos, que la empresa dispone para analizar el comportamiento de estos materiales o piezas del transformador de manera detallada, y evitar así, posibles fallos en un futuro y adoptar soluciones en caso de que sea necesario.

## 2. PRINCIPALES DATOS DEL TRANSFORMADOR

Tipo de transformador:	Trifásico seco
Potencia nominal:	18 MVA
Frecuencia nominal:	50 Hz
Grupo de conexión:	Yd11
Alto voltaje (HV):	15750 +4-4*2.500% V
Bajo voltaje (LV):	6300 V
Clase térmica del transformador:	H (180)
Material núcleo	Chapa magnética
Material conductores	Aluminio
Material encapsulado	Resina epoxi



*Imagen del transformador de diseño*

## 3. PLANOS Y CÁLCULOS ELECTROMAGNÉTICOS DEL TRANSFORMADOR

### 3.1. DISEÑO ELECTROMAGNÉTICO DEL TRANSFORMADOR

Se trata de un transformador trifásico, compuesto por un núcleo de chapa magnética formado por tres columnas, en las que se insertan los tres arrollamientos de baja tensión y de alta tensión. El arrollamiento de alta tensión (HV) está conectado en estrella. Está fabricado con tecnología de disco de aluminio, además incluye un cambiador de tomas, que permite compensar las amperio-vueltas con el arrollamiento de baja.

El arrollamiento de baja tensión (LV) está conectado en triángulo. Este arrollamiento a diferencia del arrollamiento de alta tensión está fabricado mediante un bobinado de bandas de aluminio.

### 3.2. DISPOSICIÓN DE LOS ARROLLAMIENTOS Y EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

El núcleo del transformador está diseñado con tres columnas, construidas con láminas de acero magnético.

En cada una de estas columnas se introducen los arrollamientos de baja tensión y de alta tensión en este mismo orden.

El núcleo tiene una altura máxima de ventana de 2520 mm y una distancia máxima entre centro y centro de las columnas de 1205 mm.

El diámetro del núcleo es de 534.8 mm. Además, consta de dos canales de ventilación de 14 mm cada uno.

El peso total del núcleo es de 18383.6 kg

El arrollamiento de baja tensión (LV) está dividido en dos secciones axiales conectadas en serie, su conexión es de tipo delta y su tensión es de 6300 V.

Consta de 46 espiras por sección de conductor en banda de aluminio.

Está dividido en 4 bloques de 11/12/11/12 espiras cada uno, separados por canales de ventilación de 15 mm.

El arrollamiento de alta (HV) también dividido en dos secciones axiales conectadas en paralelo, su conexión es de tipo estrella y su tensión es de 15750 V en (POS N) de 14175 V en (POS -) y de 17325 V en (POS +). Consta de 146 espiras por sección, pudiendo ser 120 o 133 en función de la demanda (POS +, POS-, POS N)

Cada sección del arrollamiento está formada por 8 discos, 6 de ellos de 18 vueltas y 2 discos de 19 vueltas. La separación entre discos es de 24 mm y 28 mm tal y como se muestra en la figura 2. Cada arrollamiento, tanto el de baja tensión como el de alta tensión son encapsulados con resina epoxi.

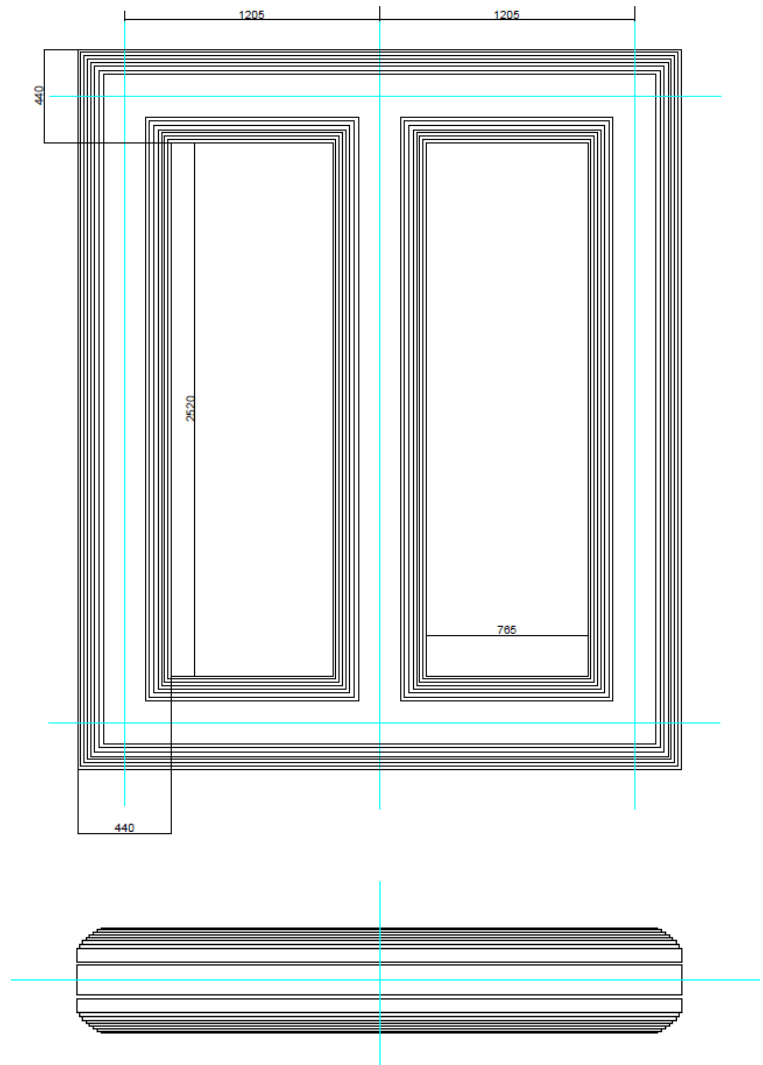


Figura 1

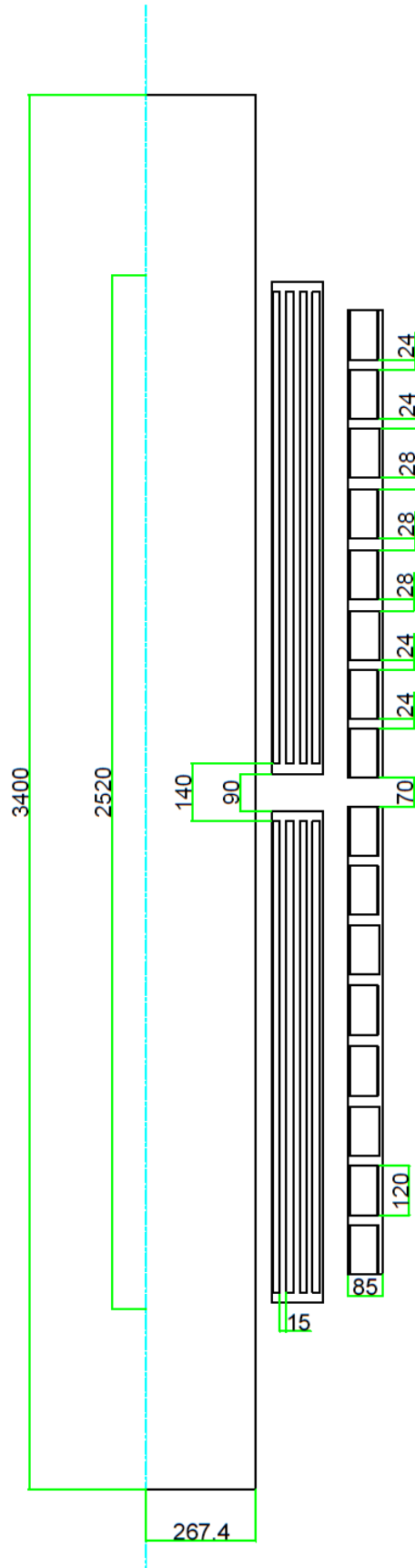


Figura 2: Plano de la sección axisimétrica de los arrollamientos y núcleo del transformador.

### 3.3. CÁLCULO DE LOS VALORES DE CORTOCIRCUITO.

De acuerdo con la norma internacional IEC- 60076-5 se han calculado todos los valores de las corrientes de cortocircuito, esta norma identifica todos los requerimientos necesarios que debe tener un transformador para soportar los esfuerzos electrodinámicos provocados en caso de un cortocircuito.

#### 3.3.1. Valor de la corriente de cortocircuito.

El valor r.m.s o valor efectivo de la corriente de cortocircuito "I" es definido por la norma IEC-60076-5 como:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)}$$

Donde:

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \quad (\Omega) \quad \text{Impedancia de cortocircuito}$$

$$U_s \quad \text{Voltaje nominal del sistema}$$

$$S \quad \text{Potencia aparente de cortocircuito del sistema}$$

$$U \quad \text{Voltaje nominal del arrollamiento}$$

$$Z_t = \frac{U^2 \times z_t}{100 \times S} \quad (\Omega) \quad \text{Impedancia de cortocircuito del arrollamiento}$$

$$z_t \quad (\%) \quad \text{Impedancia de cortocircuito media, a frecuencia y corriente nominal}$$

Con estas ecuaciones he calculado todas las corrientes de cortocircuito, para cada una de las posiciones; (POS N, POS +, POS -), con los datos característicos de cada una de ellas y que aparecen a continuación en la *Tabla 2*.

### 3.4. VALOR PICO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

El valor pico máximo de las corrientes de cortocircuito es definido por la norma IEC-60076-5 como:

$$i = I \times k \times \sqrt{2}$$

Donde el factor  $k \times \sqrt{2}$  depende del factor  $X/R$ , siendo:

$X$  la suma de las reactancias del transformador y del sistema en ohmios ( $\Omega$ )

$R$  la suma de las resistencias del transformador y del sistema en ohmios ( $\Omega$ )



Tabla factor  $k \times \sqrt{2}$

$X/R$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Tabla 1: Relación  $X/R$  y factor  $k \times \sqrt{2}$

Cuando la relación  $X/R$  es mayor de 14 el factor  $k \times \sqrt{2}$  se supondrá igual a:

$$1.8 \times \sqrt{2} = 2.55 \text{ para transformadores de la categoría II}$$

Según la norma IEC-60047-5 los transformadores de 18MVA son considerados como categoría II.

Los valores de esta tabla han sido obtenidos mediante la siguiente expresión:

$$k \times \sqrt{2} = (1 + (e^{-(\phi + \pi/2)R/X}) \sin \phi) \times \sqrt{2}$$

La siguiente tabla, muestra los valores pico de las corrientes de cortocircuito para los tres casos distintos

	Tipo de conexión		
	Pos (-)	Pos (N)	Pos (+)
Potencia nominal del transformador ( $S_r$ MVA)	18	18	18
HV voltaje nominal (UHV kV)	14.175	15.75	17.325
LV voltaje nominal (ULV kV)	6.3	6.3	6.3
HV conexión	Y	Y	Y
LV conexión	D	D	D
Voltaje máximo del transformador ( $U_m$ kV)	17.5	17.5	17.5
Impedancia de cortocircuito ( $z_t$ %)	7.338	7.140	7.270
Perdidas de carga @145°C (kW)	64.252	55.174	39.668
Potencia aparente de cortocircuito ( $S$ MVA)	500	500	500
Impedancia de cortocircuito del sistema ( $Z_s$ Ohm)	0.402	0.496	0.600
Reactancia de cortocircuito del sistema ( $X_t$ %)	7.329	7.133	7.267
Resistencia de cortocircuito del transformador ( $R_t$ %)	0.357	0.307	0.220
Impedancia de cortocircuito del transformador ( $Z_t$ %)	0.819	0.984	1.212
Reactancia de cortocircuito del transformador ( $X_t$ Ohm)	0.818	0.983	1.212
Resistencia de cortocircuito del transformador ( $R_t$ Ohm)	0.040	0.042	0.037
$(X_t + X_s) / (R_t + R_s)$	20.533	23.272	32.974
Ángulo de fase (rad $\theta$ )	1.522	1.528	1.540
$k \times \sqrt{2}$	2.629	2.651	2.700
Si $(X_t + X_s) / (R_t + R_s) > 14$ asumimos que $k \times \sqrt{2} = 2.55$	2.550	2.550	2.550
HV corriente de cortocircuito ( $I_{HV}$ kA)	<b>6.70272</b>	<b>6.14366</b>	<b>5.51835</b>
HV valor pico de la corriente de cortocircuito ( $i_{HV}$ kA)	<b>17.09193</b>	<b>15.66633</b>	<b>14.07179</b>
HV / LV ratio	1.29904	1.44338	1.58771
LV corriente de cortocircuito ( $I_{LV}$ kA)	<b>8.70708</b>	<b>8.86761</b>	<b>8.76155</b>
LV valor pico de la corriente de cortocircuito ( $i_{LV}$ kA)	<b>22.20307</b>	<b>22.61240</b>	<b>22.34196</b>

Tabla 2: corrientes de cortocircuito

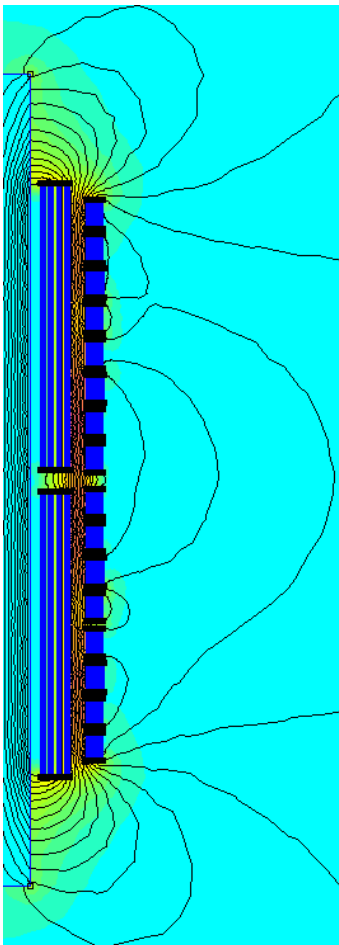
### 3.5. CÁLCULO DE LAS PRINCIPALES FUERZAS DE CORTOCIRCUITO

Para cada caso de cortocircuito calculado en los apartados anteriores, se ha llevado a cabo una simulación electromagnética de elementos finitos para obtener con precisión los valores de las fuerzas de Lorentz.

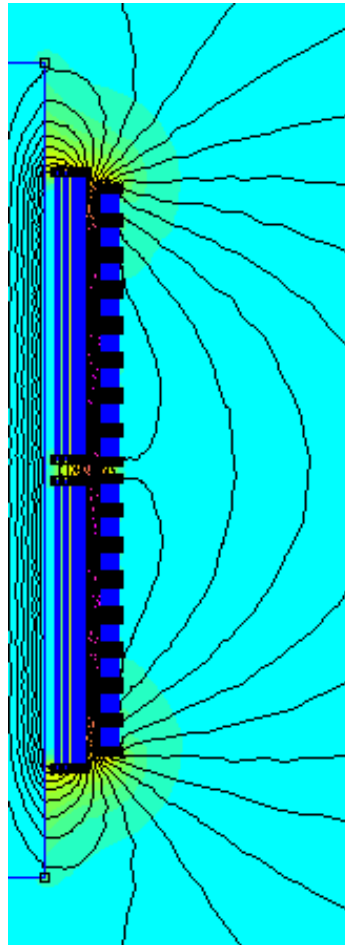
Esta simulación la he realizado mediante el software "Finite Element Method Magnetics" (F.E.M.M) a partir del modelo axi-simétrico del núcleo magnético y los dos arrollamientos del transformador.

A partir de estas simulaciones he obtenido los valores las siguientes fuerzas a las que está sometido el transformador en caso de cortocircuito.

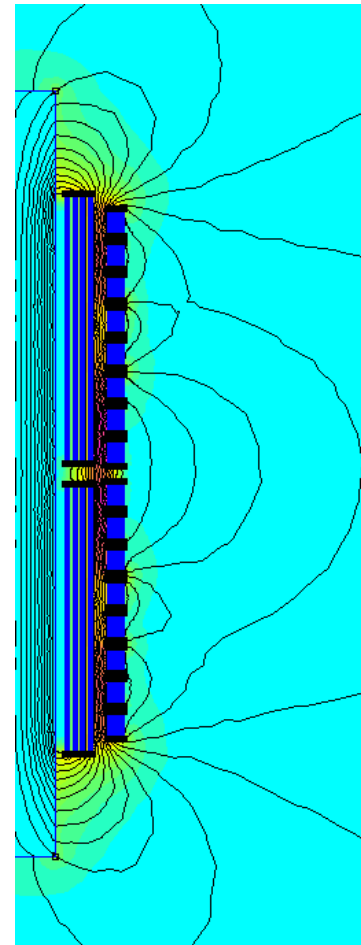
- FUERZAS RADIALES EN LOS ARROLLAMIENTOS DE BAJA TENSIÓN (LV)
- FUERZAS RADIALES EN LOS ARROLLAMIENTOS DE ALTA TENSIÓN (HV)
- FUERZAS AXIALES ENTRE LOS ARROLLAMIENTOS DE BAJA TENSIÓN
- FUERZAS AXIALES ENTRE LOS ARROLLAMIENTOS DE ALTA TENSIÓN
- FUERZAS AXIALES ENTRE LOS DISCOS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE ALTA TENSIÓN
- FUERZAS AXIALES DE LOS ARROLLAMIENTOS DE ALTA Y BAJA TENSION SOBRE LOS TACOS DE SOPORTE
- FUERZA AXIAL TOTAL



Caso1: POS N



Caso2: POS +



Caso3: POS -

En la siguiente tabla aparece un resumen de todas las fuerzas electromagnéticas obtenidas por el programa de simulación (F.E.M.M).

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<u>POS N</u>	<u>POS +</u>	<u>POS -</u>
Fuerza radial LV superior	<b>-1212411.2582</b>	-1210764.8498	-1188974.9314
Fuerza radial LV inferior	-1210113.1880	-1210511.7939	-1187627.3536
Fuerza radial HV superior	1529240.2201	<b>1601132.3744</b>	1565398.0129
Fuerza radial HV inferior	1518821.6130	1601247.2864	1563844.9430
Fuerza axial LV inferior	<b>43508.6807</b>	26105.5478	36521.1810
Fuerza axial HV inferior	107975.0645	93714.9995	<b>109916.4819</b>
Fuerza axial total inferior	<b>151483.7453</b>	119820.5473	146437.6629
Fuerza axial LV superior	<b>-41902.5559</b>	-25984.9159	-35761.9994
Fuerza axial HV superior	-84453.3279	-93839.3364	<b>-100333.9128</b>
Fuerza axial total superior	-126355.8838	-119824.2524	<b>-136095.9122</b>
Fuerza axial entre arrollamientos LV	<b>85411.2366</b>	52090.4637	72283.1804
Fuerza axial entre arrollamientos HV	192428.3925	187554.3359	<b>210250.3947</b>
Fuerza total	277839.6291	239644.7997	<b>282533.5751</b>

Tabla 3: Resumen de fuerzas obtenidas para cada tipo de conexión

\*Los signos negativos de las fuerzas indican las direcciones hacia el interior en caso de las fuerzas radiales y en caso de las fuerzas axiales indican la dirección hacia abajo.\*

### 3.5.1. Fuerzas radiales en cada arrollamiento. ( $F_{rad}^*$ )

De acuerdo con la ley de Lorentz, las fuerzas radiales de los arrollamientos de baja tensión tienen la dirección hacia el núcleo, mientras que las direcciones de las fuerzas radiales de los arrollamientos de alta tensión tienen la dirección hacia el exterior, tal y como se muestra en la siguiente figura.

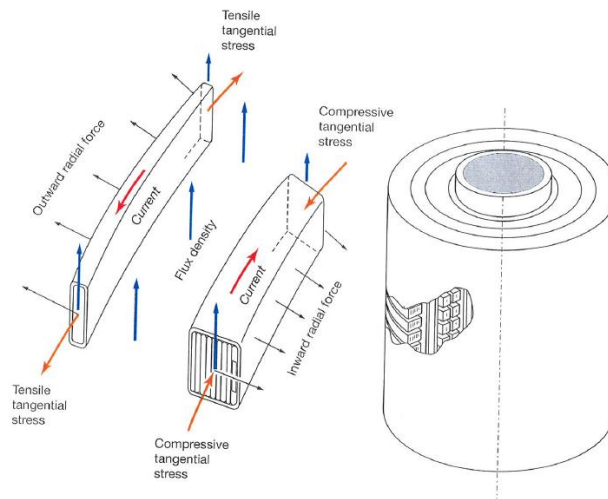


Figura 3

Los valores obtenidos de las fuerzas radiales de cada uno de los arrollamientos son:

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<u>POS N</u>	<u>POS +</u>	<u>POS -</u>
Fuerza radial LV superior	<b>-1212411.2582</b>	-1210764.8498	-1188974.9314
Fuerza radial LV inferior	-1210113.1880	-1210511.7939	-1187627.3536
Fuerza radial HV superior	1529240.2201	1601132.3744	1565398.0129
Fuerza radial HV inferior	1518821.6130	<b>1601247.2864</b>	1563844.9430

Tabla 4: Valores de fuerzas radiales

Los máximos valores obtenidos en el arrollamiento de baja tensión son con el tipo de conexión POS N. El valor máximo total de la fuerza que se produce hacia el interior del núcleo es de **1212.411 kN**.

El arrollamiento de baja tensión está dividido en cuatro secciones radiales diferentes, separadas entre sí por tres canales de ventilación. Esto hace que el flujo magnético en cada una de estas secciones sea completamente diferente. Es por eso por lo que hay que estudiarlas de forma independiente.

Los valores máximos obtenidos en el arrollamiento de alta son de **1601.247 kN** con dirección hacia el exterior del núcleo.

### 3.5.2. Fuerzas axiales en cada arrollamiento

#### 3.5.2.1. Fuerzas máximas de compresión en cada arrollamiento. ( $F_{sp}^*$ )

Como ya sabemos el transformador está diseñado por dos secciones axiales independientes. Cada una de estas secciones está separada por tacos cuya función es soportar los esfuerzos de cada arrollamiento.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las fuerzas axiales obtenidas en cada una de las secciones de los arrollamientos de alta y baja tensión.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<u>POS N</u>	<u>POS +</u>	<u>POS -</u>
Fuerza axial LV inferior	<b>43508.6807</b>	26105.5478	36521.1810
Fuerza axial HV inferior	107975.0645	93714.9995	<b>109916.4819</b>
Fuerza axial LV superior	<b>-41902.5559</b>	-25984.9159	-35761.9994
Fuerza axial HV superior	-84453.3279	-93839.3364	<b>-100333.9128</b>

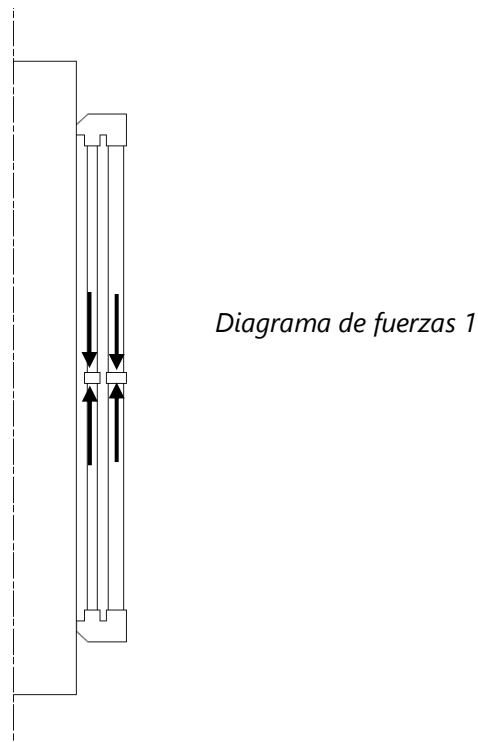
Tabla 5: Valores de fuerzas axiales

Como podemos observar el mayor esfuerzo de compresión entre las dos secciones del arrollamiento de baja tensión es de **85.41 kN**. Estos valores se producen cuando el transformador se encuentra en la posición nominal.

Entre las secciones axiales del arrollamiento de alta tensión podemos observar en la tabla superior, que el máximo valor de compresión es de **210.249 kN**.

Estos resultados se producen cuando el transformador se encuentra en la posición menor.

A continuación, se muestra una representación de las fuerzas axiales que se generan en cada una de las secciones de los arrollamientos del transformador



Por último, es muy importante estudiar los esfuerzos de compresión que se producen entre los discos del arrollamiento de alta tensión.

El arrollamiento de alta tensión está formado por dos secciones axiales de 8 discos cada una, encapsulados en resina epoxi. Estos discos están sometidos a esfuerzos de compresión y de tracción.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las máximas fuerzas de compresión y tracción entre discos.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<u>POS N</u>	<u>POS +</u>	<u>POS -</u>
Máxima fuerza de compresión entre discos	233219.0464	236575.2441	<b>249247.1945</b>
Máxima fuerza de tracción entre discos	0	0	0

*Tabla 6: Máximos valores de compresión y tracción entre discos*

Es en el Anexo III (cálculo de fuerzas electromagnéticas) donde se encuentran de manera detallada los cálculos de las fuerzas que se producen entre cada uno de estos discos.

### 3.5.2.2. Máxima fuerza axial de empuje en cada uno de los extremos de los devanados ( $F_{ax}^*$ )

Las componentes axiales de cada uno de los arrollamientos al completo tienen sus reacciones en los tacos superiores e inferiores, donde se apoyan estos mismos.

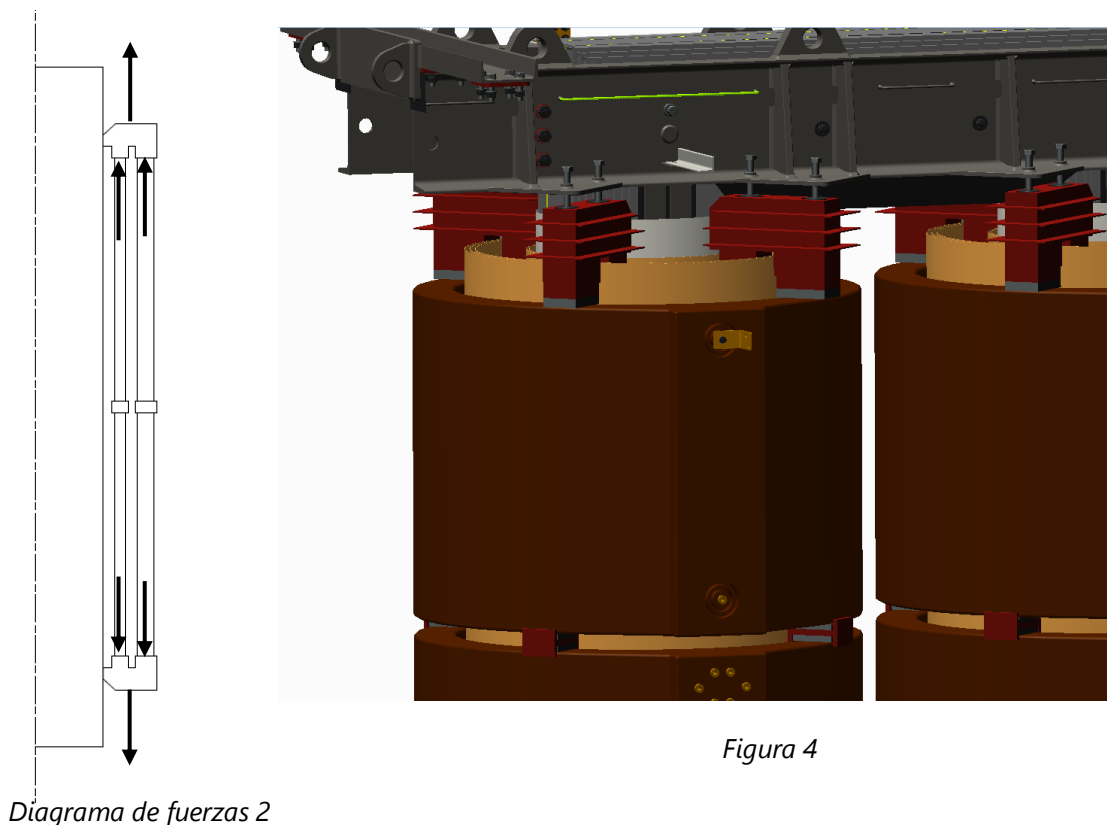
Hay 4 tacos distribuidos en toda la circunferencia del arrollamiento, que soportan estas fuerzas axiales provocadas por cada sección de arrollamiento. Cada taco tiene dos bases, donde se asientan el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento de baja tensión.

En la siguiente tabla aparecen los valores de las fuerzas que actúan en cada taco de apoyo y más en concreto en cada una de las bases de cada taco.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<i>POS N</i>	<i>POS +</i>	<i>POS -</i>
Fuerza axial en los tacos superiores LV	<b>1606.125 N</b>	120.63 N	759.19 N
Fuerza axial en los tacos inferiores LV	0	0	<b>0</b>
Fuerza axial en los tacos superiores HV	<b>23521.744 N</b>	0 N	9582.567 N
Fuerza axial en los tacos inferiores HV	0	124.33 N	<b>0</b>

Tabla 7: Fuerzas tacos inferiores y superiores

- El valor máximo de fuerza que actúa en la parte de baja tensión de los tacos superiores es 1.606 kN y en la parte de baja tensión de los tacos inferiores es de 0 kN.
- El valor máximo de la fuerza que actúa en la parte de alta tensión de los tacos superiores es de 23.521 kN y en la parte de alta tensión de los tacos inferiores es de 124.33 N.



### 3.5.2.3. Máxima fuerza axial por extremidad en los bloques de presión y en las abrazaderas del núcleo. ( $F_{ax,t}^*$ )

Con las reacciones calculadas en el apartado anterior obtenemos las fuerzas totales aplicadas en cada uno de los tacos de apoyo de las bobinas del transformador, que a su vez transmiten dichas fuerzas a las bridas del transformador.

Estas fuerzas producen un efecto de tracción en la estructura metálica, y que es principalmente soportado por las pletinas de acero del núcleo magnético..

La fuerza total de tracción en cada pletina de acero es la suma de las fuerzas de tracción en los tacos superiores e inferiores del transformador.

En la siguiente tabla aparecen los valores de las fuerzas a las que están sometidas las pletinas de acero del núcleo.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	POS N	POS ±	POS -
Fuerza axial TOTAL en los tacos superiores	<b>25127.869 N</b>	120.63 N	10341.757 N
Fuerza axial TOTAL en los tacos inferiores	0	124.33 N	0
Fuerza axial TOTAL	<b>25127.869 N</b>	244.96 N	10341.757 N

Tabla 8: Fuerzas totales tacos inferiores y superiores

Los máximos valores obtenidos tal y como refleja la tabla son los siguientes:

- En la posición N, un valor de 25.127 kN

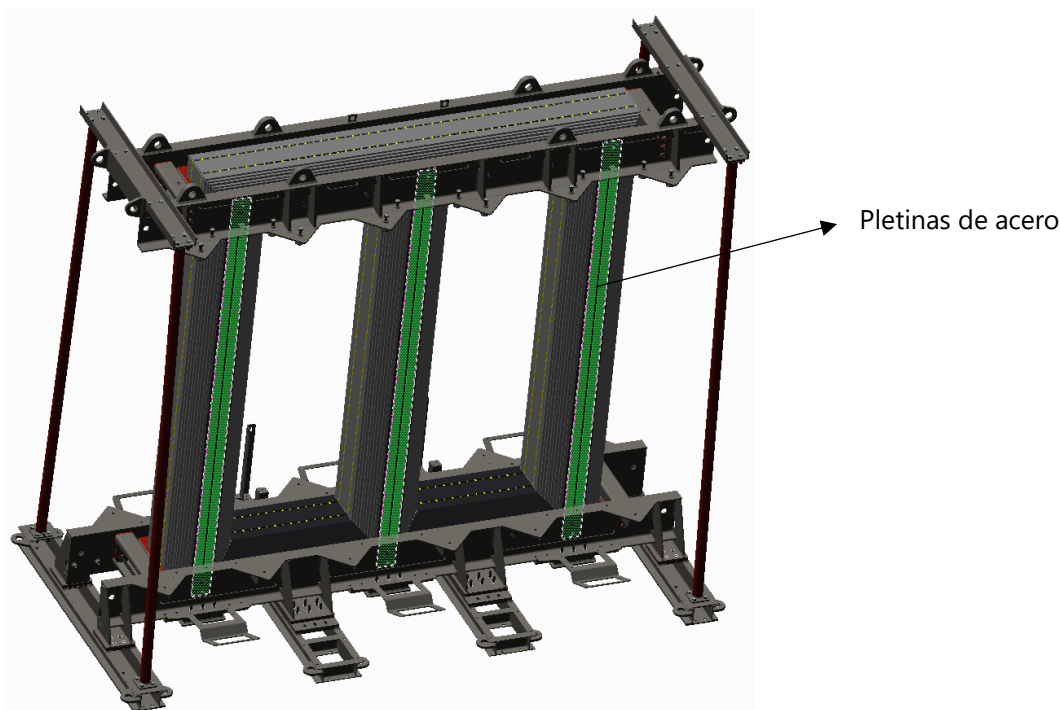


Figura 5

### 3.6. CÁLCULO DE LAS TENSIONES MECÁNICAS EN LOS ARROLLAMIENTOS Y ESTRUCTURAS DEL TRANSFORMADOR

#### 3.6.1. Esfuerzo medio de tracción en el arrollamiento exterior ( $\sigma_t^*$ )

El esfuerzo de tracción es producido por las fuerzas radiales que van hacia el exterior, calculados en el devanado de alta tensión. El máximo valor de esta fuerza es de **1601.247 kN** y es distribuido alrededor de todo el devanado de alta tensión (HV).

El esfuerzo medio de tracción en el arrollamiento exterior ha sido calculado como para una superficie cilíndrica como se muestra en la siguiente imagen.

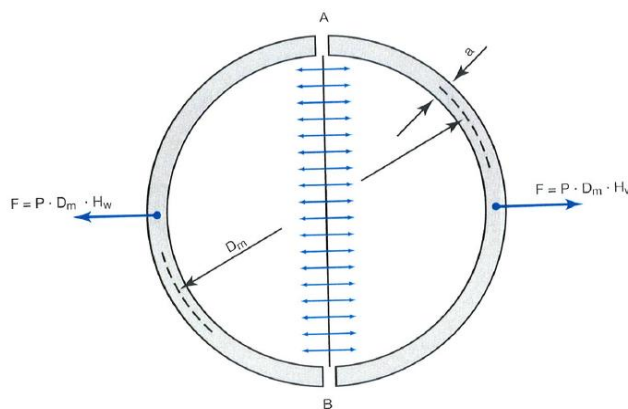


Figura 6

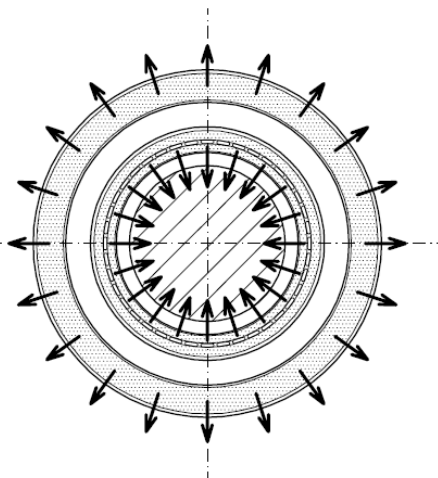


Figura 7

La fuerza transversal "F" en las dos mitades opuestas del devanado es equivalente a la presión sobre un diámetro, mientras que la fuerza radial total es equivalente a la presión en la circunferencia  $\pi \times D_m$ . La presión es igual a la fuerza/ superficie.

$$P_{HV} = F_{radHV} / (D_m \times H_w \times \pi)$$

Donde  $D_m$  es el diámetro medio en milímetros y el  $H_w$  hace referencia a la altura eléctrica en milímetros.

El esfuerzo de tensión tangencial creado en el material es;

$$\sigma_t^* = P_{HV} \times D_m / (2 \times a)$$

Siendo "a" el espesor radial de la pared, en este caso tomaremos como espesor únicamente el espesor del material del conductor ya que supondremos que la resina no tiene resistencia mecánica. En este caso será de un espesor de 63 mm, lo que equivale a 18 vueltas de 3.5 mm cada una.

De esta forma con los valores más críticos ya mencionados realizamos los siguientes cálculos:

- Para el caso de POS +, para el cual obtenemos valores más elevados:

$$P_{HV} = \frac{1601247.286}{1072.5 \times 1140 \times \pi} = 0.4268 \text{ N/mm}^2$$



Donde el  $D_m$  es igual a 1072.5mm y  $H_w$  es igual a 1140mm

$$\sigma_t^* = 0.4268 \times \frac{1072.5}{2 \times 63} = 3.63 \text{ N/mm}^2$$

En el *Anexo IV* tenemos una explicación más detallada con todos los cálculos realizados para cada uno de los casos.

### 3.6.2. Esfuerzo medio de compresión en el arrollamiento interior ( $\sigma_c^*$ )

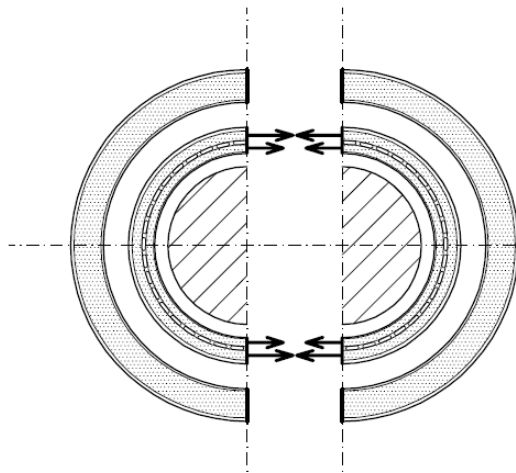


Figura 8

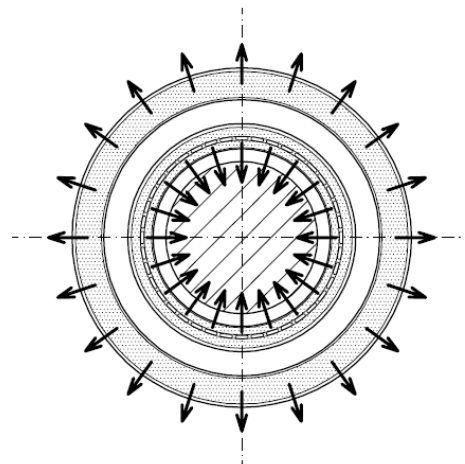


Figura 9

En este caso, el arrollamiento de baja tensión tiene 4 secciones radiales separadas entre sí por canales de ventilación. Las fuerzas radiales no están distribuidas uniformemente entre las 4 secciones. El máximo valor es de **1212.411 kN**.

Estas secciones pueden considerarse como superficies cilíndricas cerradas presurizadas, sometidas a una presión constante aplicada sobre su superficie exterior.

Usando las mismas fórmulas que para el apartado anterior en el caso de la tensión de tracción media en el devanado de alta tensión, calcularemos el valor que estamos buscando.

$$P_{LV} = F_{radHV} / (D_m \times H_w \times \pi)$$

En este caso  $D_m$  representa el diámetro medio de cada una de las cuatro secciones radiales por las que está formado el arrollamiento de baja tensión y  $H_w$  hace referencia a la longitud eléctrica. Así pues, a continuación procedo a realizar el cálculo de los esfuerzos medios de compresión de la sección más crítica del arrollamiento en el caso más crítico.

- Para el caso de POS +:

$$P_{LV(3)} = \frac{352696.9497}{764.58 \times 1150 \times \pi} = 0.1277 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{LV(1)} = \frac{41565.1731}{626.85 \times 1150 \times \pi} = 0.0183 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{LV(4)} = \frac{613757.5801}{829.52 \times 1150 \times \pi} = 0.2047 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{LV(3)} = \frac{204391.5553}{699.64 \times 1150 \times \pi} = 0.0808 \text{ N/mm}^2$$

El devanado consta de 4 secciones radiales de 12/11/12/11 vueltas cada uno de 1.3 mm de espesor cada una, así pues, procedemos al cálculo del esfuerzo medio de compresión de cada una de estas secciones, con las mismas fórmulas empleadas que para los esfuerzos de tracción del apartado anterior.

$$\sigma_c^* = P_{HV} \times D_m / (2 \times a)$$

Siendo "a" el número de vueltas por la sección de cada una de estas vueltas.

$$\sigma_{c,1}^* = 0.0183 \times \frac{626.85}{2 \times 11 \times 1.3} = 0.401 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,3}^* = 0.1277 \times \frac{764.58}{2 \times 11 \times 1.3} = 3.414 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,2}^* = 0.0808 \times \frac{699.64}{2 \times 12 \times 1.3} = 1.812 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,4}^* = 0.2047 \times \frac{829.52}{2 \times 12 \times 1.3} = 5.442 \frac{N}{mm^2}$$

En el *Anexo IV* tenemos una explicación más detallada con todos los cálculos realizados para cada uno de los casos.

### 3.6.3. Estrés producido debido a la flexión radial de los conductores en el tramo entre las barras axiales y los espaciadores usados para generar los conductos de enfriamiento dentro del ancho del devanado de baja tensión. ( $\sigma_{br}^*$ )

El colapso de los devanados debido a la tensión de compresión que se produce en cada uno de ellos puede ocurrir de dos modos diferentes:

- Pandeo forzado "forced buckling"
- Pandeo libre "free buckling".

Según el modelo de pandeo forzado, los conductores se doblan en cada tramo entre ejes "espaciadores entre los canales de refrigeración de la bobina" hacia adentro.

Según el modelo de pandeo libre, el conductor colapsa o cede por la presión de compresión en cualquier dirección.

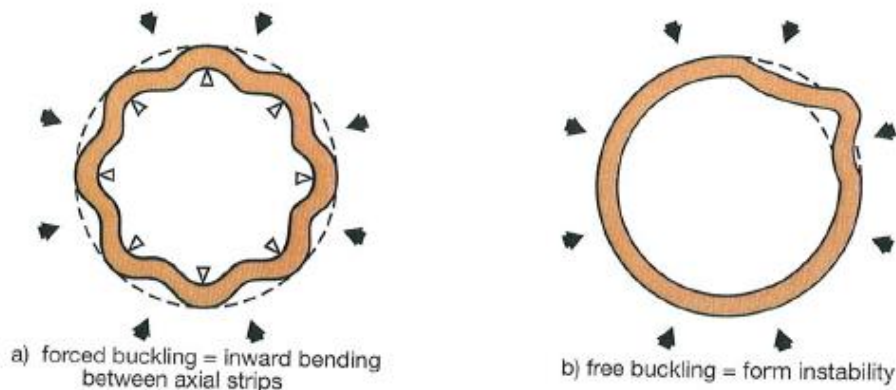


Figura 8: Diferencias entre pandeo forzado y pandeo libre

El esfuerzo debido al pandeo forzado se puede calcular con el modelo de viga delgada.

- a) Como en la sección interior del devanado de baja tensión no hay apoyos internos que soporten los esfuerzos de compresión como en el caso de las secciones exteriores del devanado, ya que en estos casos sí que existen apoyos que separan una sección de otra dando lugar así a los canales de refrigeración.

Es pues en este caso donde se podría dar lugar el modelo de pandeo libre "free buckling". Para ello realizamos los siguientes cálculos:

$$J_x = 1150 \times \frac{22.04^3}{12} = 1026009.459 \text{ m}^4$$

$$F_{rad,crit} = 3 \times 1150 \times \frac{1026009.459}{316.02^3} = 1121.57 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{blk,crit} = \frac{1121.57}{1150} = 0.97 \text{ N/mm}^2$$

La presión radial que actúa en esta sección del devanado se obtiene dividiendo la fuerza radial entre la superficie de la sección sobre la que actúa la fuerza.

$$\sigma_{blk,act} = \frac{44738.821}{\pi \times 1150 \times 632.04} = 0.01959 \text{ N/mm}^2$$

Así pues, como podemos comprobar este valor está muy por debajo del valor crítico de libre pandeo, lo que nos indica que no sufrirá "free buckling".

- b) En este caso en las secciones exteriores del arrollamiento consideraremos el modelo de "forced buckling" ya que internamente tenemos canales de refrigeración formados por soportes internos de resina epoxi, separados entre sí una distancia de 55 mm.

Para cada una de las tres secciones radiales de las que están dispuestas de soportes internos de los canales de refrigeración realizaremos los siguientes cálculos:

Cálculos del esfuerzo más crítico obtenido.

$$F_{dist,rad} = -352944.93 / (\pi \times 771.48) = -145.623 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_{br} = (-145.623 \times 55^2) / (2 \times 1150 \times 18.04^2) = 0.588 \text{ N/mm}^2$$

### 3.6.4. Tensión de compresión en los separadores radiales de los bobinados de tipo cinta ( $\sigma_{sp}^*$ )

Los arrollamientos de tipo cinta están completamente recubiertos por resina epoxi, esta resina separa cada uno de los discos por los que está formado el arrollamiento, trabajando como aislante y separador.

La tensión soportada por la resina epoxi es la siguiente:

$$\sigma_{sp,int} = \frac{F_{sp,int,HV}}{\text{Area entre discos}} = \frac{F_{sp,int,HV}}{\pi \times D_m \times a} = \frac{163624.578}{103797.139} = 1.576 \text{ MPa}$$

Hay que tener en cuenta que en función del caso en el que nos encontramos, entre algunos discos la dimensión radial varia, en la (POS -) hay discos con menor número de espiras y en la (POS N) pasa lo mismo, por lo tanto, la superficie en la que se aplica la fuerza disminuye. En los *Anexos III y IV principalmente*, aparecen al detalle cada una de las fuerzas entre discos, las secciones en las que se aplican dichas fuerzas y el valor de la tensión de compresión-tracción entre cada uno.

También existe un caso especial, que se trata de los bloques o tacos que separan las dos secciones axiales de los arrollamientos, estos tacos sufren las fuerzas de compresión de las secciones axiales superiores y de las secciones axiales inferiores tal y como se muestra en el "diagrama de fuerzas 1".

Fuerza (N)	POS N	POS +	POS -
Tacos MED (LV)	85411.23664	52090.46372	72283.18043
Tacos MED (HV)	192428.3925	187554.3359	210250.3947
Taco MED total	277839.6291	239644.7997	282533.5751

Tabla 9: Fuerzas totales tacos inferiores y superiores

El valor máximo de compresión entre los devanados de baja tensión es de 85411.23 N y entre las secciones de alta tensión es de 210250.39 N.

Existen 4 tacos que separan ambas secciones y que soportan dichos esfuerzos de compresión. Podemos obtener la presión de compresión ejercida en cada una de las bases de los tacos con la siguiente formula:

$$\sigma_{sp,ext} = \frac{F_{sp,ext}}{\text{Area de contacto bloque}}$$

Siendo el área de contacto; el ancho de cada uno de los tacos por el número de tacos en los que se apoyan las secciones de los arrollamientos y por la sección radial de cada arrollamiento (sección que se apoya en el taco).

$$\sigma_{sp,ext,HV} = \frac{F_{sp,ext,HV}}{\text{Area de contacto bloque}} = \frac{210250.3947}{4 \times 87.5 \times 80} = 7.5089 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sp,ext,LV} = \frac{F_{sp,ext,LV}}{\text{Area de contacto bloque}} = \frac{85411.2366}{4 \times 131 \times 80} = 2.037 \text{ N/mm}^2$$

### 3.6.5. Tensión de compresión o tracción en las capas aislantes de los bobinados de tipo banda ( $\sigma_{pi}^*$ )

Las fuerzas radiales que se producen en los devanados LV y HV comprimen las capas de aislante que se encuentra entre cada una de las espiras del conductor.

Cada una de las secciones radiales por las que están formadas las bobinas del transformador producen una fuerza radial sobre las capas de aislante que a su vez produce una presión sobre toda la superficie de dicho aislante.

A partir de los valores mostrados en la *Tabla 4* del apartado 3.5.1. elegimos los valores máximos de las fuerzas para calcular los esfuerzos más críticos.

Para el cálculo de los esfuerzos de compresión que se producen sobre los aislantes del transformador procedemos de la siguiente manera.

$$\sigma_{pi,LV}^* = F_{rad} / (\pi \times D_{int} \times H_w) = 1212411.2582 / (\pi \times 618 \times 1200) = 0.52039 \text{ N/mm}^2$$

El arrollamiento exterior sufre el mismo efecto que el interior analizado en la parte superior. Pero con dirección opuesta, es por eso por lo que analizamos la capa exterior como capa más crítica.

$$\sigma_{pi,HV}^* = F_{rad} / (\pi \times D_{ext} \times H_w) = 1601247.2864 / (\pi \times 1147 \times 960) = 0.4628 \text{ N/mm}^2$$

### 3.6.6. Tensión de compresión en estructuras de aislamiento ( $\sigma_{es}^*$ )

Tanto el arrollamiento de alta tensión como el arrollamiento de baja tensión están soportados cada uno por 4 tacos distribuidos en el perímetro de la bobina, estos tacos constan de algunas piezas de aislamiento encargadas de soportar y absorber las dilataciones térmicas. Las tensiones provocadas por el cortocircuito más el peso de la propia bobina son calculados con la siguiente fórmula, de esta forma calculamos las tensiones máximas que tienen que soportar estas piezas de aislamiento.

$$\sigma_{es}^* = (F_{ax} + \text{Peso arrollamiento}) / \text{Area}$$

Las fuerzas axiales que tiene que soportar cada uno de los tacos de soporte y por lo tanto también las "estructuras de aislamiento" son las siguientes: (Tabla 9, calculada en el apartado 2.5.3).

Así pues, con los valores máximos calculados y expuestos en la *tabla 9* procedemos a realizar los siguientes cálculos.

$$\sigma_{es LV sup}^* = 1606.25 \text{ N} / (4 \times 80 \times 135) = 0.0372 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es LV inf}^* = 0 \text{ N} + (3720.2 \times 9.81) / (4 \times 80 \times 135) = 0.845 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es HV sup}^* = 23521.744 \text{ N} / (4 \times 80 \times 87.5) = 0.84 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es HV inf}^* = 124.33 \text{ N} + (6029.4 \times 9.81) / (4 \times 80 \times 87.5) = 2.11 \text{ N/mm}^2$$

### 3.6.7. Esfuerzos de compresión en los tacos de soporte de las bobinas ( $\sigma_{pr}^*$ )

Para este caso en concreto se ha decidido simular los esfuerzos a los que están sometidos los tacos en un programa de simulación mediante elementos finitos, ya que estos constan de una geometría más compleja y son el principal soporte de las bobinas del transformador.

En primer lugar, se ha dibujado la geometría de los tacos de manera simplificada, de esta forma conseguimos discretizar la pieza de diseño.

Definimos el material por el que están fabricados y procedemos a mallar la pieza. Una vez creada la malla en la pieza procedemos a definir las condiciones de contorno.

Con todo esto ya bien definido, colocamos las fuerzas que tienen que soportar cada uno de los tacos. Ya con todos los datos definidos procedemos a realizar la simulación.

A partir de esta simulación obtenemos los siguientes resultados:

- Tensión de Von Mises
- Tensión máxima principal
- Tensión mínima principal

En el *Anexo IV* aparecen los cálculos detallados de todas las simulaciones realizadas en los tacos de soporte en la situación de máximas fuerzas, así como las explicaciones y la interpretación de los resultados obtenidos para cada uno de los tres criterios.

### 3.6.8. Tensión de tracción en las pletinas del núcleo ( $\sigma_{rod}$ )

Las fuerzas transmitidas a través de los tacos en los que se apoyan y que sujetan cada una de las secciones de las bobinas del transformador, producen en el núcleo magnético unos esfuerzos de tracción.

Estos esfuerzos son principalmente soportados por las pletinas de acero del núcleo, tal y como se muestran en la *figura 5* y en el *diagrama de fuerzas 2*.

Cada columna del transformador tiene dos pletinas de acero S275JR de 160 x 12 mm con una ranura de 20 mm. Así pues, calcularemos la fuerza axial total que ejerce cada una de las columnas del transformador para poder obtener los esfuerzos que deben soportar cada una de las pletinas del núcleo.

La máxima fuerza axial que tiene que soportar estas pletinas será de 25127 N, esta fuerza ha sido obtenida como la suma de las fuerzas axiales que produce el arrollamiento de baja tensión y el arrollamiento de alta tensión en los tacos superiores.

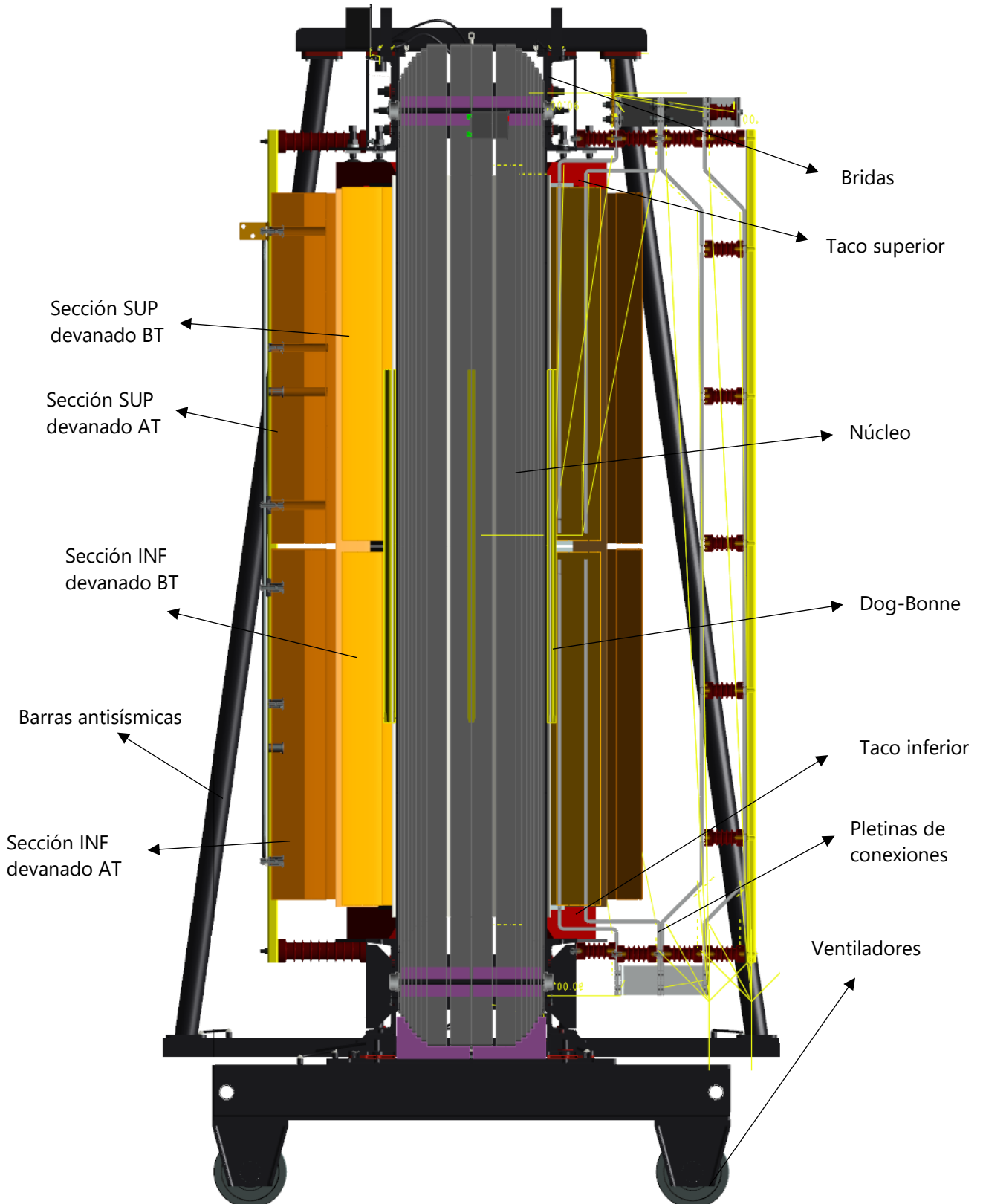
Los esfuerzos de tracción que tiene que soportar dichas pletinas se muestran en la *Tabla 8* del apartado 3.5.2.3.

$$\sigma_{rod} = 25127 \text{ N} / (2 \times (160 - 20) \times 12) = 7.478 \text{ N/mm}^2$$

Así pues, la máxima tensión de tracción será de 7.478 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4. ESTRUCTURA Y DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

En la siguiente imagen se muestra la estructura del transformador de diseño y los principales componentes por los que está formado.



## 5. EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO

### 5.1. FUERZAS PERMITIDAS Y TENSIONES LÍMITE

En este apartado se ha realizado la evaluación de los siguientes esfuerzos; es en el *Anexo V* donde podemos ver de forma más detallada todos los pasos seguidos para la evaluación de los siguientes esfuerzos, así como también, los criterios adoptados.

#### - ESFUERZO MEDIO DE TRACCIÓN EN LOS DEVANADOS EXTERIORES

La norma recomienda que los esfuerzos calculados no sobrepasen el 90% del valor  $R_{p0,2}$ .

Sin embargo, si nos basamos en la experiencia del diseño de este tipo de transformadores, en la sección de transformadores de tipo seco se usa siempre el 80% del valor  $R_{p0,2}$

Tomamos el valor mínimo aceptado en fabrica ( $35 \text{ N/mm}^2$ ):

Con el valor calculado en el apartado 3.6.1. ( $3.63 \text{ N/mm}^2$ ), podemos observar que está claramente por debajo del valor mínimo aceptado en fabrica que en este caso es el calculado de  $28 \text{ N/mm}^2$ .

$$\sigma_{t,act}^* = 3.63 \text{ N/mm}^2 \leq 28 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{t,permitida}^*$$

Así que como podemos observar en los cálculos, esta condición es considerada como **ACEPTADA**.

#### - TENSIÓN MEDIA DE COMPRESIÓN EN LOS DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN

La norma para este caso recomienda que para conductores regulares la tensión de compresión media calculada sea inferior al 35% del valor  $R_{p0,2}$ .

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0.35 \times R_{p0,2} = 0.35 \times 35 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

La tensión de compresión calculada en el apartado 3.6.2. para los devanados de baja tensión es la siguiente:

$$\sigma_{c,act4}^* = 5.442 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar con los cálculos realizados es que ninguno de los valores previamente calculados supera el valor mínimo permitido, lo que nos indica que esta condición se puede considerar como **ACEPTADA**.



- ESTRÉS DEBIDO A LA FLEXIÓN RADIAL DE LOS CONDUCTORES EN LA ZONA DE LOS ESPACIADORES AXIALES.

Los esfuerzos de pandeo a los que son sometidas cada una de las secciones radiales de los arrollamientos de baja tensión de transformador han sido calculados en el apartado 3.6.3. así como también la presión límite de colapso.

La norma IEC recomienda que el valor calculado debe de estar por debajo del valor 90% del valor crítico, sin embargo, basados en la experiencia de la empresa, ABB siempre utiliza un valor de un 80%.

$$\sigma_{blk,act} = 0.0182 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \times 0.97 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar para cualquiera de los dos criterios que utilicemos, cumplimos la normativa, por lo tanto, esta condición es **ACEPTADA**.

- TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LOS SEPARADORES RADIALES ENTRE LAS SECCIONES DE LOS ARROLLAMIENTOS.

De los dos materiales empleados en la estructura que separa las dos secciones axiales, la goma de silicona es el material más débil, y de acuerdo con la experiencia de casos anteriores, esta debe trabajar por debajo de 10 N/mm<sup>2</sup>.

Con los cálculos obtenidos en el apartado 3.6.4. y con un factor de seguridad de un 80% procedemos a calcular las siguientes comprobaciones.

$$\sigma_{sp,ext,HV} = 7.5089 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sp,ext,LV} = 2.037 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 8 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar, aunque los valores de diseño calculados estén próximos a los valores críticos, aun así, todavía tenemos un pequeño margen de seguridad, de esta forma podemos decir que cumple con la normativa. **ACEPTADA**

- TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LOS SEPARADORES RADIALES DENTRO DE LOS ARROLLAMIENTOS (ENTRE DISCOS).

Los esfuerzos de compresión que debe soportar la resina que se encuentra entre los discos que forman el arrollamiento de alta tensión han sido calculados en el apartado 3.6.4.

Tal como hemos detallado en el *Anexo I* donde aparecen las propiedades las características de los materiales, la resina epoxi tiene un límite elástico de 60 N/mm<sup>2</sup>. Sin embargo, la experiencia en el diseño de estos transformadores nos recomienda que los esfuerzos de compresión entre discos no sean superiores al 50%

$$\sigma_{sp,int} = 1.576 \text{ N/mm}^2 \leq 0.5 \times 60 \text{ N/mm}^2 = 30 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos ver los valores obtenidos son los correctos es por eso por lo que esta condición se considera como **ACEPTADA**.

- TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LAS CAPAS AISLANTES DE LOS BOBINADOS DE TIPO CAPA.

Para el arrollamiento de Baja tensión el esfuerzo máximo obtenido es de  $0.52039 \text{ N/mm}^2$ , mientras que para el arrollamiento de alta tensión ha sido de  $0.4628 \text{ N/mm}^2$ .

Utilizando un factor de seguridad de un 50% y esfuerzos limite indicados en el *Anexo IV*, obtenemos los siguientes valores:

$$\sigma_{pi,LV}^* = 0.52039 \text{ N/mm}^2 \leq 90 \text{ N/mm}^2 \times 0.50 = 45 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pi,HV}^* = 0.4628 \text{ N/mm}^2 \leq 140 \text{ N/mm}^2 \times 0.50 = 70 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar con los resultados obtenidos, que se cumplen los valores mínimos aceptado, así pues, podemos decir que esta condición es **ACEPTADA**.

- TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LAS ESTRUCTURAS AISLANTES.

Los esfuerzos de compresión han sido calculados en el *Anexo IV*, además utilizaremos un factor de seguridad del 80%. Siendo  $10 \text{ N/mm}^2$  la presión máxima capaz de soportar por el material.

$$\sigma_{es HV inf}^* = 2.11 \text{ N/mm}^2 \leq 10 \text{ N/mm}^2 \times 0.8 = 8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es LV inf}^* = 0.845 \text{ N/mm}^2 \leq 10 \text{ N/mm}^2 \times 0.8 = 8 \text{ N/mm}^2$$

Así pues, podemos observar que los valores más altos de esfuerzos obtenidos en cada uno de los arrollamientos no superan los valores límite del material, condición **ACEPTADA**.

- TENSIÓN DE COMPRESION EN LOS TACOS DE SOPORTE INFERIORES.

Mediante las simulaciones que he llevado a cabo a través del programa de cálculos de las fuerzas electromagnéticas (F.E.M.M.) he calculado las máximas tensiones de Von Mises y los máximos desplazamientos que se producen en los tacos de soporte superiores.

En el apartado 3.6.7. podemos encontrar los valores máximos de estas tensiones y desplazamientos ya mencionados y a partir de los cuales vamos a comprar con los valores limite aceptados.

El material por el cual están fabricados estos tacos es GPO3, este material tiene una resistencia mínima a la compresión de  $220 \text{ N/mm}^2$  y una resistencia a la flexión de  $130 \text{ N/mm}^2$ .

Aplicando un factor de seguridad de 50% tal y como está definido aquí en ABB y tomando el valor más débil de resistencia del material, obtenemos la siguiente relación.

$$\sigma_{pr}^* = 2.155 \leq 0.5 \times 220 \text{ N/mm}^2 = 110 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{pr,permitido}^*$$

Como el valor de la tensión de Von Mises está muy lejos del valor mínimo permitido, podemos considerar esta condición como **ACEPTADA**.

- TENSIÓN DE COMPRESION EN LOS TACOS DE SOPORTE SUPERIORES.

Al igual que para los tacos inferiores, para los tacos superiores, con la tensión de Von Mises máxima calculada en el apartado 2.6.7. y con el valor del máximo desplazamiento, vamos a proceder a comprobar si se cumple la siguiente condición.

Como se trata de los mismos tacos fabricados con el mismo material que para los tacos inferiores la expresión no cambia respecto a la anterior.

$$\sigma_{pr}^* = 0.859 \leq 0.5 \times 220 \text{ N/mm}^2 = 110 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{pr,permitido}^*$$

Así pues, como para el caso anterior podemos comprobar que los valores de la tensión de Von Mises no superan el valor limite aceptado, así pues, esta condición es **ACEPTADA**.

- TENSIÓN DE TRACCIÓN EN LAS PLETINAS DEL NÚCLEO.

Como en muchos de los casos anteriores, para esfuerzos mecánicos, utilizaremos un coeficiente de seguridad del 50%

Procedemos a realizar la evaluación de resistencia a partir del esfuerzo más crítico obtenido en los apartados anteriores

$$\sigma_{rod}^* = 7.478 \text{ N/mm}^2 \leq 0.5 \times 275 \text{ N/mm}^2 = 137.5 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{rod,permitido}^*$$

Comprando las fuerzas calculadas con las fuerzas limite permitidas podemos observar que el valor de las fuerzas calculadas es inferior a las permitidas así que podemos considerar esta condición como **ACEPTADA**.

## 5.2. COMPARATIVA DE FUERZAS Y ESFUERZOS EN EL TRANSFORMADOR

Doc. Ref.	Tipo de fuerza/tensión	Sección interior Bob BT				Sección exterior Bob BT				Bobinado AT			
		Actual	Permitido	Crítico	Coef. seguridad	Actual	Permitido	Crítico	Coef. seguridad	Actual	Permitido	Crítico	Coef. seguridad
2.6.1	Esfuerzo medio de tracción en los devanados exteriores									3.63	28	35	771%
2.6.2	Tensión media de compresión (devanados de BT)	0.401	12.5	35	3117%	5.442	12.5	35	229%				
2.6.3	Estrés debido a la flexión radial de los conductores en la zona de los espaciadores axiales.					0.0195	0.776	0.97	3979%				
2.6.4	Tensión de compresión en los separadores radiales entre las secciones de los arrollamientos.	2.037	8	10	392.73%	2.037	8	10	392.73%	7.508	8	10	106.553%
2.6.4	Tensión de compresión en los separadores radiales dentro de los arrollamientos (entre discos).									1.576	30	60	1903.55%
2.6.5	Tensión de compresión en las capas aislantes de los bobinados de tipo capa.	0.5204	45	90	8647.19%	0.5204	45	90	8647.19%	0.463	70	140	15125%
2.6.6	Tensión de compresión en las estructuras aislantes.	0.845	8	10	946.7%	0.845	8	10	946.7%	2.11	8	10	379

Tablas 10 y 11: comparativas de esfuerzos, con los valores límite aceptados

Doc. Ref.	Tipo de fuerza/tensión	Valor Permitido	Valor Permitido	Valor Crítico	Coeficiente de Seguridad
2.6.7	Tensión de compresión en los tacos inferiores.	2.155	65	130	3016.24%
2.6.7	Tensión de compresión en los tacos superiores.	0.859	65	130	7566%
2.6.8	Tensión de tracción en las pletinas del núcleo.	7.478	137.5	275	1838.72%

*Actual: valor de las fuerzas i esfuerzos del transformador que se está analizando.*

*Permitido: fuerzas y tensiones permitidas siguiendo los criterios de diseño y la norma.*

*Crítico: fuerzas y tensiones criticas según las propiedades de los materiales y las normas de diseño.*

## **6. CONCLUSIONES**

Finalmente y como balance de este trabajo después de todos los cálculos realizados, tanto eléctricos, con los cuales obtenemos las fuerzas generadas en el transformador a través de los programas de simulación electromagnética, seguido de los cálculos de esfuerzos que estas fuerzas generan en el transformador, podemos observar que se cumple con los parámetros de diseño y que los materiales elegidos, también son los correctos ya que son capaces de aguantar los esfuerzos generados ante un posible cortocircuito.

Para concluir con este proyecto, he aprendido no solo como es el funcionamiento de un transformador sino que me ha servido para aprender desde como elegir los materiales de diseño, parte que tiene una gran importancia así como saber analizar los resultados obtenidos y compararlos con los valores que la norma te permite para poder cumplir con los requisitos de seguridad y evitar en todo momento un fallo que pueda poner en riesgo, en primer lugar la seguridad y por otro lado el buen funcionamiento de la máquina.

Desde el punto de vista laboral me ha servido para conocer el funcionamiento de la empresa, pasando por casi todos los departamentos y analizando el trabajo que se realiza en cada uno de ellos tomando nota de todo lo que podría serme útil a la hora de realizar el trabajo, pasando desde el montaje del transformador, hasta el bobinado de los arrollamientos o la preparación de los materiales.

Otro aspecto muy interesante ha sido el poder aprender a utilizar los programas de diseño y de simulación que la empresa utiliza en el día a día para el diseño y simulación de los transformadores.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### Libros consultados acerca de transformadores:

- IEC 60075-5 Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit
- IEC 60075-11 – Dry-Type Transformers
- The short circuit performance of power transformers. CIGRE Working Group 12.19 Brochure, June 2002
- The ABB approach to short-circuit duty of power transformers. Giorgio Bertagnoli, ABB publications, 2007
- Theory of elastic stability. Timoshenko, McGraw – Book Company, 1961
- NUMESA – State of the Art Review and SCAP Tool for CDS

### Páginas web consultadas:

- [http://www.uco.es/grupos/giie/cirweb/teoria/tema\\_11/tema\\_11\\_18.pdf](http://www.uco.es/grupos/giie/cirweb/teoria/tema_11/tema_11_18.pdf)
- [https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/307/zacchino\\_laminados](https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/307/zacchino_laminados)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato\\_de\\_polietileno](https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno)
- [http://www.alsider.com/s275jr\\_planchas\\_acero.aspx](http://www.alsider.com/s275jr_planchas_acero.aspx)
- <http://www.comatec.es/aislantes-electricos-termicos-tag/gpo3/>
- <http://www.lindberg-lund.fi/files/Tekniske%20datblad/VAN-CY5936-TD.pdf>
- <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>
- <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza\\_de\\_Lorentz](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz)

## **ANEXO I**

### **(PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE DISEÑO DEL TRANSFORMADOR)**

- GPO-3
- RESINA EPOXY Y ENDURECEDOR
- AISLANTE DE POLIESTER
- POLIESTER PREIMPREGNADO (DMD)
- ALUMINIO (BOBINADO EN BANDA)
- ALUMINIO (BOBINADO EN CINTA)
- Mylar
- ACERO S275JR

## I. GPO-3

### a. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

El GPO3 es un plástico reforzado con fibra de vidrio, de acuerdo con los siguientes standards (normas) internacionales:

DIN 7735 | HM2471

NEMA LI | GPO-3

NFC Std. Type | VmP2e

Color principal rojo.

Las medidas principales son las siguientes: 2445 x 1255 con un rango de espesor máximo de 1.5-50.

#### i. COMPOSICION:

Está preparado a partir de MAT de vidrio impregnado con resina poliéster insaturada. Este producto es especialmente remarcable por su excepcional resistencia mecánica, valores de aislamiento eléctrico excelentes, muy buena resistencia al "tracking", alta resistencia al arco eléctrico y a la temperatura, buena resistencia a la corrosión y a los productos químicos, así como también resistencia a la abrasión.

#### ii. APLICACIONES:

Puede ser utilizado como material de construcción de alta calidad en la industria electromecánica, química... Aislamiento eléctrico y térmico en máquinas y equipos diversos.

Las aplicaciones dentro del transformador son las siguientes:

- Tacos de soporte de las bobinas como modo de sujeción.
- Tacos entre secciones axiales de los arrollamientos.
- Soportes del núcleo por sus propiedades mecánicas.
- Soporte de las barras colectoras, cables...
- Calce de las barras antisísmicas, arandelas de aisladores...

### b. TABLAS DE CARACTERÍSTICAS

PROPIEDADES	Unidad de medida	Valor típico
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.8
Categoría de inflamabilidad	-	UL94V0*

Tabla 12



\*UL 94 es la norma de inflamabilidad de materiales plásticos para piezas y dispositivos de pruebas. Es un estándar de inflamabilidad de plásticos publicado por Underwriters laboratorios de los Estados Unidos. La norma determina la tendencia del material a extinguir o extender la llama una vez la muestra ha sido encendida. En esta norma existe una clasificación de menos ignífugo a más ignífugo. Este material está clasificado como V-0 lo que significa que la llama se detiene a los 10 segundos en una muestra en vertical, se permiten gotas de partículas siempre que no estén infladas.

#### i. PROPIEDADES MECÁNICAS

PROPIEDADES	Unidad de medida	Valor típico
Fuerza de flexión	MPa	170
Resistencia a la cizalladura	MPa	80
Fuerza de tensión	MPa	58

Tabla 13

#### ii. PROPIEDADES ELÉCTRICAS

PROPIEDADES	Unidad de medida	Valor típico
Cortocircuito	kV	46
Permitividad relativa (1MHz)	-	4.0
Permitividad relativa (50MHz)	-	4.2
Factor de disipación (1MHz)	-	0.010
Factor de disipación (50MHz)	-	0.11
Tracking index	V	600

Tabla 14

#### iii. PROPIEDADES TÉRMICAS

PROPIEDADES	Unidad de medida	Valor típico
Calificación térmica continua	°C	120
Coefficiente lineal de expansión	( $\times 10^{-6}$ )K	20

Tabla 15

#### c. SELECCIÓN DEL MATERIAL (NORMATIVA)

A la hora de elegir y utilizar este material como parte del diseño del transformador han sido consultadas las siguientes normas que nos aseguran un uso correcto del material para cumplir con los requerimientos específicos y evitar posibles fallos en caso de cortocircuito o cualquier otro posible fallo al que pueda verse sometido el transformador.

Para ellos se han consultado las siguientes normas:

- IEC 60071-1 (Parte 1): definiciones, principios y reglas.
- IEC 60071-2 (Parte 2): guía de aplicación.
- ISO 178 (para plásticos): determinación de las propiedades de flexión.

- ISO 527 (para plásticos): determinación de las propiedades de compresión.
- IEC-243- métodos de prueba de resistencia eléctrica de materiales sólidos aislantes.
- IEC-60587 materiales aislantes eléctricos usados bajo condiciones de ambiente críticas.
- IEC 216 métodos de determinación de la resistencia térmica para materiales aislantes.
- UL94 norma de inflamabilidad de materiales plásticos para piezas y dispositivos de pruebas.

d. TEST DE CALIDAD DEL PRODUCTO

TEST DE APROBACIÓN DEL MATERIAL

- Control dimensional (mm)
- Composición química
- Propiedades eléctricas
- Propiedades mecánicas



Figura 9

Apariencia del GPO-3



Figura 10

## II. RESINA EPOXY Y ENDURECEDOR

### a. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

La resina que se utiliza para el encapsulado de las bobinas del transformador de diseño se trata de ARALDITE CY 5948 BROWN, esta resina se mezcla con un endurecedor ARADUR HY 925-1 y harina de sílice. La mezcla de estos materiales es la que se utiliza para el encapsulado de las bobinas de los transformadores.

La resina y el endurecedor pueden estar hechos tanto en China, Suiza, Alemania o Estados Unidos. Los sufijos CI; CH; BD o US indican el origen de los materiales.

Esta mezcla debido a su baja viscosidad hace que sea fácil rellenar los moldes y ocupar los espacios.

Larga vida útil hasta 80°C. Buenas propiedades mecánicas y eléctricas.

Excelente resistencia al agrietamiento, muy buenas propiedades de resistencia térmica (clase H)

### b. TABLA DE CARACTERÍSTICAS

En las siguientes tablas aparecen las principales características de los materiales principales de la mezcla (resina y endurecedor).

<i>Propiedades</i>	<b>Resina epoxi líquida, de baja viscosidad (ARALDITE CY5948 BROWN)</b>			
<i>VISCOSIDAD</i>	25°C	ISO 12058	MPa	2000-3000
<i>CONTENIDO EPOXY</i>		ISO 3001	Equiv/kg	4.9-5.2
<i>INDICE REFRACTARIO</i>	20°C	ISO 489		1.55-1.57
	25°C			1.14-1.18
<i>DESNIDAD</i>	60°C	ISO 1675	g/cm <sup>3</sup>	1.13-1.16
	80°C			1.13-1.14
<i>PUNTO DE INFLAMABILIDAD</i>		DIN 51758	°C	>119
<i>PRESION DE VAPOR</i>	20°C		Pa	<10 <sup>-6</sup>
	60°C			<10 <sup>-3</sup>

Tabla 16

<i>Propiedades</i>	<b>Endurecedor anhidrido preacelerado líquido (ARADUR HY-925-1)</b>			
<i>VISCOSIDAD</i>	25°C	ISO 12058	MPa	300-450
<i>DESNIDAD</i>	25°C	ISO 1675	g/cm <sup>3</sup>	1.19-1.22
	40°C			1.16-1.20
<i>PUNTO DE INFLAMABILIDAD</i>		DIN 51758	°C	>115
<i>PRESION DE VAPOR</i>	20°C		Pa	appr. 0.5
	60°C			appr. 10

Tabla 17

*\*ARADUR HY-925-1 es sensible a la humedad, los contenedores parcialmente vacíos, deben estar correctamente cerrados inmediatamente después de su uso.*

### c. SISTEMA DE PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

Para una obtención de una deseable larga vida útil de la mezcla con ARALDITE, se deben mezclar todos los componentes muy a fondo a una temperatura de 55°C o ligeramente superior y al vacío. La humedad del relleno es extremadamente importante. Una mezcla adecuada resultara con:

- Mejores propiedades de flujo y menor tendencia a la contracción.
- Menores tensiones internas y, por lo tanto, mejores propiedades mecánicas como objeto.
- Comportamiento mejorado de descarga parcial en aplicaciones de alto voltaje.

En plantas más grandes se usan dos premezcladores para mezclar los componentes individualmente (ARALDITE Y ARADUR) con las cantidades respectivas de cargas y aditivos al vacío. Las bombas dosificadoras luego alimentan estas premezcladoras al mezclador final o aun mezclador continuo. Las premezclas se pueden almacenar a temperatura elevada (<80°C) durante aproximadamente 2 días. Se recomienda la agitación intermitente durante el almacenamiento para evitar la sedimentación del relleno.

El tiempo de mezcla puede variar de 0.5 a 3 horas, dependiendo de la temperatura de mezcla, reactividad, cantidad, equipo de mezcla y la aplicación particular. El vacío requerido es de 0.5 a 8 mbar. Se debe de tener en cuenta la presión de vapor de los componentes individuales.

La vida útil efectiva de la mezcla es de aproximadamente de 1 día a temperaturas inferiores a 25°C.

#### Temperatura de moldeo:

- Encapsulado al vacío convencional 80-100°C

#### Tiempos de desmoldeo:

- Dependiendo de la temperatura del moldeo y del volumen del a fundición, después del primer curado). Fundición al vacío unos tiempos de 4-12h.

#### Condiciones del curado:

- Encapsulado al vacío convencional:

(6-10h) a 80°C+3h a 90°C+2h a 100°C+4h a 110°C+8h a 120°C

(Proceso rápido) 4h a 80°C+6h a140°C

d. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

PROPIEDADES	<b>ARALDITE CY 5948 BROWN/ARADUR HY 925-1/harina de silicio</b>		
<i>Fuerza de tensión</i>	ISO R 527:1993	N/mm <sup>2</sup>	82-92
- <i>Alargamiento a la rotura</i>		%	1.3-1.6
- <i>Módulo de Young</i>		N/mm <sup>2</sup>	11'500-12'500
<i>Fuerza de flexión</i>	ISO 178:2001	MPa	135-150
- <i>Tensión superficial</i>		%	1.3-1.6
- <i>Módulo de Young</i>		MPa	11'500-12'500
<i>Temperatura de transición vítrea</i>	ISO 11357-2: 1999	°C	80-90
<i>Coefficiente de expansión térmica</i>	ISO 11359: 1999		
- <i>Valor medio bajo Tg</i>		Ppm/K	30-35
<i>Conductividad térmica</i>	ISO 8894-1	W/mK	1.00-1.06
<i>TRACKING Inflamabilidad</i>	UL94	Clase	HB
<i>Espesor de la muestra: 6mm</i>			
<i>Envejecimiento térmico</i>	UL file E96722		
<i>Índice relativo de temperatura (RTI)</i>		°C	200
<i>Absorción de agua (muestra:50x50x4 mm)</i>	ISO 62		
- <i>10 días a 23°C</i>			0.10-0.15
- <i>60min a 100°C</i>			0.10-0.15
- <i>10h a 100°C</i>			0.40-0.50
- <i>100h a 100°C</i>			1.00-1.50
<i>Densidad</i>	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.87-1.91

\*Ratio de la mezcla:100/80/350pbw; curado durante 4h a 80°C + 10h a 140°C

Tabla 18

e. PROPIEDADES ELÉCTRICAS

PROPIEDADES	<b>ARALDITE CY 5948 BROWN/ARADUR HY 925-1/harina de silicio</b>		
<i>Fuerza de descomposición</i>	IEC 60243-1	kV/mm	20-25
<i>Difusión de la fuerza de descomposición (Temperatura de la muestra después de la prueba)</i>	DIN VDE 0441-1	Clase	HD 2 <23°C
<i>Arco de resistencia HV</i>	IEC 61621	s	183-195
<i>Resistencia de seguimiento</i>	IEC 60112	°C	80-90
<i>Corrosión electrolítica</i>	DIN 53489	Grado	A-1

\*Ratio de la mezcla:100/80/350pbw; curado durante 4h a 80°C + 10h a 140°C

Tabla 19

### III. AISLANTE DE POLIESTER

#### a. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

PET poliéster es usado como aislante eléctrico en las bobinas del transformador.

Es una capa de poliéster transparente o ligeramente de color blanco. Tiene una alta fuerza de tensión, una excelente resistencia a la humedad y puede soportar temperaturas extremas ya que no contiene ningún plastificante. No presenta fragilidad con el paso del tiempo en condiciones normales.

#### b. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

La tolerancia de espesor es indicada en la norma IEC 674-1 y será de un valor  $\pm 10\%$  del valor nominal.

La tolerancia del ancho estar de acuerdo con la norma IEC 674-1. Se define de acuerdo con el ancho de la capa/película:

<u>ANCHO (mm)</u>	<u>TOLERANCIA (mm)</u>
$\leq 50$	$\pm 0.5$
$> 50$	$\pm 1.0$

Tabla 20

Las propiedades mecánicas se establecen de acuerdo con la sección 5 de la norma IEC 674-3-2. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los datos más relevantes:

<b>Espesor nominal (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>&gt; 15 \leq 100</math></b>	<b><math>&gt; 100 \leq 250</math></b>	<b>IEC 674-2</b>
<b>Densidad (<math>\text{Kg}/\text{m}^3</math>)</b>	1390 $\pm$ 10	1390 $\pm$ 10	ISO 1183
<b>Fuerza de tensión (MPa)</b>	$\geq 150$	$\geq 140$	ISO 1184
<b>Elongación (%)</b>	$\geq 80$	$\geq 80$	ISO 1184

Tabla 21

Las propiedades eléctricas al igual que las mecánicas también se establecen según la sección 5 de la norma IEC 674-3-2. Podemos ver en la siguiente tabla las principales características a tener en cuenta.

<b>Espesor nominal (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mínima fuerza eléctrica (V/ <math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mínimo voltaje de descomposición kV</b>	<b>IEC 674-2</b>
<b>23</b>	174	4.0	IEC 643
<b>36</b>	150	5.4	
<b>50</b>	130	6.5	
<b>75</b>	105	7.9	
<b>100</b>	90	9.0	
<b>125</b>	80	10.0	

Tabla 22

#### IV. POLIESTER PREIMPREGNADO (DMD)

##### a. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Se trata de un aislamiento triple compuesto por P-PET (fibra de poliéster no tejida), F-PET (película de poliéster) y P-PET (fibra de poliéster no tejida), recubierto por una lámina de PET de unos 50 µm a ambos lados de las láminas de PET y con un recubrimiento de resina epoxi termoendurecible, utilizada como aislamiento entre las vueltas del conductor de bajo voltaje en las bobinas del transformador.

El laminado flexible esta recubierto por una resina epoxi que curará y conducirá a una unión adhesiva durante el proceso de curado de la bobina.

El aislamiento pre-impregnado F-PET/P-PET/F-PET tiene optimas propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas, también muestra buenas propiedades adhesivas en superficies metálicas.

##### b. PROPIEDADES DEL MATERIAL

Características del material de acuerdo con la norma IEC 60626-3

PROPIEDADES	UNIDADES	VALORES		
Grosor nominal laminado	mm	0.13 ± 10%	0.17 ± 10%	0.25 ± 10%
Tolerancia nominal de anchura	-	± 2%	± 2%	± 2%
Gramaje nominal laminado	g/m <sup>2</sup>	115 ± 12%	190 ± 12%	265 ± 12%
PET grosor no tejido (en cada lado)	µm	50	50	50
Fuerza de tensión desplegada (MD)	N/cm	≥ 50	≥ 140	≥ 180
Fuerza de tensión doblada (XD)	N/cm	≥ 40	≥ 105	≥ 120
Fuerza de tensión doblada (MD)	N/cm	≥ 35	≥ 105	≥ 120
Fuerza de tensión desplegada (XD)	N/cm	≥ 30	≥ 90	≥ 100
Elongación desplegada (MD)	%	≥ 20	≥ 20	≥ 20
Elongación oblada (XD)	%	≥ 50	≥ 50	≥ 40
Absorción de agua ISO-2	%	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Inflamabilidad UL-94	-	V2	V2	V2
Clase térmica IEC 60085		155 °C clase F	155 °C clase F	155 °C clase F
Descomposición eléctrica desplegada (Ø6mm electrodo) IEC 60243-1	kV	> 4	> 7	> 9
Descomposición eléctrica doblada (Ø6mm electrodo) IEC 60243-1	kV	> 3	> 6	> 8

Tabla 23

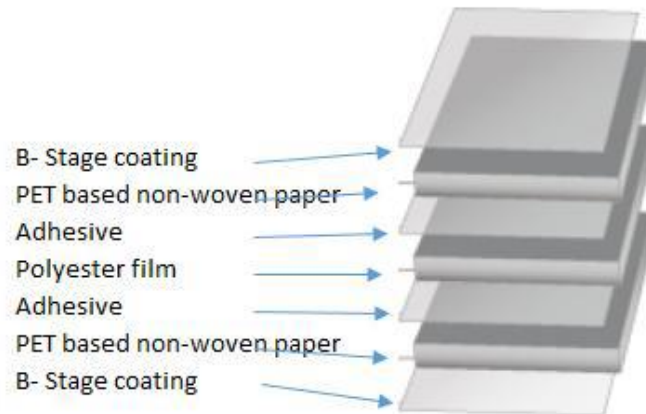


Figura 11

c. PROPIEDADES DE ADHERENCIA

La resistencia al corte se determinará con muestras unidas entre sí. La muestra se prepara con dos piezas de aluminio limpio o con una lámina de cobre, en el caso de este transformador como se trata de aluminio únicamente, se realizará la prueba únicamente con el aluminio.

Las dimensiones de las láminas deben ser de 0.4 a 0.8 mm de espesor, 50 mm de ancho y 150 mm de largo. La longitud de 50 mm de cada hoja formará una superposición. Entre las dos hojas superpuestas, colocaremos una capa de material pre-impregnado de tamaño 50x50 mm. La muestra se unirá a una presión de 0.0138 MPa y a una temperatura de 140°C durante 3 horas.

Las muestras unidas se someterán a prueba para determinar la resistencia al corte con una velocidad de extracción de 150 mm/min a temperatura ambiente. La separación debe ocurrir en la capa de papel y no en a la superficie de adhesión.

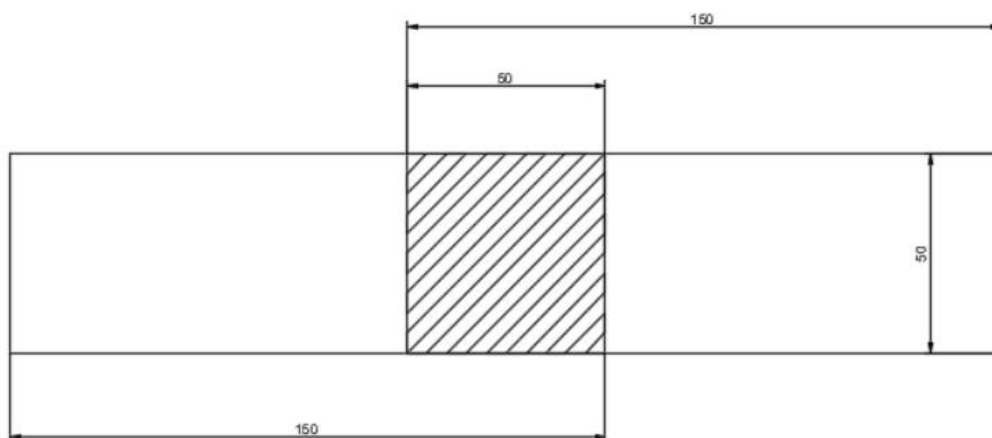


Figura 12



d. ENVEJECIMIENTO TÉRMICO

El material suministrado debe de tener un certificado de prueba de resistencia para las pruebas realizadas según la norma IEC 60216-1,2 y 5 que confirman el índice de temperatura para el aislamiento de clase F.

Clase térmica para materiales aislantes:

ATE/RTE		CLASE TERMICA	LETRA DE DESIGNACION
°C		°C	
≥90	<105	90	Y
≥105	<120	105	A
≥120	<130	120	E
≥130	<155	130	B
≥155	<180	155	F
≥180	<200	180	H

Tabla 24

e. CONDICIONES DE CURADO

En este apartado ABB tiene unas condiciones de curado específicas en las que la resina tiene que curarse completamente en ambos lados del material a 140°C durante 4 horas y sin que se llegue a iniciar el proceso de degradación.

Apariencia del DMD:



Figura 12

Figura 13



## V. ALUMINIO (BOBINADO EN BANDA)

### a. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

El aluminio utilizado para el bobinado en banda del transformador se trata de una aleación de aluminio EN AW-1050A esta aleación es utilizada para cada una de las cuatro secciones del arrollamiento de baja tensión del transformador.

El proveedor nos aporta las tensiones más altas del material, pero estas varían dependiendo de la calidad del conductor, así que normalmente se elige un margen de un 20% para las tensiones permisibles de los cálculos.

$$\sigma_p = 0.8 \times R_{p,0.2}$$

### b. PROPIEDADES DEL MATERIAL

#### i. COMPOSICIÓN QUÍMICA:

La composición química debe de estar de acuerdo con la norma EN 573-3, en la que se define la cantidad mínima de aluminio y las cantidades máximas para cada elemento de aleación. En particular, la composición de aleación requerida para ABB es:

ALEACION	ELEMENTOS								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al(min)	Otros
EN AW-1050A	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	99.50	0.03

Tabla 25

#### ii. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:

El valor mínimo del material debe de ser 61.2% IACS (35.496 MS/m)

#### iii. DIMENSIONES Y TOLERANCIAS:

Las siguientes tolerancias están basadas en la norma EN 485-4

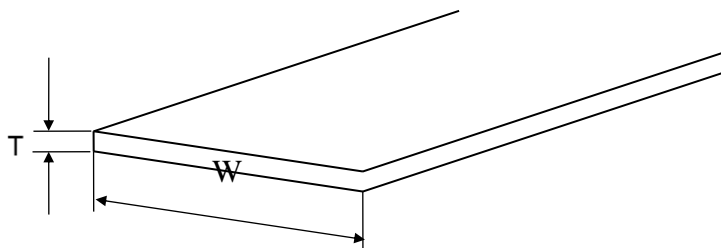


Figura 14

Tolerancias del espesor para una determinada anchura:

Espesor específico [mm]	Tolerancia de espesor para una determinada anchura $W$ [mm]		
	$W \leq 1000$	$1000 < W \leq 1250$	$1250 < W \leq 1600$
$0.2 < T \leq 0.4$	$\pm 0.02$	$\pm 0.04$	$\pm 0.05$
$0.4 < T \leq 0.5$	$\pm 0.03$	$\pm 0.04$	$\pm 0.05$
$0.5 < T \leq 0.6$	$\pm 0.03$	$\pm 0.05$	$\pm 0.06$
$0.6 < T \leq 0.8$	$\pm 0.03$	$\pm 0.06$	$\pm 0.07$
$0.8 < T \leq 1.0$	$\pm 0.04$	$\pm 0.06$	$\pm 0.08$
$1.0 < T \leq 1.2$	$\pm 0.04$	$\pm 0.07$	$\pm 0.09$
$1.2 < T \leq 1.5$	$\pm 0.05$	$\pm 0.09$	$\pm 0.10$
$1.5 < T \leq 1.8$	$\pm 0.06$	$\pm 0.10$	$\pm 0.11$
$1.8 < T \leq 2.0$	$\pm 0.06$	$\pm 0.11$	$\pm 0.12$
$2.0 < T \leq 2.5$	$\pm 0.07$	$\pm 0.12$	$\pm 0.13$

Tabla 26

Tolerancias de ancho para una tira y para un ancho específico:

Espesor específico [mm]	Tolerancias de ancho para una tira y para un ancho específico $W$ [mm]		
	$300 < W \leq 500$	$500 < W \leq 1250$	$1250 < W \leq 1650$
$0.2 < T \leq 0.6$	+ 0.6 / - 0	+ 1.5 / - 0	+ 2.5 / - 0
$0.6 < T \leq 1.0$	+ 1.0 / - 0	+ 1.5 / - 0	+ 2.5 / - 0
$1.0 < T \leq 2.0$	+ 1.2 / - 0	+ 2.0 / - 0	+ 2.5 / - 0
$2.0 < T \leq 2.5$	+ 1.5 / - 0	+ 2.0 / - 0	+ 2.5 / - 0

Tabla 27

#### iv. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS:

Las propiedades mecánicas deben de estar en conformidad con las especificaciones marcadas en la norma EN 485-2 donde se define la resistencia a la tracción, e límite elástico, el alargamiento y la dureza para cada aleación, el tratamiento con temple y el espesor especificado o las condiciones acordadas entre el comprador y el fabricante.

PROPIEDADES	VALOR
Densidad $g/cm^3$	2.70
Fuerza de tensión, $R_m$ , $N/mm^2$	65-105
Módulo de Young, $R_{p0.2}$ , $N/mm^2$	35-55
Elongación, $A_{50}$ mm, %	Min. 22
Dureza	
- HV	20-30
- HB	20-25
Resistividad, $\mu\Omega m$ [at 20 °C]	Máximo 0.02817
Contenido de aluminio, %	Mínimo 99.5
Conductividad térmica, $W/(K \cdot m)$	203

Tabla 28

v. TOLERANCIAS DE FORMA

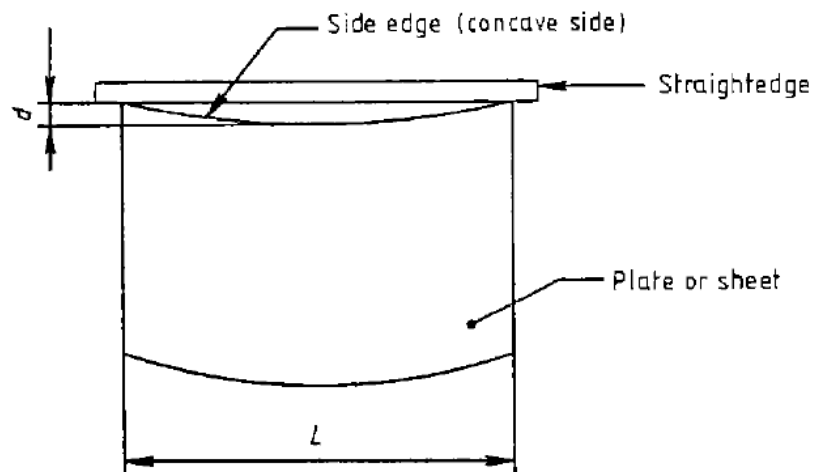
- Curvatura lateral:

La desviación de la rectitud,  $d$ , se mide como se indica en la siguiente figura, para una longitud  $L$  de 2000mm, desde un extremo de la tira, mientras la tira descansa sobre una placa base horizontal.

La siguiente tabla muestra los valores máximos permitidos según la norma EN 485-4:

Anchura específica (mm)	Máxima curvatura lateral "d" (mm)
$300 < W \leq 600$	5
$600 < W \leq 1000$	4
$1000 < W \leq 2000$	3

Tabla 29



$d$  - deviation from straightness  
 $L$  - length of the sheet or plate

Figura 15

## VI. ALUMINIO (BOBINADO EN CINTA)

Se trata de la misma clase de aluminio que el empleado para el bobinado en banda así pues tiene las mismas propiedades y características que las definidas en el apartado anterior, en este apartado solamente voy a hacer referencia a una característica que en el apartado anterior no he mencionado pero que para el caso de bobinado en banda cobra más importancia y se trata de las propiedades de planeidad o planitud.

### a. PLANITUD:

La desviación de la planitud,  $d$ , resultante de las ondas de arco, pandeo u borde se miden como se muestra en las figuras siguiente cogidas directamente de la norma EN 485-4. La tolerancia de planeidad,  $d$ , para la tira debe ser de 2 mm para una longitud de  $L=2000$  mm.

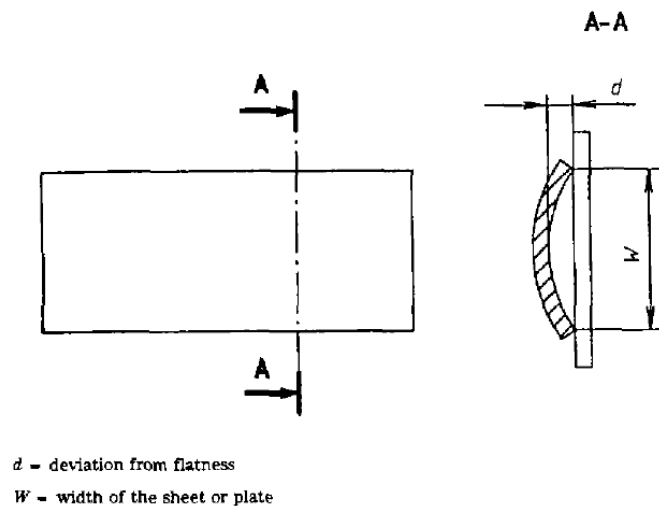


Figura 16

## VII. Mylar (CAPA DE POLIESTER)

El Mylar es uno de los aislantes utilizados para el diseño del transformador, emplea como aislante en las bobinas del transformador ya que tiene muy buenas propiedades eléctricas.

Es el componente más importante de un material que se utiliza en el bobinado, el NMN, que se trata de una capa de Mylar recubierta por dos capas de una fibra de aramida resistente a las llamas, y con una gran resistencia al calor, que se llama Nomex.

### a. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL Mylar:

El Mylar ofrece capacidades de diseño únicas para la industria eléctrica debido al excelente equilibrio de sus propiedades eléctricas con sus propiedades químicas, térmicas y físicas.

#### i. RESISTENCIA DIELECTRICA:

La prueba de resistencia dieléctrica a corto plazo se utiliza principalmente para medir la calidad de una muestra de Mylar. Este método de prueba permite una libertad considerable en la elección del tamaño del electrodo, condiciones ambientales...

#### ii. ESPESOR DE LA MUESTRA:

Como con la mayoría de los materiales, la resistencia dieléctrica de la muestra de Mylar en V/mil disminuye a medida que el espesor de la muestra aumenta. A 500V/seg la película o muestra comienza a derretirse antes de lo real. Se produce un colapso. Cuanto mayor es el espesor de la muestra mayor probabilidad de fallo por derretimiento de la muestra hay.

#### iii. TAMAÑO DEL ELECTRODO:

Pueden apreciarse diferencias de resistencia dieléctrica al comparar electrodos de diferentes medidas debido a una mayor área de película entre los dos electrodos. Los valores de resistencia son más grandes con electrodos de mayor tamaño.

Figure 1. Dielectric Strength vs. Thickness  
(2 in Electrode in air at 25°C [77°F])

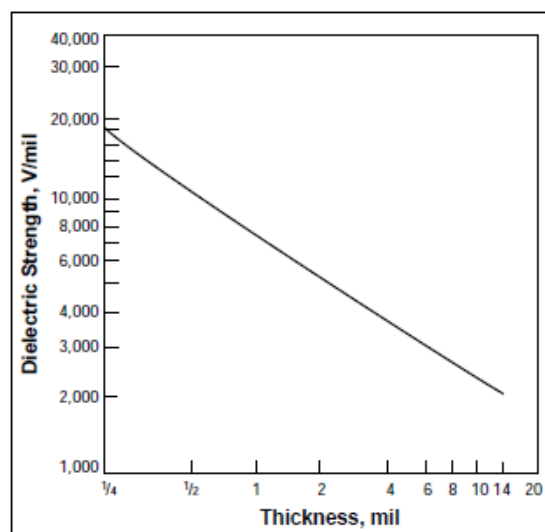
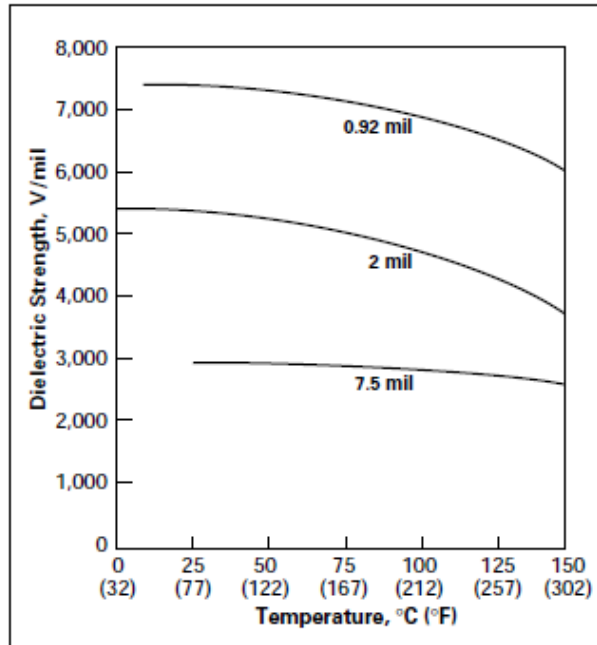


Figura 17

b. PROPIEDADES TÉRMICAS

El efecto de la temperatura en la muestra es el siguiente. La resistencia de la película de poliéster Mylar se muestra en la figura siguiente. Hay una pequeña disminución la resistencia del dieléctrico desde temperatura ambiente hasta 150°C.

**Figure 2. Dielectric Strength vs. Temperature**



*Figura 18*

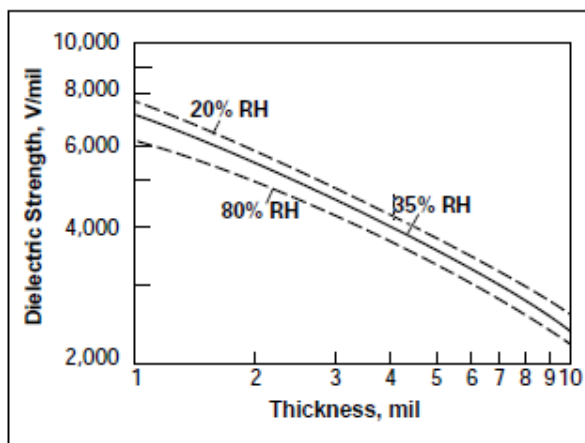
c. HUMEDAD

Mientras que la resistencia dieléctrica del Mylar es mucho menor a la humedad que los materiales celulósicos, hay un ligero efecto tal y como se muestra en la figura siguiente.

Para película de más de 2 mm de espesor, el efecto de variar la humedad relativa del 20% al 80% provoca un cambio máximo en a la resistencia dieléctrica del material.

Las diferencias absolutas en la resistencia dieléctrica del material como resultado de los cambios de humedad parecen ser independientes del tamaño del electrodo.

**Figure 3. Dielectric Strength at Various Humidities**



*Figura 19*

d. FRECUENCIA

A una temperatura constante, la constante dieléctrica disminuye como consecuencia del aumento de la frecuencia tal y como podemos ver en la siguiente tabla.

Figure 7. Dissipation Factor vs. Temperature

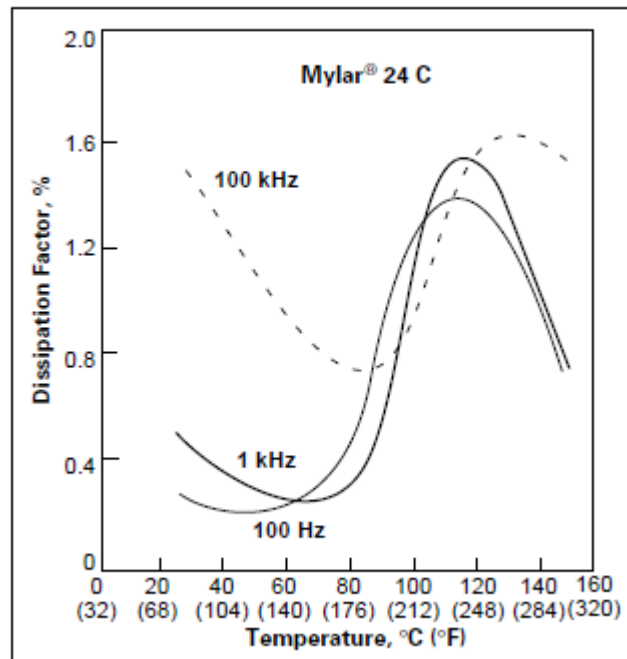


Figura 20

e. UBICACIÓN Y APARIENCIA (Mylar)

En primer lugar, decir que el Mylar, ese principal componente del NMN, que es el material que se coloca en el bobinado de los arrollamientos, el NMN, esta compuesto por Mylar recubierto por ambos lados por Nomex (fibra de aramida).

Se utiliza para aislar las salidas S1 y S2, así como también los puentes doblados y soldados.

- Se colocan 4 tiras de NMN en las salidas S1 y S2
- 3 tiras de NMN en los puentes serie y las salidas.

Definición de anchos de NMN en función de las salidas.

- Puentes serie doblados:
  - Ancho  $\leq 30$  mm: 3 x 50 mm
  - $30 \text{ mm} < \text{Ancho} \leq 45$  mm: 3 x 65 mm
  - $45 \text{ mm} < \text{Ancho} \leq 60$  mm: 3 x 80 mm
  - $60 \text{ mm} < \text{Ancho} \leq 70$  mm: 3 x 100mm
  - $70 \text{ mm} < \text{Ancho} \leq 80$  mm: 3 x 120mm
- Puentes serie soldados:
  - Ancho 20 mm: 3 x 50 mm
  - Ancho 35 mm: 3 x 65 mm
  - Ancho 60 mm: 3 x 100 mm



- Salida conmutación:
  - Ancho 20 mm: 3 x 50 mm
  - Ancho 35 mm: 3 x 65 mm



*Figura 21*

### VIII. ACERO S275JR

Según el Documento básico SE-A Acero e instrucción de acero estructural EAE

Denominación de los aceros:

Designación	Grado			
	JR	J0	J2	K2
S235	S 235 JR	S 235 J0	S 235 J2	-
S275	S 275 JR	S 275 J0	S 275 J2	-
S355	S 355 JR	S 355 J0	S 355 J2	S 355 K2
S450	-	S 450 J2	-	-

Tabla 30

Los aceros según se designan con un S de Steel seguida por un número que indica el valor mínimo especificado del límite elástico en MPa, para el menor intervalo de espesor. El uso de distintos grados de aceros es el siguiente:

- Grado JR: aplicación en construcción ordinaria
- Grado J0: aplicación en la construcción
- Grado J2: aplicación en la construcción con especiales exigencias de resistencia.

Teniendo en cuenta que el acero que en este caso vamos a usar es el de Grado JR.

Características mecánicas:

CTE DB SE-A (aceros en chapas y perfiles) Designación	espesor nominal t (mm)			
	Tensión de límite elástico $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )			Tensión de rotura $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100
S235	235	225	215	360
S275	275	265	255	410
S355	355	345	335	470
S450	450	430	410	550

Tabla 31

EAE (Aceros laminados en caliente) Designación	espesor t ≤ 40 mm		40 mm < espesor t ≤ 80 mm	
	Límite elástico	Tensión de rotura	Límite elástico	Tensión de rotura
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
S 235	235	360< $f_u$ <510	215	360< $f_u$ <510
S 275	275	430< $f_u$ <580	255	410< $f_u$ <560
S 355	355	490< $f_u$ <680	335	470< $f_u$ <630

Tabla 32

Las siguientes características son comunes para todos los aceros:

Módulo de Elasticidad	Módulo de Rigidez	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de dilatación térmica	Densidad
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$G \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\nu$	$\alpha \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$
210.000	81.000	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5}$	7.850

Tabla 33

Como resumen de las características del acero que este caso vamos a utilizar para la fabricación de las pletinas del núcleo, saber que estas pletinas su principal función será la de soportar las fuerzas de tracción a las que se va a ver afectado el transformador, con el fin de que le núcleo magnético no sufra daños ni tenga que soportar ningún esfuerzo.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS	
Módulo de elasticidad	210.000 MPa
Módulo de rigidez	81.000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Límite elástico (espesor $t < 40 \text{ mm}$ )	275 MPa
Límite elástico (espesor $t < 80 \text{ mm}$ )	255 MPa

Tabla 34

## **ANEXO II**

### *(CÁLCULOS Y DISEÑO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR)*

- *PRINCIPALES DATOS ELÉCTRICOS DEL TRANSFORMADOR*
- *DIMENSIONES Y ESQUEMA ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR*
- *CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO*
- *RESUMEN D LOS VALORES OBTENIDOS*
- *FUERZAS (POS N)*
- *FUERZAS (POS +)*
- *FUERZAS (POS -)*

## i. Principales datos eléctricos del transformador

Potencia nominal: 18 MVA

Frecuencia nominal: 50 Hz

Voltaje máximo HV:  $15750 + 4 \cdot 2.5\% (V)$  • el transformador consta de 4 salidas en cada sección de la bobina pero en nuestro caso como analizamos los casos más extremos y el caso nominal, es por eso que el voltaje varía solo un 10% (positivo y negativo), en el caso máximo (POS +):  $HV = 15750 + 4 \times 0.025 \times 15750 = 17325V$  y en el caso mínimo (POS -):  $HV = 15750 - 4 \times 0.025 \times 15750 = 14175 V$ .

Voltaje máximo LV: 6300 (V)

Voltios por espiras: 68.478 V/espira

Número de espiras:

- POS +: HV=146 espiras;      LV=46 espiras
- POS -: HV=120 espiras;      LV=46 espiras
- POS N: HV=133 espiras;      LV=46 espiras

Materiales utilizados para el diseño del transformador:

- Arrollamientos: Aluminio y aislante DMD<sup>1</sup> y resina y poliéster
- Núcleo: chapa magnética y acero
- Aire

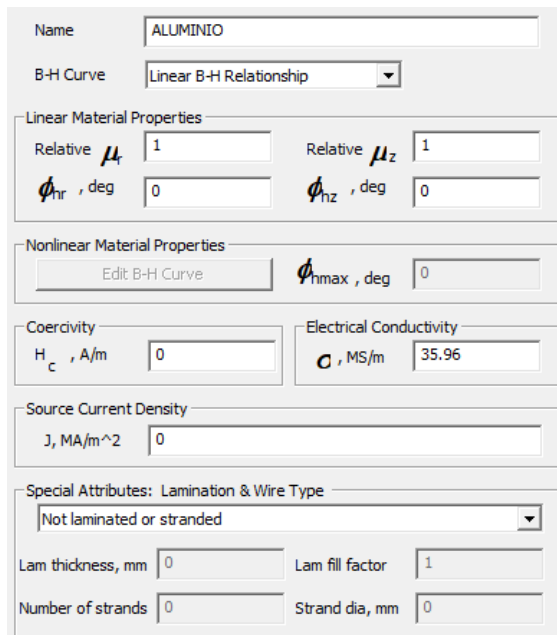


Figure 22 shows the software interface for the material properties of ALUMINIO. The Name field is set to ALUMINIO. The B-H Curve is set to Linear B-H Relationship. Under Linear Material Properties, Relative  $\mu_r$  is 1, Relative  $\mu_z$  is 1,  $\phi_{lr}$  is 0, and  $\phi_{hz}$  is 0. Under Nonlinear Material Properties, there is an Edit B-H Curve button and  $\phi_{hmax}$  is 0. Under Coercivity,  $H_c$  is 0. Under Electrical Conductivity,  $\sigma$  is 35.96 MS/m. Under Source Current Density,  $J$  is 0. Under Special Attributes: Lamination & Wire Type, it is set to Not laminated or stranded. Lam thickness is 0 mm, Lam fill factor is 1, Number of strands is 0, and Strand dia is 0 mm.

Figura 22

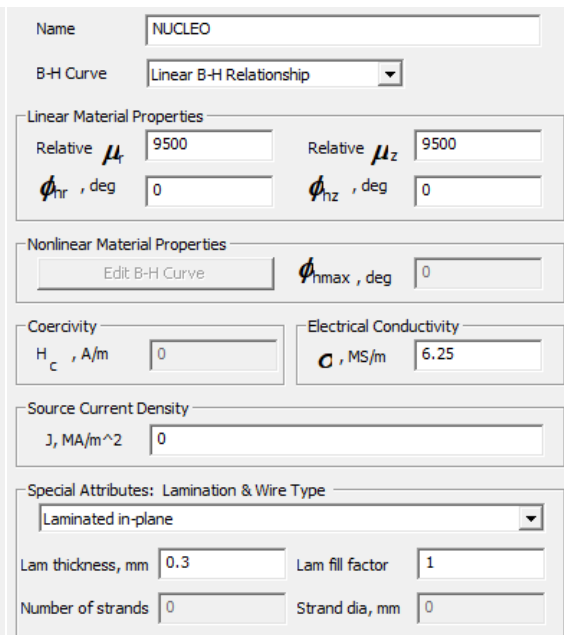


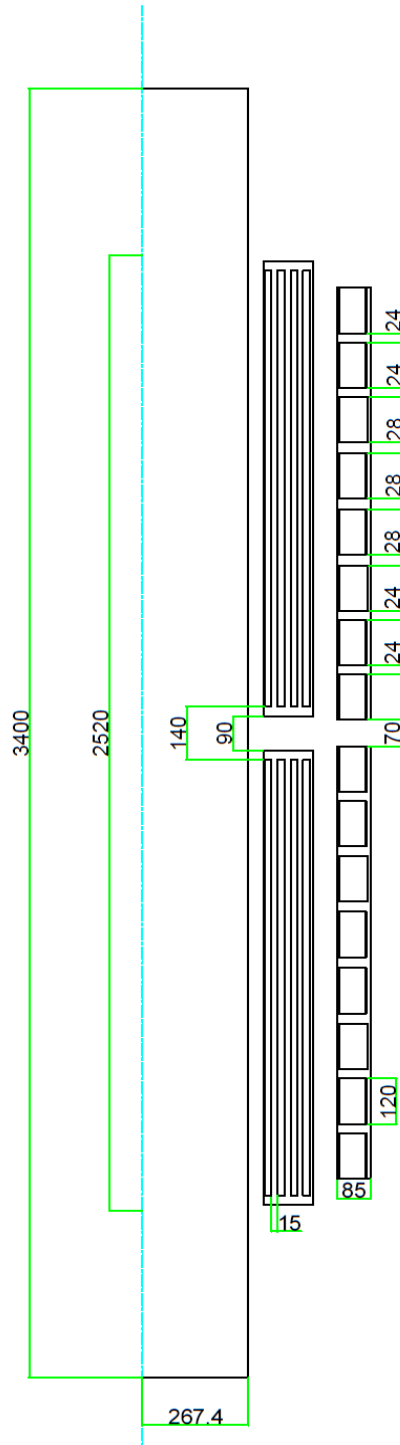
Figure 23 shows the software interface for the material properties of NUCLEO. The Name field is set to NUCLEO. The B-H Curve is set to Linear B-H Relationship. Under Linear Material Properties, Relative  $\mu_r$  is 9500, Relative  $\mu_z$  is 9500,  $\phi_{lr}$  is 0, and  $\phi_{hz}$  is 0. Under Nonlinear Material Properties, there is an Edit B-H Curve button and  $\phi_{hmax}$  is 0. Under Coercivity,  $H_c$  is 0. Under Electrical Conductivity,  $\sigma$  is 6.25 MS/m. Under Source Current Density,  $J$  is 0. Under Special Attributes: Lamination & Wire Type, it is set to Laminated in-plane. Lam thickness is 0.3 mm, Lam fill factor is 1, Number of strands is 0, and Strand dia is 0 mm.

Figura 23

\*1: DMD es un laminado flexible de tres capas compuesto por, fibra de poliéster no tejido a ambos lados de una película de poliéster

## ii. Dimensiones y esquema del transformador

### a. Esquema de simulación FEMM



Como podemos apreciar en la siguiente imagen, el esquema eléctrico de este transformador está compuesto por:

- Un núcleo laminado de chapa magnética
- Un arrollamiento de baja tensión (el más cercano al núcleo), el cual se encuentra dividido en dos secciones. Cada una de estas secciones se encuentra dividida en 4 "grupos" separados entre sí por los canales de ventilación. En total consta de 8 grupos numerados del 1 al 8, los cuatro primeros corresponden a la sección superior y los cuatro últimos a la sección inferior.
- Un arrollamiento de alta tensión, también formado por dos secciones, cada una de estas secciones está formada por 8 discos separados entre sí por resina epoxi. En la sección superior se encuentran los grupos del 9 al 16 y en la sección inferior se encuentran los grupos del 17 al 24.

El arrollamiento de baja tensión se trata de un bobinado de banda de aluminio mientras que el arrollamiento de alta tensión se trata de un bobinado de discos en cinta.

\*En el arrollamiento de alta, los grupos 11 y 14 de la sección superior y los grupos 19 y 22 de la sección inferior, constan de 19 espiras mientras que el resto están formados por 18 espiras.

Figura 24

i. **Arrollamiento de baja tensión (LV)**

Se trata de un bobinado en banda de aluminio separado en dos secciones y con un total de 46 espiras por sección. El material del que está formado se trata de láminas de aluminio separadas entre sí por material aislante.

Cada lamina de aluminio tiene un espesor de 1.3 mm y cada capa de aislante colocada entre las láminas de aluminio tiene un espesor de 0.340 mm, el material del aislante es DMD, se trata de un aislante eléctrico.

Todo el conjunto se encuentra encapsulado en resina epoxi.

Las principales dimensiones del arrollamiento de baja son:

- Diámetro eléctrico/físico (interior): 610/618 mm
- Diámetro eléctrico/físico (exterior): 865/880 mm
- Resina epoxi: 4.0/7.5 mm
- Anchura aislante: 0.340 mm
- Anchura del conductor: 1.3 mm

ii. **Arrollamiento de alta tensión (HV)**

Se trata de un bobinado de alta, con un arrollamiento formado por dos secciones de 8 discos cada una. Cada sección está formada por 6 discos de 18 espiras y 2 de 19 espiras.

Los discos están formados por dos cintas de aluminio de 1.5 y 2 mm de espesor separadas entre sí por un material aislante Mylar de un espesor de 0.315 mm.

Todo el conjunto se encuentra encapsulado en resina epoxi.

Las principales dimensiones del arrollamiento de baja son:

- Diámetro eléctrico/físico (interior): 990/998 mm
- Diámetro eléctrico/físico (exterior): 1147/1165 mm
- Resina epoxi: 4.0/9 mm
- Anchura del aislante: 0.315 mm
- Anchura del conductor: 2+1.5 mm

### iii. Núcleo magnético

El núcleo del transformador está compuesto por 9 bloques de láminas de acero magnético .... el núcleo consta de 3 columnas cerradas entre sí por una culata superior y una culata inferior que cierran el circuito magnético del núcleo.

Cada uno de estos nueve grupos están formados por laminas un espesor de 0,3 mm, el motivo de que el núcleo este formado por laminas tan delgadas de acero magnético en vez de un solo bloque es el siguiente.

Al utilizar un núcleo compacto de un material determinado en vez de un núcleo laminado, este se calentará en poco tiempo ya que en su interior discurrirán corrientes parásitas o también llamadas corrientes de Foucault, un núcleo compacto se comportaría en la práctica como una gran espira cortocircuitada por sus dos extremos. Es por eso por lo que para neutralizar estas corrientes se utilizan delgadas laminas en este caso de acero, aisladas unas de otras por una fina capa de aislamiento. Es de esta forma que el rendimiento de estas laminas aumenta considerablemente. El tamaño estándar de espesor de estas laminas es de 0,5 mm, en ABB existen diferentes dimensiones de espesor de estas laminas que cambian en función del transformador, en este caso hemos elegido un espesor de 0,3 mm. Aquellos núcleos que están formados por laminas más delgadas tienen un mayor rendimiento ya que son menores las pérdidas causadas por la dispersión y por las corrientes parásitas. Para frecuencias mayores ya tendríamos que utilizar otro tipo de núcleos.

¿que son y como disminuir al máximo dichas corrientes que provocan tantas perdidas magnéticas?

Como bien sabemos las corrientes parásitas o corrientes de Foucault son la principal causa de perdidas magnéticas de nuestro núcleo del transformador. Estas pérdidas se originan como consecuencia de estar sometido el material ferromagnético de nuestro núcleo a un campo eléctrico variable con el tiempo. Si el material magnético fuera aislante como es el caso de la ferrita estas pérdidas serian nulas.

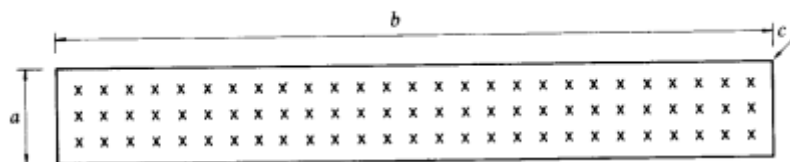


Figura 25

Para evaluar estas pérdidas, suponemos una chapa como la de la figura y de dimensiones a, b, c, siendo "a" el espesor, "b" la anchura y "c" la longitud, en cuyo interior hay un campo magnético variable dado por esta expresión.

$$B = B_{\max} \sin(\omega t)$$



teniendo en cuenta que la chapa es de un material ferromagnético de conductividad  $\gamma_{Fe}$ . Este campo induce unas corrientes eléctricas en el material que son proporcionales a la velocidad de variación de "B", o sea, a  $w=2\pi f$ . Estas corrientes producen un calentamiento por efecto Joule debido a las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault. Suponiendo que  $b \gg a$ , se puede hacer la hipótesis de que las corrientes inducidas siguen trayectorias tal y como se indican en la siguiente figura.



Figura 26

Para una trayectoria situada a una distancia  $x$  del eje, puede suponerse que hay un hilo de anchura " $dx$ " y profundidad " $c$ " que transporta una corriente " $i$ ", y tiene una resistencia óhmica dada por:

$$R = \frac{l}{\gamma_{Fe}} \cdot \frac{2b}{cdx}$$

cómo podemos observar en la figura 25, podemos desprejar el efecto en los extremos al ser  $b \gg a$ , así pues, la intensidad vendrá dada por la ley de Ohm:  $i=e/R$

Siendo  $e$  la tensión inducida por la ley de Faraday: 
$$e = \frac{d\phi}{dt} = 2xb \frac{dB}{dt} = 2xb B_{max} \omega \cos \omega t$$

teniendo en cuenta ambas expresiones anteriores obtenemos la siguiente expresión:

$$i = \frac{2xb B_{max} \omega \cos \omega t}{\frac{2b}{\gamma_{Fe} c dx}} = B_{max} \omega \gamma_{Fe} c (\cos \omega t) x dx$$

Así pues la potencia media de un ciclo completo de variación de  $B$ , en un tiempo  $T$ , siendo  $T$ (segundos) igual al periodo.

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T e i d(\omega t) = 2B_{max}^2 \omega^2 \gamma_{Fe} b c (x^2 dx) \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2 \omega t \cdot d(\omega t)$$

$$\int_0^T \cos^2 \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{T}{2}$$

$$p = B_{max}^2 \omega^2 \gamma_{Fe} b c x^2 dx$$

Así pues, esta es la potencia disipada en el circuito del hilo de anchura  $dx$ , pero para cubrir toda la chapa se tendrá que tener en cuenta desde  $x=0$  hasta  $x=a/2$ .

$$p = \int_0^{a/2} B_{max}^2 \omega^2 \gamma_{Fe} b c x^2 dx = B_{max}^2 \omega^2 \gamma_{Fe} b c \frac{a^3}{24}$$

Y de esta forma y para finalizar ya, teniendo en cuenta el volumen de la chapa abc y sabiendo que la densidad de esta misma es  $d_{Fe}$ , la potencia perdida por unidad de peso será:

$$p_F \left( \frac{W}{kg} \right) = \frac{B_{max}^2 \omega^2 \gamma_{Fe} a^2}{24 d_{Fe}}$$

Así pues, de esta fórmula se deduce que las pérdidas por corrientes parásitas son proporcionales al cuadrado de la inducción máxima y de la frecuencia siendo estas dos magnitudes dependientes del tipo de excitación de la bobina que actúa sobre el circuito magnético. Otras magnitudes que también dependen son la conductividad y la densidad. Cuanto más pequeña sea la conductividad del material ferromagnético tanto más pequeñas serán las pérdidas magnéticas. La densidad se tiene en cuenta si se comparan dos materiales que al igual que del resto de las magnitudes, el más denso tiene pérdidas magnéticas más pequeñas.

Pero existe una magnitud de carácter geométrico, en la expresión anterior, que es el espesor de la chapa "a", que tiene una gran importancia para poder disminuir las pérdidas magnéticas por efecto de las corrientes parásitas. Cuanto menor sea el espesor de la chapa tanto más pequeñas serán las pérdidas. Disminuir el espesor a la mitad, significa reducir las pérdidas a la cuarta parte. Esto hace que los circuitos magnéticos con excitación alterna estén constituidos por chapas muy delgadas, aisladas entre sí, para disminuir lo más posible estas pérdidas.

Otra característica a tener en cuenta es la siguiente; La sección de un circuito magnético, para transformadores, es como se indica en la figura 27, buscando que el contorno se aproxime, lo más posible (teniendo en cuenta la economía en su fabricación) a una circunferencia, para evitar los huecos, entre las bobinas y dicho circuito magnético, que daría lugar a flujos de dispersión.

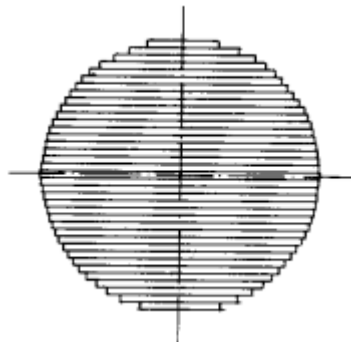


Figura 27

En los *Anexos I y VII*, se muestran los planos y dimensiones de cada una de las partes y chapas por las que está formado el núcleo magnético del transformador de diseño, así como también las principales propiedades del material por el que está compuesto.

El núcleo este fabricado por láminas de chapa magnética con las siguientes dimensiones.

LÁMINA/PASO	ANCHURA	ALTURA	PESO
1	440	141.4	6200.8
2	440	133.0	5832.4
3	410	40.0	1638.1
4	380	33.6	1278.2
5	350	27.6	969.1
6	320	24.0	772.2
7	280	27.6	779.2
8	240	21.6	524.2
9	200	19.2	389.3

Tabla 35

Se trata de un núcleo simétrico con dos canales de ventilación de 14 mm.

En el *Anexo I* podemos obtener información más detallada de todas las principales características de los materiales de diseño.

### iii. Cálculo de las corrientes de cortocircuito

#### a. Cálculo de las impedancias de cortocircuito

##### i. Posición Nominal (POS N)

Potencia nominal=18 MVA

Máximo voltaje HV= 15750 V

Máximo voltaje LV= 6300 V

Número de espiras HV= 133

Número de espiras LV=46

Comenzamos calculando las corrientes de cada circuito, tanto para el circuito de alta tensión como para el circuito de baja

Teniendo en cuenta que el circuito de alta se trata de dos circuitos conectados en paralelo, mientras que el circuito de baja se trata de dos circuitos conectados en serie.

$$HV: \frac{18000000VA}{15750 \times \sqrt{3}} = 659.83A \rightarrow \frac{659.83}{2} = 329.9A$$

$$LV: \frac{18000000VA}{6300 \times \sqrt{3}} = 1649.6A \rightarrow \frac{1649.6}{2} = 952.4A$$

Estos dos valores obtenidos son los correspondientes a valores r.m.s<sup>2</sup>, sin embargo, el programa de simulación FEMM funciona con los valores pico de dichas corrientes que en este caso serian:

Cálculo de la corriente de pico a partir de la corriente r.m.s

$$I_{RMS} = \frac{I_{Pico}}{\sqrt{2}} (A)$$

$$HV = 329.9 \times \sqrt{2} = 466.55A$$

$$LV = 952.4 \times \sqrt{2} = 1346.87A$$

\*2. El voltaje RMS, o el cuadrado medio de la raíz (también llamado el voltaje eficaz), es un método de denotar una forma de onda senoidal de voltaje (forma de onda de CA) como un voltaje equivalente que representa el valor de voltaje CC que producirá el mismo efecto de calentamiento o disipación de potencia en el circuito, como esta tensión de CA.

A continuación, introducimos estos valores en el FEMM y simulamos para obtener los valores de las pérdidas resistivas y para obtener también el valor del campo magnético.

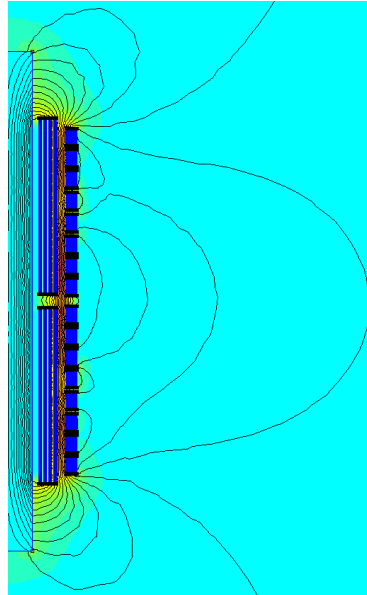


Figura 28: Campo eléctrico POS N

Los valores obtenidos son los siguientes:

- Energía Magnética: 681.981 J
- Pérdidas resistivas: 18391 W (por cada bobina) → 55173.6 W en total

Con los datos obtenidos anteriormente procedemos al cálculo de las impedancias.

$$L = \frac{2 \times 681.981}{659.83^2} = 0.003133H$$

$$L = \frac{15750}{\frac{\sqrt{3}}{649.83}} = 13.78\text{Ohmios}$$

$$X(\%) = \frac{2 \times \pi \times 0.003133}{13.78} = 7.14\%$$

Según la norma IEC60076-5 para un transformador de 18 MVA el valor de su impedancia de cortocircuito debe ser mayor que 7% y menor que 8%, por lo tanto, en este caso cumple con la norma.

$$7\% < 7.14\% < 8\%$$

ii. **Posición Mayor (POS +)**

Potencia nominal=18 MVA

Máximo voltaje HV= 17325 V

Máximo voltaje LV= 6300 V

Número de espiras HV= 146

Número de espiras LV=46

Comenzamos calculando las corrientes de cada circuito, tanto para el circuito de baja como para el circuito de alta

Teniendo en cuenta que el circuito de alta se trata de dos circuitos conectados en paralelo, mientras que el circuito de baja se trata de dos circuitos conectados en serie.

$$HV: \frac{18000000VA}{17325 \times \sqrt{3}} = 599.84A \rightarrow \frac{599.84}{2} = 299.92A$$

$$LV: \frac{18000000VA}{6300 \times \sqrt{3}} = 1649.6A \rightarrow \frac{1649.6}{2} = 952.4A$$

Estos dos valores obtenidos son los correspondientes a valores r.m.s, sin embargo, el programa de simulación FEMM funciona con los valores pico de dichas corrientes que en este caso serian:

Cálculo de la corriente de pico a partir de la corriente r.m.s

$$I_{RMS} = \frac{I_{Pico}}{\sqrt{2}} (A)$$

$$HV = 299.9 \times \sqrt{2} = 424.15A$$

$$LV = 952.4 \times \sqrt{2} = 1346.87A$$

A continuación, introducimos estos valores en el FEMM y simulamos para obtener los valores de las perdidas resistivas y para obtener también el valor del campo magnético.

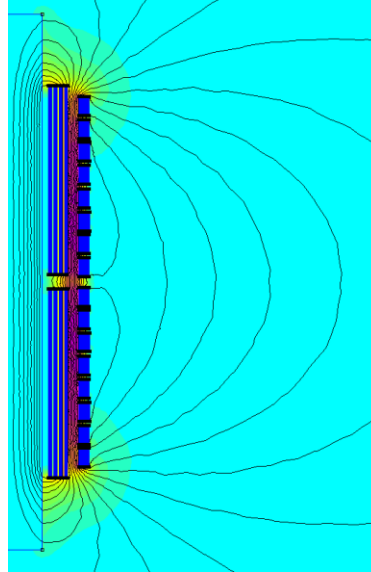


Figura 29: Campo eléctrico POS +

Los valores obtenidos son los siguientes:

- Energía Magnética: 694.448 J
- Perdidas resistivas: 13222.8 W (por cada bobina) → 39668.4 W en total

Con los datos obtenidos anteriormente procedemos al cálculo de las impedancias.

$$L = \frac{2 \times 694.448}{599.84^2} = 0.00386 \text{ H}$$

$$L = \frac{17325}{\frac{\sqrt{3}}{599.84}} = 16.675 \text{ Ohmios}$$

$$X(\%) = \frac{2 \times \pi \times 0.00386}{16.675} = 7.27\%$$

Según la norma IEC60076-5 para un transformador de 18 MVA el valor de su impedancia de cortocircuito debe ser mayor que 7% y menor que 8%, por lo tanto, en este caso cumple con la norma.

$$7\% < 7.27\% < 8\%$$

iii. **Posición Menor (POS -)**

Potencia nominal=18 MVA

Máximo voltaje HV= 14175 V

Máximo voltaje LV= 6300 V

Número de espiras HV= 120

Número de espiras LV=46

Comenzamos calculando las corrientes de cada circuito, tanto para el circuito de baja como para el circuito de baja

Teniendo en cuenta que el circuito de alta se trata de dos circuitos conectados en paralelo, mientras que el circuito de baja se trata de dos circuitos conectados en serie.

$$HV: \frac{18000000VA}{14175 \times \sqrt{3}} = 733.143A \rightarrow \frac{733.143}{2} = 366.57A$$

$$LV: \frac{18000000VA}{6300 \times \sqrt{3}} = 1649.6A \rightarrow \frac{1649.6}{2} = 952.4A$$

Por el mismo motivo que para las posiciones nominal y mayor, calculamos los valores pico a partir de los valores r.m.s.

Cálculo de la corriente de pico a partir de la corriente r.m.s

$$I_{RMS} = \frac{I_{Pico}}{\sqrt{2}} (A)$$

$$HV = 366.57 \times \sqrt{2} = 518.41A$$

$$LV = 952.4 \times \sqrt{2} = 1346.87A$$

A continuación, introducimos estos valores en el FEMM y simulamos para obtener los valores de las pérdidas resistivas y para obtener también el valor del campo magnético.



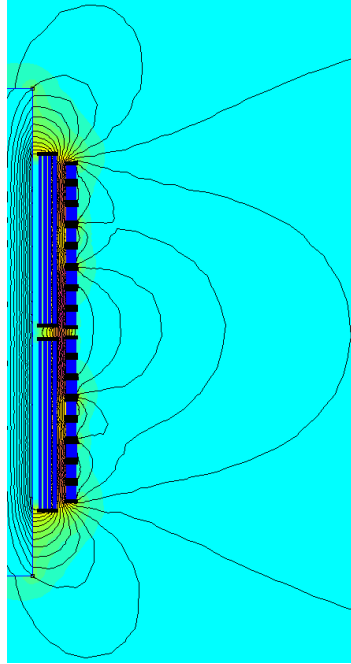


Figura 30: Campo eléctrico POS +

Los valores obtenidos son los siguientes:

- Energía Magnética: 700.667 J
- Perdidas resistivas: 21417.3 W (por cada bobina) → 64251.9 W en total

Con los datos obtenidos anteriormente procedemos al cálculo de las impedancias.

$$L = \frac{2 \times 700.667}{733.143^2} = 0.002607 \text{ H}$$

$$L = \frac{14175}{\frac{\sqrt{3}}{733.143}} = 11.163 \text{ Ohmios}$$

$$X(\%) = \frac{2 \times \pi \times 0.002607}{11.163} = 7.337\%$$

Según la norma IEC60076-5 para un transformador de 18 MVA el valor de su impedancia de cortocircuito debe ser mayor que 7% y menor que 8%, por lo tanto, en este caso cumple con la norma.

$$7\% < 7.337\% < 8\%$$

**b. Corrientes de cortocircuito**

Con los datos obtenidos de cada una de las impedancias de cortocircuito para cada una de las posiciones del transformador.

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)}$$

Donde:

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} (\Omega) \quad \text{Impedancia de cortocircuito}$$

$U_s$  Voltaje nominal del sistema

$S$  Voltaje nominal del sistema

$U$  Voltaje nominal del arrollamiento

$$Z_t = \frac{U^2 \times z_t}{100 \times S} (\Omega) \quad \text{Impedancia de cortocircuito del arrollamiento}$$

$z_t(\%)$  Impedancia de cortocircuito media, a frecuencia y corriente nominal

Con los datos ya calculados anteriormente y usando las expresiones de cálculo de las corrientes de cortocircuito procedemos a calcular los valores de dichas corrientes para cada una de las posiciones (POS N; POS +; POS -).

**i. Posición Nominal (POS N)**

Potencia nominal: 18 MVA

Voltaje máximo HV: 15725 V

Voltaje máximo LV: 6300 V

Impedancia cortocircuito: 7.14%

$$Z_t = \frac{7.14 \times 15.750^2}{100 \times 18} = 0.9840 \text{hmios}$$

$$Z_s = \frac{15.750^2}{500} = 0.49610 \text{hmios}$$

$$I = \frac{15.750}{\sqrt{3} \times (0.4961 + 0.984)} = 6143.7A$$

Con la ratio de HV/LV calculamos la corriente de cortocircuito en el arrollamiento de baja, como el producto de la corriente HV y la ratio HV/LV.

$$\frac{HV}{LV} = \frac{15750}{6300 \times \sqrt{3}} = 1.44338$$

- HV: I=6143.7 A
- LV: I=8867.61 A

ii. **Posición Mayor (POS +)**

Potencia nominal: 18 MVA

Voltaje máximo HV: 17325 V

Voltaje máximo LV: 6300 V

Impedancia cortocircuito: 7.27%

$$Z_t = \frac{7.27 \times 17.325^2}{100 \times 18} = 1.212 \text{ Ohmios}$$

$$Z_s = \frac{17.325^2}{500} = 0.6 \text{ Ohmios}$$

$$I = \frac{17325}{\sqrt{3} \times (0.6 + 1.212)} = 5518.35 \text{ A}$$

Con el ratio de HV/LV calculamos la corriente de cortocircuito en el arrollamiento de baja, como el producto de la corriente HV y la ratio HV/LV.

$$\frac{HV}{LV} = \frac{17325}{6300 \times \sqrt{3}} = 1.5877$$

- HV: I=5518.35 A
- LV: I=8761.48 A

iii. **Posición Menor (POS -)**

Potencia nominal: 18 MVA

Voltaje máximo HV: 14175 V

Voltaje máximo LV: 6300 V

Impedancia cortocircuito: 7.337%

$$Z_t = \frac{7.337 \times 14.175^2}{100 \times 18} = 0.819 \text{ Ohmios}$$

$$Z_s = \frac{14.175^2}{500} = 0.402 \text{ Ohmios}$$

$$I = \frac{14175}{\sqrt{3} \times (0.402 + 0.819)} = 6703 \text{ A}$$

Con la ratio de HV/LV calculamos la corriente de cortocircuito en el arrollamiento de baja, como el producto de la corriente HV y la ratio HV/LV.

$$\frac{HV}{LV} = \frac{14175}{6300 \times \sqrt{3}} = 1.299$$

- HV: I=6703 A
- LV: I=8707.08 A

Con los valores de los siguientes corrientes ya calculados, procedemos a calcular los valores pico de las corrientes de cortocircuito.

Para ello usaremos las expresiones que vienen indicadas en la norma IEC-60046-5 acerca de la capacidad que tiene un transformador para soportar los esfuerzos que se producen en caso de cortocircuito.

**c. Cálculo de las corrientes pico de cortocircuito.**

El valor pico máximo de las corrientes de cortocircuito es definido por la norma IEC-60076-5 como:

$$i = I \times k \times \sqrt{2}$$

Donde el factor  $k \times \sqrt{2}$  depende del factor  $X/R$ , siendo:

$X$  la suma de las reactancias del transformador y del sistema en ohmios ( $\Omega$ )

$X$  la suma de las reactancias del transformador y del sistema en ohmios ( $\Omega$ )

Tabla factor  $k \times \sqrt{2}$

$X/R$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Tabla 36

Cuando la relación  $X/R$  es mayor de 14 el factor  $k \times \sqrt{2}$  se supondrá igual a:

$$1,8 \times \sqrt{2} = 2,55 \text{ para transformadores de la categoría II}$$

Según la norma IEC-60047-5 los transformadores de 18MVA son considerados como categoría II.

Los valores de esta tabla han sido obtenidos mediante la siguiente expresión:

$$k \times \sqrt{2} = (1 + (e^{-(\phi + \pi/2)R/X}) \sin \phi) \times \sqrt{2}$$

#### i. Posición Nominal (POS N)

A partir de las siguientes expresiones vamos a proceder al cálculo del valor pico de las corrientes de cortocircuito, en el caso de 133 vueltas (POS N).

$$\phi = \arctg \frac{X}{R}$$

$$R_t(\%) = \frac{55.175}{18 \times 1000} \times 100 = 0.3065\%$$

$$X_t(\%) = \sqrt{z_t^2 - R_t^2} = \sqrt{7.14^2 - 0.3067^2} = 7.133\%$$

$$X_t(\Omega) = \frac{7.133 \times 15.750^2}{18 \times 1000} = 0.983\Omega$$

$$R_t(\Omega) = \frac{0.3065 \times 15.750^2}{18 \times 1000} = 0.042\Omega$$

Como el valor de  $X/R$  es mayor que 14, la norma nos dice que para valores mayores de 14 tomaremos  $k \times \sqrt{2}$  igual a 2.55, como ya hemos explicado anteriormente.

$$I_{HV} = 6143.66 \times 2.55 = 15666.33A$$

$$I_{LV} = 8867.61 \times 2.55 = 22612.4A$$

ii. **Posición Mayor (POS +)**

A partir de las siguientes expresiones vamos a proceder al cálculo del valor pico de las corrientes de cortocircuito, en el caso de 133 vueltas (POS N).

$$\phi = \arctg \frac{X}{R}$$

$$R_t(\%) = \frac{39.668}{18 \times 1000} \times 100 = 0.220\%$$

$$X_t(\%) = \sqrt{z_t^2 - R_t^2} = \sqrt{7.27^2 - 0.220^2} = 7.267\%$$

$$X_t(\Omega) = \frac{7.267 \times 17.325^2}{18 \times 1000} = 1.212\Omega$$

$$R_t(\Omega) = \frac{0.220 \times 17.325^2}{18 \times 1000} = 0.037\Omega$$

Como el valor de  $X/R$  es mayor que 14, tomaremos  $k \times \sqrt{2}$  igual a 2.55.

$$I_{HV} = 6143.66 \times 2.55 = 14071.79A$$

$$I_{LV} = 8867.61 \times 2.55 = 22341.96A$$

iii. **Posición Menor (POS -)**

A partir de las siguientes expresiones vamos a proceder al cálculo del valor pico de las corrientes de cortocircuito, en el caso de 133 vueltas (POS N).

$$\phi = \arctg \frac{X}{R}$$

$$R_t(\%) = \frac{64.252}{18 \times 1000} \times 100 = 0.357\%$$

$$X_t(\%) = \sqrt{z_t^2 - R_t^2} = \sqrt{7.337^2 - 0.357^2} = 7.329\%$$

$$X_t(\Omega) = \frac{7.329 \times 14.175^2}{18 \times 1000} = 0.818\Omega$$

$$R_t(\Omega) = \frac{0.357 \times 14.175^2}{18 \times 1000} = 0.040\Omega$$

Como el valor de X/R es mayor que 14, tomaremos  $k \times \sqrt{2}$  igual a 2.55.

$$I_{HV} = 6143.66 \times 2.55 = 17091.93A$$

$$I_{LV} = 8867.61 \times 2.55 = 22203.07A$$

iv. **Resumen valores obtenidos**

Tabla resumen de las corrientes pico de cortocircuito, en esta tabla se recogen todos os valores necesarios para poder llevar a cabo la simulación.

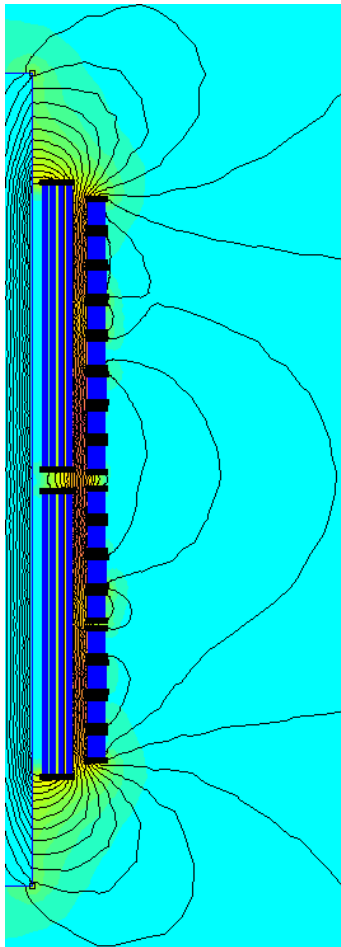
A partir de los datos que recoge esta tabla, procedemos a simular en el FEMM para cada una de las posiciones.

	<b>POS +</b>	<b>POS -</b>	<b>POS N</b>
<i>Numero de vueltas (LV)</i>	46	46	46
<i>Número de vueltas (HV)</i>	146	133	120
<i>Valor corriente pico (LV)</i>	22.34196 kA	22.20307 kA	22.61240 kA
<i>Valor corriente pico (HV)</i>	14.07179 kA	17.09193 kA	15.66633 kA

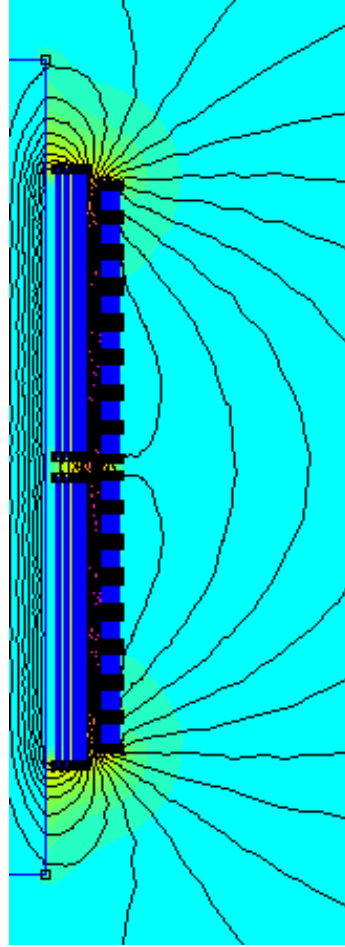
Tabla 36

En estas simulaciones obtendremos los valores de cada una de las fuerzas, tanto axiales como radiales a las que estará sometido el transformador en caso de producirse un cortocircuito.

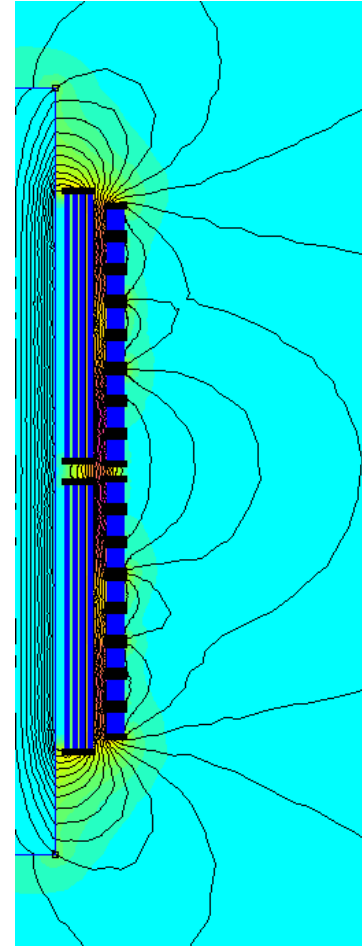
Intensidad de campo de cada uno de los casos con las corrientes pico de cortocircuito:



Caso1: POS N



Caso2: POS +



Caso3: POS -

Con los tres modelos ya simulados, procedemos al cálculo de las fuerzas que aparecen en cada uno de ellos, estos cálculos también los realizaremos a través del programa de simulación FEMM.

Obtenemos así las fuerzas radiales y axiales de cada uno de los grupos por los que está formado el transformador de manera independiente.

Estos cálculos los realizaremos en un programa auxiliar del propio FEMM en el cual deberemos introducir las coordenadas de los circuitos eléctricos del transformador, así como el número de grupos por los que está formado el esquema de diseño, para que este haga los cálculos integrales de los campos electromagnéticos, para así calcular las fuerzas axiales y radiales, ya que el propio Software del programa no es capaz de calcular las fuerzas axiales al tratarse de un modelo axi-simétrico.



Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Fuerzas (POS +)**

	[F_radiales(re/im/abs) + F_Axiales(re/im/abs)]					
1	-44718.165023	1359.361847	44738.821483	-16260.029908	-1694.172598	16348.051670
2	-203272.087444	800.688821	203273.664394	-10074.069384	-542.291860	10088.654738
3	-349373.059471	1565.213713	349376.565583	-3170.718356	-1349.559173	3445.978070
4	-613373.632064	1630.173618	613375.798330	3647.033291	-1375.408241	3897.768548
5	-44601.021843	1395.529797	44622.849000	16359.585897	1723.560635	16450.128024
6	-203219.547245	798.334930	203221.115342	10084.178911	529.606940	10098.076442
7	-349299.124206	1573.190433	349302.666894	3174.724208	1351.962136	3450.605080
8	-613363.040334	1613.561735	613365.162712	-3638.662809	1384.781588	3893.261754
9	149083.290107	-1327.140989	149089.197101	-68169.089662	4104.827579	68292.564711
10	182539.584509	-2124.520063	182551.947396	-28511.399018	96.039516	28511.560770
11	205887.813268	-2169.403839	205899.242265	-11434.873980	-1253.018772	11503.321215
12	208180.732266	-1226.834061	208184.347175	-4230.376166	-551.013192	4266.110412
13	212812.290220	-963.899938	212814.473126	-4000.089718	277.941523	4009.734310
14	221995.010129	-1397.649656	221999.409789	-1707.165651	453.987397	1766.499113
15	213834.926114	-860.300118	213836.656686	6239.151342	-496.838840	6258.902324
16	206756.221830	602.915988	206757.100902	18121.521862	-2174.761380	18251.551760
17	206741.679263	601.070876	206742.553024	-18105.708915	2176.071424	18236.007846
18	213836.061718	-858.460182	213837.784886	-6232.099919	496.831407	6251.872587
19	221985.081776	-1400.225054	221989.497862	1711.637815	-453.302257	1770.645912
20	212787.977814	-960.853955	212790.147193	4008.478400	-281.202952	4018.329775
21	208160.804898	-1222.741842	208164.396075	4229.025886	548.775434	4264.482901
22	205875.720121	-2166.127322	205887.115291	11435.446464	1251.894749	11503.767917
23	182513.571473	-2109.519512	182525.762139	28471.175035	-106.213262	28471.373151
24	149304.643827	-1268.209888	149310.029886	68047.543895	-4155.028152	68174.280261

Figura 31

**Fuerzas (POS N)**

	[F_radiales(re/im/abs) + F_Axiales(re/im/abs)]					
1	-41527.680801	1765.034307	41565.173148	-23665.434947	-2038.074153	23753.032596
2	-204390.69598	592.671225	204391.555270	-15362.983332	-252.808882	15365.063267
3	-352694.08816	1420.750772	352696.949748	-6803.357602	-1405.882789	6947.098753
4	-613751.37886	2758.992795	613757.580075	3991.410937	-1181.609002	4162.638719
5	-41449.387288	1791.556825	41488.087235	24146.391277	2120.760066	24239.344772
6	-204531.81231	525.238534	204532.486718	15698.433672	249.723242	15700.419785
7	-352942.36317	1345.377559	352944.927382	7139.369338	1412.892261	7277.833406
8	-611137.75897	3483.464268	611147.686703	-3505.028095	1212.783992	3708.917221
9	182344.14351	-3327.627002	182374.504180	-71277.630866	4348.633529	71410.162270
10	209171.27404	-5602.712831	209246.295730	-14446.948581	1237.409406	14499.845011
11	207069.23133	-8924.154099	207261.446228	39825.568037	2592.010290	39909.828198
12	103995.34264	-9552.628317	104433.155652	726.365134	-2762.597468	2856.492794
13	95707.380493	1001.775939	95712.623180	-26557.778270	4325.580172	26907.735513
14	243530.94177	-9244.356180	243706.335004	-32513.795528	-1316.172208	32540.424228
15	245596.15630	-4269.554038	245633.265422	-2057.106728	-928.169280	2256.808875
16	240864.80640	-1936.990604	240872.594739	20252.976438	-2405.474452	20395.326964
17	238207.04546	-2529.923817	238220.479858	-16401.829151	3012.195870	16676.130350
18	237614.79790	-5593.298504	237680.620096	9918.542103	2114.280628	10141.383536
19	218562.93229	-9852.906688	218784.906118	56630.641093	4810.250803	56834.567152
20	100855.07178	-10758.38011	101427.255936	1394.267749	-4722.501367	4924.022921
21	90800.574511	269.625768	90800.974828	-23745.629967	2681.198314	23896.522067
22	228899.21927	-9303.045661	229088.190976	-18138.772787	-45.593365	18138.830088
23	216562.00037	-4601.639408	216610.884059	21082.176234	-549.639734	21089.339928
24	186189.86698	-2620.087743	186208.301175	73563.575755	-4436.501360	73697.233477

Figura 32

Fuerzas (POS +)

	[F_radiales(re/im/abs) + F_Axiales(re/im/abs)]					
1	-41080.691161	1635.574964	41113.237427	-21650.744724	-2019.213851	21744.699853
2	-198834.839151	566.260774	198835.645475	-13963.787164	-434.035419	13970.531081
3	-342554.782047	1216.596859	342556.942436	-5782.282129	-1617.913866	6004.367735
4	-606414.749652	8119.608188	606469.106083	5719.124134	-1668.714557	5957.599276
5	-40966.749666	1673.868956	41000.931886	21917.254528	2050.508330	22012.965053
6	-198856.000311	548.504215	198856.756779	14106.554591	402.537918	14112.296737
7	-342608.472453	1207.439696	342610.600109	5923.136346	1600.003747	6135.434472
8	-605101.804418	8324.666532	605159.064860	-5496.330858	1652.991869	5739.515226
9	202934.793719	-3824.118982	202970.821518	-83181.798245	5388.161565	83356.126615
10	230656.367811	-6828.315822	230757.417885	-7641.424453	2050.196363	7911.679518
11	217261.872714	-12111.23585	217599.180534	82178.664300	4795.454818	82318.462407
12	51988.959355	4421.845313	52176.667302	-24626.488668	-16771.615906	29795.151354
13	76906.051484	25608.52132	81057.616046	16355.062763	23303.510320	28470.013544
14	243188.900745	-16239.002259	243730.479505	-91400.042687	-8094.293772	91757.753868
15	267638.272091	-7480.299016	267742.786198	-17591.595201	-2716.345007	17800.077300
16	269335.524072	-3850.311924	269363.043919	19231.807777	-3213.280231	19498.399940
17	267992.269878	-3943.219620	268021.278438	-17277.905233	3279.981724	17586.480300
18	263524.998362	-7480.075414	263631.136799	21624.576470	2915.012792	2 1820.165148
19	230496.349382	-13412.20316	230886.236645	103260.662431	7481.359125	103531.324439
20	43699.298409	2790.300385	43788.291331	-34825.768016	-22985.083659	41727.067818
21	85327.158605	27298.107420	89587.447024	9506.487185	17707.787865	20098.234989
22	228060.949355	-15222.74151	228568.432816	-71522.845650	-5574.696578	71739.770642
23	234281.907171	-6947.174902	234384.887027	10988.224977	-2020.897640	11172.516073
24	204943.470914	-3720.180961	204977.232923	84162.523192	-5583.956511	84347.560014

Figura 33

En las imágenes anteriores podemos observar los resultados obtenidos de las fuerzas en Newtons.

También podemos observar que las fuerzas están formadas por dos componentes, una componente real y una componente imaginaria, esto se debe a la variación del campo respecto al tiempo ya que la polaridad del campo está constantemente cambiando.

Para ello la fuerza absoluta será el resultado de  $abs = \sqrt{re^2 + im^2}$  donde la dirección será el signo de la componente real. Tomando como positivas las direcciones hacia arriba y hacia la derecha y negativas hacia abajo y la izquierda.

A partir de los siguientes resultados procedemos a realizar el cálculo de las siguientes fuerzas globales para cada sección de arrollamiento.

- FUERZAS RADIALES EN LOS ARROLLAMIENTOS DE BAJA TENSION (LV)
- FUERZAS RADIALES EN LOS ARROLLAMIENTOS DE BAJA TENSION (HV)
- FUERZAS AXIALES ENTRE LOS ARROLLAMIENTOS DE BAJA TENSION
- FUERZAS AXIALES ENTRE LOS ARROLLAMIENTOS DE ALTA TENSION
- FUERZAS AXIALES ENTRE LOS DISCOS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE ALTA TENSION
- FUERZAS AXIALES DE LOS ARROLLAMIENTOS DE LATA Y BAJA TENSION SOBRE LOS TACOS DE SOPORTE
- FUERZA AXIAL TOTAL

TABLA RESUMEN DE LAS FUERZAS OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN

VALOR DE FUERZA (N)	TIPO DE CONEXIÓN		
	POS N	POS +	POS -
<b>FUERZA RADIAL LV SUPERIOR</b>	-1212411.2582	-1210764.8498	-1188974.9314
<b>FUERZA RADIAL LV INFERIOR</b>	-1210113.1880	-1210511.7939	-1187627.3536
<b>FUERZA RADIAL HV SUPERIOR</b>	1529240.2201	1601132.3744	1565398.0129
<b>FUERZA RADIAL HV INFERIOR</b>	1518821.6130	1601247.2864	1563844.9430
<b>FUERZA AXIAL LV INFERIOR</b>	43508.6807	26105.5478	36521.1810
<b>FUERZA AXIAL HV INFERIOR</b>	107975.0645	93714.9995	109916.4819
<b>FUERZA AXIAL TOTAL INFERIOR</b>	151483.7453	119820.5473	146437.6629
<b>FUERZA AXIAL LV SUPERIOR</b>	-41902.5559	-25984.9159	-35761.9994
<b>FUERZA AXIAL HV SUPERIOR</b>	-84453.3279	-93839.3364	-100333.9128
<b>FUERZA AXIAL TOTAL SUPERIOR</b>	-126355.8838	-119824.2524	-136095.9122
<b>FUERZA AXIAL ENTRE ARROLLAMIENTOS LV</b>	85411.2366	52090.4637	72283.1804
<b>FUERZA AXIAL ENTRE ARROLLAMIENTOS HV</b>	192428.3925	187554.3359	210250.3947
<b>FUERZA TOTAL</b>	277839.6291	239644.7997	282533.5751

Tabla 37

## **ANEXO III**

### **(CÁLCULO DE LAS FUERZAS ELECTROMAGNETICAS)**

- *INTRODUCCIÓN*
- *PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO*
- *CÁLCULO DE LAS FUERZAS RADIALES*
  - *Cálculo de las fuerzas radiales (arrollamiento de alta tensión)*
  - *Cálculo de las fuerzas radiales (arrollamiento de baja tensión)*
  - *Resumen de las fuerzas obtenidas*
- *CÁLCULO DE LAS FUERZAS AXIALES*
  - *Fuerzas máximas de compresión en cada arrollamiento*
  - *Fuerzas de compresión y tracción entre discos*
  - *Máxima fuerza axial de empuje en cada uno de los devanados*
  - *Máxima fuerza axial por extremidad en los bloques de presión y en las abrazaderas del núcleo.*

## I. Introducción

A partir de los cálculos eléctricos que ya hemos calculado previamente en el *Anexo II* (Cálculos eléctricos y obtención de las corrientes de cortocircuito”), podemos proceder al cálculo de las siguientes fuerzas radiales que va a tener que soportar el transformador en caso de producirse un cortocircuito.

Estudiaremos cada una de las fuerzas que se producen en cada caso, y nos centraremos en los valores más críticos obtenidos, para asegurarnos que nuestro diseño es capaz de aguantar sin romperse o sin que se produzcan daños en este que impidan su correcto funcionamiento.

## II. Procedimiento de cálculo

Como ya he comentado con anterioridad a partir de los valores de las corrientes de cortocircuito obtenidas en los cálculos eléctricos del transformador *Anexo II*, tomando estos valores procedo a realizar en el FEMM una nueva simulación, en este caso serán necesarias tres nuevas simulaciones; una para cada uno de los casos de nuestro transformador.

Con los valores pico de las corrientes de cortocircuito de cada uno de los casos indicados e indicando en el propio programa el número de espiras o vueltas por las que está compuesto el arrollamiento de alta tensión en cada caso, ya que es el único que varía dependiendo de la posición en la que se encuentre el transformador.

Con el modelo que ya teníamos anteriormente de nuestro transformador cambiamos los siguientes datos para obtener los valores de las fuerzas radiales.

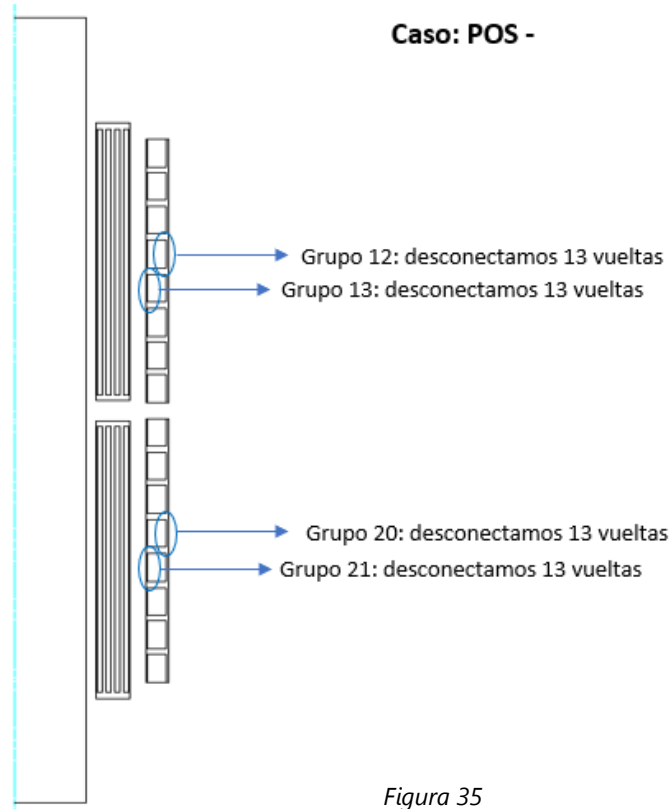
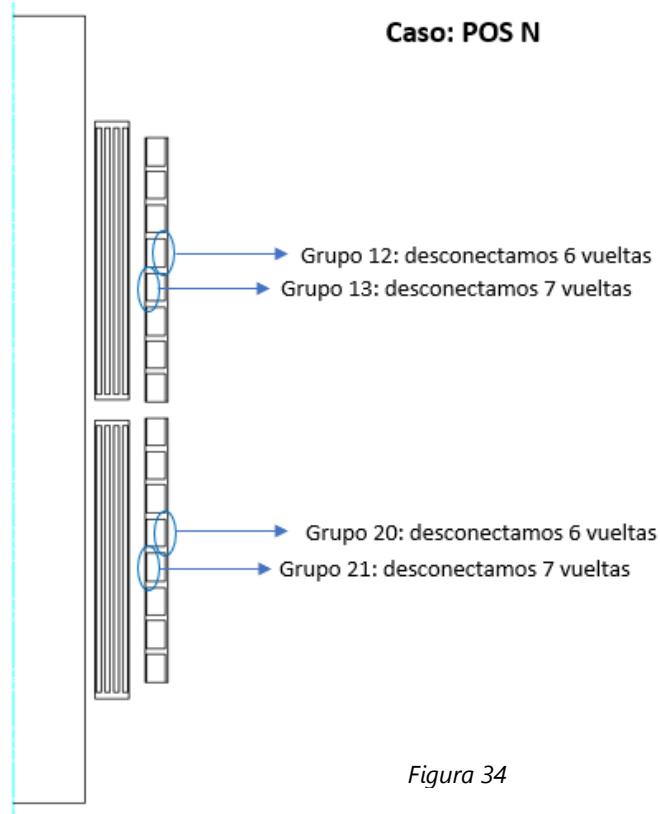
Como ya sabemos el diseño del transformador está dividido en 24 Grupos; 8 grupos el arrollamiento de baja tensión y 16 grupos el arrollamiento alta tensión.

En el caso de POS + el arrollamiento de alta se reduce a 133 vueltas, lo que significa que el diseño tenemos que desactivar 13 espiras o vueltas tanto de la sección axial superior del devanado como de la inferior, por lo que he optado por desactivar; 6 espiras del grupo 12 y 7 espiras del grupo 13 en el devanado superior y en el caso del devanado inferior; 6 espiras en el grupo 20 y 7 espiras en el grupo 21.

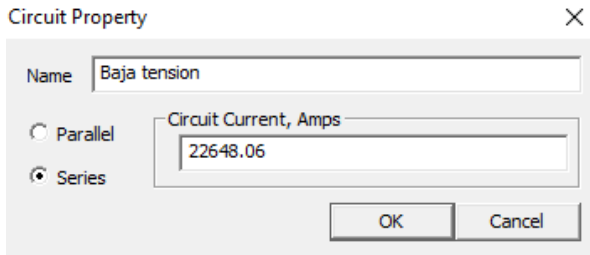
En el caso de POS + el arrollamiento de alta consta de 146 espiras o vueltas, lo que quiere decir que por todas las espiras circula corriente eléctrica.

Sin embargo, para el caso de POS -, el arrollamiento de alta tensión consta de 120 espiras o vueltas útiles. En este caso de los grupos 12 y 13 desconectaremos 13 espiras de cada uno y de los grupos 20 y 21 exactamente igual.

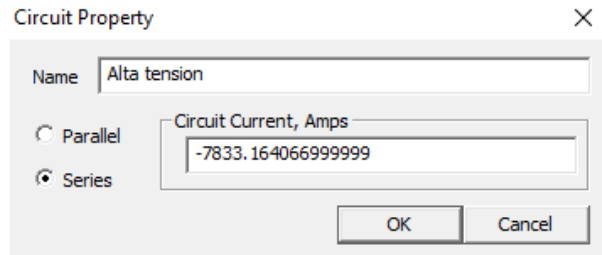
Con los tres modelos ya planteados, solo nos queda modificar los valores pico de cada uno de los devanados, ajustando cada valor con su correspondiente diseño procedemos ya a realizar la simulación de manera individual para cada uno de los casos, con el objetivo de obtener los valores de las fuerzas que aparecen en cada arrollamiento del transformador ante un caso de cortocircuito.



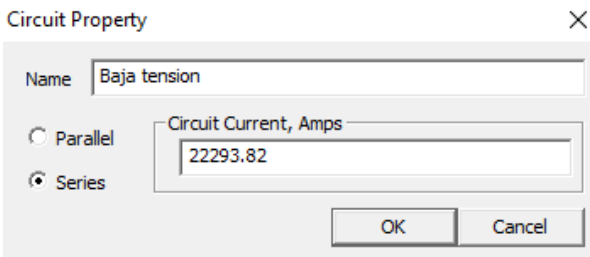
Sabiendo los valores y datos de cada uno de los casos a los que vamos a evaluar el transformador, los introducimos en el modelo creado en FEMM y procedemos a simular de manera independiente cada caso.



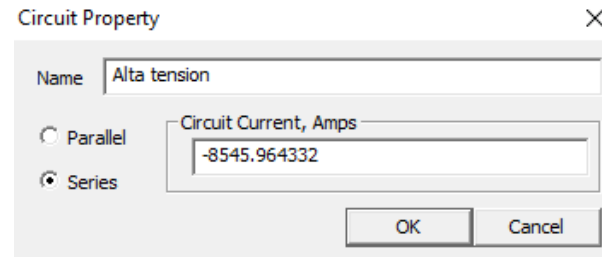
Circuito de baja tensión POS N



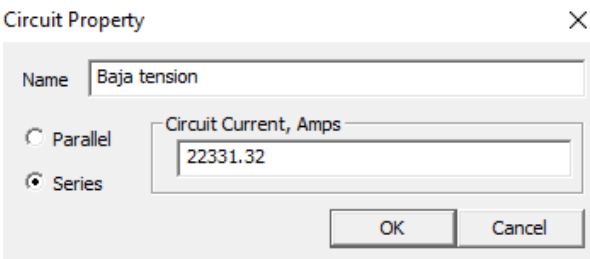
Circuito de alta tensión POS N



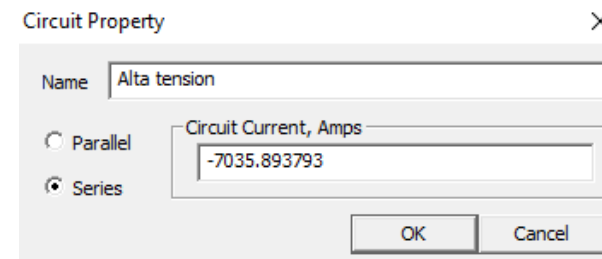
Circuito de baja tensión POS -



Circuito de alta tensión POS -



Circuito de baja tensión POS +



Circuito de alta tensión POS +

Como podemos apreciar los valores de las corrientes de alta tensión que aparece en las imágenes superiores es distinta al valor indicado en los cálculos previamente explicados en el *Anexo II*, esto se debe a que el circuito se encuentra conectado en paralelo así que la corriente en cada una de las secciones del arrollamiento se divide entre 2.

Además, podemos apreciar que una de las corrientes es de signo distinto a la otra esto es debido a que la corriente que circula por ambos arrollamientos siempre lleva direcciones opuestas y está continuamente cambiando de dirección ya que se trata de corriente alterna.

Pues con todos estos datos ya introducidos en el programa solo nos queda simular individualmente cada uno de los casos.

a. Cálculo de las fuerzas radiales ( $F_{rad}^*$ )

De acuerdo con la ley de Lorentz, los devanados o arrollamientos internos del transformador tienen fuerzas hacia el interior mientras que los arrollamientos exteriores tienen fuerzas hacia el exterior.

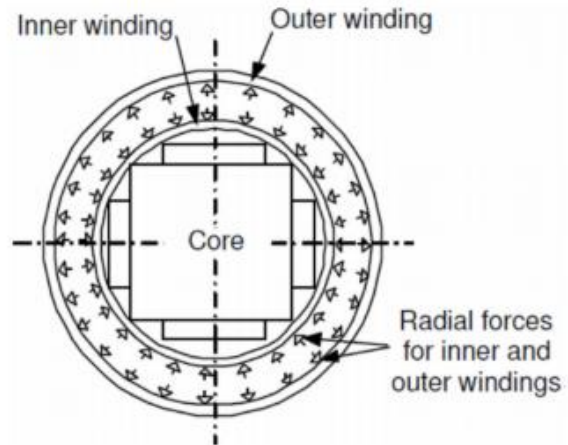


Figura 36

En la siguiente imagen podemos ver la dirección de las fuerzas radiales que se generan en el transformador tras un cortocircuito.

Simulando el diseño creado con los datos ya mencionados obtenemos los siguientes valores de fuerzas para cada uno de los bloques del diseño.

Grupo	Fuerza RADIAL (POS N)	Fuerza RADIAL (POS +)	Fuerza RADIAL (POS -)
1	-41565.1731	-44738.8215	-41113.23743
2	-204391.5553	-203273.6644	-198835.6455
3	-352696.9497	-349376.5656	-342556.9424
4	-613757.5801	-613375.7983	-606469.1061
	<b>-1212411.2582</b>	<b>-1210764.8498</b>	<b>-1188974.931</b>
5	-41488.0872	-44622.8490	-41000.93189
6	-204532.4867	-203221.1153	-198856.7568
7	-352944.9274	-349302.6669	-342610.6001
8	-611147.6867	-613365.1627	-605159.0649
	<b>-1210113.1880</b>	<b>-1210511.7939</b>	<b>-1187627.354</b>
9	182374.5042	149089.1971	202970.8215
10	209246.2957	182551.9474	230757.4179
11	207261.4462	205899.2423	217599.1805
12	104433.1557	208184.3472	52176.6673
13	95712.6232	212814.4731	81057.61605
14	243706.335	221999.4098	243730.4795
15	245633.2654	213836.6567	267742.7862
16	240872.5947	206757.1009	269363.0439
	<b>1529240.2201</b>	<b>1601132.3744</b>	<b>1565398.013</b>
17	238220.4799	206742.5530	268021.2784
18	237680.6201	213837.7849	263631.1368
19	218784.9061	221989.4979	230886.2366
20	101427.2559	212790.1472	43788.29133
21	90800.9748	208164.3961	89587.44702
22	229088.1910	205887.1153	228568.4328
23	216610.8841	182525.7621	234384.887
24	186208.3012	149310.0299	204977.2329
	<b>1518821.6130</b>	<b>1601247.2864</b>	<b>1563844.943</b>

Tabla 38



A partir de cada una de las fuerzas que aparecen en cada uno de los grupos podemos calcular el valor total de cada fuerza total en cada sección de cada devanado así obteniendo una simplificación más concreta y poder calcular los esfuerzos a los que van a estar sometidas cada una de las partes del transformador

En primer lugar, tenemos que calcular el valor y la dirección de las fuerzas que aparecen en cada devanado.

### i. Cálculo de las fuerzas radiales del arrollamiento de baja tensión

Así pues, comenzamos al cálculo de las fuerzas en la sección axial superior del devanado de baja tensión. Como podemos observar en la sección superior del devanado de baja tensión está dividido en 4 grupos, de esta manera sumando los valores de los 4 grupos, obtenemos el valor total de la fuerza en la sección axial superior, de esta misma manera procedemos con la sección inferior y observamos que los resultados son muy parecidos.

Los resultados obtenidos de las máximas fuerzas axiales valorando cada uno de los tres casos son los siguientes:

- -1212411.2582 N (sección superior)
- -1210113.1880 N (sección inferior)

Además, podemos apreciar que se cumple la ley de Lorentz mencionada anteriormente ya que observamos que los valores de las fuerzas obtenidas en el arrollamiento de baja tensión son valores negativos, lo que nos indica que tienen dirección hacia el interior del arrollamiento.

En la siguiente imagen aparece el diagrama de fuerzas del caso más crítico.



Figura 37

## ii. Cálculo de las fuerzas radiales del arrollamiento de alta tensión

De la misma forma que para el arrollamiento de baja tensión, a partir de la simulación, hemos obtenido de manera desglosada los resultados de las fuerzas de cada uno de los grupos por los que está compuesto el arrollamiento de alta tensión, así pues el devanado de alta está formado por dos secciones al igual que el de baja tensión, cada devanado consta de 8 grupos, así pues si sumamos las fuerzas de cada uno de los 8 grupos obtenemos la fuerza total a la que está sometido cada una de las secciones del devanado de alta, exactamente igual que en el caso anterior para el devanado de baja tensión.

Es así como obtenemos para cada caso una fuerza total en cada sección del arrollamiento, tomaremos como referencian los valores más críticos que en este caso serán;

- En el arrollamiento superior 1529240.2201 N
- En el arrollamiento inferior 1518821.6130 N

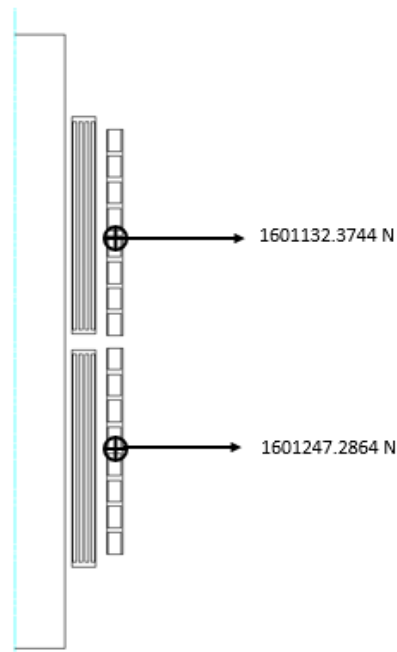


Figura 38

De el mismo modo que para el caso del arrollamiento de baja, en este caso también se cumple la ley de Lorentz, como podemos observar en el devanado de alta, véase en la imagen superior, la dirección de las fuerzas es hacia el exterior tal y como dice la Ley de Lorentz.

iii. **Resumen de las fuerzas radiales obtenidas**

En la siguiente tabla podemos observar un breve resumen de las fuerzas radiales obtenidas a partir de las simulaciones llevadas a cabo mediante el FEMM.

<b>VALOR DE FUERZA (N)</b>	<b>TIPO DE CONEXIÓN</b>		
	POS N	POS +	POS -
<b>FUERZA RADIAL LV SUPERIOR</b>	-1212411.2582	-1210764.8498	-1188974.9314
<b>FUERZA RADIAL LV INFERIOR</b>	-1210113.1880	-1210511.7939	-1187627.3536
<b>FUERZA RADIAL HV SUPERIOR</b>	1529240.2201	1601132.3744	1565398.0129
<b>FUERZA RADIAL HV INFERIOR</b>	1518821.6130	1601247.2864	1563844.9430

*Tabla 39*

**b. Cálculo de las fuerzas axiales**

Tras realizar las simulaciones mediante del programa F.E.M.M. obtenemos también los valores de las fuerzas axiales que se generan en cada uno de los devanados del transformador, obteniendo los siguientes valores.

<b>Grupo</b>	<b>Fuerza AXIAL (POS N)</b>	<b>Fuerza AXIAL (POS +)</b>	<b>Fuerza AXIAL (POS -)</b>
1	-23753.0326	-16348.0517	-21744.6999
2	-15365.06327	-10088.6547	-13970.5311
3	-6947.098753	-3445.9781	-6004.3677
4	4162.638719	3897.7685	5957.5993
	<b>-41902.5559</b>	<b>-25984.9159</b>	<b>-35761.9994</b>
5	24239.34477	16450.1280	22012.9651
6	15700.41979	10098.0764	14112.2967
7	7277.833406	3450.6051	6135.4345
8	-3708.917221	-3893.2618	-5739.5152
	<b>43508.68074</b>	<b>26105.5478</b>	<b>36521.1810</b>
9	-71410.16227	-68292.5647	-83356.1266
10	-14499.84501	-28511.5608	-7911.6795
11	39909.8282	-11503.3212	82318.4624
12	2856.492794	-4266.1104	-29795.1514
13	-26907.73551	-4009.7343	28470.0135
14	-32540.42423	-1766.4991	-91757.7539
15	-2256.808875	6258.9023	-17800.0773
16	20395.32696	18251.5518	19498.3999
	<b>-84453.32794</b>	<b>-93839.3364</b>	<b>-100333.9128</b>
17	-16676.13035	-18236.0078	-17586.4803
18	10141.38354	-6251.8726	21820.1651
19	56834.56715	1770.6459	103531.3244
20	4924.022921	4018.3298	-41727.0678
21	-23896.52207	4264.4829	20098.2350
22	-18138.83009	11503.7679	-71739.7706
23	21089.33993	28471.3732	11172.5161
24	73697.23348	68174.2803	84347.5600
	<b>107975.0645</b>	<b>93714.9995</b>	<b>109916.4819</b>

Tabla 40

Cómo podemos observar en los valores obtenidos que se encuentran en la tabla anterior, todas las fuerzas axiales obtenidas, son de compresión, es decir, las secciones axiales superiores de cada arrollamiento tiene fuerzas negativas (dirección hacia abajo) y las secciones axiales inferiores tienen fuerzas positivas (dirección hacia arriba), esto quiere decir que los esfuerzos que vamos a obtener van a ser principalmente de compresión en los tacos de soporte que separan ambas secciones, así pues la diferencia de estas fuerzas será soportada por los tacos superiores o inferiores dependiendo del caso. Además, también obtendremos fuerzas de compresión y tracción entre los discos del devanado de alta tensión que provocarán esfuerzos que serán directamente soportados por la resina que separa cada uno de ellos entre sí.

i. **Fuerzas máximas de compresión en cada arrollamiento.** ( $F_{sp}$ )

Comenzamos con el cálculo de las máximas fuerzas de compresión que se producen en cada arrollamiento, analizando también cada una de las posiciones de estudio del transformador. Con las fuerzas obtenidas mediante el programa de simulación procedemos a realizar el cálculo.

Este cálculo es muy sencillo, en las secciones del arrollamiento de bajo voltaje tenemos cuatro secciones radiales donde cada una de ellas produce una fuerza axial, la suma de estas cuatro fuerzas axiales, una fuerza por cada sección radial da lugar a la fuerza axial total de la sección del arrollamiento y a su vez la suma de las dos fuerzas axiales (de cada sección axial del arrollamiento) da lugar a la máxima fuerza de compresión.

En la siguiente tabla podemos ver los máximos valores de compresión obtenidos para cada una de las posiciones en las que se está analizando el transformador.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	POS N	POS +	POS -
Fuerza axial LV inferior	43508.6807	26105.5478	36521.1810
Fuerza axial HV inferior	107975.0645	93714.9995	109916.4819
Fuerza axial LV superior	-41902.5559	-25984.9159	-35761.9994
Fuerza axial HV superior	-84453.3279	-93839.3364	-100333.9128
Fuerza máxima de compresión (HV)	192428.3924	187554.3359	<b>210250.3947</b>
Fuerza máxima de compresión (LV)	<b>85411.2366</b>	52090.4637	72283.1804

Tabla 41

Como podemos observar el máximo valor de compresión entre las secciones del arrollamiento de baja tensión se ha obtenido en la (POS N) con un valor obtenido de 85.411kN y el máximo valor obtenido para las secciones del arrollamiento de alta tensión se ha obtenido en la (POS -) con un valor de 210.250 kN

A continuación, se ha realizado una representación a partir de tres diagramas de fuerzas, las fuerzas de compresión en cada sección de las bobinas y para cada uno de los tres casos calculados, obteniendo así el caso en el que se obtienen mayores valores de compresión.

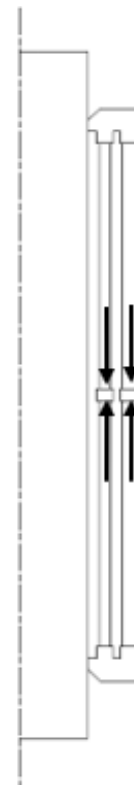


Figura 39

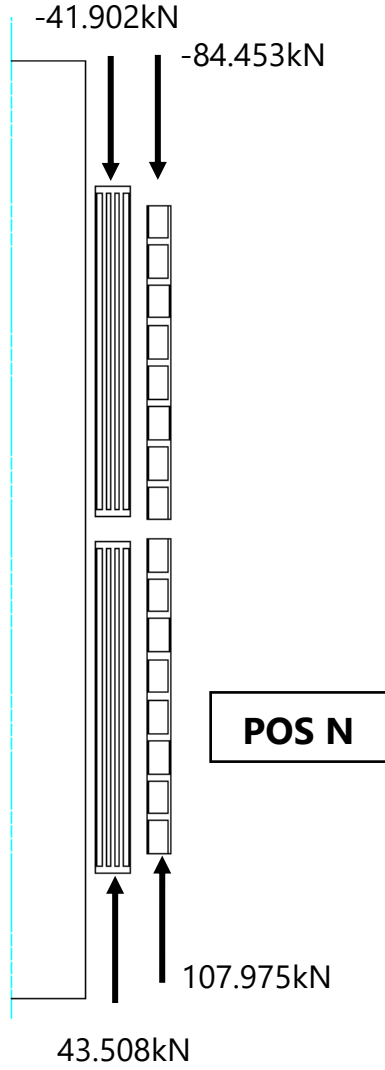
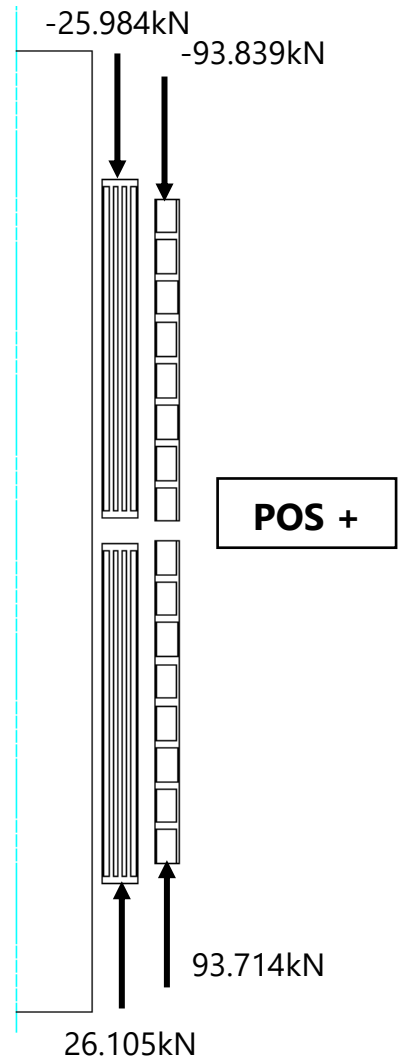
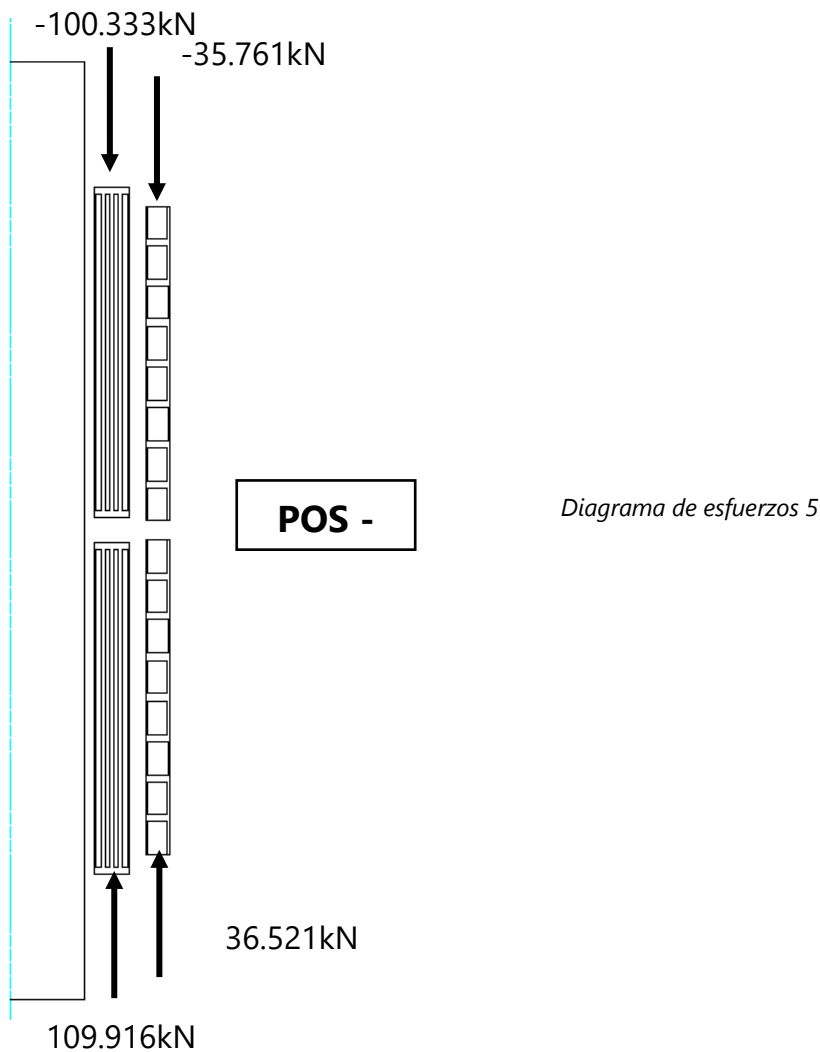


Diagrama de esfuerzos 3

Diagrama de esfuerzos 4





Tal y como se mostraba en la tabla anterior los máximos valores de compresión obtenidos son, en los arrollamientos de baja tensión, en la (POS N) y en los arrollamientos de alta tensión en la (POS -).

## ii. Fuerzas de compresión y de tracción entre discos

En los arrollamientos de alta tensión las fuerzas son provocadas por cada uno de los discos por los que están formados las secciones de los arrollamientos, así pues, cada disco produce unas fuerzas que se transmiten de unos otros a través de la resina que los separa provocando unos esfuerzos de compresión o de tracción dependiendo de las direcciones de las fuerzas.

En este apartado se va a estudiar las fuerzas entre discos, en la siguiente tabla podemos observar las fuerzas que se producen en cada disco individualmente y la dirección de estas fuerzas. A partir

de cada una de estas fuerzas calcularemos las fuerzas que se producen entre cada uno de estos discos, obteniendo así los valores de compresión entre cada disco, ya que más adelante tendremos que calcular los máximos esfuerzos de compresión o de tracción que deberán soportar cada una de estas secciones de resina que se encuentran entre cada uno de los discos.

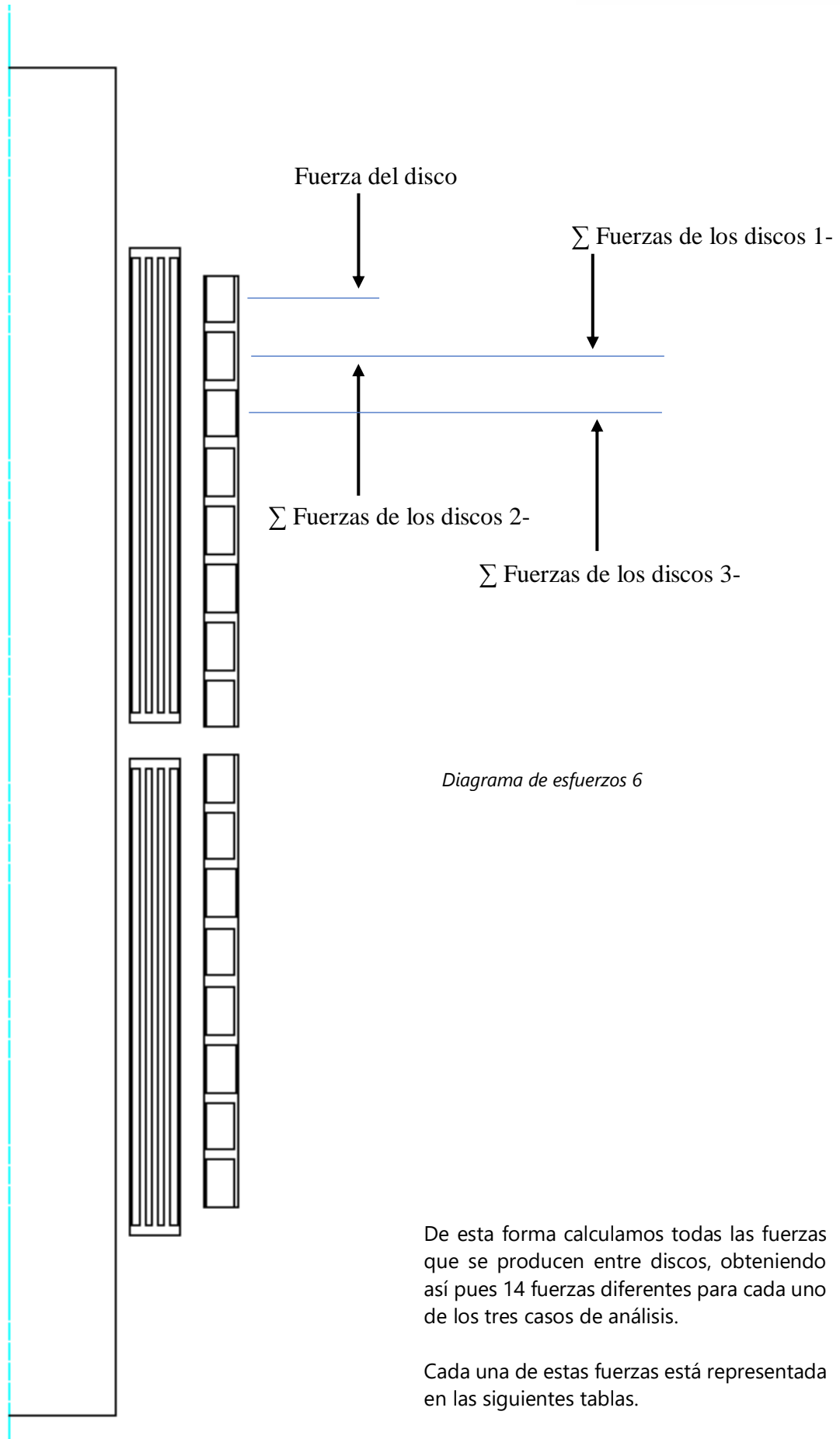
	<i>POS N</i>	<i>POS +</i>	<i>POS -</i>
<i>D1</i>	-71410.16227	-68292.5647	-83356.1266
<i>D2</i>	-14499.84501	-28511.5608	-7911.6795
<i>D3</i>	39909.8282	-11503.3212	82318.4624
<i>D4</i>	2856.492794	-4266.1104	-29795.1514
<i>D5</i>	-26907.73551	-4009.7343	28470.0135
<i>D6</i>	-32540.42423	-1766.4991	-91757.7539
<i>D7</i>	-2256.808875	6258.9023	-17800.0773
<i>D8</i>	20395.32696	18251.5518	19498.3999
<i>D9</i>	-16676.13035	-18236.0078	-17586.4803
<i>D10</i>	10141.38354	-6251.8726	21820.1651
<i>D11</i>	56834.56715	1770.6459	103531.3244
<i>D12</i>	4924.022921	4018.3298	-41727.0678
<i>D13</i>	-23896.52207	4264.4829	20098.2350
<i>D14</i>	-18138.83009	11503.7679	-71739.7706
<i>D15</i>	21089.33993	28471.3732	11172.5161
<i>D16</i>	73697.23348	68174.2803	84347.5600

*Tabla 42*

Con todos los valores de las fuerzas de cada uno de los discos ya calculados se procede al cálculo de las fuerzas entre discos, a continuación, se muestra un diagrama de fuerzas en el que se muestra tal y como se ha realizado el cálculo de las fuerzas entre discos para cada una de las tres posiciones de análisis.

Es importante también a la hora de realizar los cálculos de los esfuerzos que las secciones entre discos varían dependiendo del caso en el que nos encontremos ya que el número de vueltas de cada disco cambia.





En las siguientes tablas se muestran las fuerzas entre discos de cada una de las secciones de cada arrollamiento, para cada uno de los tres casos.

<b>POS N</b>			
<u>Discos</u>	<u>Fuerza inferior</u>	<u>Fuerza superior</u>	<u>F. Compresión</u>
D1-D2	94931.89884	-71410.16227	166342.0611
D2-D3	109431.7438	-85910.00728	195341.7511
D3-D4	69521.91565	-46000.17908	115522.0947
D4-D5	66665.42286	-43143.68629	109809.1091
D5-D6	93573.15837	-70051.4218	163624.5802
D6-D7	126113.5826	-102591.846	228705.4286
D7-D8	128370.3915	-104848.6549	<b>233219.0464</b>
D9-D10	124651.1949	-101129.4583	225780.6532
D10-D11	114509.8113	-90988.07476	205497.8861
D11-D12	57675.24417	-34153.5076	91828.75177
D12-D13	52751.22125	-29229.48468	81980.70593
D13-D14	76647.74332	-53126.00675	129773.7501
D14-D15	94786.57341	-71264.83684	166051.4102
D15-D16	73697.23348	-50175.49691	123872.7304

Tabla 43: Fuerzas entre discos (POS N)

<b>POS +</b>			
<u>Discos</u>	<u>Fuerza inferior</u>	<u>Fuerza superior</u>	<u>F. Compresión</u>
D1-D2	68168.2277	-68292.5647	136460.7925
D2-D3	96679.7885	-96804.1255	193483.9140
D3-D4	108183.1097	-108307.4467	216490.5564
D4-D5	112449.220145	-112573.5571	225022.7773
D5-D6	116458.9545	-116583.2914	233042.2459
D6-D7	118225.4536	-118349.7905	<b>236575.2441</b>
D7-D8	111966.5512	-112090.8882	224057.4395
D9-D10	111951.0073	-112075.3443	224026.3516
D10-D11	118202.8799	-118327.2169	236530.0968
D11-D12	116432.2340	-116556.5710	232988.8050
D12-D13	112413.9042	-112538.2412	224952.1454
D13-D14	108149.4213	-108273.7583	216423.1796
D14-D15	96645.6534	-96769.9904	193415.6438
D15-D16	68174.2803	-68298.6172	136472.8975

Tabla 44: Fuerzas entre discos (POS +)

<b>POS -</b>			
<u>Discos</u>	<u>Fuerza inferior</u>	<u>Fuerza superior</u>	<u>F. Compresión</u>
D1-D2	92938.6958	-83356.1266	176294.8224
D2-D3	100850.3753	-91267.806133	192118.1814
D3-D4	18531.9129	-8949.3437	27481.2566
D4-D5	48327.0642	-38744.4951	87071.5593
D5-D6	19857.0507	-10274.4815	30131.5322
D6-D7	111614.8045	-102032.2354	213647.0399
D7-D8	129414.8818	-119832.312704	<b>249247.1945</b>
D9-D10	127502.9622	-117920.3931	245423.3553
D10-D11	105682.7971	-96100.2279	201783.0250
D11-D12	2151.4726	7431.0965	-5279.6239
D12-D13	43878.5404	-34295.9713	78174.5117
D13-D14	23780.3054	-14197.7363	37978.0418
D14-D15	95520.0761	-85937.5069	181457.5830
D15-D16	84347.5600	-74764.9909	159112.5509

Tabla 45: Fuerzas entre discos (POS -)

Podemos observar la fuerza de valor más alto se produce en el caso POS – en la sección que se encuentra entre los discos D7 y D8 obteniendo un valor de 249.247kN.

La siguiente tabla resume los valores máximos de compresión y de tracción entre discos de cada uno de los casos analizados

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<u>POS N</u>	<u>POS +</u>	<u>POS -</u>
Máxima fuerza de compresión entre discos	233219.0464	236575.2441	<b>249247.1945</b>
Máxima fuerza de tracción entre discos	0	0	0

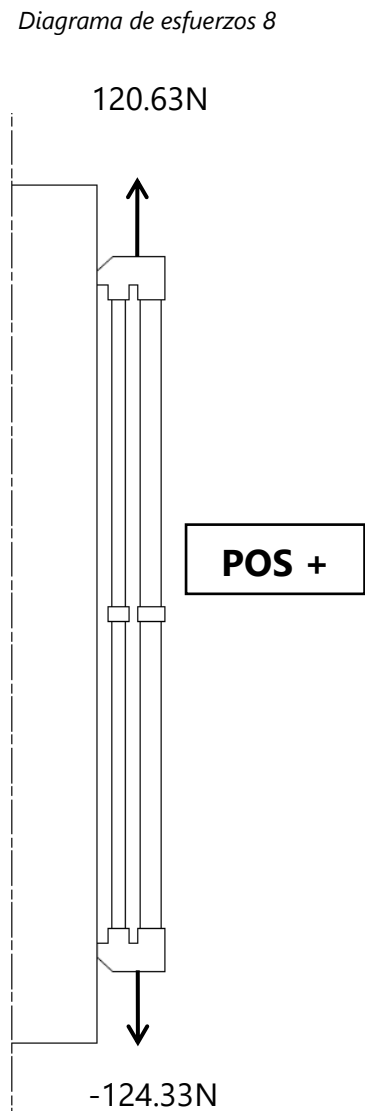
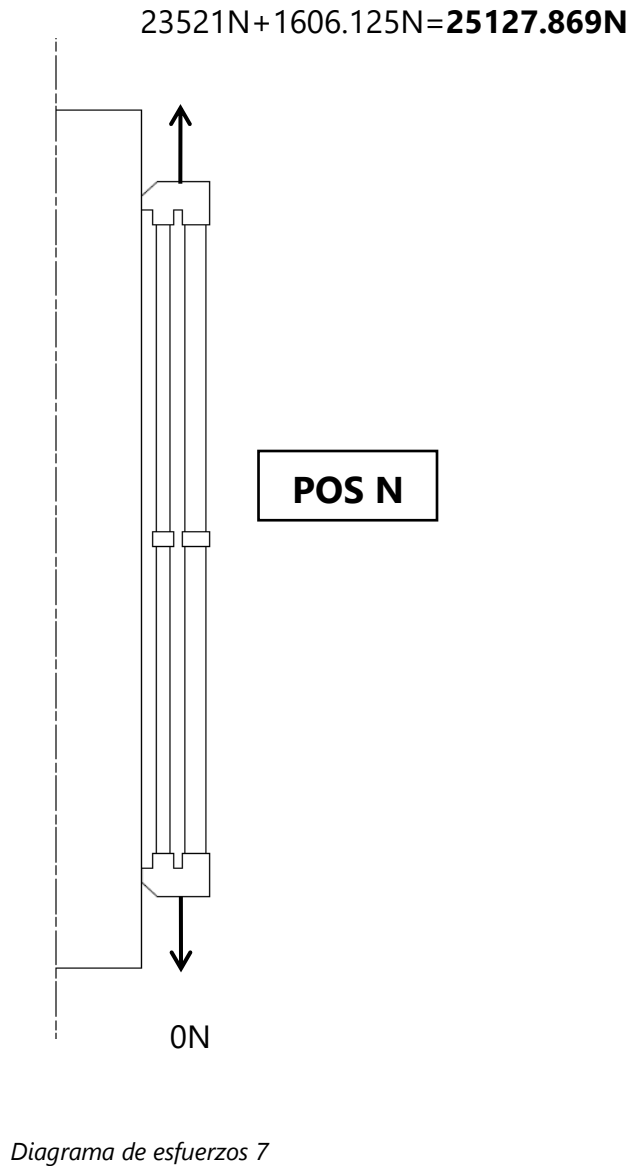
Tabla 46

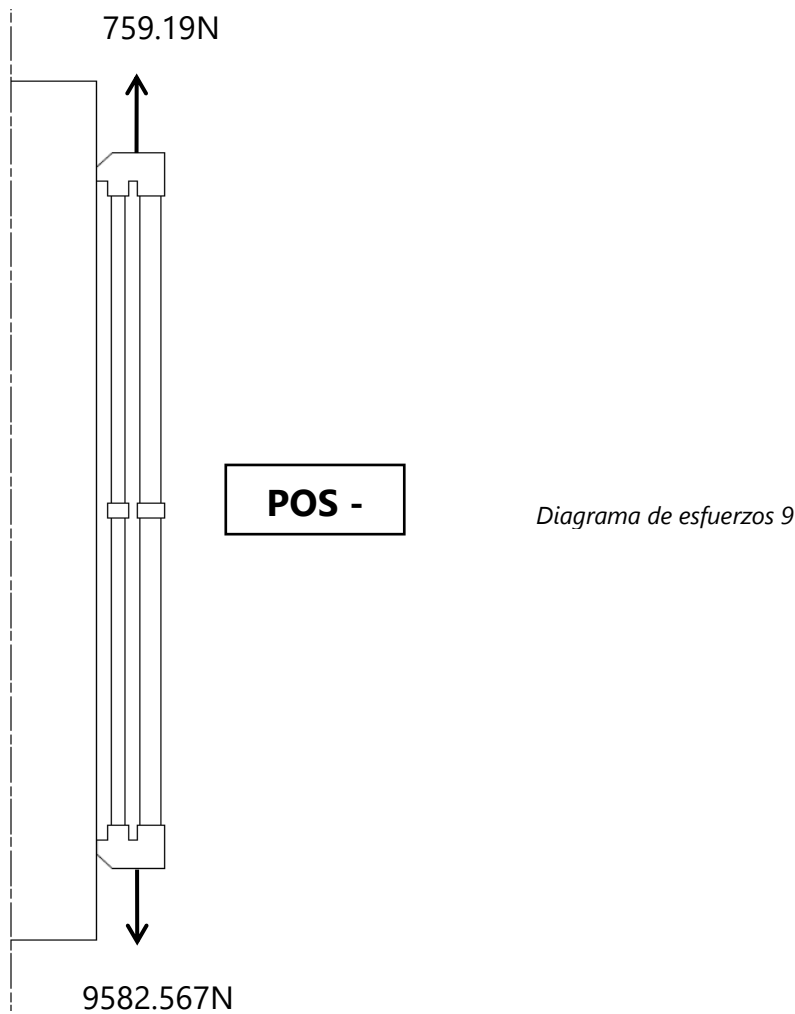
iii. **Máxima fuerza axial de empuje en cada uno de los extremos de los devanados ( $F_{ax}^*$ )**

La suma de las fuerzas que se producen en cada una de las secciones de los devanados da lugar a una fuerzas de compresión, que son soportadas por los tacos que se encuentran entre ambas secciones de los arrollamientos, sin embargo cada una de estas fuerzas que produce cada sección de cada arrollamiento no tiene un valor exactamente igual que la otra sección de su mismo devanado, es así pues que la diferencia de estas fuerzas es transmitida a los tacos de soporte, ya bien sea los tacos superiores o los tacos inferiores, dependiendo de cuál de las fuerzas sea superior.

Cada arrollamiento costa de 4 tacos superiores y 4 tacos inferiores que son los encargados de soportar estas fuerzas. Además, cada uno de estos tacos posee dos bases. En las que se apoyan cada uno de los arrollamientos (HV y LV).

A continuación, en los siguientes diagramas de fuerzas, se muestran las fuerzas de empuje que se producen en cada uno de los arrollamientos para cada uno de los casos analizados.





En la siguiente tabla aparecen los valores de las fuerzas que actúan en cada taco de apoyo y más en concreto encada una de las bases de cada taco.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<i>POS N</i>	<i>POS +</i>	<i>POS -</i>
Fuerza axial en los tacos superiores LV	<b>1606.125 N</b>	120.63 N	759.19 N
Fuerza axial en los tacos inferiores LV	0	0	<b>0</b>
Fuerza axial en los tacos superiores HV	<b>23521.744 N</b>	0 N	9582.567 N
Fuerza axial en los tacos inferiores HV	0	124.33 N	<b>0</b>

Tabla 47

Los valores máximos de empuje obtenidos, como podemos ver tanto en los diagramas de fuerzas como en la tabla anterior se producen en la POS N, ya que es donde más diferencia de fuerzas entre secciones tenemos, así pues, en todos los análisis de esfuerzos se tendrán en cuenta los valores obtenidos para este caso ya que es aquí donde se han obtenido los valores más críticos.

iv. **Máxima fuerza axial por extremidad en los bloques de presión y en las abrazaderas del núcleo. ( $F_{ax,t}^*$ )**

Con las reacciones calculadas en el apartado anterior, hemos obtenido los valores de las fuerzas que tienen que soportar los tacos inferiores y los tacos superiores donde se apoyan cada una de las secciones de los arrollamientos del transformador.

Estas fuerzas provocan en el transformador una fuerza de tracción, esta fuerza de tracción se transmite a unas pletinas de acero colocadas a ambos lados de cada columna del núcleo magnético. La manera de transmitir estas fuerzas hasta estas pletinas es la siguiente.

El transformador está compuesto por dos bridas, cuya función es evitar que se abra el núcleo magnético, pero principalmente, su función es la de soportar las fuerzas que producen cada uno de los arrollamientos a través de los tacos de soporte. Esta fuerza de tracción se transmite a través de las bridas a unas pletinas de acero cuya única función es la de soportar estos esfuerzos de tracción y evitar que sea la chapa magnética quien tenga que soportarlos.

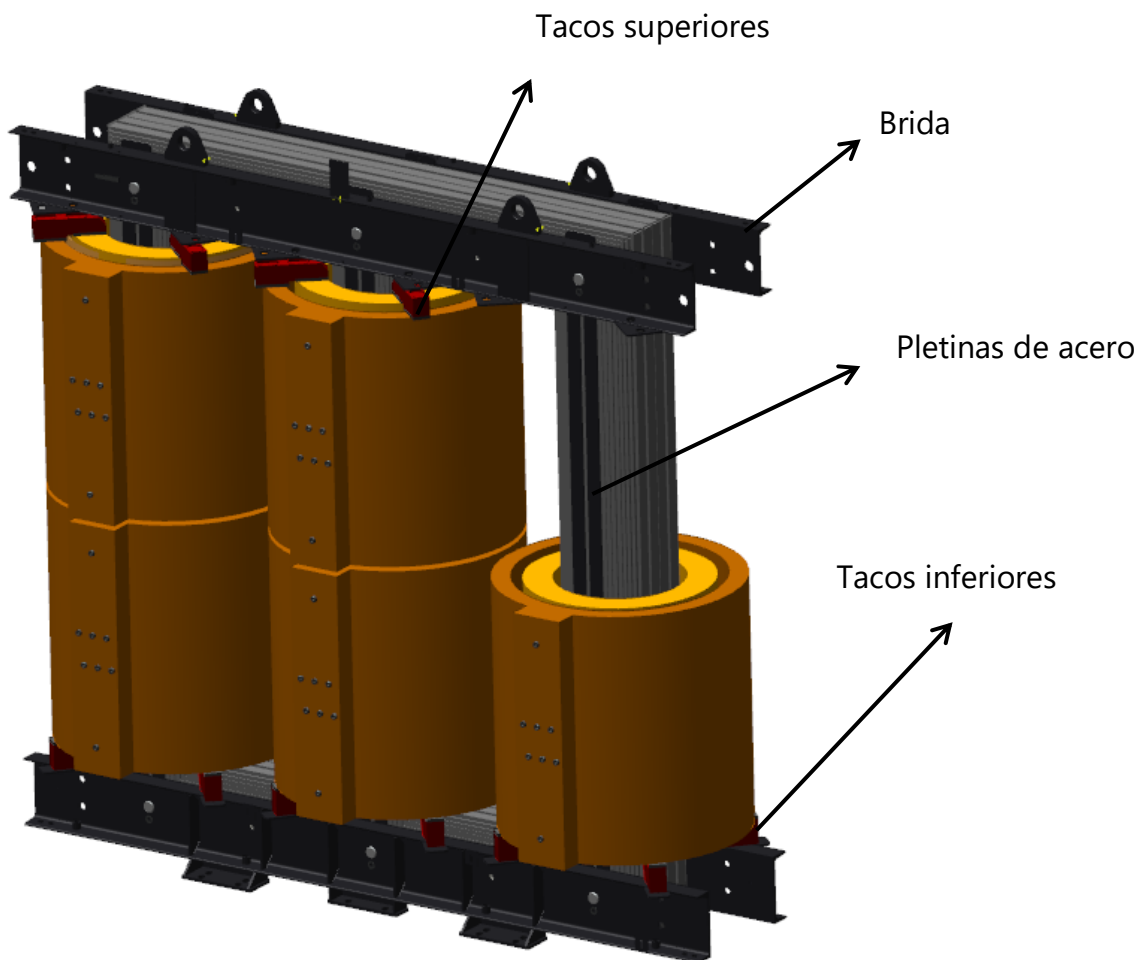


Figura 40

En la siguiente tabla se muestran los valores máximos de las fuerzas que tiene que soportar estas pletinas:

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	<u>POS N</u>	<u>POS ±</u>	<u>POS -</u>
Fuerza axial TOTAL en los tacos superiores	<b>25127.869 N</b>	120.63 N	10341.757 N
Fuerza axial TOTAL en los tacos inferiores	0	124.33 N	0
Fuerza axial TOTAL	<b>25127.869 N</b>	244.96 N	10341.757 N

Tabla 48

El material de estas pletinas es de acero, y cada una de ellas tiene unas dimensiones de 160 x 12 mm con una ranura de separación de 20 mm. Esta ranura está pensada para reducir el flujo de corrientes inducidas en su interior. En el *Anexo I* aparece una explicación al detalle del material por el que están fabricadas estas pletinas, así como en el *Anexo VII* aparecen los planos de las mismas.

## **ANEXO IV**

### **(CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS MECÁNICOS GENERADOS POR LAS FUERZAS DE CORTOCIRCUITO)**

- *TENSIONES Y ESFUERZOS PROVOCADOS POR LAS FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS*
  - *Esfuerzos tangenciales causados por las fuerzas radiales*
    - *Esfuerzo medio de tracción en el arrollamiento*
    - *Esfuerzo medio de compresión en el arrollamiento interior*
    - *Estrés producido debido a la flexión radial de los espaciadores de los canales de refrigeración*
    - *Tensión de compresión en los espaciadores radiales de los bobinados tipo cinta*
    - *Tensión de compresión o tracción en las capas aislantes de los bobinados de tipo banda*
    - *Tensión de compresión en las estructuras de aislamiento*
    - *Esfuerzo de compresión en los tacos de soporte*
    - *Tensión de tracción en las pletinas del núcleo*



### III. Tensiones y esfuerzos provocados por las fuerzas electromagnéticas

Las fuerzas electromagnéticas provocadas como consecuencia del cortocircuito provocan en el transformador y en cada uno de sus componentes unas fuerzas que producen una serie de esfuerzos que someten al transformador y pueden llegar a causar diversos fallos.

En este apartado se va a analizar cada uno de los esfuerzos y tensiones provocadas por dichas fuerzas, para su posterior comprobación de que no provocan ningún fallo que pueda alterar el funcionamiento del transformador.

#### a. Esfuerzos tangenciales causados por las fuerzas radiales

En los transformadores de tipo núcleo con arrollamientos concéntricos, como es el caso de este transformador. Los conductores que transportan la corriente se encuentran en un campo magnético de dirección principalmente axial. Por lo tanto, los conductores son sometidos a fuerzas radiales.

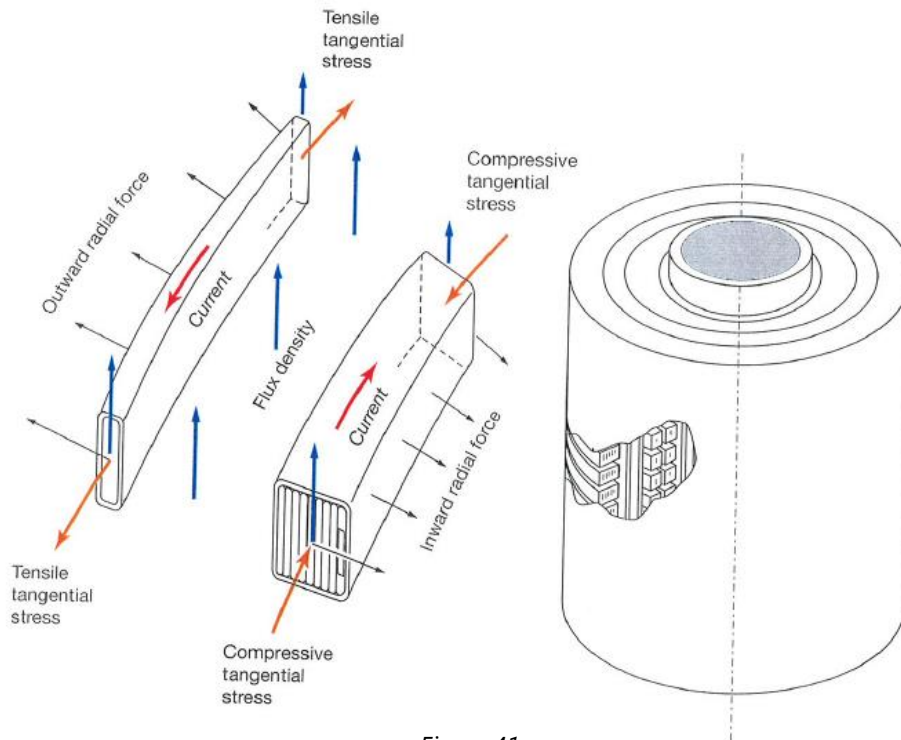


Figura 41

Debido a la simetría circular de los arrollamientos, las fuerzas radiales producen un esfuerzo en el material del conductor que evoluciona en una dirección tangencial del devanado. Este esfuerzo se llama tangencial.

El esfuerzo producido en el conductor es de tracción cuando es causado por las fuerzas con dirección hacia el exterior y de compresión cuando las fuerzas que lo causan tienen dirección hacia el interior.

Por las condiciones de diseño el transformador consta de dos secciones axiales por cada devanado, y en este caso en el del devanado de baja tensión consta de 4 grupos por cada sección axial de arrollamiento, cada grupo produce una fuerza radial independiente, así pues, la fuerza total será la suma de los 4 grupos de manera independiente como se muestra en la tabla superior, esto se debe a que el arrollamiento está dividido por tres canales de ventilación, es por eso que es muy importante estudiar cada sección independientemente ya que el flujo magnético es totalmente diferente en cada una de estas secciones.

Grupo	Fuerza RADIAL (POS N)	Fuerza RADIAL (POS +)	Fuerza RADIAL (POS -)
Total 1-4	-1212411.2582	-1210764.8498	-1188974.931
Total 5-8	-1210113.1880	-1210511.7939	-1187627.354

Tabla 49

Como podemos observar los valores máximos aparecen en el caso de POS N donde el valor de **1212.411 kN**. Este valor se ha obtenido como la suma de los cuatro grupos pertenecientes a esta sección de arrollamiento.

Respecto al devanado de alta tensión los valores son los siguientes:

Grupo	Fuerza RADIAL (POS N)	Fuerza RADIAL (POS +)	Fuerza RADIAL (POS -)
Total 9-16	1529240.2201	1601132.3744	1565398.013
Total 17-24	1518821.6130	1601247.2864	1563844.943

Tabla 50

Estos valores son el resultado de la suma de todas las fuerzas de todos los grupos correspondientes a cada sección del devanado, y como podemos observar el valor mayor de fuerza radial que aparece en el devanado de alta tensión es de **1601.247 kN** en la sección inferior en el caso de POS +.

#### i. Esfuerzo medio de tracción en el arrollamiento exterior

El esfuerzo de tracción es producido por las fuerzas que van hacia el exterior, calculados en el devanado de alta tensión. El máximo valor de esta fuerza es de **1601.247 kN** y es distribuido alrededor de todo el devanado de alta tensión (HV).

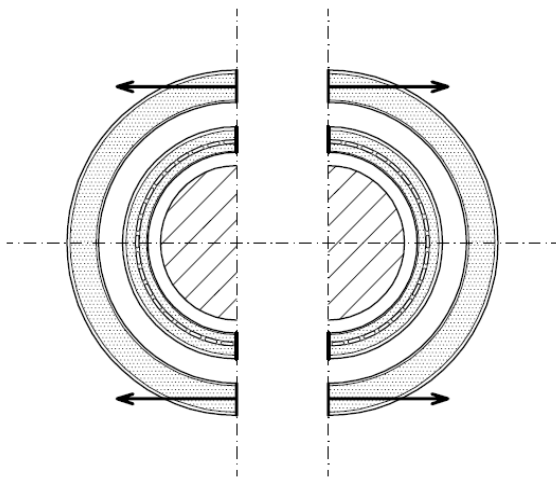


Figura 42

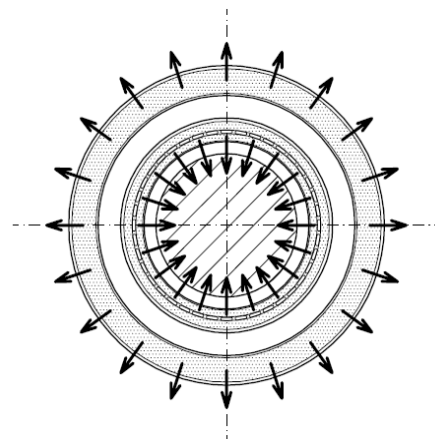


Figura 43

El esfuerzo medio de tracción en el arrollamiento exterior lo he calculado como para una superficie cilíndrica como se muestra en la siguiente imagen.

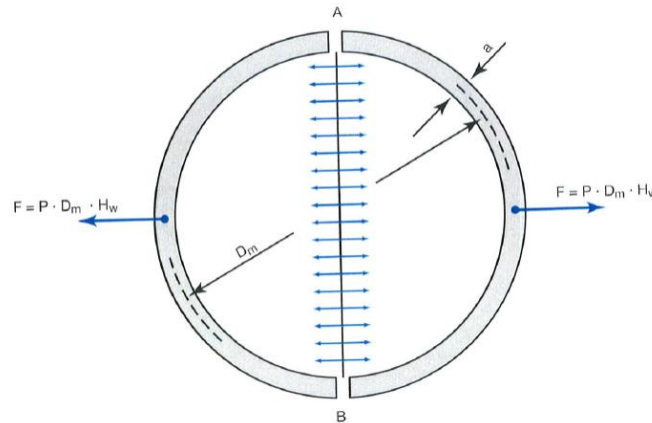


Figura 44

La fuerza transversal  $F$  en las dos mitades opuestas del devanado es equivalente a la presión sobre un diámetro, mientras que la fuerza radial total es equivalente a la presión en la circunferencia  $\pi \times D_m$ . La presión es igual a la fuerza/ superficie.

$$P_{HV} = F_{radHV} / (D_m \times H_w \times \pi)$$

Donde  $D_m$  es el diámetro medio en milímetros y el  $H_w$  hace referencia a la altura eléctrica en milímetros.

El esfuerzo de tensión tangencial creado en el material es;

$$\sigma_t^* = P_{HV} \times D_m / (2 \times a)$$

Siendo "a" el espesor radial de la pared, en este caso tomaremos como espesor únicamente el espesor del material del conductor ya que supondremos que la resina no tiene resistencia mecánica. En este caso será de un espesor de 63 mm, lo que equivale a 18 vueltas de 3.5 mm cada una.

A continuación, voy a proceder a realizar los cálculos de los esfuerzos tangenciales producidos por las fuerzas radiales, para cada uno de los tres casos. Una vez haya obtenido los resultados nos quedaremos con el caso más crítico, es decir, con el caso en el cual los esfuerzos sean mayores.

- Para el caso de POS +:

$$P_{HV} = \frac{1601247.286}{1072.5 \times 1140 \times \pi} = 0.4268 \text{ N/mm}^2$$

Donde el  $D_m$  es igual a 1072.5mm y  $H_w$  es igual a 1140mm

$$\sigma_t^* = 0.4268 \times \frac{1072.5}{2 \times 63} = 3.63 \text{ N/mm}^2$$

- Para el caso de POS N:

$$P_{HV} = \frac{1529240.2201}{1072.5 \times 1140 \times \pi} = 0.398 \text{ N/mm}^2$$

Donde el Dm es igual a 1072.5mm y H<sub>w</sub> es igual a 1140mm

$$\sigma_t^* = 0.398 \times \frac{1072.5}{2 \times 63} = 3.38 \text{ N/mm}^2$$

- Para el caso de POS -:

$$P_{HV} = \frac{1565398.013}{1072.5 \times 1140 \times \pi} = 0.4075 \text{ N/mm}^2$$

Donde el Dm es igual a 1072.5mm y H<sub>w</sub> es igual a 1140mm

$$\sigma_t^* = 0.4075 \times \frac{1072.5}{2 \times 63} = 3.46 \text{ N/mm}^2$$

Así que podemos observar que el valor más alto se produce en el caso de POS +.

Aunque de este modo no se está valorando las tensiones que sufre cada disco por separado en el arrollamiento de alta tensión, es por eso por lo que en las siguientes tablas se muestran los cálculos de forma detallada con todos los resultados obtenidos y para cada uno de los casos de estudio.

La principal diferencia entre los resultados obtenidos entre unos discos y otros además de la diferencia de las fuerzas que existe entre unos y otros es principalmente la variación de la sección del conductor ya que hay algunos discos que según en el caso de análisis en el que nos encontremos tienen menor número de vueltas es así pues que la sección de conductor disminuye, lo que tiene un gran efecto en los esfuerzos y tensiones obtenidos.

TABLA DE ESFUERZOS DE TRACCION ARROLLAMIENTO EXTERIOR (POS N)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$N.^\circ$ vueltas	$D. Radial$	Presión	Sección $n$	Esfuerzos
AT Sup	182374.504	990	1153.34	1071.67	18	63	0.45141079	126	<b>3.83939204</b>
AT Sup	209246.296	990	1153.34	1071.67	18	63	0.51792346	126	<b>4.40510348</b>
AT Sup	207261.446	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.51119082	133	<b>4.13366963</b>
AT Sup	104433.156	990	1107.56	1048.78	12	42	0.26413313	84	<b>3.29782797</b>
AT Sup	95712.6232	990	1099.93	1044.965	11	38.5	0.24296088	77	<b>3.29721582</b>
AT Sup	243706.335	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.60107871	133	<b>4.86053482</b>
AT Sup	245633.265	990	1153.34	1071.67	18	63	0.60798797	126	<b>5.17113074</b>
AT Sup	240872.595	990	1153.34	1071.67	18	63	0.59620443	126	<b>5.07090795</b>
AT Inf	238220.48	990	1153.34	1071.67	18	63	0.58963995	126	<b>5.01507499</b>
AT Inf	237680.62	990	1153.34	1071.67	18	63	0.5883037	126	<b>5.00370973</b>
AT Inf	218784.906	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.53961235	133	<b>4.36349615</b>
AT Inf	101427.256	990	1107.56	1048.78	12	42	0.25653059	84	<b>3.20290658</b>
AT Inf	90800.9748	990	1099.93	1044.965	11	38.5	0.23049295	77	<b>3.12801385</b>
AT Inf	229088.191	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.56502443	133	<b>4.56898722</b>
AT Inf	216610.884	990	1153.34	1071.67	18	63	0.53615219	126	<b>4.56014457</b>
AT Inf	186208.301	990	1153.34	1071.67	18	63	0.46090015	126	<b>3.92010206</b>

Tabla 51

TABLA DE ESFUERZOS DE TRACCION ARROLLAMIENTO EXTERIOR (POS +)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$N.^\circ$ vueltas	$D. Radial$	Presión	Sección $n$	Esfuerzos
AT Sup	149089.197	990	1153.34	1071.67	18	63	0.36902347	126	<b>3.13866173</b>
AT Sup	182551.947	990	1153.34	1071.67	18	63	0.45184999	126	<b>3.84312762</b>
AT Sup	205899.242	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.50783107	133	<b>4.10650153</b>
AT Sup	208184.347	990	1107.56	1048.78	18	63	0.52654144	126	<b>4.38274708</b>
AT Sup	212814.473	990	1099.93	1044.965	18	63	0.54021706	126	<b>4.48022161</b>
AT Sup	221999.41	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.54754062	133	<b>4.42760695</b>
AT Sup	213836.657	990	1153.34	1071.67	18	63	0.52928546	126	<b>4.50174086</b>
AT Sup	206757.101	990	1153.34	1071.67	18	63	0.51176224	126	<b>4.35270035</b>
AT Inf	238220.48	990	1153.34	1071.67	18	63	0.58963995	126	<b>5.01507499</b>
AT Inf	237680.62	990	1153.34	1071.67	18	63	0.5883037	126	<b>5.00370973</b>
AT Inf	218784.906	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.53961235	133	<b>4.36349615</b>
AT Inf	101427.256	990	1107.56	1048.78	18	63	0.25653059	126	<b>2.13527105</b>
AT Inf	90800.9748	990	1099.93	1044.965	18	63	0.23049295	126	<b>1.91156402</b>
AT Inf	229088.191	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.56502443	133	<b>4.56898722</b>
AT Inf	216610.884	990	1153.34	1071.67	18	63	0.53615219	126	<b>4.56014457</b>
AT Inf	186208.301	990	1153.34	1071.67	18	63	0.46090015	126	<b>3.92010206</b>

Tabla 52

TABLA DE ESFUERZOS DE TRACCION ARROLLAMIENTO EXTERIOR (POS -)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	N.º vueltas	D. Radial	Presión	Sección $n$	Esfuerzos
AT Sup	202970.822	990	1153.34	1071.67	18	63	0.5023905	126	<b>4.27299068</b>
AT Sup	230757.418	990	1153.34	1071.67	18	63	0.57116749	126	<b>4.85796081</b>
AT Sup	217599.181	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.53668787	133	<b>4.33984777</b>
AT Sup	52176.6673	990	1107.56	1048.78	5	17.5	0.13196563	35	<b>3.95436882</b>
AT Sup	81057.616	990	1099.93	1044.965	5	17.5	0.20576001	35	<b>6.14320013</b>
AT Sup	243730.48	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.60113826	133	<b>4.86101637</b>
AT Sup	267742.786	990	1153.34	1071.67	18	63	0.66271315	126	<b>5.6365857</b>
AT Sup	269363.044	990	1153.34	1071.67	18	63	0.66672359	126	<b>5.67069576</b>
AT Inf	268021.278	990	1153.34	1071.67	18	63	0.66340247	126	<b>5.64244859</b>
AT Inf	263631.137	990	1153.34	1071.67	18	63	0.65253605	126	<b>5.55002627</b>
AT Inf	230886.237	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.56945914	133	<b>4.60484785</b>
AT Inf	43788.2913	990	1107.56	1048.78	5	17.5	0.11074968	35	<b>3.31863001</b>
AT Inf	89587.447	990	1099.93	1044.965	5	17.5	0.22741248	35	<b>6.78965954</b>
AT Inf	228568.433	990	1160.97	1075.485	19	66.5	0.5637425	133	<b>4.55862104</b>
AT Inf	234384.887	990	1153.34	1071.67	18	63	0.58014615	126	<b>4.93432716</b>
AT Inf	204977.233	990	1153.34	1071.67	18	63	0.50735674	126	<b>4.31523014</b>

Tabla 53

Así pues, a partir de las siguientes tablas obtenemos todos y cada uno de los valores de los esfuerzos que se producen en el arrollamiento de alta tensión para que a la hora de calcular y determinar si cumplen con el criterio de aceptación, solamente tendremos que comparar con el valor más alto obtenido.

ii. **Esfuerzo medio de compresión en el arrollamiento interior**

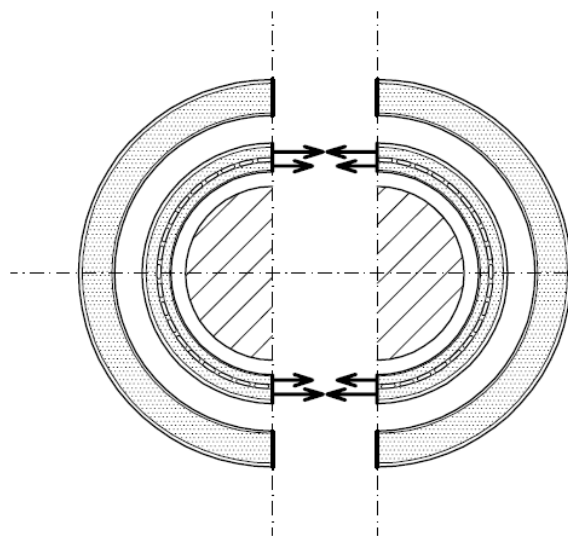


Figura 45

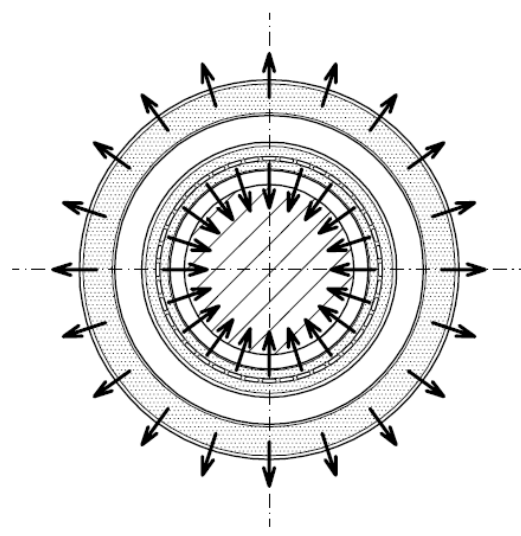


Figura 46

En este caso, el arrollamiento de baja tensión tiene 4 secciones radiales separadas entre sí por canales de ventilación. Las fuerzas radiales no están distribuidas uniformemente entre las 4 secciones. El máximo valor es de **1212.411 kN**.

Estas secciones pueden considerarse como superficies cilíndricas cerradas presurizadas, sometidas a una presión constante aplicada sobre su superficie exterior.

Usando las mismas fórmulas que para el apartado anterior en el caso de la tensión de tracción media en el devanado de alta tensión, calcularemos el valor que estamos buscando.

$$P_{HV} = F_{radHV} / (D_m \times H_w \times \pi)$$

En este caso  $D_m$  representa el diámetro medio de cada una de las cuatro secciones radiales por las que está formado el arrollamiento de baja tensión y  $H_w$  hace referencia a la longitud eléctrica.

Del mismo modo que para el caso anterior, se han realizado los cálculos para cada una de las secciones radiales del devanado de baja tensión y para cada uno de los casos que son objeto de análisis para el diseño de este transformador, de esta forma se han obtenido los siguientes resultados, todos ellos mostrados en las siguientes tablas, así como también todos los datos necesarios para realizar el cálculo de estos mismos.

TABLA DE ESFUERZOS DE COMPRESION ARROLLAMIENTO INTERIOR (POS N)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$N.^\circ$ vueltas	$D. Radial$	Presión	Sección	Esfuerzos
BT Sup	-41565.2	610	654.08	632.04	44.08	14.3	-0.0182	8222.5	<b>-0.40227</b>
BT Sup	-204392	684.08	723.44	703.76	39.36	15.6	-0.08039	8970	<b>-1.81326</b>
BT Sup	-352697	753.44	789.52	771.48	36.08	14.3	-0.12654	8222.5	<b>-3.41341</b>
BT Sup	-613758	819.52	873.88	846.7	54.36	15.6	-0.20064	8970	<b>-5.44496</b>
BT Inf	-41488.1	610	654.08	632.04	44.08	14.3	-0.01817	8222.5	<b>-0.40152</b>
BT Inf	-204532	684.08	723.44	703.76	39.36	15.6	-0.08044	8970	<b>-1.81451</b>
BT Inf	-352945	753.44	789.52	771.48	36.08	14.3	-0.12663	8222.5	<b>-3.41581</b>
BT Inf	-611148	819.52	873.88	846.7	54.36	15.6	-0.19979	8970	<b>-5.4218</b>

Tabla 54

TABLA DE ESFUERZOS DE COMPRESION ARROLLAMIENTO INTERIOR (POS +)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$N.^\circ$ vueltas	$D. Radial$	Presión	Sección	Esfuerzos
BT Sup	-44738.821	610	654.08	632.04	44.08	14.3	-0.0195926	8222.5	<b>-0.43298</b>
BT Sup	-203273.66	684.08	723.44	703.76	39.36	15.6	-0.0799482	8970	<b>-1.80334</b>
BT Sup	-349376.57	753.44	789.52	771.48	36.08	14.3	-0.1253491	8222.5	<b>-3.38127</b>
BT Sup	-613375.8	819.52	873.88	846.7	54.36	15.6	-0.2005162	8970	<b>-5.44157</b>
BT Inf	-44622.849	610	654.08	632.04	44.08	14.3	-0.0195418	8222.5	<b>-0.43186</b>
BT Inf	-203221.12	684.08	723.44	703.76	39.36	15.6	-0.0799276	8970	<b>-1.80287</b>
BT Inf	-349302.67	753.44	789.52	771.48	36.08	14.3	-0.1253226	8222.5	<b>-3.38055</b>
BT Inf	-613365.16	819.52	873.88	846.7	54.36	15.6	-0.2005127	8970	<b>-5.44147</b>

Tabla 55

TABLA DE ESFUERZOS DE COMPRESION ARROLLAMIENTO INTERIOR (POS -)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$N.^\circ$ vueltas	$D. Radial$	Presión	Sección	Esfuerzos
BT Sup	-41113.237	610	654.08	632.04	44.08	14.3	-0.018004	8222.5	<b>-0.39789</b>
BT Sup	-198835.65	684.08	723.44	703.76	39.36	15.6	-0.078202	8970	<b>-1.76397</b>
BT Sup	-342556.94	753.44	789.52	771.48	36.08	14.3	-0.122902	8222.5	<b>-3.31527</b>
BT Sup	-606469.11	819.52	873.88	846.7	54.36	15.6	-0.198258	8970	<b>-5.3803</b>
BT Inf	-41000.932	610	654.08	632.04	44.08	14.3	-0.017955	8222.5	<b>-0.39681</b>
BT Inf	-198856.76	684.08	723.44	703.76	39.36	15.6	-0.078211	8970	<b>-1.76416</b>
BT Inf	-342610.6	753.44	789.52	771.48	36.08	14.3	-0.122921	8222.5	<b>-3.31579</b>
BT Inf	-605159.06	819.52	873.88	846.7	54.36	15.6	-0.197830	8970	<b>-5.36868</b>

Tabla 56

A continuación, procedo a realizar el cálculo de los esfuerzos medios de compresión de la sección más crítica del arrollamiento en el caso más crítico, que será la que posteriormente analizaremos y comprobaremos si cumple o no con los requisitos de seguridad. Para poder observar los cálculos realizados para cada sección de cada caso de manera detallada.

$$P_{HV(1)} = \frac{41565.1731}{626.85 \times 1150 \times \pi} = 0.0183 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{HV(2)} = \frac{204391.5553}{699.64 \times 1150 \times \pi} = 0.0808 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{HV(3)} = \frac{352696.9497}{764.58 \times 1150 \times \pi} = 0.1277 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{HV(4)} = \frac{613757.5801}{829.52 \times 1150 \times \pi} = 0.2047 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

El devanado consta de 4 secciones radiales de 12/11/12/11 vueltas cada uno de 1.3 mm de espesor cada una, así pues, procedemos al cálculo del esfuerzo medio de compresión de cada una de estas secciones, con las mismas formulas empleadas que para los esfuerzos de tracción del apartado anterior.

$$\sigma_c^* = P_{HV} \times D_m / (2 \times a)$$

Siendo "a" el número de vueltas por el espesor de cada una de estas vueltas.



$$\sigma_{c,1}^* = 0.0183 \times \frac{626.85}{2 \times 11 \times 1150} = 0.4534 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,2}^* = 0.0808 \times \frac{699.64}{2 \times 12 \times 1150} = 1.812 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,3}^* = 0.1277 \times \frac{764.58}{2 \times 11 \times 1150} = 3.414 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,4}^* = 0.2047 \times \frac{829.52}{2 \times 12 \times 1150} = 5.442 \frac{N}{mm^2}$$

- iii. **Estrés producido debido a la flexión radial de los conductores en el tramo entre las barras axiales y los espaciadores usados para generar los conductos de enfriamiento dentro del ancho del devanado de baja tensión.**

Una vez conocidas y calculadas las fuerzas que actúan en cada caso y en cada sección de cada devanado, podemos centrarnos en la predicción y en el cálculo de las tensiones y esfuerzos. Su cálculo varía en función del modelo mecánico elegido. Para este caso tenemos tres modelos en los que basarnos para el cálculo de los esfuerzos:

- Modelo de presión de Vessel
- Modelo de viga delgada
- Modelo de viga doblada

Modelo de presión de Vessel

Este modelo fue desarrollado por Mariotte, el esquema geométrico es el siguiente:

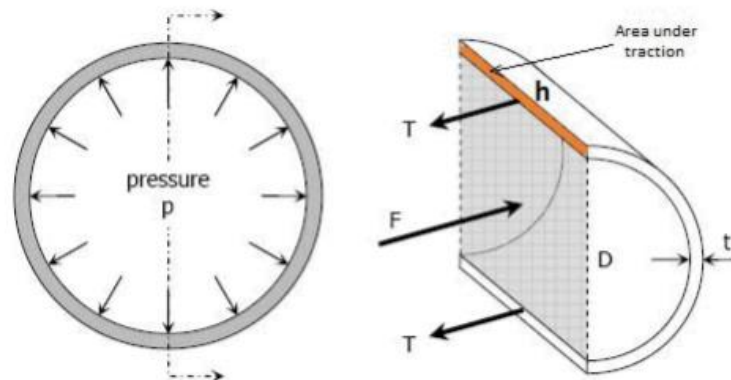


Figura 47

Suposiciones de este modelo:

- Simetría axial de la geometría y de las cargas
- Espesor constante
- Ratio entre el diámetro y el espesor debe de ser  $>20$
- Ausencia de variaciones del diámetro.

Este método razonadamente debe ser adoptado para arrollamientos exteriores, por el contrario, no es válido para arrollamientos interiores por las siguientes razones:

- La presión que actúa en los devanados tiene direcciones hacia el interior
- Si el devanado se apoya en varios soportes, la distribución simétrica de las cargas ya no existe debido a la presencia de momentos flectores.

#### Modelo de viga delgada:

En este modelo, cada sección de devanado se modela como una viga delgada, es decir, una dimensión es dominante en comparación con las otras dos.

- El material sigue la ley de Hooke
- Una dimensión es mucho más grande que la otras dos
- "n" numero de espaciadores distribuidos uniformemente a lo largo de la dirección azimutal (tipo cilíndrico).
- La curvatura del devanado no se tiene en cuenta
- Soportes modelados como una conexión fija.

#### Modelo de viga curvada o doblada:

Este método se describe esquemáticamente tal y como se muestra en la siguiente figura.

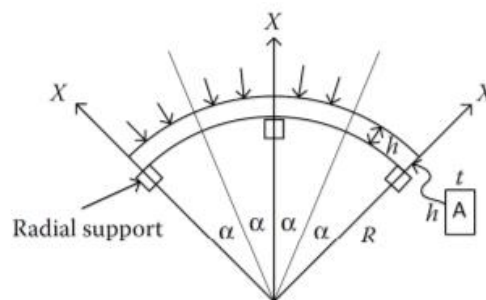


Figura 48

Suposiciones:

- El material sigue la ley de Hooke.
- Una dimensión es más grande que las otras dos.

- "n" numero de espaciadores distribuidos uniformemente a lo largo de la dirección azimutal (tipo cilíndrico).
- Soportes modelados como una conexión fija.
- El conductor de la sección forma un anillo cerrado de longitud radial "h", altura axial "t" y un radio medio "R".

Estos son los tres modelos de cálculo que disponemos, ahora solo queda elegir el modelo más apropiado.

Para el cálculo de los esfuerzos de pandeo hemos elegido de estos tres modelos, el modelo de viga delgada.

Los esfuerzos de compresión pueden llegar a colapsar el arrollamiento de dos formas diferentes: "forced buckling" o "free buckling".

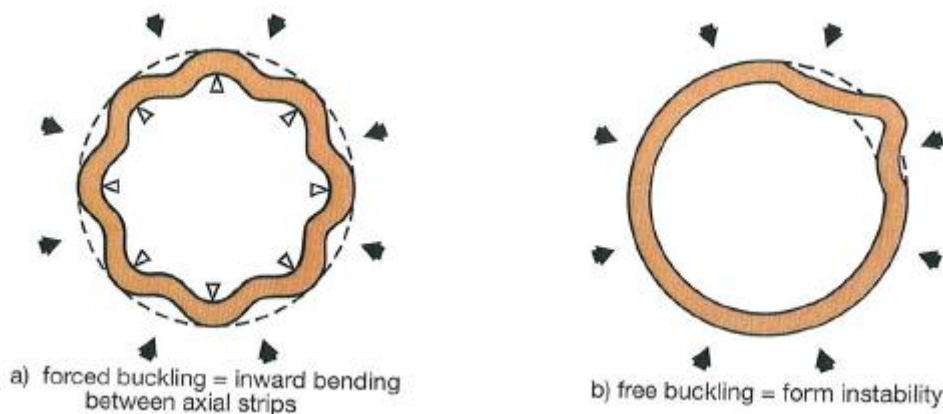


Figura 49

Así pues, para el cálculo del pandeo forzado se ha utilizado el modelo de viga delgada.

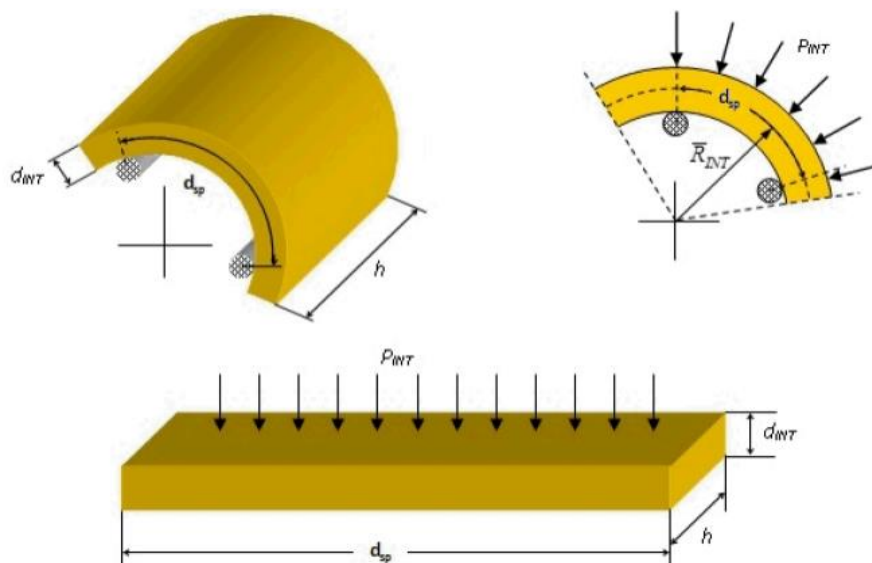


Figura 50

En este caso para el cálculo de la tensión entre los soportes se ha utilizado la siguiente expresión:

$$\sigma_{br} = (F_{dist,rad} \times L^2)/(2 \times b \times t^2)$$

Siendo:

- $F_{dist,rad}$ , la fuerza radial distribuida de forma lineal alrededor de toda la bobina en N/mm;  $F_{dist,rad} = F_{rad}/(\pi \times D_m)$
- $L$ , la distancia entre apoyos.
- $b$ , la altura axial eléctrica de la sección del devanado.
- $t$ , el espesor radial de la sección del devanado.

El modelo de pandeo forzado tiene lugar en las tres secciones radiales más exteriores del arrollamiento de baja tensión puesto que es en estas secciones donde se tienen soportes cada 55 mm pertenecientes a los canales de refrigeración.

Para cada una de las tres secciones radiales, de las que están dispuestas de soportes internos, de los canales de refrigeración, realizaremos los siguientes cálculos:

$$F_{dist,rad} = -352944.93/(\pi \times 771.48) = -145.623 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_{br} = (-145.623 \times 55^2)/(2 \times 1150 \times 18.04^2)$$

En las siguientes tablas aparecen todos los datos y resultados obtenidos para cada uno de los casos analizados. Utilizando siempre las fórmulas mostradas anteriormente.

TABLA DE ESFUERZOS DE DOBLADO TIPO VIGA (POS N)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$D_{Axial}$	$F_{radial}$	Dist. entre apoyos	Esfuerzos
BT Sup	-41565.173	610	654.08	632.04	1150	-20.933178	479.09288	<b>-4.30054</b>
BT Sup	-204391.56	684.08	723.44	703.76	1150	-92.446079	55	<b>-0.31393</b>
BT Sup	-352696.95	753.44	789.52	771.48	1150	-145.5215	55	<b>-0.58810</b>
BT Sup	-613757.58	819.52	873.88	846.7	1150	-230.7371	55	<b>-0.41078</b>
BT Inf	-41488.087	610	654.08	632.04	1150	-20.894355	479.09288	<b>-4.29257</b>
BT Inf	-204532.49	684.08	723.44	703.76	1150	-92.509822	55	<b>-0.31414</b>
BT Inf	-352944.93	753.44	789.52	771.48	1150	-145.62381	55	<b>-0.58851</b>
BT Inf	-611147.69	819.52	873.88	846.7	1150	-229.75594	55	<b>-0.4090</b>

Tabla 57

TABLA DE ESFUERZOS DE DOBLADO TIPO VIGA (POS +)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$D. Axial$	$F. radial$	Dist. entre apoyos	<b>Esfuerzos</b>
BT Sup	-44738.821	610	654.08	632.04	1150	-22.5315	479.09288	<b>-4.628907</b>
BT Sup	-203273.66	684.08	723.44	703.76	1150	-91.940458	55	<b>-0.312215</b>
BT Sup	-349376.57	753.44	789.52	771.48	1150	-144.15152	55	<b>-0.582564</b>
BT Sup		819.52	873.88	846.7	1150	-230.59358	55	<b>-0.410530</b>
BT Inf	-44622.849	610	654.08	632.04	1150	-22.473093	479.09288	<b>-4.616908</b>
BT Inf	-203221.12	684.08	723.44	703.76	1150	-91.91669	55	<b>-0.312134</b>
BT Inf	-349302.67	753.44	789.52	771.48	1150	-144.12103	55	<b>-0.582440</b>
BT Inf	-613365.16	819.52	873.88	846.7	1150	-230.58958	55	<b>-0.410523</b>

Tabla 58

TABLA DE ESFUERZOS DE DOBLADO TIPO VIGA (POS -)

Sección	Fuerza	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	$D. Axial$	$F. radial$	Dist. entre apoyos	<b>Esfuerzos</b>
BT Sup	-41113.237	610	654.08	632.04	1150	-20.705572	479.09288	<b>-4.253786</b>
BT Sup	-198835.65	684.08	723.44	703.76	1150	-89.933147	55	<b>-0.305398</b>
BT Sup	-342556.94	753.44	789.52	771.48	1150	-141.33777	55	<b>-0.571192</b>
BT Sup	-606469.11	819.52	873.88	846.7	1150	-227.99706	55	<b>-0.405908</b>
BT Inf	-41000.932	610	654.08	632.04	1150	-20.649013	479.09288	<b>-4.242166</b>
BT Inf	-198856.76	684.08	723.44	703.76	1150	-89.942696	55	<b>-0.305431</b>
BT Inf	-342610.6	753.44	789.52	771.48	1150	-141.35991	55	<b>-0.571282</b>
BT Inf	-605159.06	819.52	873.88	846.7	1150	-227.50456	55	<b>-0.405031</b>

Tabla 59

El estrés producido debido al pandeo libre "free buckling" se puede calcular con las fórmulas de Timoshenko sobre pandeo de barras curvadas y arcos.

Estas fórmulas dan la presión crítica que pudiera producir la flexión en el devanado, si la presión calculada en cada una de las secciones está por debajo de la crítica no se producirán deformaciones. Así pues, la fuerza radial distribuida crítica se define como:

$$F_{rad,crit} = 3 \times E \times J_x / R^3$$

Siendo:

- "E", el módulo de elasticidad del devanado, asumiendo como 11500 N/mm<sup>2</sup> correspondiente al del aluminio.
- "J<sub>x</sub>", el momento de inercia;  $J_x = H_w \times \frac{a^3}{12}$
- "R", el radio medio del devanado
- "H<sub>w</sub>", la altura del conductor
- "a", la anchura radial del arrollamiento.

Siendo además la presión de compresión crítica:

$$\sigma_{blk,crit} = F_{rad,crit}/H_w$$

Como en las secciones interiores de los devanados de baja tensión no hay apoyos internos que soporten los esfuerzos de compresión como es el caso de las secciones exteriores del devanado, ya que en estos casos sí que existen apoyos que separan una sección de otra dando lugar así a los canales de refrigeración.

Los únicos soportes que pueden hacer de apoyo para estas secciones interiores son cuatro perfiles "dog-bonne" que se colocan en el montaje del transformador para el centrado de las bobinas y para soportar en parte los esfuerzos de compresión. Estos perfiles están fabricados con fibra de vidrio.

Es pues en este caso donde se podría dar lugar el modelo de pandeo libre "free buckling". Para ello realizamos los siguientes cálculos:

Caso más crítico o esfuerzos de pandeo libre mayor obtenido:

$$J_x = 1150 \times \frac{22.04^3}{12} = 1026009.459 m^4$$
$$F_{rad,crit} = 3 \times 11500 \times \frac{1026009.459}{316.02^3} = 1121.57 N/mm^2$$
$$\sigma_{blk,crit} = \frac{1121.57}{1150} = 0.97 N/mm^2$$

La presión radial que actúa en esta sección del devanado se obtiene dividiendo la fuerza radial entre la superficie de la sección sobre la que actúa la fuerza.

$$\sigma_{blk,act} = \frac{44738.821}{\pi \times 1150 \times 632.04} = 0.01959 N/mm^2$$

Así pues, como podemos comprobar este valor está muy por debajo del valor crítico de libre pandeo, lo que nos indica que no sufrirá "free buckling".

En las siguientes tablas observamos los valores de los esfuerzos de pandeo libre que sufren cada una de las secciones interiores para cada uno de los casos analizados.

TABLA ESFUERZOS "FREE BUCKLING" POS N

ESFUERZOS FREE BUCKLING	Sección BT Sup.	Sección BT Inf.
Dimensión radial del bloque	22.04	22.04
Dimensión axial del bloque	1150	1150
Módulo de elasticidad del bobinado	11500	11500
Momento de inercia de la sección	1026009.46	1026009.46
Fuerza radial crítica	-41565.173	-41488.087
Radio medio del bloque	316.02	316.02
Fuerza radial crítica	1121.57095	1121.57095
Esfuerzo crítico para producir buckling	<b>0.97527909</b>	<b>0.97527909</b>
Presión radial en el bloque	<b>-0.0182028</b>	<b>-0.018169</b>

Tabla 60

TABLA ESFUERZOS "FREE BUCKLING" POS +

ESFUERZOS FREE BUCKLING	Sección BT Sup.	Sección BT Inf.
Dimensión radial del bloque	22.04	22.04
Dimensión axial del bloque	1150	1150
Módulo de elasticidad del bobinado	11500	11500
Momento de inercia de la sección	1026009.46	1026009.46
Fuerza radial crítica	-44738.821	-44622.849
Radio medio del bloque	316.02	316.02
Fuerza radial crítica	1121.57095	1121.57095
Esfuerzo crítico para producir buckling	<b>0.97527909</b>	<b>0.97527909</b>
Presión radial en el bloque	<b>-0.0195926</b>	<b>-0.0195418</b>

Tabla 61

TABLA ESFUERZOS "FREE BUCKLING" POS -

ESFUERZOS FREE BUCKLING	Sección BT Sup.	Sección BT Inf.
Dimensión radial del bloque	22.04	22.04
Dimensión axial del bloque	1150	1150
Módulo de elasticidad del bobinado	11500	11500
Momento de inercia de la sección	1026009.46	1026009.46
Fuerza radial crítica	-41113.237	-41001
Radio medio del bloque	316.02	316.02
Fuerza radial crítica	1121.57095	1121.57095
Esfuerzo crítico para producir buckling	<b>0.97527909</b>	<b>0.97527909</b>
Presión radial en el bloque	<b>-0.018</b>	<b>-0.018</b>

Tabla 62

Como podemos observar en los resultados obtenidos en las tablas anteriores, el esfuerzo crítico para que se produzca el pandeo libre, está muy lejos del valor obtenido, así pues, no existe riesgo de producirse "free buckling".

iv. **Tensión de compresión en los separadores radiales de los bobinados de tipo cinta ( $\sigma_{sp}^*$ )**

Los arrollamientos de tipo cinta están completamente recubiertos por resina epoxi, esta resina separa cada uno de los discos por los que está formado el arrollamiento trabajando como aislante y separador.

Cada uno de los discos por los que están formado estos arrollamientos produce una fuerza de tracción o de compresión entre estos. Esta fuerza es directamente soportada por estos separadores de resina.

La máxima presión que debe soportar la resina epoxi se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{sp,int} = \frac{F_{sp,int HV}}{\text{Area entre discos}} = \frac{F_{sp,int HV}}{\pi \times D_m \times a}$$

Donde:

- $F_{sp,HV}$  es la máxima fuerza de compresión entre discos.
- $D_m$  es el diámetro medio del devanado de alta tensión.
- "a" es la dimensión radial del devanado.

La máxima fuerza entre discos obtenida es la siguiente: 249147.1945 N ya calculada en el *Anexo III*. Así pues, se realizaremos los cálculos con todas las fuerzas entre discos obtenidas ya bien será de tracción o de compresión para cada uno de los casos de análisis y el valor más alto obtenido será el que compararemos con el valor límite o crítico.

Debemos analizar todas las fuerzas por el siguiente motivo, como las secciones entre discos varían dependiendo de la sección entre discos y dependiendo de los casos de análisis, esto hace que los valores no solo dependan de las fuerzas de compresión y tracción ya que las secciones también influyen en el cálculo de los esfuerzos que se producen entre los discos.

Así pues, en las siguientes tablas encontraremos todos los casos posibles a los que nos vamos a enfrentar y de ahí elegiremos el valor más alto como objeto de análisis y comparación.



TABLA DE ESFUERZOS ENTRE DISCOS (POS N)

Sección	D. Radial	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	F. inferior	F. superior	Sección resistente	Esfuerzo
D1-D2	81.67	998	1161.34	1079.67	94931.8988	-71410.1623	277015.112	<b>0.6004801</b>
D2-D3	81.67	998	1161.34	1079.67	109431.744	-85910.0073	277015.112	<b>0.70516641</b>
D3-D4	58.78	998	1115.56	1056.78	69521.9157	-46000.1791	195147.971	<b>0.5919718</b>
D4-D5	54.965	998	1107.93	1052.965	66665.4229	-43143.6863	181823.511	<b>0.6039324</b>
D5-D6	54.965	998	1107.93	1052.965	93573.1584	-70051.4218	181823.511	<b>0.89990881</b>
D6-D7	81.67	998	1161.34	1079.67	126113.583	-102591.846	277015.112	<b>0.82560632</b>
D7-D8	81.67	998	1161.34	1079.67	128370.391	-104848.655	277015.112	<b>0.84190008</b>
D9-D10	81.67	998	1161.34	1079.67	124651.195	-101129.458	277015.112	<b>0.81504814</b>
D10-D11	81.67	998	1161.34	1079.67	114509.811	-90988.0748	277015.112	<b>0.74182915</b>
D11-D12	58.78	998	1115.56	1056.78	57675.2442	-34153.5076	195147.971	<b>0.4705596</b>
D12-D13	54.965	998	1107.93	1052.965	52751.2213	-29229.4847	181823.511	<b>0.45088067</b>
D13-D14	54.965	998	1107.93	1052.965	76647.7433	-53126.0067	181823.511	<b>0.7137347</b>
D14-D15	81.67	998	1161.34	1079.67	94786.5734	-71264.8368	277015.112	<b>0.59943087</b>
D15-D16	81.67	998	1161.34	1079.67	73697.2335	-50175.4969	277015.112	<b>0.44716958</b>

Tabla 63

TABLA DE ESFUERZOS ENTRE DISCOS (POS +)

Sección	D. Radial	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	F. inferior	F. superior	Sección resistente	Esfuerzo
D1-D2	81.67	998	1161.34	1079.67	94931.8988	-71410.1623	277015.112	<b>0.6004801</b>
D2-D3	81.67	998	1161.34	1079.67	109431.744	-85910.0073	277015.112	<b>0.70516641</b>
D3-D4	81.67	998	1161.34	1079.67	69521.9157	-46000.1791	277015.112	<b>0.41702452</b>
D4-D5	81.67	998	1161.34	1079.67	66665.4229	-43143.6863	277015.112	<b>0.39640115</b>
D5-D6	81.67	998	1161.34	1079.67	93573.1584	-70051.4218	277015.112	<b>0.59067023</b>
D6-D7	81.67	998	1161.34	1079.67	126113.583	-102591.846	277015.112	<b>0.82560632</b>
D7-D8	81.67	998	1161.34	1079.67	128370.391	-104848.655	277015.112	<b>0.84190008</b>
D9-D10	81.67	998	1161.34	1079.67	124651.195	-101129.458	277015.112	<b>0.81504814</b>
D10-D11	81.67	998	1161.34	1079.67	114509.811	-90988.0748	277015.112	<b>0.74182915</b>
D11-D12	81.67	998	1161.34	1079.67	57675.2442	-34153.5076	277015.112	<b>0.33149365</b>
D12-D13	81.67	998	1161.34	1079.67	52751.2213	-29229.4847	277015.112	<b>0.29594308</b>
D13-D14	81.67	998	1161.34	1079.67	76647.7433	-53126.0067	277015.112	<b>0.46847173</b>
D14-D15	81.67	998	1161.34	1079.67	94786.5734	-71264.8368	277015.112	<b>0.59943087</b>
D15-D16	81.67	998	1161.34	1079.67	73697.2335	-50175.4969	277015.112	<b>0.44716958</b>

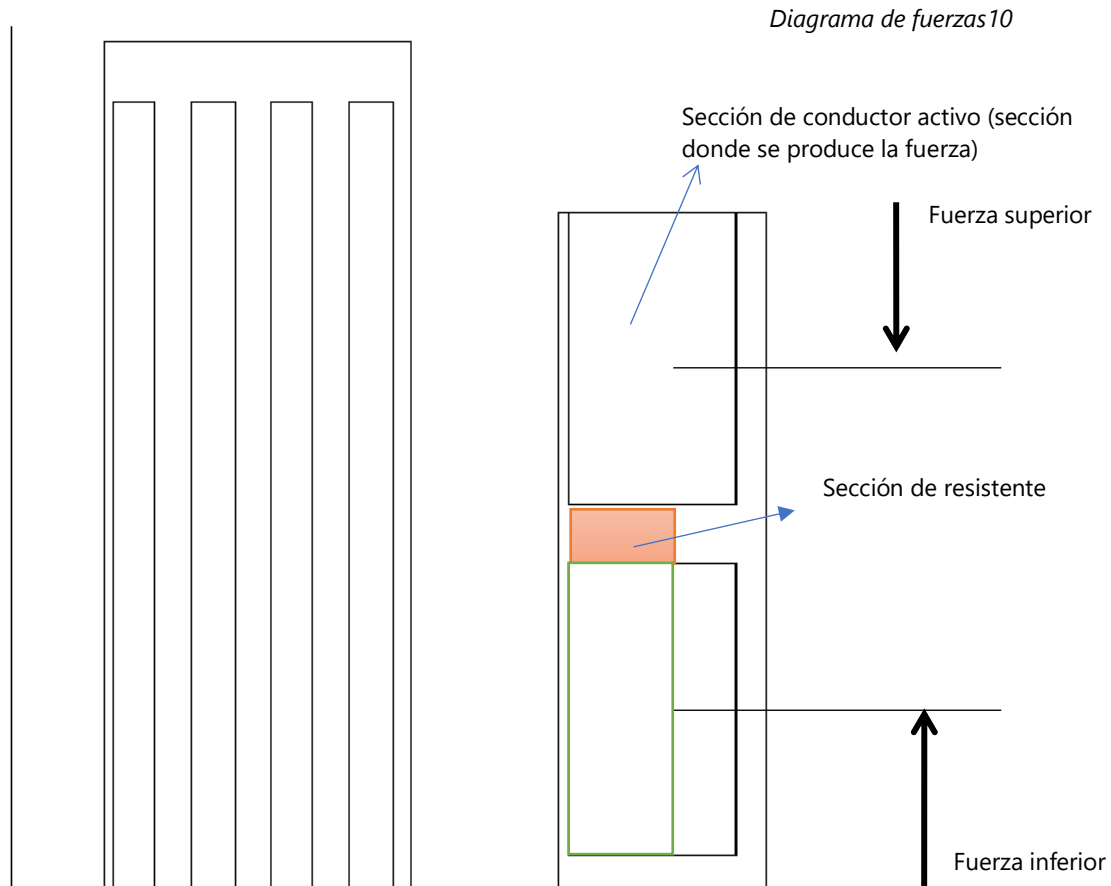
Tabla 64

TABLA DE ESFUERZOS ENTRE DISCOS (POS -)

Sección	D. Radial	$D_{int}$	$D_{ext}$	$D_m$	F. inferior	F. superior	Sección resistente	Esfuerzo
D1-D2	81.67	998	1161.34	1079.67	94931.8988	-71410.1623	277015.112	<b>0.6004801</b>
D2-D3	81.67	998	1161.34	1079.67	109431.744	-85910.0073	277015.112	<b>0.70516641</b>
D3-D4	32.075	998	1062.15	1030.075	69521.9157	-46000.1791	103797.139	<b>1.11296029</b>
D4-D5	32.075	998	1062.15	1030.075	66665.4229	-43143.6863	103797.139	<b>1.05792038</b>
D5-D6	32.075	998	1062.15	1030.075	93573.1584	-70051.4218	103797.139	<b>1.57638815</b>
D6-D7	81.67	998	1161.34	1079.67	126113.583	-102591.846	277015.112	<b>0.82560632</b>
D7-D8	81.67	998	1161.34	1079.67	128370.391	-104848.655	277015.112	<b>0.84190008</b>
D9-D10	81.67	998	1161.34	1079.67	124651.195	-101129.458	277015.112	<b>0.81504814</b>
D10-D11	81.67	998	1161.34	1079.67	114509.811	-90988.0748	277015.112	<b>0.74182915</b>
D11-D12	32.075	998	1062.15	1030.075	57675.2442	-34153.5076	103797.139	<b>0.88469444</b>
D12-D13	32.075	998	1062.15	1030.075	52751.2213	-29229.4847	103797.139	<b>0.78981662</b>
D13-D14	32.075	998	1062.15	1030.075	76647.7433	-53126.0067	103797.139	<b>1.25026326</b>
D14-D15	81.67	998	1161.34	1079.67	94786.5734	-71264.8368	277015.112	<b>0.59943087</b>
D15-D16	81.67	998	1161.34	1079.67	73697.2335	-50175.4969	277015.112	<b>0.44716958</b>

Tabla 65

Esquema representativo del cálculo de las secciones de contacto, de las fuerzas totales de compresión y/o tracción, así como todos los detalles de cálculo y de dimensiones necesarios para el cálculo de los esfuerzos.



También debemos tener muy en cuenta las fuerza que se produce sobre los tacos de soporte de ambas secciones axiales de los arrollamientos ya que estos deben soportar altas fuerzas de compresión. Del mismo modo que para los esfuerzos entre discos analizaremos este tipo de esfuerzos, teniendo en cuenta eso si la sección de apoyo, ya que en este caso solo tenemos 4 tacos donde se reparten todas las fuerzas de compresión que se generan en ambos arrollamientos.

Los valores de las fuerzas obtenidos en los tacos de soporte son los mostrados en la siguiente tabla.

<i>Fuerza (N)</i>	<i>POS N</i>	<i>POS +</i>	<i>POS -</i>
<i>Tacos MED (LV)</i>	85411.23664	52090.46372	72283.18043
<i>Tacos MED (HV)</i>	192428.3925	187554.3359	210250.3947
<i>Taco MED total</i>	277839.6291	239644.7997	282533.5751

*Tabla 66*

El valor máximo de compresión entre los devanados de baja tensión es de 85411.23 N y entre las secciones de alta tensión es de 210250.39 N.

Cada uno de los cuatro tacos por los que está formado el transformador, tiene dos bases de apoyo, una base para cada arrollamiento, es decir, en una de las bases se apoya el arrollamiento de baja tensión y en la otra base se apoya el arrollamiento de alta tensión.

Podemos obtener la presión de compresión ejercida en cada una de las bases de los tacos con la siguiente formula:

$$\sigma_{sp,ext} = \frac{F_{sp,ext}}{Areadecontactobloque}$$

Siendo el área de contacto; el ancho de cada uno de los tacos por el número de tacos en los que se apoyan las secciones de los arrollamientos y por la sección radial de cada arrollamiento (sección que se apoya en el taco).

A continuación, se muestran los cálculos de los esfuerzos de compresión para las fuerzas más críticas contenidas.

$$\sigma_{sp,ext,HV} = \frac{F_{sp,ext,HV}}{Areadecontactobloque} = \frac{210250.3947}{4 \times 87.3 \times 80} = 7.52 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sp,ext,LV} = \frac{F_{sp,ext,LV}}{Areadecontactobloque} = \frac{85411.2366}{4 \times 135 \times 80} = 1.977 \text{ N/mm}^2$$

Las siguientes tablas muestran el cálculo de todos los esfuerzos de compresión obtenidos en los tacos para cada uno de los casos analizados.

<i>ESFUERZOS ENTRE SECCIONES (POS N)</i>	<i>SECCION BT</i>	<i>SECCION AT</i>
<i>Numero de tacos</i>	4	4
<i>Dimensión radial entre secciones</i>	135	87.3
<i>Ancho de los tacos</i>	80	80
<i>Fuerza axial de la sección inferior</i>	43508.68074	107975.0645
<i>Fuerza axial de la sección superior</i>	-41902.5559	-84453.32794
<i>Sección resistente entre secciones</i>	43200	27936
<i>Esfuerzo de compresión entre secciones</i>	<b>1.977111959</b>	<b>6.888187015</b>

Tabla 67

<i>ESFUERZOS ENTRE SECCIONES (POS +)</i>	<i>SECCION BT</i>	<i>SECCION AT</i>
<i>Numero de tacos</i>	4	4
<i>Dimensión radial entre secciones</i>	135	87.3
<i>Ancho de los tacos</i>	80	80
<i>Fuerza axial de la sección inferior</i>	26105.54779	93714.99948
<i>Fuerza axial de la sección superior</i>	-25984.91593	-93839.33645
<i>Sección resistente entre secciones</i>	43200	27936
<i>Esfuerzo de compresión entre secciones</i>	<b>1.205797771</b>	<b>6.713714774</b>

Tabla 68

<i>ESFUERZOS ENTRE SECCIONES (POS -)</i>	<i>SECCION BT</i>	<i>SECCION AT</i>
<i>Numero de tacos</i>	4	4
<i>Dimensión radial entre secciones</i>	135	87.3
<i>Ancho de los tacos</i>	80	80
<i>Fuerza axial de la sección inferior</i>	36521.18104	109916.4819
<i>Fuerza axial de la sección superior</i>	-35761.99939	-100333.9128
<i>Sección resistente entre secciones</i>	43200	27936
<i>Esfuerzo de compresión entre secciones</i>	<b>1.673221769</b>	<b>7.526145284</b>

Tabla 69

**v. Tensión de compresión o tracción en las capas aislantes de los bobinados de tipo banda ( $\sigma_{pt}^*$ )**

Las fuerzas radiales que se producen en los devanados LV y HV comprimen las capas de aislante que se encuentra entre cada vuelta de conductor.

Cada una de las secciones radiales por las que están formados las bobinas del transformador producen una fuerza radial sobre las capas de aislante que produce una presión sobre toda la superficie de dicho aislante.

Las máximas fuerzas radiales se van a producir en dos puntos en concreto, para la sección de radial del devanado de baja tensión, al estar compuesto de 4 secciones radiales donde en cada

una de ellas las fuerzas radiales tienen dirección hacia el interior del arrollamiento, está claro que la máxima fuerza radial se va a producir en la capa de aislante más interna, es decir en el diámetro interior del arrollamiento. Para el caso del arrollamiento de alta tensión va a suceder justamente todo lo contrario ya que las fuerzas radiales generadas tienen direcciones opuestas, lo que nos hace indicar que el esfuerzo mayor se va a producir en la última capa del arrollamiento, es decir justamente en el diámetro exterior.

En la siguiente tabla se muestran las fuerzas radiales ya calculadas en el *Anexo III*

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	POS N	POS +	POS -
Fuerza radial LV superior	<b>-1212411.2582</b>	-1210764.8498	-1188974.9314
Fuerza radial LV inferior	-1210113.1880	-1210511.7939	-1187627.3536
Fuerza radial HV superior	1529240.2201	1601132.3744	1565398.0129
Fuerza radial HV inferior	1518821.6130	<b>1601247.2864</b>	1563844.9430

Tabla 70

Así pues, con las fuerzas de la tabla anterior y las siguientes expresiones, procedemos al cálculo de los esfuerzos que se producen sobre los aislantes del bobinado.

Para el caso de los arrollamientos de baja tensión:

$$\sigma_{pi,LV}^* = F_{rad} / (\pi \times D_{int} \times H_w)$$

Siendo:

- $F_{rad}$ , la fuerza radial del arrollamiento
- $D_{int}$ , el diámetro interior del arrollamiento
- $H_w$ , la altura eléctrica de la sección de arrollamiento

$$\sigma_{pi,HV}^* = F_{rad} / (\pi \times D_{ext} \times H_w)$$

Siendo:

- $F_{rad}$ , la fuerza radial del arrollamiento
- $D_{ext}$ , el diámetro exterior del arrollamiento
- $H_w$ , la altura eléctrica de la sección de arrollamiento

Estos son los resultados obtenidos de los esfuerzos más críticos calculados:

- Esfuerzos obtenidos en el arrollamiento de Baja Tensión:

$$\sigma_{pi,LV}^* = 1212411.2582 / (\pi \times 618 \times 1200) = 0.52039 \text{ N/mm}^2$$

- Esfuerzos obtenidos en el arrollamiento de Alta Tensión:

$$\sigma_{pi,HV}^* = 1601247.2864 / (\pi \times 1147 \times 960) = 0.4628 \text{ N/mm}^2$$

vi. **Tensión de compresión en estructuras de aislamiento ( $\sigma_{es}^*$ )**

Tanto los tacos superiores como los inferiores son los encargados de soportar las bobinas del transformador estos constan de unas estructuras de aislamiento, fabricadas de un material de silicona, estas estructuras se colocan a ambos lados de los soportes, formando una especie de sándwich y que su principal función es la de absorber las dilataciones térmicas que sufren las bobinas del transformador.

Estas estructuras aislantes, tienen que ser capaces de soportar sin romperse o sin provocar la rotura de los tacos de soporte las tensiones provocadas por; el propio transformador en funcionamiento convencional, en caso de producirse un cortocircuito o simplemente el peso de las bobinas del transformador

Mediante las siguientes expresiones calculamos las tensiones que deberán soportar estas estructuras de aislamiento.

$$\sigma_{es}^* = (F_{ax} + \text{Peso arrollamiento}) / \text{Area}$$

En el *Anexo III* hemos calculado las fuerzas axiales producidas por los arrollamientos sobre los tacos de soporte, a continuación, se muestra la tabla de los valores obtenidos.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	POS N	POS +	POS -
Fuerza axial en los tacos superiores LV	<b>1606.125 N</b>	120.63 N	759.19 N
Fuerza axial en los tacos inferiores LV	0	0	<b>0</b>
Fuerza axial en los tacos superiores HV	<b>23521.744 N</b>	0 N	9582.567 N
Fuerza axial en los tacos inferiores HV	0	124.33 N	<b>0</b>

Tabla 71

Además, debemos calcular los pesos de cada una de las secciones de los arrollamientos para cada uno de los casos analizados.

Secciones	Pesos (Kg)	Peso total devanado (Kg)
BT Sup.	1860.1	3720.2
BT Inf.	1860.1	
AT Sup.	3014.7	6029.4
AT Inf.	3014.7	

Tabla 72

$$\sigma_{es LV sup}^* = 1606.25 \text{ N} / (4 \times 80 \times 135) = 0.0372 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es LV inf}^* = 0 \text{ N} + (3720.2 \times 9.81) / (4 \times 80 \times 135) = 0.845 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es HV sup}^* = 23521.744 \text{ N} / (4 \times 80 \times 87.5) = 0.84 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{es HV inf}^* = 124.33 \text{ N} + \frac{6029.4 \times 9.81}{(4 \times 80 \times 87.5)} = 2.11 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

vii. **Esfuerzos de compresión en los tacos de soporte de las bobinas ( $\sigma_{pr}^*$ )**

Para el caso de los esfuerzos a los que son sometidos los tacos de soporte, hemos simulado a los esfuerzos que van a estar sometidas estas estructuras, que son una de las piezas más importantes del transformador y las que tienen que soportar mayores esfuerzos.

En primer lugar, hemos diseñado la geometría de dichos tacos, que para el diseño de este transformador coincide tanto para los tacos inferiores como para los superiores. El diseño de la geometría en el programa de diseño y que después realizaremos la simulación esta simplificada en comparación con la geometría real de los tacos, pero así de esta manera conseguimos discretizar las piezas de análisis.

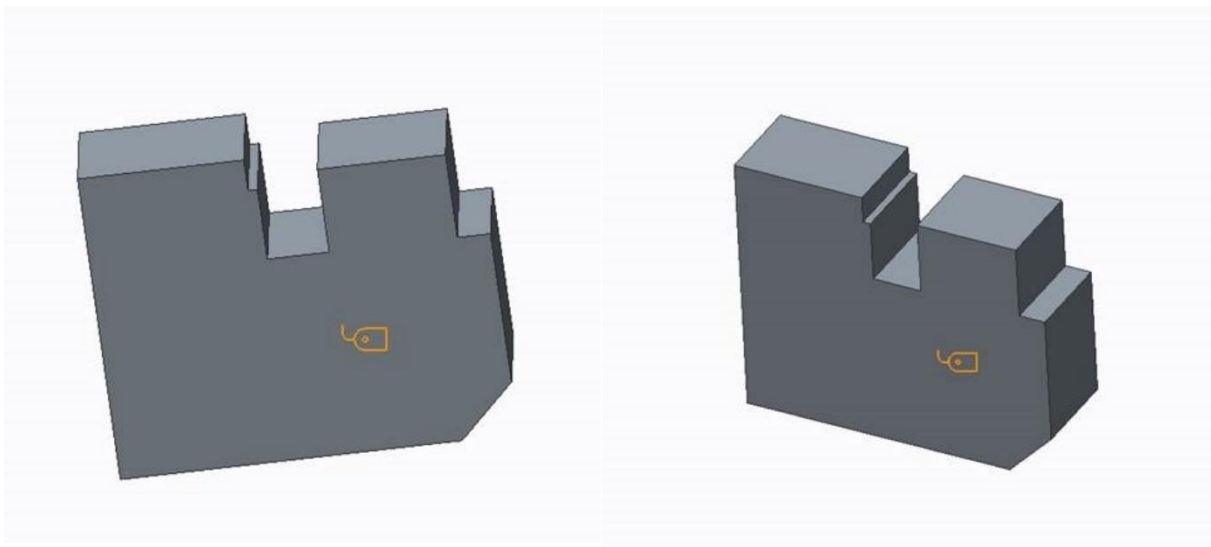


Figura 51

También es muy importante definir el eje de simetría de la pieza.

En segundo lugar, definiremos el material de diseño, que este caso será el GPO3 ya mencionado y el Anexo I, donde también se ha explicado al detalle todas sus características y propiedades.

En la siguiente imagen aparecen todos los datos necesarios y utilizados en el programa de diseño para un buen análisis de la pieza

Name		GPO3
Description		Taco
Density		1.8 g/cm <sup>3</sup>
<b>Structural</b>   Thermal   Miscellaneous   Appearance   User Defined		
Symmetry		Isotropic
Stress-Strain Response		Linear
Poisson's Ratio	0.3	
Young's Modulus	10750	MPa
Coeff. of Thermal Expansion	3e-05	/C
Mechanisms Damping		sec/mm
<b>Material Limits</b>		
Tensile Yield Stress	78	MPa
Tensile Ultimate Stress *	78	MPa
Compressive Ultimate Stress	-187	MPa
* Required Fields		

Figura 52

Uno de los principales pasos es el mallado de la pieza. En este caso se ha usado una malla tetraédrica. Debemos saber que la malla hexaédrica nos proporciona unos resultados más exactos que la malla tetraédrica, sin embargo, como se trata de una pieza de geometría bastante sencilla podemos utilizar la malla tetraédrica que se adapta mejor a la geometría de figura siendo así pues posible reducir el tamaño de la malla y con ello conseguir resultados muy similares que si lo hubiéramos hecho con la malla hexaédrica.

El uso de una malla hexaédrica para una pieza de pequeñas dimensiones como es esta nos dificulta el mallado, siendo necesarios equipos de simulación más avanzados, es por eso por lo que se ha utilizado este tipo de malla.

AutoGEM Summary			
Entities Created:			
Beam:	0	Edge:	39020
Tri:	0	Face:	61218
Quad:	0	Face-Face Link:	0
Tetra:	28904	Edge-Face Link:	0
Wedge:	0		
Brick:	0		
Criteria Satisfied:			
Angles (Degrees):			
Min Edge Angle:	5.03	Max Edge Angle:	169.15
Max Aspect Ratio: 9.62			
Elapsed Time: 0.27 min		CPU Time: 0.28 min	
Close			

Figura 53

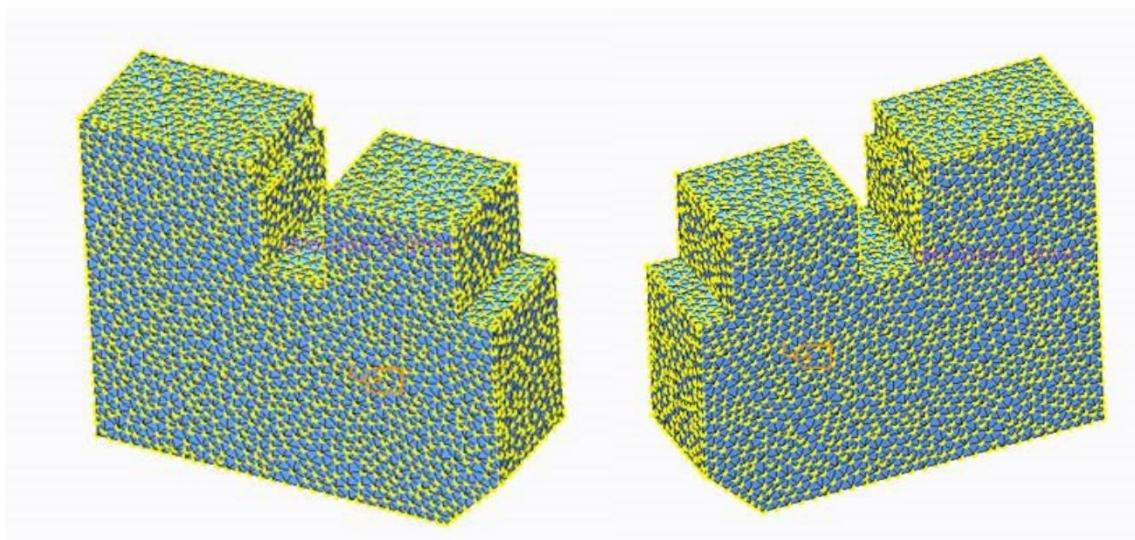


Figura 54

El siguiente paso sería definir las condiciones de contorno. Es importante que a la hora de definir las condiciones de contorno restrinjamos la pieza en todas las direcciones, pues sino obtendremos infinitas soluciones.



En primer lugar, supondremos que el movimiento está completamente restringido en cualquiera de las tres direcciones en la zona de apoyo en brida. A continuación, colocaremos las fuerzas a las que va a estar sometido el taco que, en el caso de los tacos inferiores, serán las fuerzas que actúan sobre el mas el propio peso de las bobinas, mientras que en el caso de los tacos superiores únicamente serán las fuerzas que se generan en el cortocircuito.

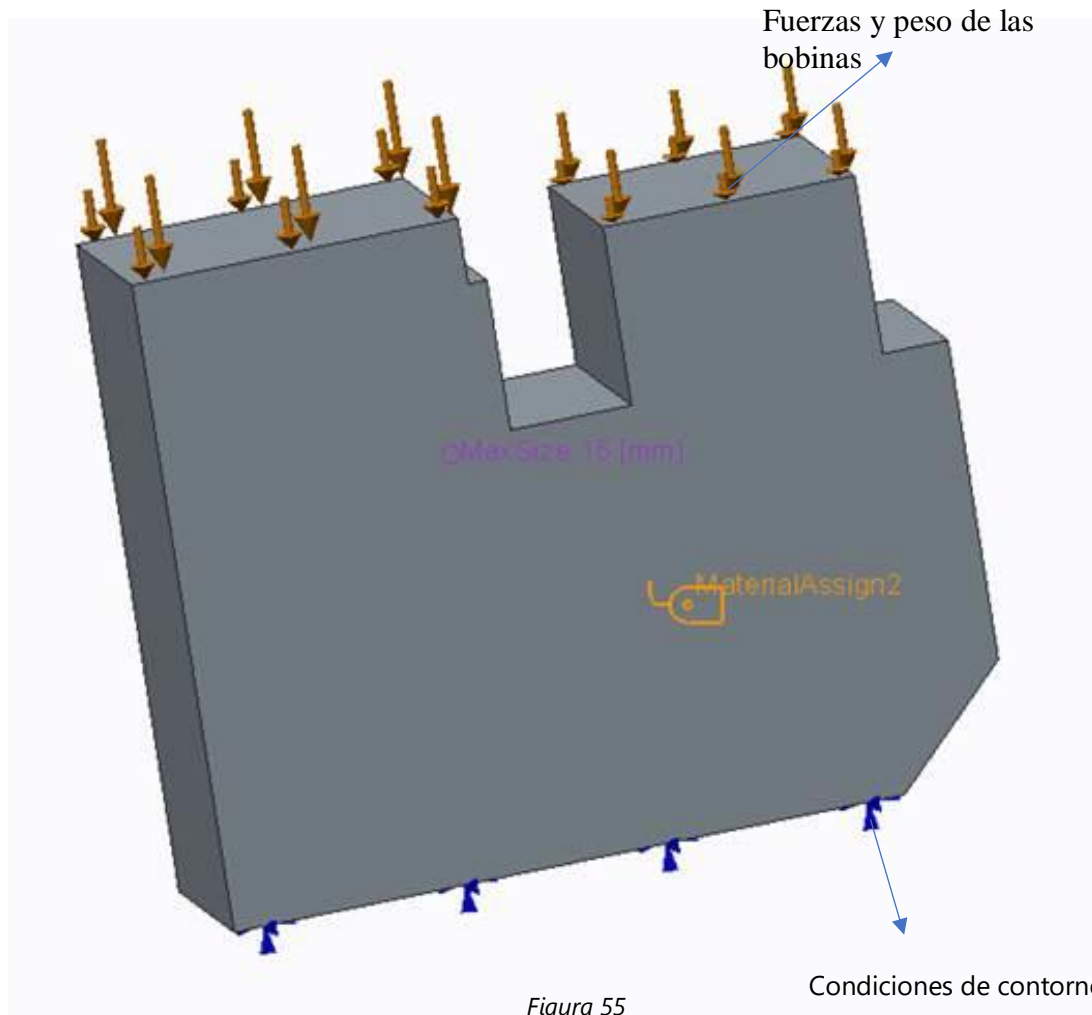


Figura 55

Una vez realizados todos los pasos anteriores solo queda analizar los resultados obtenidos.

Es muy importante saber las propiedades del material a la hora de analizar los resultados.

Análisis a partir de Von Mises:

Mediante las tensiones de Von Mises los resultados obtenidos sabemos que no van a ser 100% exactos ya que sabemos que Von Mises se utiliza para materiales, isotrópicos, elástico lineales, simétricos y homogéneo, como bien sabemos a partir de las explicaciones en el Anexo 1 el GPO3 no es un material elástico lineal y además desconocemos la dirección de las fibras, y es por esto por lo que los cálculos obtenidos mediante el criterio de Von Mises no son completamente aceptables, pero sí que nos sirven para hacernos una idea de los resultados que vamos a obtener.

RESULTADOS OBTENIDOS (VON MISES)

TACOS INFERIORES

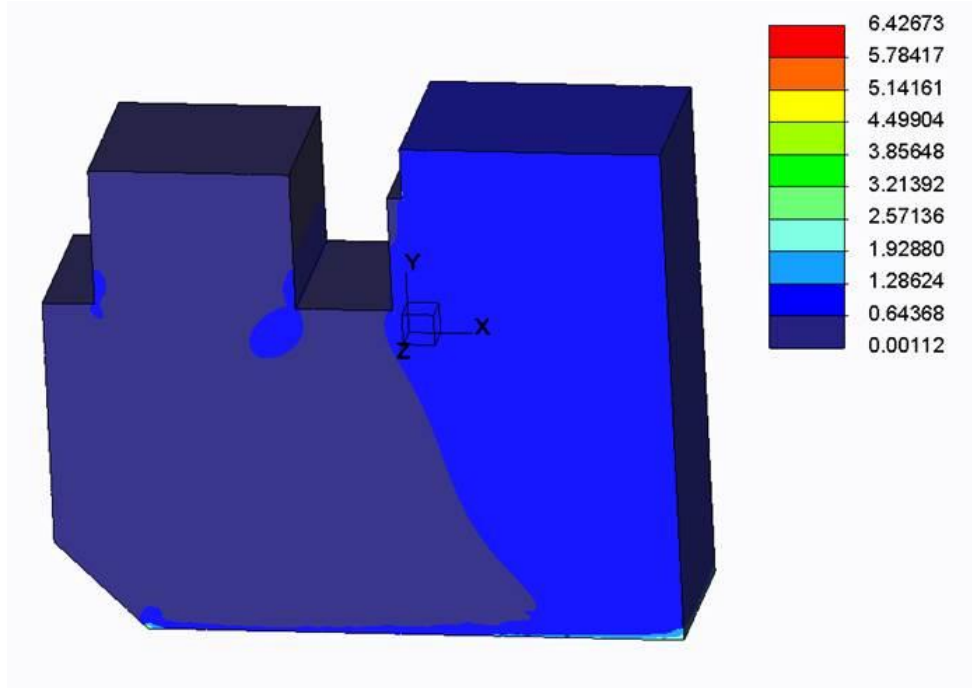


Figura 56

TACOS SUPERIORES

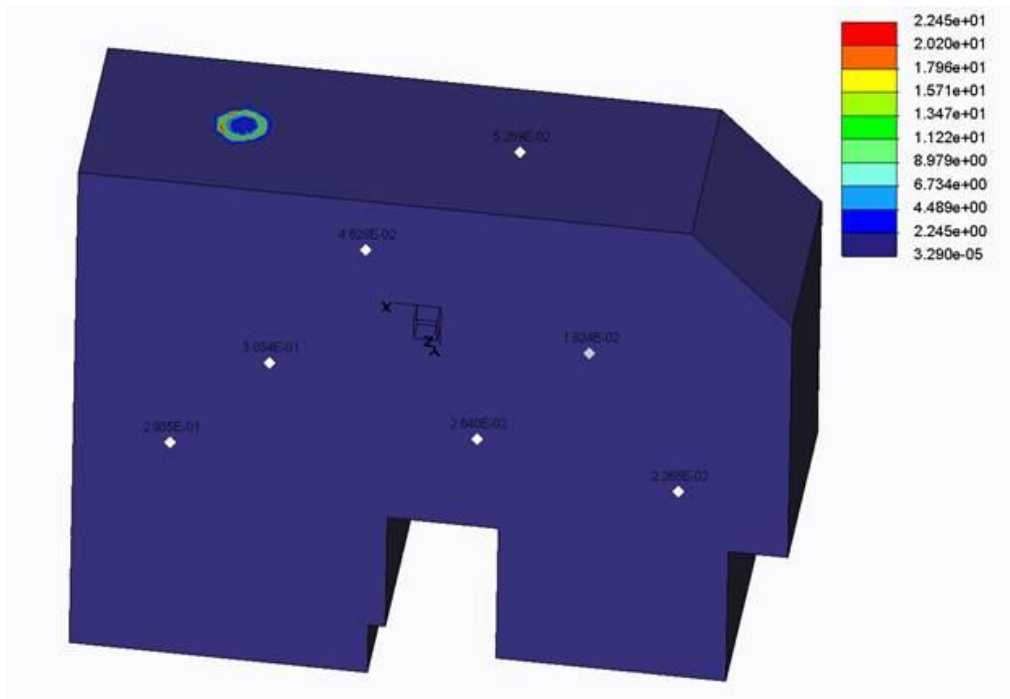


Figura 57

Además de por Von Mises también analizaremos los esfuerzos por las tensiones máximas principales y por las tensiones mínimas principales.

Tensiones máximas principales: analizan los esfuerzos a tracción a los que ha sido sometida la pieza, en las siguientes imágenes aparecen los resultados obtenidos de las simulaciones tanto para los tacos inferiores, como para los tacos superiores.

TACO INFERIOR

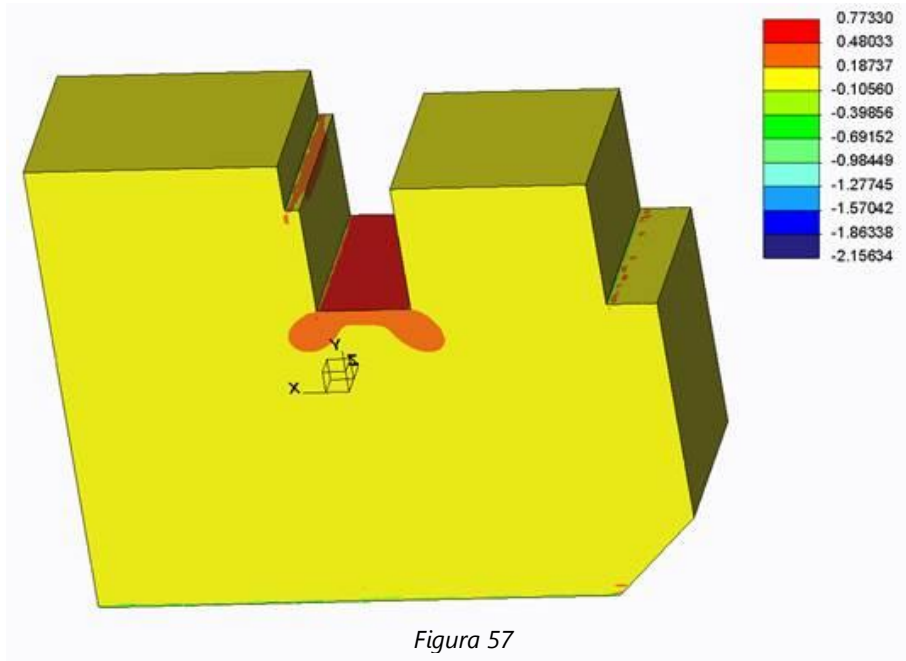


Figura 57

Cómo podemos ver en la leyenda de la imagen mostrada la tensión máxima principal es de 0.773 MPa

TACO SUPERIOR

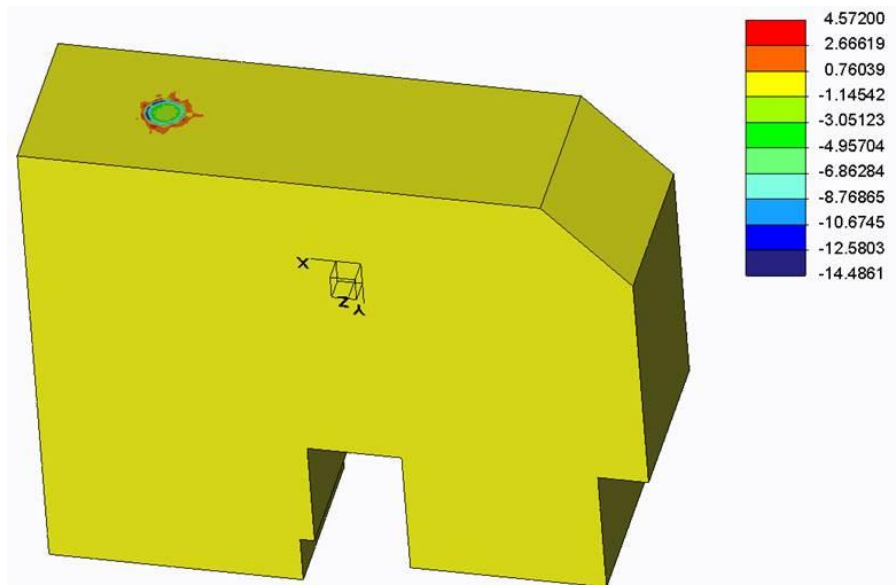
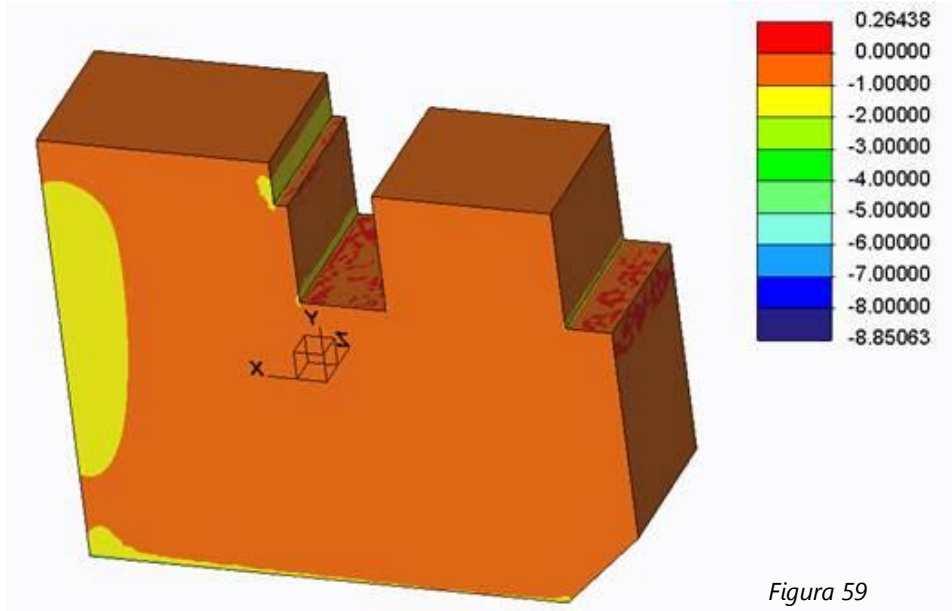


Figura 58

Como podemos ver en la leyenda de la imagen la tensión máxima principal es de 4.57MPa

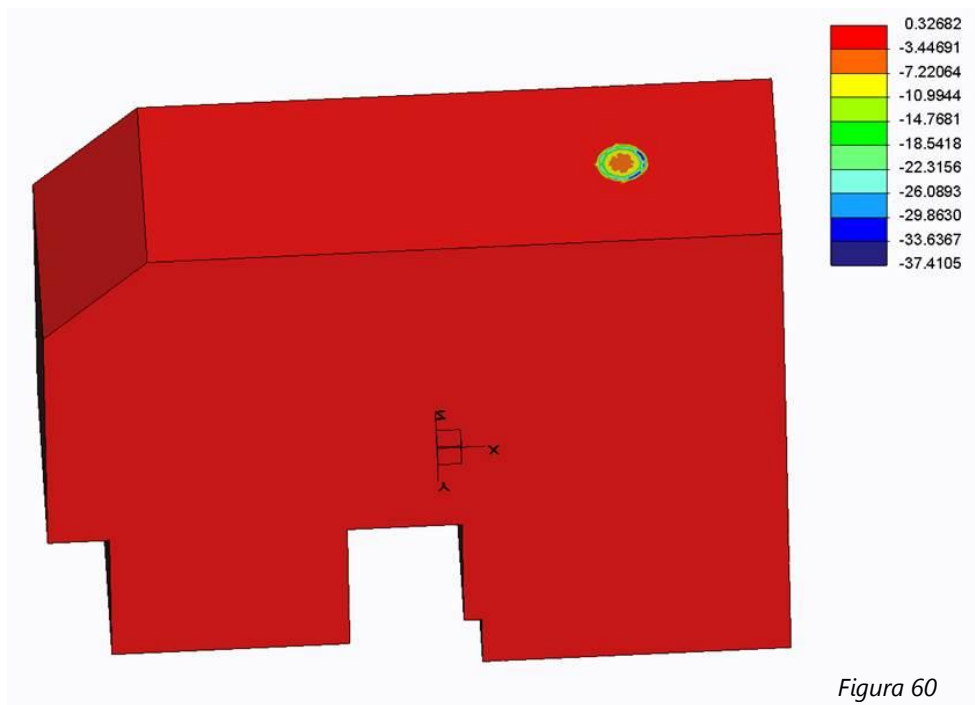
Tensiones mínimas principales: analizan los esfuerzos de compresión a los que ha sido sometida la pieza, en las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos tanto para los tacos inferiores como para los tacos superiores.

TACO INFERIOR



Como podemos apreciar en la leyenda de la imagen, la tensión mínima principal es de -8.85 MPa.

TACO SUPERIOR



Como podemos apreciar en la leyenda de la imagen, la tensión mínima principal es de -37.4105 MPa

Como podemos apreciar en las imágenes de los tacos superiores, estos no son apoyados en toda su superficie superior, sino que se apoyan en dos puntos de 25 mm de diámetro cada uno, correspondientes a la sección de dos tornillos que son los que hacen de apoyo para los tacos.

Esto es hace que las tensiones que se produzcan sean mayores ya que la sección de apoyo es menor y las fuerzas se concentran en esos puntos.

Como podemos observar en la siguiente imagen se muestra el apoyo de los tacos en los tornillos con el transformador completamente ya montado.

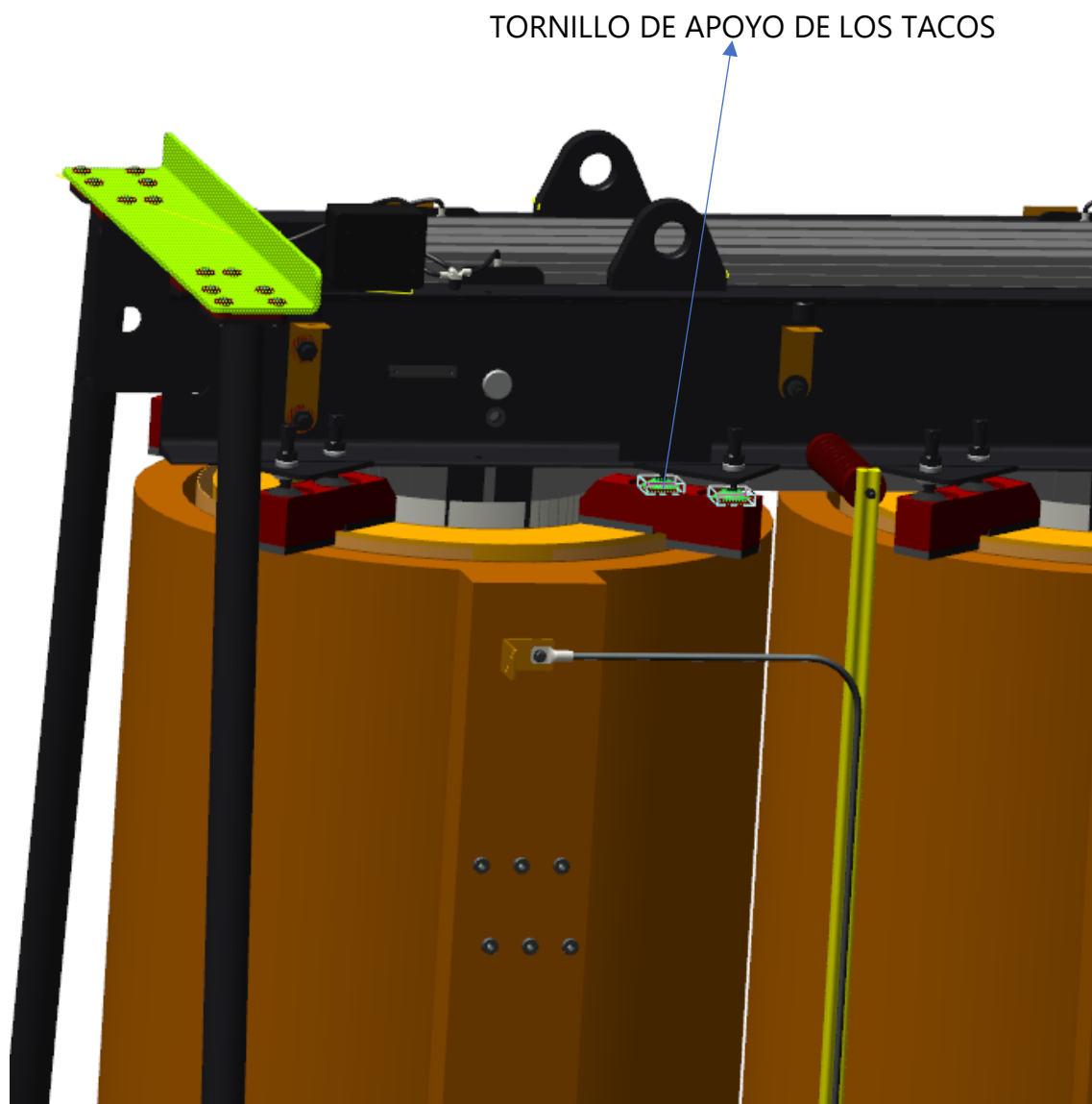


Figura 61

**viii. Tensión de tracción en las pletinas del núcleo ( $\sigma_{rod}$ )**

Tal y como se ha explicado en el Anexo III, las fuerzas axiales provocan una serie de esfuerzos de tracción que finalmente son soportados por las pletinas del núcleo, cuya función es esta, la de soportar dichos esfuerzos para que el núcleo magnético no se vea afectado.

Las principales medidas y dimensiones de estas pletinas de acero son las siguientes: 160x12 mm con una ranura de 20 mm para evitar que se originen corrientes por el interior de estas pletinas que puedan afectar al funcionamiento del transformador. En el *Anexo VII* se muestran los planos de las siguientes pletinas, así como también la cantidad de estas necesarias.

En la siguiente tabla se muestran las fuerzas axiales que deben soportar en cada arrollamiento, estas fuerzas han sido calculadas en el Anexo III. Son las fuerzas transmitidas de las bobinas a los tacos de soporte y que finalmente provocan un esfuerzo de tracción que debe ser soportado por estas pletinas de acero.

Valor de FUERZA (N)	Tipo de conexión		
	POS N	POS +	POS -
Fuerza axial TOTAL en los tacos superiores	<b>25127.869 N</b>	120.63 N	10341.757 N
Fuerza axial TOTAL en los tacos inferiores	0	124.33 N	0
Fuerza axial TOTAL	<b>25127.869 N</b>	244.96 N	10341.757 N

Tabla 73

Así pues, a partir de las siguientes fuerzas, podemos calcular los esfuerzos de tracción que deberán soportar cada una de estas pletinas.

$$\sigma_{rod} = F_{axial} / (N^{\circ} de pletinas \times Seccion)$$

En las siguientes tablas observamos todos los valores obtenidos de los esfuerzos de tracción para cada uno de los casos analizados.

ESFUERZOS DE TRACCIÓN PLETINAS NÚCLEO (POS N)	
Sección de las pletinas	3360
Fuerza axial superior	25127.8614
Fuerza axial inferior	0
Fuerza total	25127.8614
Esfuerzo de tracción en las pletinas	<b>7.47853018</b>

Tabla 74

ESFUERZOS DE TRACCIÓN PLETINAS NÚCLEO (POS +)	
Sección de las pletinas	3360
Fuerza axial superior	120.631862
Fuerza axial inferior	-124.336963
Fuerza total	244.968825
Esfuerzo de tracción en las pletinas	<b>0.07290739</b>

Tabla 75

<i>ESFUERZOS DE TRACCIÓN PLETINAS NÚCLEO (POS N)</i>	
<i>Sección de las pletinas</i>	3360
<i>Fuerza axial superior</i>	10341.7508
<i>Fuerza axial inferior</i>	0
<i>Fuerza total</i>	10341.7508
<i>Esfuerzo de tracción en las pletinas</i>	<b>3.07790202</b>

Tabla 76

A continuación, se muestra el cálculo del esfuerzo de tracción mayor, obtenido en las pletinas del núcleo.

$$\sigma_{rod} = 25127 \text{ N} / (2 \times (160 - 20) \times 12) = 7.478 \text{ N/mm}^2$$

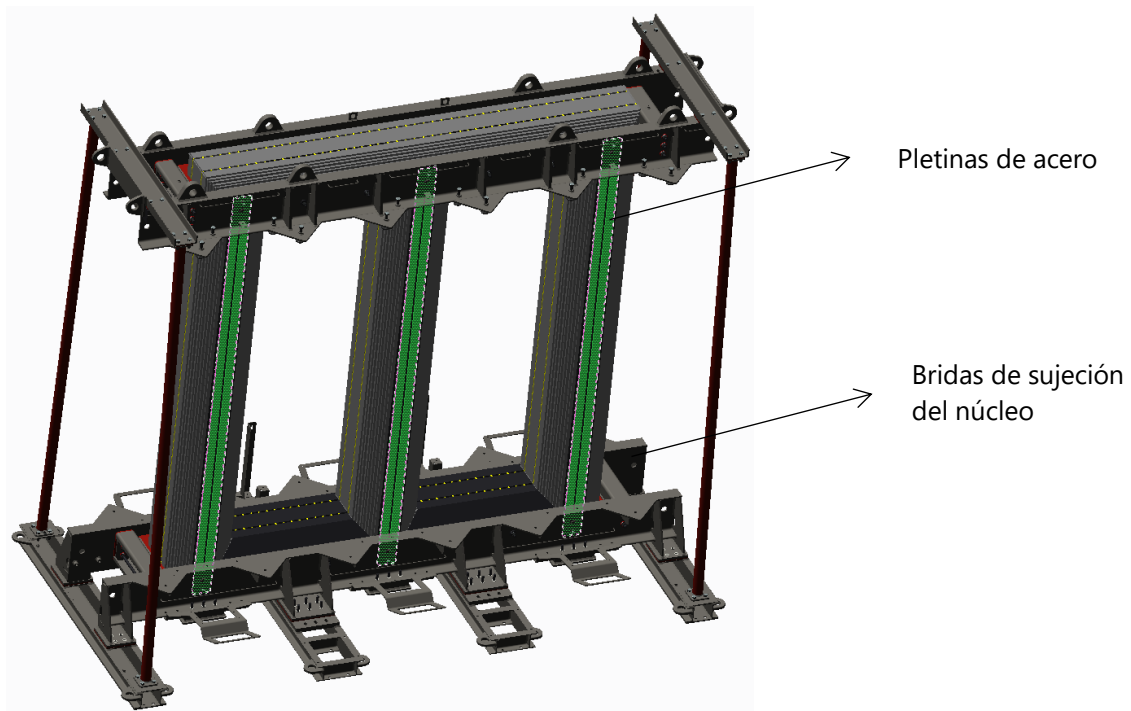


Figura 62

## **ANEXO V**

### **(CRITERIOS DE EVALUACION DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO)**

- *FUERZAS PERMITIDAS Y TENSIONES LÍMITE*
  - Esfuerzo medio de tracción en los devanados exteriores
  - Tensión media de compresión en los devanados de baja tensión
  - Estrés debido a la flexión radial de los conductores en la zona de los espaciadores axiales.
  - Tensión de compresión en los separadores radiales entre las secciones de los arrollamientos.
  - Tensión de compresión en los separadores radiales dentro de los arrollamientos (entre discos).
  - Tensión de compresión en las capas aislantes de los bobinados de tipo capa.
  - Tensión de compresión en las estructuras aislantes tacos superiores.
  - Tensión de compresión en las estructuras aislantes tacos inferiores.
  - Tensión de compresión en los tacos de soporte inferiores.
  - Tensión de compresión en los tacos de soporte superiores.
  - Tensión de tracción en las pletinas del núcleo
  
- *COMPARATIVA DE FUERZAS Y ESFUERZOS EN EL TRANSFORMADOR*



## I. EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO

### a. FUERZAS PERMITIDAS Y TENSIONES LÍMITE

El procedimiento que he seguido es el siguiente; en primer lugar, un análisis de devanado y de las estructuras de aislamiento, así como la disposición de sujeción del transformador. Una vez que se ha comprobado y analizado que estas estructuras son consistentes se pasa a realizar una comparación de los valores de fuerzas y tensiones obtenidos con los valores críticos permitidos para comprobar que el transformador es capaz de soportar los esfuerzos a los que se va a tener que enfrentar.

Como resultado final se considera que el transformador diseñado es capaz de soportar los efectos del cortocircuito cuando los valores de las fuerzas y esfuerzos obtenidos no exceden el valor máximo o crítico de las condiciones que se muestran en la tabla A.1 de la norma IEC-60076-5, (Tabla correspondiente a los transformadores de tipo núcleo).

- category I: 25 kVA to 2 500 kVA;
- category II: 2 501 kVA to 100 000 kVA;
- category III: above 100 000 kVA.

La norma IEC60076-5, en el Anexo A3.3.3.2, da una guía para evaluar las fuerzas y esfuerzos límite basada en la experiencia con antiguos transformadores. Bajo la debida consideración de las condiciones de contorno, como las propiedades de los materiales, tolerancias, diseños mecánicos y procesos de producción.

Estas guías están basadas en los transformadores de aceite y adaptadas para los transformadores de tipo seco, de acuerdo con la experiencia de ABB y los materiales usados.

### v. ESFUERZO MEDIO DE TRACCION EN LOS DEVANADOS EXTERIORES

La norma recomienda que los esfuerzos calculados no Sobrepasen el 90% del valor  $R_{p0,2}$ . El esfuerzo de prueba  $R_{p0,2}$  es el esfuerzo de tracción que produce una elongación igual al 0.2% de la longitud, cuando todavía se está aplicando la carga.

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0.9 \times R_{p0,2}$$

Sin embargo, en ABB, en la sección de transformadores de tipo seco se usa siempre el 80% del valor  $R_{p0,2}$  para conductores de aluminio y de cobre. Esta condición más restrictiva se está usando en la empresa para evaluar el esfuerzo medio de tracción de los devanados.

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0.8 \times R_{p0,2}$$

Para los transformadores de aluminio en el devanado de alta tensión (como es el caso de este transformador), de acuerdo con las órdenes de fabricación de fabrica, debe tener un límite elástico  $R_{p0,2}$  entre 35 y 50 N/mm<sup>2</sup>.

Tomamos el valor mínimo aceptado en fabrica (35 N/mm<sup>2</sup>):

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0.8 \times R_{p0,2} = 0.8 \times 35 \text{ N/mm}^2 \leq 28 \text{ N/mm}^2$$

Con el valor calculado en el *Anexo IV* (3.63 N/mm<sup>2</sup>), podemos observar que está claramente por debajo del valor mínimo aceptado en fabrica que en este caso es el calculado de 28 N/mm<sup>2</sup>.

$$\sigma_{t,act}^* = 3.63 \text{ N/mm}^2 \leq 28 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{t,permitida}^*$$

Así que como podemos observar en los cálculos, esta condición es considerada como **ACEPTADA**.

vi. TENSIÓN MEDIA DE COMPRESIÓN EN LOS DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN

La norma para este caso recomienda que para conductores regulares la tensión de compresión media calculada sea inferior al 35% del valor  $R_{p0,2}$ .

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0.35 \times R_{p0,2} = 0.35 \times 35 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

La tensión de compresión calculada en el apartado *Anexo IV* para los devanados de baja tensión es la siguiente dependiendo de la sección radial de la que se trate.

$$\sigma_{c,1}^* = 0.0183 \times \frac{626.85}{2 \times 11 \times 1150} = 0.4534 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c,2}^* = 0.0808 \times \frac{699.64}{2 \times 12 \times 1150} = 1.812 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c,3}^* = 0.1277 \times \frac{764.58}{2 \times 11 \times 1150} = 3.414 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c,4}^* = 0.2047 \times \frac{829.52}{2 \times 12 \times 1150} = 5.442 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c,act1}^* = 0.4534 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,act2}^* = 1.812 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,act3}^* = 3.414 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,act4}^* = 5.442 \text{ N/mm}^2 \leq 12.25 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar con los cálculos realizados es que ninguno de los valores previamente calculados supera el valor mínimo permitido, lo que nos indica que esta condición se puede considerar como **ACEPTADA**.

vii. ESTRÉS DEBIDO A LA FLEXIÓN RADIAL DE LOS CONDUCTORES EN LA ZONA DE LOS ESPACIADORES AXIALES.

Los esfuerzos de pandeo a los que son sometidas cada una de las secciones radiales de los arrollamientos de baja tensión de transformador han sido calculados en el *Anexo IV*.

Para la sección interior del devanado, la que hemos definido como modelo de libre pandeo "free buckling" ya que no tiene apoyos o soportes como el resto de las secciones que constan de los soportes de los canales de refrigeración cada 55 mm, hemos obtenido una presión límite de colapso del valor de,  $0.97 \text{ N/mm}^2$ , pero sin embargo el valor máximo calculado para nuestro diseño es de  $0.0196 \text{ N/mm}^2$ .

La norma IEC recomienda que el valor calculado debe de estar por debajo del valor 90% del valor crítico, sin embargo, basados en la experiencia de la empresa, ABB siempre utiliza un valor de un 80%.

Así pues, si nos basamos en el criterio de la norma IEC:

$$\sigma_{blk,act} = 0.0196 \text{ N/mm}^2 \leq 0.9 \times 0.97 \text{ N/mm}^2$$

Y basando nos en el criterio de ABB:

$$\sigma_{blk,act} = 0.0196 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \times 0.97 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar para cualquiera de los dos criterios que utilicemos, cumplimos la normativa, por lo tanto, esta condición es **ACEPTADA**.

viii. TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LOS SEPARADORES RADIALES ENTRE LAS SECCIONES DE LOS ARROLLAMIENTOS.

En el espacio que separa las dos secciones axiales de los arrollamientos, este espacio está ocupado por unos tacos que soportan los esfuerzos de compresión entre las dos secciones.

Estos tacos están formados por dos materiales colocados de la siguiente manera, capa de una goma de silicona-GPO3-otra capa de goma de silicona. De los dos materiales empleados en la siguiente estructura, la goma de silicona es el material más débil, y de acuerdo con la experiencia de casos anteriores, esta debe trabajar por debajo de  $10 \text{ N/mm}^2$ .

Con los cálculos obtenidos en el *Anexo IV*, y con un factor de seguridad de un 80% procedemos a calcular las siguientes comprobaciones.

$$\sigma_{sp,ext,HV} = 7.5089 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sp,ext,LV} = 2.037 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 8 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar, aunque los valores de diseño calculados estén próximos a los valores críticos, aun así, todavía tenemos un margen de seguridad, de esta forma podemos decir que cumple con la normativa. **ACEPTADA**

Este el caso más típico de fallo, así pues, también tiene una solución fácil, que sería aumentar el número de tacos de soporte entre las secciones de los arrollamientos, en lugar de 4 colocaríamos 6 tacos así pues la fuerza de compresión quedaría distribuida entre más puntos de soporte y en una superficie más grande lo que haría que los esfuerzos disminuyeran considerablemente.

ix. TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LOS SEPARADORES RADIALES DENTRO DE LOS ARROLLAMIENTOS (ENTRE DISCOS).

Los esfuerzos de compresión que debe de soportar la resina que se encuentra entre los discos que forman el arrollamiento de alta tensión han sido calculados en el *Anexo IV* también lugar donde se muestran todos los resultados para cada uno de los casos, y observamos pues, que el valor más alto obtenido de tensión entre los separadores radiales de resina que se encuentran entre los discos del bobinado de alta tensión es de  $1.576 \text{ N/mm}^2$ .

Tal como hemos detallado en el *Anexo I* donde aparecen las propiedades las características de los materiales, la resina epoxi tiene un límite elástico de  $60 \text{ N/mm}^2$ .

ABB recomienda que los esfuerzos de compresión entre discos no sean superiores al 50% del valor indicado de las características de la resina, es así pues que la condición para ser aceptado como admisible será la siguiente:

$$\sigma_{sp,int} \leq 30 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sp,int} = 1.576 \text{ N/mm}^2 \leq 0.5 \times 60 \text{ N/mm}^2 = 30 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos ver los valores obtenidos son los correctos es por eso por lo que esta condición se considera como **ACEPTADA**.

x. TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LAS CAPAS AISLANTES DE LOS BOBINADOS DE TIPO CAPA.

Los esfuerzos de compresión que se producen en las capas aislantes de los devanados de tipo banda han sido calculados en el *Anexo IV* lugar donde podemos comprobar que los valores máximos obtenidos son los siguientes;

Para el arrollamiento de baja tensión el valor máximo obtenido es de  $0.52039 \text{ N/mm}^2$ , mientras que para el arrollamiento de alta tensión ha sido de  $0.4628 \text{ N/mm}^2$ .

De acuerdo con el *Anexo I* en el que se muestran las propiedades de todos los materiales utilizados en el diseño del transformador entre ellos el aislante pre-impregnado de resina utilizado en el bobinado de baja tensión, que debe de tener una resistencia mínima de  $90 \text{ N/mm}^2$  cuando el espesor del material es de  $0.17 \text{ mm}$ . Para el caso de los aislamientos por los que están formados los arrollamientos de alta tensión (película de poliéster) la norma define que la tensión mínima soportada es de  $140 \text{ N/mm}^2$ .

Utilizando un factor de seguridad de un 50%, obtenemos los siguientes valores:

$$\sigma_{pi,LV}^* = 0.52039 \text{ N/mm}^2 \leq 90 \text{ N/mm}^2 \times 0.50 = 45 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pi,HV}^* = 0.4628 \text{ N/mm}^2 \leq 140 \text{ N/mm}^2 \times 0.50 = 70 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar con los resultados obtenidos, que se cumplen los valores mínimos aceptado, así pues, podemos decir que esta condición es **ACEPTADA**.

xi. TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LAS ESTRUCTURAS AISLANTES TACOS SUPERIORES.

En los transformadores de tipo seco las estructuras aislantes son similares a las que se usan para los transformadores de aceite, se trata de piezas fabricadas de un material de silicona, el cual según la experiencia la máxima presión que es capaz de soportar es de  $10 \text{ N/mm}^2$ .

Los esfuerzos de compresión han sido calculados en el *Anexo IV*, además utilizaremos un factor de seguridad del 80%.

En los tacos superiores los valores obtenidos son los siguientes, ya calculados en el *Anexo IV*.

$$\sigma_{es\ LV\ sup}^* = 1606.25\ N / (4 \times 80 \times 135) = 0.0372\ N/mm^2$$

$$\sigma_{es\ LV\ sup}^* = 0.0372\ N/mm^2 \leq 10\ N/mm^2 \times 0.8 = 8\ N/mm^2$$

$$\sigma_{es\ HV\ sup}^* = 23521.744\ N / (4 \times 80 \times 87.5) = 0.84\ N/mm^2$$

$$\sigma_{es\ HV\ sup}^* = 0.84\ N/mm^2 \leq 10\ N/mm^2 \times 0.8 = 8\ N/mm^2$$

Así pues, podemos observar que los valores más altos de esfuerzos obtenidos en los tacos superiores del transformador no superan los valores límite del material, luego condición **ACEPTADA**.

xii. TENSIÓN DE COMPRESIÓN EN LAS ESTRUCTURAS AISLANTES TACOS INFERIORES.

Al igual que en el apartado anterior las condiciones son las mismas, pero en este caso serán las estructuras aislantes de los tacos inferiores las que sean objeto de análisis, como se trata del mismo material los límites establecidos son los mismos, lo único que cambia son los esfuerzos en los tacos inferiores, a los cuales además de las fuerzas habrá que sumarle el peso de cada uno de los devanados. Los valores máximos obtenidos en este caso han sido calculados anteriormente en el *Anexo IV*.

Con los mismos límites establecidos ya que se trata del mismo material procedemos a realizar la evaluación de aceptación.

$$\sigma_{es\ HV\ inf}^* = 124.33\ N + (6029.4 \times 9.81) / (4 \times 80 \times 87.5) = 2.11\ N/mm^2$$

$$\sigma_{es\ HV\ inf}^* = 2.11\ N/mm^2 \leq 10\ N/mm^2 \times 0.8 = 8\ N/mm^2$$

$$\sigma_{es\ LV\ inf}^* = 0\ N + (3720.2 \times 9.81) / (4 \times 80 \times 135) = 0.845\ N/mm^2$$

$$\sigma_{es\ LV\ inf}^* = 0.845\ N/mm^2 \leq 10\ N/mm^2 \times 0.8 = 8\ N/mm^2$$

Como podemos observar los valores obtenidos se encuentran muy por debajo de los valores límite, así pues, podemos decir que esta condición también es **ACEPTADA**.

xiii. TENSIÓN DE COMPRESION EN LOS TACOS DE SOPORTE INFERIORES.

Mediante las simulaciones que he llevado a cabo a través del programa de cálculos de las fuerzas electromagnéticas (F.E.M.M.) he calculado las máximas tensiones de Von Misses y los máximos desplazamientos que se producen en los tacos de soporte superiores.

En el *Anexo IV* podemos encontrar los valores máximos de estas tensiones y desplazamientos ya mencionados y a partir de los cuales vamos a comparar con los valores límite aceptados.

El material por el cual están fabricados estos tacos es GPO3, este material tiene una resistencia mínima a la compresión de  $220 \text{ N/mm}^2$  y una resistencia a la flexión de  $130 \text{ N/mm}^2$ .

Aplicando un factor de seguridad de 50% tal y como está definido aquí en ABB y tomando el valor más débil de resistencia del material, obtenemos la siguiente relación.

$$\sigma_{pr}^* = 2.155 \leq 0.5 \times 220 \text{ N/mm}^2 = 110 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{pr,permitido}^*$$

Como el valor de la tensión de Von Misses está muy lejos del valor mínimo permitido, podemos considerar esta condición como **ACEPTADA**.

xiv. TENSIÓN DE COMPRESION EN LOS TACOS DE SOPORTE SUPERIORES.

Al igual que para los tacos inferiores, para los tacos superiores, con la tensión de Von Misses máxima calculada en el apartado 2.6.7. y con el valor del máximo desplazamiento, vamos a proceder a comprobar si se cumple la siguiente condición.

Como se trata de los mismos tacos fabricados con el mismo material que para los tacos inferiores la expresión no cambia respecto a la anterior.

$$\sigma_{pr}^* = 0.859 \leq 0.5 \times 220 \text{ N/mm}^2 = 110 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{pr,permitido}^*$$

Así pues, como para el caso anterior podemos comprobar que los valores de la tensión de Von Misses no superan el valor límite aceptado, así pues, esta condición es **ACEPTADA**.

xv. TENSIÓN DE TRACCIÓN EN LAS PLETINAS DEL NÚCLEO.

Todos los esfuerzos de tracción a los que están sometidas cada una de las secciones de los arrollamientos son transmitidos a las estructuras metálicas (pletinas del núcleo).

En el *Anexo IV* se han realizado los cálculos de las fuerzas y esfuerzos a los cuales estas estructuras están sometidos. El valor del esfuerzo máximo que estas estructuras (pletinas) tienen que soportar es de  $7.478 \text{ N/mm}^2$ .

Cada una de estas pletinas esta fábrica con el mismo material, acero S275JR, con una resistencia la tracción de  $275 \text{ N/mm}^2$ . Con un espesor máximo de pieza de  $12 \text{ mm}$ , sus dimensiones son de  $160 \times 12 \text{ mm}$  con una ranura en medio de  $20 \text{ mm}$ .

Como en muchos de los casos anteriores, para esfuerzos mecánicos, utilizaremos un coeficiente de seguridad del 50%

$$\sigma_{rod}^* = 7.478 \text{ N/mm}^2 \leq 0.5 \times 275 \text{ N/mm}^2 = 137.5 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{rod,permitido}^*$$

Comprando las fuerzas calculadas con las fuerzas limite permitidas podemos observar que el valor de las fuerzas calculadas es inferior a las permitidas así que podemos considerar esta condición como **ACEPTADA**.



**d. COMPARATIVA DE FUERZAS Y ESFUERZOS EN EL TRANSFORMADOR**

Doc. Ref.	Tipo de fuerza/tensión	Sección interior Bob BT				Sección exterior Bob BT				Bobinado AT			
		Actual	Permitido	Crítico	Coef. seguridad	Actual	Permitido	Crítico	Coef. seguridad	Actual	Permitido	Crítico	Coef. seguridad
2.6.1	Esfuerzo medio de tracción en los devanados exteriores									3.63	28	35	771%
2.6.2	Tensión media de compresión (devanados de BT)	0.401	12.5	35	3117%	5.442	12.5	35	229%				
2.6.3	Estrés debido a la flexión radial de los conductores en la zona de los espaciadores axiales.					0.0195	0.776	0.97	3979%				
2.6.4	Tensión de compresión en los separadores radiales entre las secciones de los arrollamientos.	2.037	8	10	392.73%	2.037	8	10	392.73%	7.508	8	10	106.553%
2.6.4	Tensión de compresión en los separadores radiales dentro de los arrollamientos (entre discos).									1.576	30	60	1903.55%
2.6.5	Tensión de compresión en las capas aislantes de los bobinados de tipo capa.	0.5204	45	90	8647.19%	0.5204	45	90	8647.19%	0.463	70	140	15125%
2.6.6	Tensión de compresión en las estructuras aislantes.	0.845	8	10	946.7%	0.845	8	10	946.7%	2.11	8	10	379

Doc. Ref.	Tipo de fuerza/tensión	Valor Permitido	Valor Permitido	Valor Crítico	Coeficiente de Seguridad
2.6.7	Tensión de compresión en los tacos inferiores.	2.155	65	130	3016.24%
2.6.7	Tensión de compresión en los tacos superiores.	0.859	65	130	7566%
2.6.8	Tensión de tracción en las pletinas del núcleo.	7.478	137.5	275	1838.72%

*Actual: valor de las fuerzas i esfuerzos del transformador que se está analizando.*

*Permitido: fuerzas y tensiones permitidas siguiendo los criterios de diseño y la norma.*

*Crítico: fuerzas y tensiones criticas según las propiedades de los materiales y las normas de diseño.*

## **ANEXO VI**

### **(CAPACIDAD TÉRMICA DEL TRANSFORMADOR)**

- *EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO*
  - *Capacidad térmica a cortocircuito*

## II. EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO

### a. CAPACIDAD TÉRMICA DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO

La duración de la corriente "I" utilizada para el cálculo de la resistencia térmica ante corto circuito no debe superar los 2 segundos a menos que tengamos una especificación diferente.

Durante este cortocircuito el flujo de corriente que circula por los devanados no debe calentar los devanados a temperaturas superiores que puedan cambiar o modificar las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales conductores.

Según la norma, esta define que estas temperaturas no deben ser superiores a 200°C para el aluminio y de 350°C para el cobre.

Las fórmulas que utilizaremos para el cálculo de la temperatura final de los conductores son las siguientes:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2 \times t} - 1} \text{ para el ALUMINIO}$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 \times t} - 1} \text{ para el COBRE}$$

Donde:

- J; es la densidad de corriente durante el cortocircuito.
- $\theta_0$  es la temperatura inicial
- t es la duración del cortocircuito

Estas fórmulas están basadas en condiciones adiabáticas y solo válidas para cortocircuitos de un tiempo corto, inferior a 10 segundos.

Además, están basadas en las siguientes propiedades de los materiales

	Copper	Aluminium
Specific heat at 100 °C (J/kg· °C)	398,4	928
Density at 100 °C (kg/m <sup>3</sup> )	8 894	2 685
Resistivity at 100 °C (μΩ·m)	0,022 4	0,035 5

Tabla 77

La temperatura inicial, será considerada en las peores condiciones posibles, estas condiciones serán justamente después a una carga eléctrica total (125°C en los devanados) además de las peores condiciones ambientales (40°C), lo que da aproximadamente valores de 165°C.

A partir de los siguientes valores procedemos a calcular a partir de las fórmulas previamente expresadas.

Como en este caso para el diseño del transformador hemos empleado únicamente conductores de aluminio, solo tendremos en cuenta las fórmulas para el aluminio a la hora de calcular resistencia térmica.

$$J_{LV} = \frac{8867.61}{1200 \times 1.3} = 5.684 \text{ A/mm}^2$$

$$J_{LV} = \frac{6702.72}{1200 \times 3.5} = 1.5958 \text{ A/mm}^2$$

$$\theta_{1,LV} = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{5.684^2 \times 2} - 1} = 166.1044^\circ\text{C}$$

$$\theta_{1,HV} = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{1.5958^2 \times 2} - 1} = 165.0869^\circ\text{C}$$

En los cálculos realizados anteriormente, los valores de la densidad de corriente han sido calculados con los valores de las corrientes de cortocircuito mayores, en términos de r.m.s.

El máximo valor de temperatura permitido de cada uno de los arrollamientos después de un cortocircuito se rige según la Tabla 3 de la norma IEC 60076-5.

Transformer type	Insulation system temperature, °C (thermal class in brackets)	Maximum value of temperature, °C	
		Copper	Aluminium
Oil-immersed	105 (A)	250	200
Dry	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	200	350	200
	220	350	200

NOTE 1 In the case of windings made of high tensile strength aluminium alloys, higher maximum values of temperature, but not exceeding those relevant to copper, may be allowed by agreement between the manufacturer and the purchaser.

NOTE 2 When insulation systems other than thermal class A are employed in oil-immersed transformers, different maximum values of temperature may be allowed by agreement between the manufacturer and the purchaser.

Tabla 78

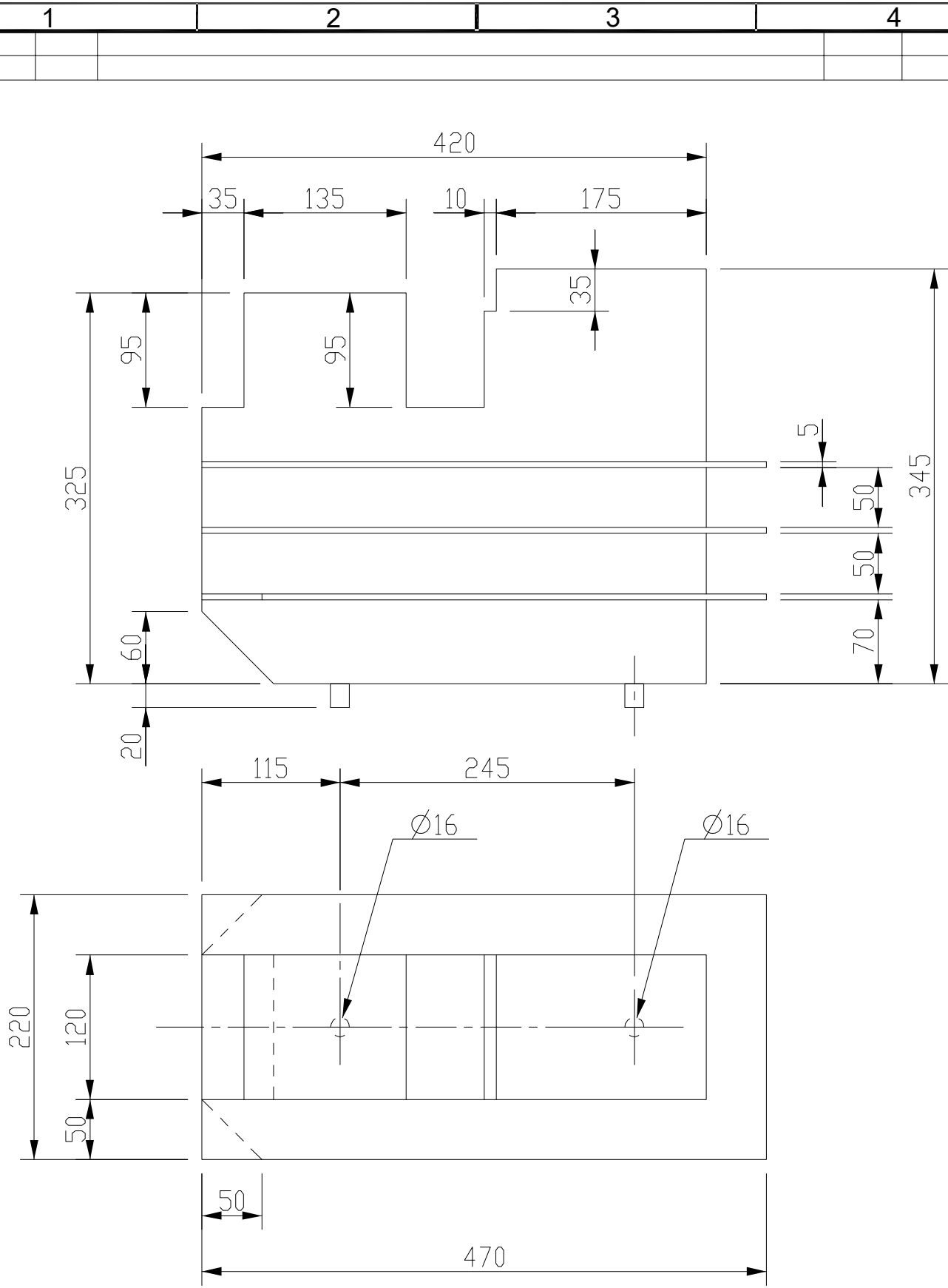



Como podemos observar en los resultados obtenidos de los cálculos de la temperatura obtenida en caso de cortocircuito en cada uno de los arrollamientos es que cumple la norma ya que la temperatura alcanzada para el caso más crítico es inferior a 200°C límite que marca la norma para un transformador de aluminio como material conductor.

## **ANEXO VII**

### **(PLANOS DEL TRANSFORMADOR)**

- 1. PLANO TACOS INFERIORES
- 2. PLANO TACOS INFERIORES
- 3. PLANO PLETINAS NÚCLEO
- 4. PLANO NÚCLEO LAMINA (1)
- 5. PLANO NÚCLEO LAMINA (2)
- 6. PLANO NÚCLEO LAMINA (3)
- 7. PLANO NÚCLEO LAMINA (4)
- 8. PLANO NÚCLEO LAMINA (5)
- 9. PLANO NÚCLEO LAMINA (6)
- 10. PLANO NÚCLEO LAMINA (7)
- 11. PLANO NÚCLEO LAMINA (8)
- 12. PLANO NÚCLEO LAMINA (9)
- 13. PLANO PLETINAS NÚCLEO
- 14. PLANO NUCLEO
- 15. PLANO BRIDAS NÚCLEO



Nombre <b>ALBERTO</b>		Apellidos <b>EREZA SERRANO</b>		Clasificación <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b>			
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Título <b>TACOS INFERIORES</b>			
Rev. -	Escala 0.215	Masa 29.2 kg			Nº. Documento. 1		
Título del trabajo DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO							

1 2 3 4

A

B

C

D

E

F

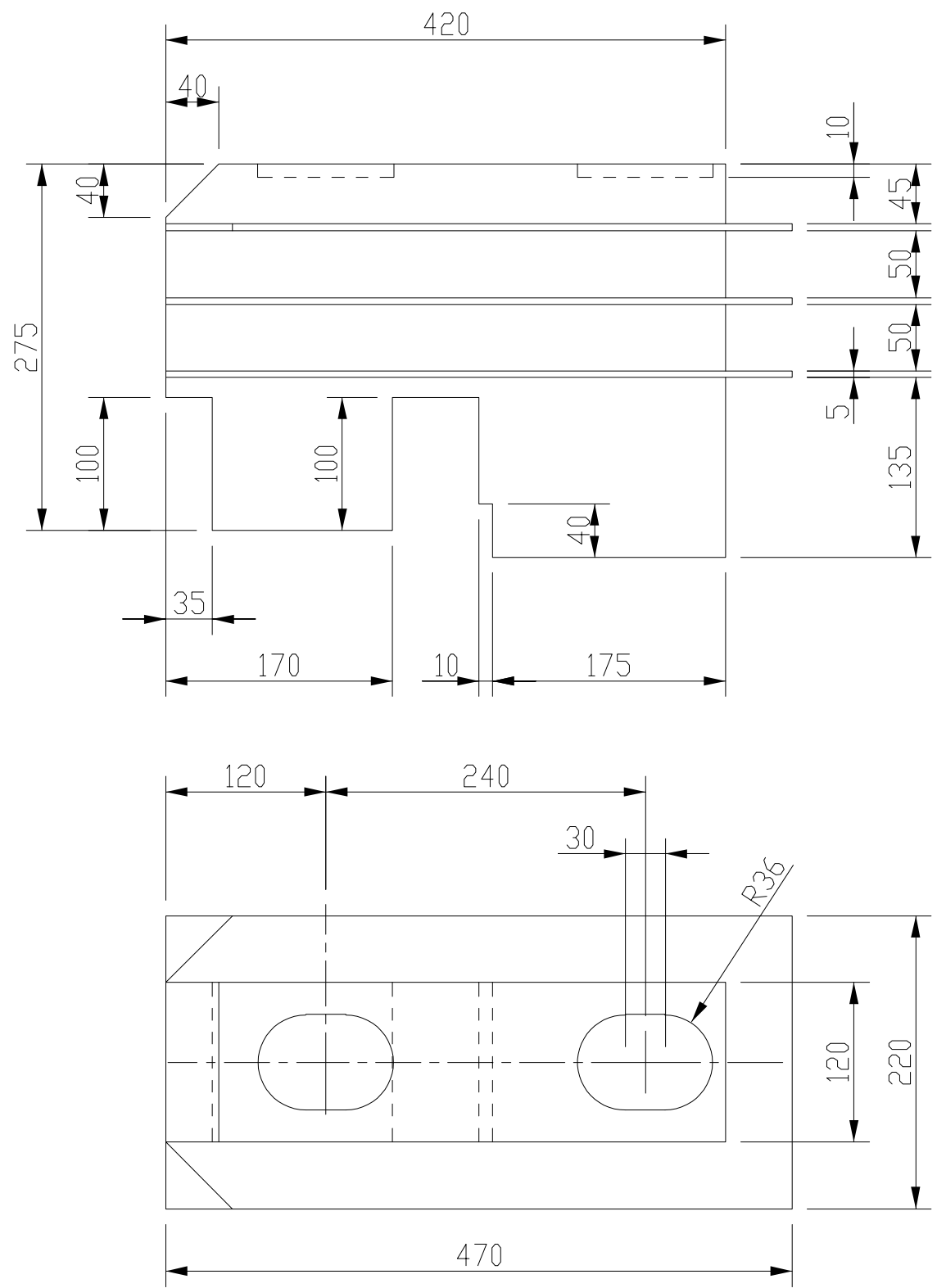
B

C

D

E

F



Nombre <b>ALBERTO</b>		Apellidos <b>EREZA SERRANO</b>		Clasificación <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b>			
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Título <b>TACOS SUPERIORES</b>			
Rev. -	Escala 0.215	Masa 24.5 kg			Nº. Documento.		2
Título del trabajo DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO							

1 2 3 4



1 2 3 4

A

2835

B

2520

3385

C

765

D

E

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	6200.8 Kg
Espesor seccion	70.7 mm

Nombre  
ALBERTO

Apellidos  
EREZA SERRANO

Clasificacion  
TRABAJO FIN DE GRADO



Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Titulo  
CHAPA MAGNÉTICA (1)

Rev.	Escala	Masa
-	1/750	6200.8 Kg

Titulo del trabajo  
DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento.  
3

1 2 3 4

F

F

1 2 3 4

A

2835

B

2520

3385

C

765

D

E

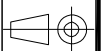
MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	5832.4 Kg
Espesor seccion	66.50 mm

Nombre  
ALBERTO

Apellidos  
EREZA SERRANO

Clasificación  
TRABAJO FIN DE GRADO



Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Título  
CHAPA MAGNÉTICA (2)

Rev. - Escala 1/750 Masa 5832.4 Kg

Título del trabajo  
DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento.  
4

1 2 3 4

F

F

1 2 3 4

A

2805

B

B

3355

3355

C

C

787,5

D

D

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	1638.1 Kg
Espesor seccion	20 mm

E

E

Nombre  
ALBERTO

Apellidos  
EREZA SERRANO

Clasificacion  
TRABAJO FIN DE GRADO



F

F

Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Titulo  
CHAPA MAGNÉTICA (3)

Rev.	Escala	Masa
-	1/750	1638.1 Kg

Titulo del trabajo  
DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento.  
5

1 2 3 4

1 2 3 4

A

2775

B

2565

3325

C

817,5

D

E

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	1278.2 Kg
Espesor seccion	16.8 mm

Nombre ALBERTO		Apellidos EREZA SERRANO		Clasificacion TRABAJO FIN DE GRADO		
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Titulo CHAPA MAGNÉTICA (4)		
Rev. -	Escala 1/750	Masa 1278.2 Kg				
Titulo del trabajo DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO				Nº. Documento.		6

1 2 3 4

F

F

1 2 3 4

A

2745

B

2595

3295

C

847,5

D

E

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	969.1 Kg
Espesor seccion	13.8 mm

Nombre  
ALBERTO

Apellidos  
EREZA SERRANO

Clasificacion  
TRABAJO FIN DE GRADO



Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Titulo  
CHAPA MAGNÉTICA (5)

Rev. - Escala 1/750 Masa 969.1 Kg

Titulo del trabajo  
DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento. 7

1 2 3 4

F

F

1 2 3 4

A

2715

B

B

2625

3265

C

C

877,5

D

D

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	772.2 Kg
Espesor seccion	12 mm

E

E

Nombre ALBERTO		Apellidos EREZA SERRANO		Clasificacion TRABAJO FIN DE GRADO		
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Titulo CHAPA MAGNÉTICA (6)		
Rev. -	Escala 1/750	Masa 772.2 Kg		Nº. Documento.		8
Titulo del trabajo DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO						

F

F

1 2 3 4

1 2 3 4

A

2675

B

2665

3225

C

918

D

E

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	779.2 Kg
Espesor seccion	13.8 mm

Nombre  
ALBERTO

Apellidos  
EREZA SERRANO

Clasificacion  
TRABAJO FIN DE GRADO



Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Titulo  
CHAPA MAGNÉTICA (7)

Rev. - Escala 1/750 Masa 779.2 Kg

Titulo del trabajo  
DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento. 9

1 2 3 4

F

F

1 2 3 4

A

2635

B

B

2705

3185

C

C

957,5

D

D

E

E

MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	524.2 Kg
Espesor seccion	10.8 mm

Nombre  
ALBERTO

Apellidos  
EREZA SERRANO

Clasificacion  
TRABAJO FIN DE GRADO



Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Titulo  
CHAPA MAGNÉTICA (8)

F Rev.

Escala

1/750

Masa

524.2 Kg

Titulo del trabajo  
DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento.  
10

1 2 3 4

F



1

2

3

4

A

B

C

D

E

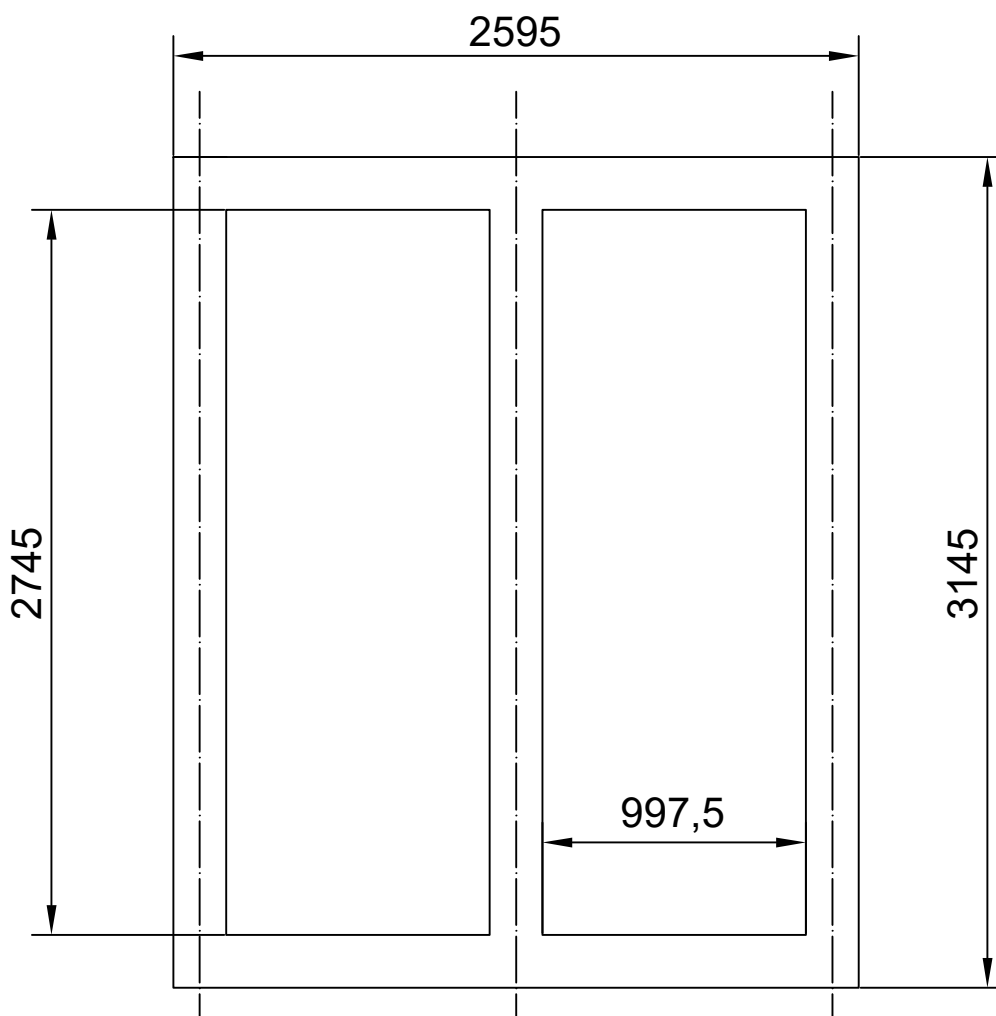
B

C

D

E

F



## MODULO 1

Nº de secciones	2 secciones
Espesor lamina	0.3 mm
Peso módulo	389.3 Kg
Espesor seccion	9.6 mm

Nombre

ALBERTO

Apellidos

EREZA SERRANO

Clasificacion

TRABAJO FIN DE GRADO



Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza

Titulo

CHAPA MAGNÉTICA (9)

F Rev.

-

Escala

1/750

Masa

389.3 Kg

Titulo del trabajo

DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO

Nº. Documento.

11

1

2

3

4

1 2 3 4

A

B

C

D

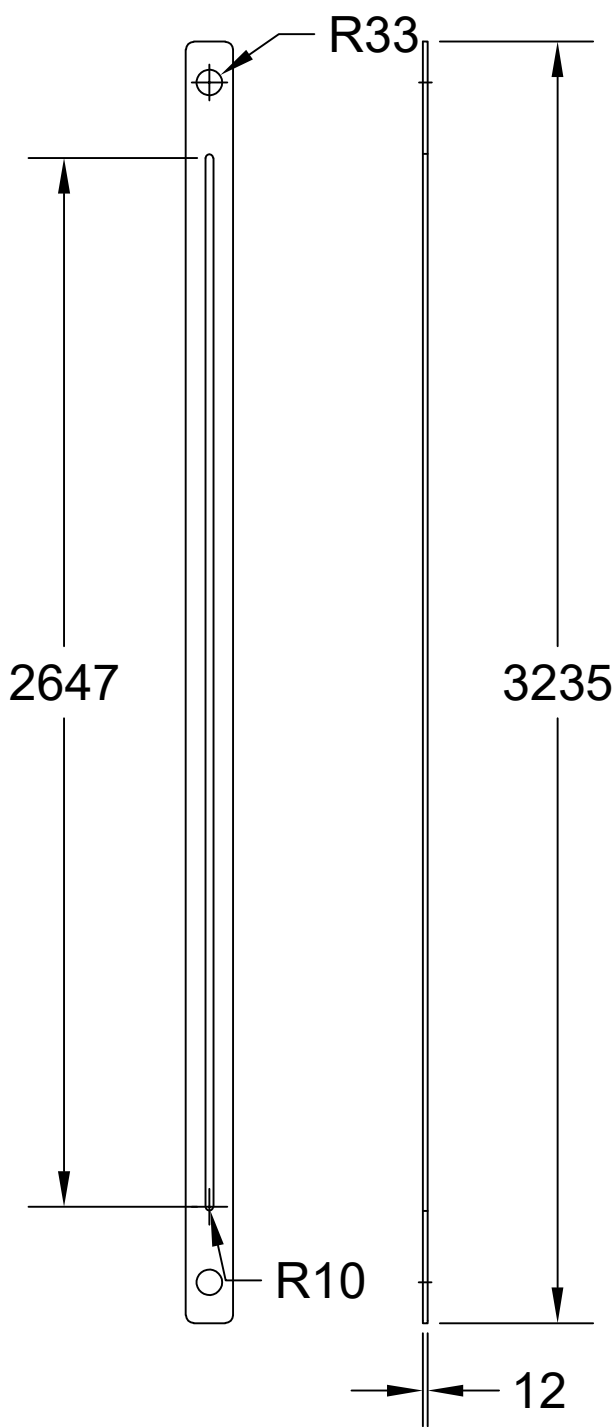
E


B

C

D

E



Nombre ALBERTO		Apellidos EREZA SERRANO		Clasificación TRABAJO FIN DE GRADO	
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Título PLETINAS NÚCLEO	
Rev. -	Escala 1/500			Nº. Documento.	12
Título del trabajo DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO					

1 2 3 4

1 2 3 4

A

B

C

D

E

F

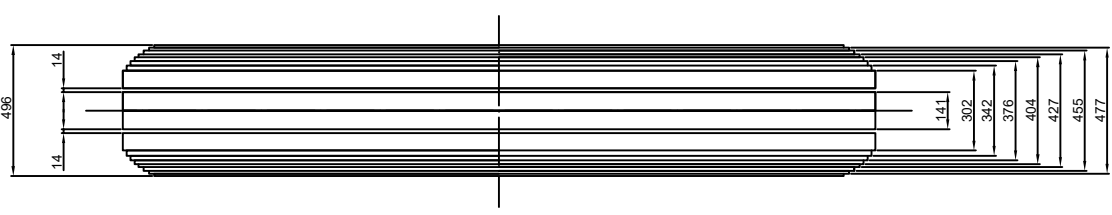
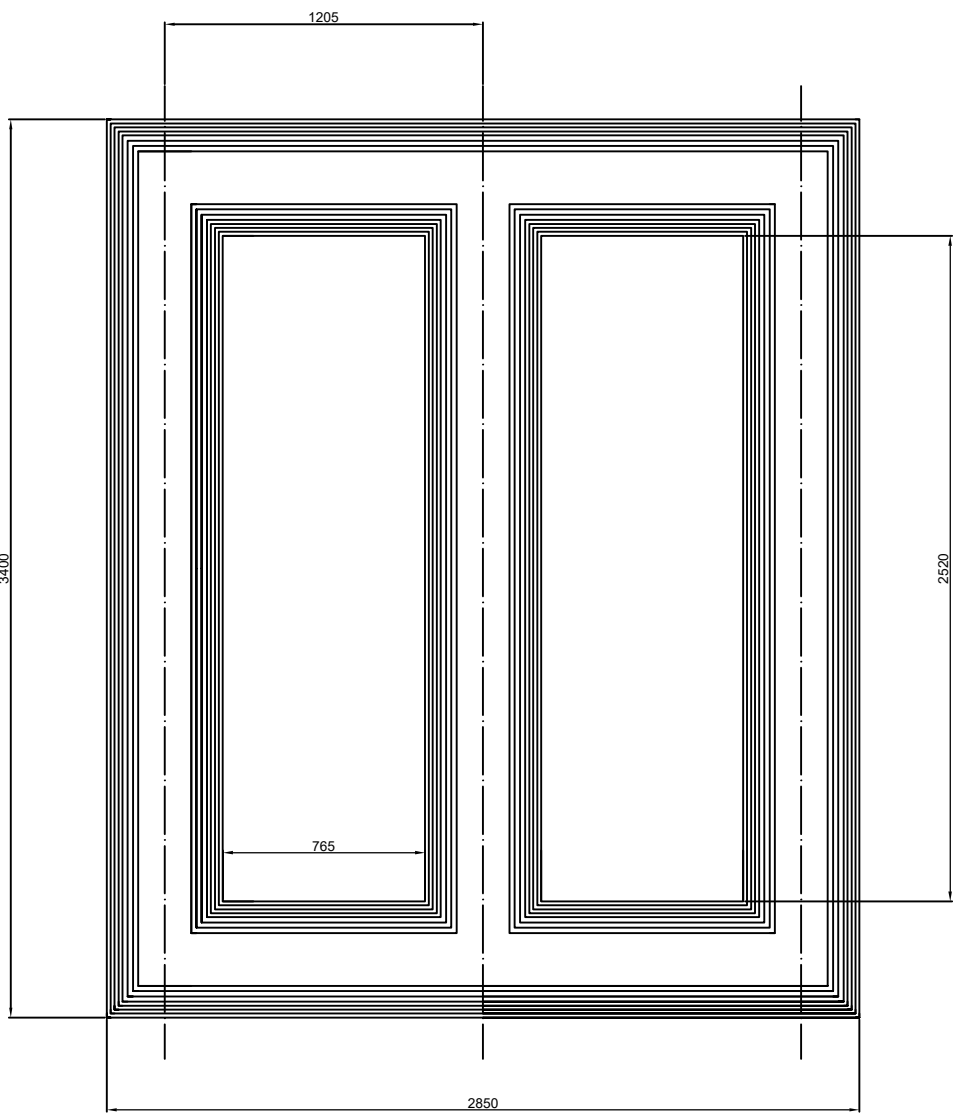
B

C

D

E

F



Nombre <b>ALBERTO</b>		Apellidos <b>EREZA SERRANO</b>		Clasificación <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b>	
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Título <b>NÚCLEO MAGNÉTICO</b>	
Rev. -	Escala 1/750	Masa 18383.6 Kg			
Título del trabajo DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO				Nº. Documento.	13

1 2 3 4

1 2 3 4

A

B

C

D

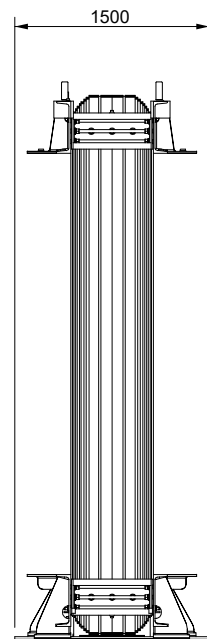
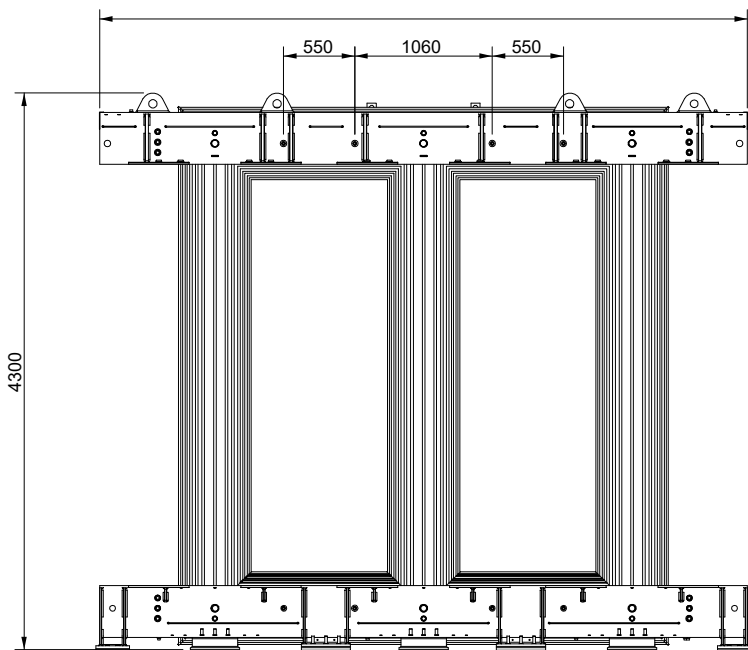
E


B

C

D

E



Nombre <b>ALBERTO</b>		Apellidos <b>EREZA SERRANO</b>		Clasificación <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b>	
Escuela de ingeniería y arquitectura de Zaragoza				Título <b>NÚCLEO Y BRIDAS</b>	
F Rev. -	Escala <b>7/400</b>	Masa		Nº. Documento.	<b>14</b>
Título del trabajo <b>DISEÑO Y ANALISIS DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO SECO</b>					

1 2 3 4

F