



Jorge Mendez Giron

email: jmendez@delcrosa.com.pe

Miguel Delgado León

email: mdelgado@uni.edu.pe

Enrique Granados de la Barra

email: enriquegranados@delcrosa.com.pe

TRANSFORMADORES

Departamento de Ingeniería

ANÁLISIS DE UN TRANSFORMADOR SOMETIDO A CORTOCIRCUITO



CONCEPTOS GENERALES

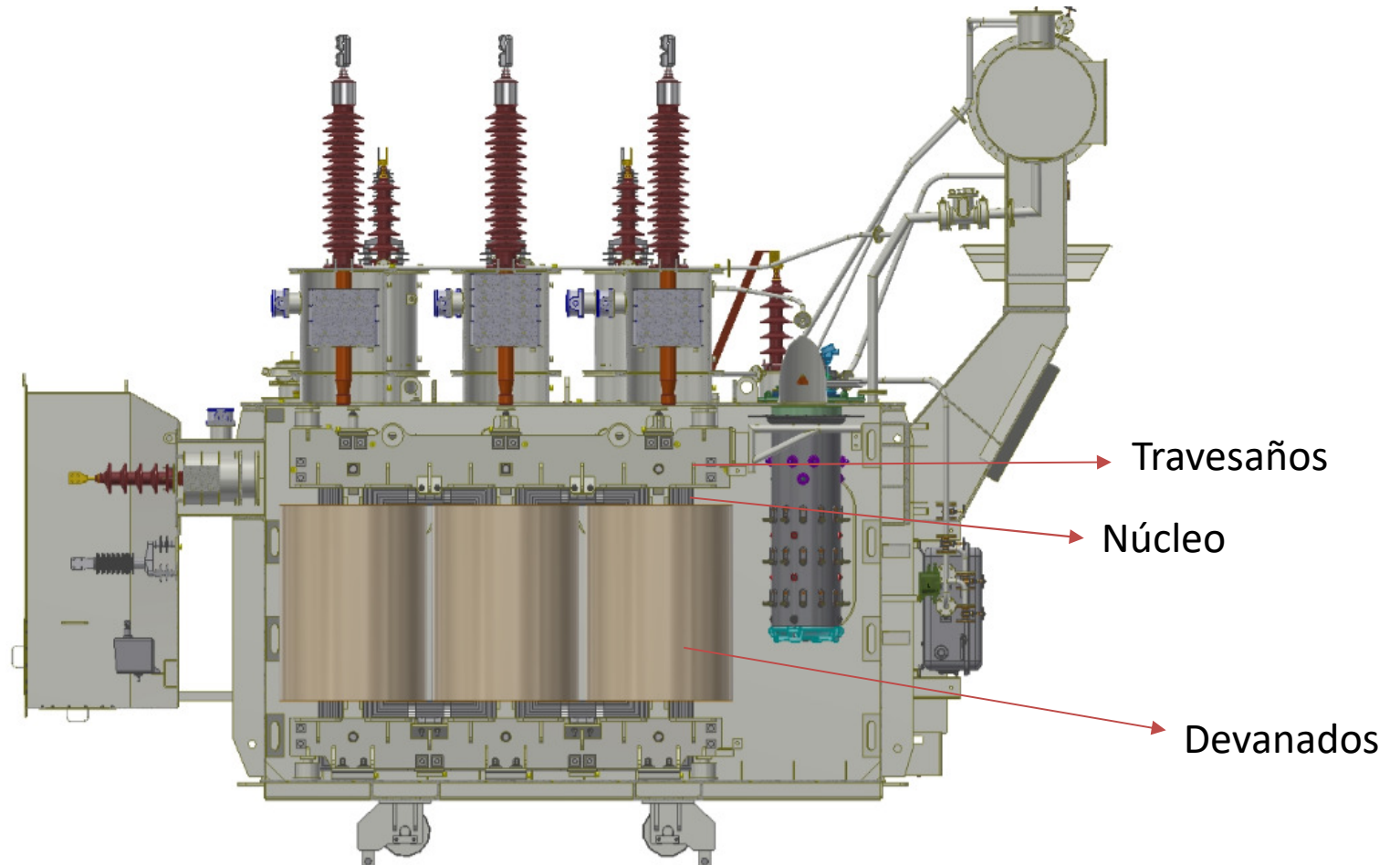
- Es un aparato estático con dos o más bobinados que mediante inducción electromagnética, transforma un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema de tensión y corriente generalmente de diferentes valores y a la misma frecuencia con el propósito de transmitir potencia eléctrica ⁽¹⁾
- Permite transportar económicamente energía eléctrica a distancia.



(1) Según norma IEC 60076-1 ed 2.1 2000-04

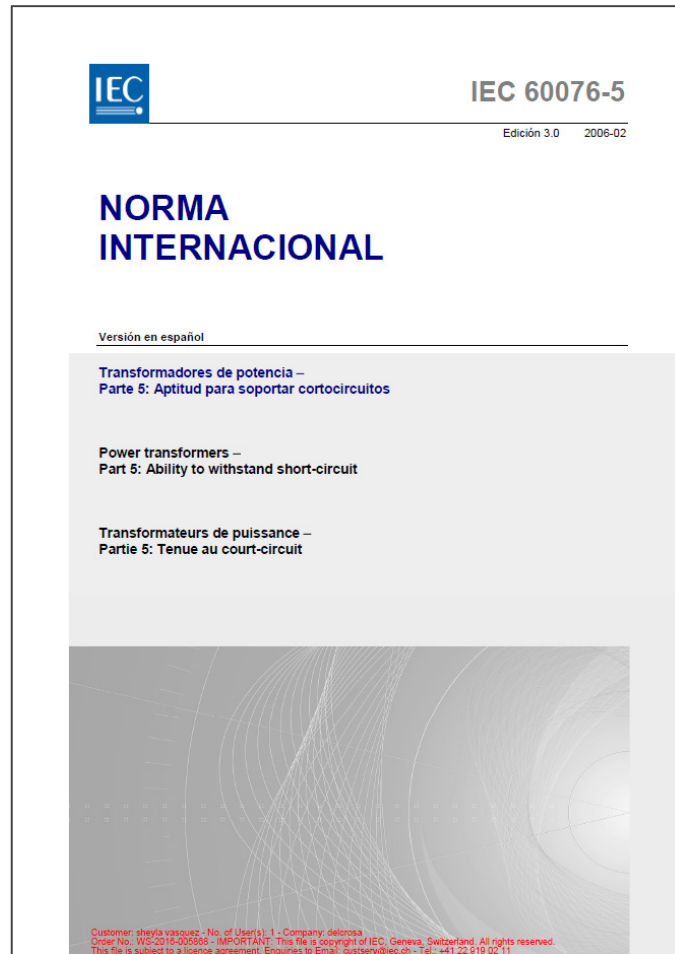


PARTES DEL TRANSFORMADOR –PARTE DE ANALISIS





Norma de referencia IEC 60076-5 Ed. 3.0 2006-02



Campo de aplicación

Define los requisitos para que los transformadores de potencia soporten sin daños los efectos de las sobre intensidades originadas por cortocircuito externos.

- Describe los procedimientos de cálculo para demostrar aptitud térmica para soportar tales sobreintensidades
- Método teórico de evaluación utilizados para demostrar su aptitud para soportar los efectos dinámicos.
- Aplicación para transformadores trifásicos y monofásicos ($1\Phi \geq 1\text{kVA}$, $3\Phi \geq 5\text{kVA}$). No aplica transformadores especiales mencionados IEC 60076-1.



Consideraciones de la Norma IEC 60076-5 Ed. 3.0 2006-02

I.- Transformadores con dos arrollamientos separados

Categoría I: 25 kVA a 2500 kVA

Categoría II: 2501 kVA a 100 000 kVA

Categoría III: mayor de 100 000 kVA

II.- En ausencia de especificaciones, la corriente de cortocircuito simétrica se debe calcular teniendo en cuenta la impedancia de cortocircuito (Z_{cc}) medida más la impedancia de la red. (categoría I, si el trafo $Z_{cc} \leq 5\%$, se desprecia)

III.- Para transformadores con dos arrollamiento separados, normalmente solo se toma en consideración cortocircuito trifásico, puesto que se considera que cubre de manera adecuada todos los otros posibles tipos de falta (excepción hecha en casos muy especiales)

IV.- Para transformadores con mas de dos arrollamientos, deben tenerse en cuenta diferentes tipos de falta que pueden ocurrir en servicio, por ejemplo faltas tierra y fallas entre fases asociadas con la puesta a tierra de la red y del transformador. (Norma IEC 60076-8).



Consideraciones de la Norma IEC 60076-5 Ed. 3.0 2006-02

Impedancia de cortocircuito

Tabla 1 – Valores mínimos reconocidos de la impedancia de cortocircuito para los transformadores con dos arrollamientos separados

Impedancia de cortocircuito a corriente asignada	
Potencia asignada kVA	Impedancia de cortocircuito mínima %
25 a 630	4,0
631 a 1 250	5,0
1 251 a 2 500	6,0
2 501 a 6 300	7,0
6 301 a 25 000	8,0
25 001 a 40 000	10,0
40 001 a 63 000	11,0
63 001 a 100 000	12,5
Mayor que 100 000	> 12,5

NOTA 1 Para las potencias asignadas superiores a 100 000 kVA, los valores son generalmente objeto de un acuerdo entre el fabricante y el comprador.

NOTA 2 En el caso de unidades monofásicas conectadas en banco trifásico, los valores de la potencia asignada se aplican al banco trifásico.

Potencia de cortocircuito

Tabla 2 – Potencia aparente de cortocircuito de la red

Tensión más elevada para el material, U_m kV	Potencia aparente de cortocircuito MVA	
	Práctica actual en Europa	Práctica actual en Norteamérica
7,2; 12; 17,5 y 24	500	500
36	1 000	1 500
52 y 72,5	3 000	5 000
100 y 123	6 000	15 000
145 y 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
362	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500

NOTA Si no está especificado, se debería considerar un valor entre 1 y 3 para la relación entre la impedancia homopolar y la impedancia directa de la red.



Caso de aplicación

Transformador de dos arrollamientos

Potencia : 1.5-2.5 MVA

Tensión : 33/0.4 kV

Grupo : Dyn5

Altura : 1000 msnm





Aptitud térmica para soportar cortocircuitos

Valor de corriente de cortocircuito simétrica

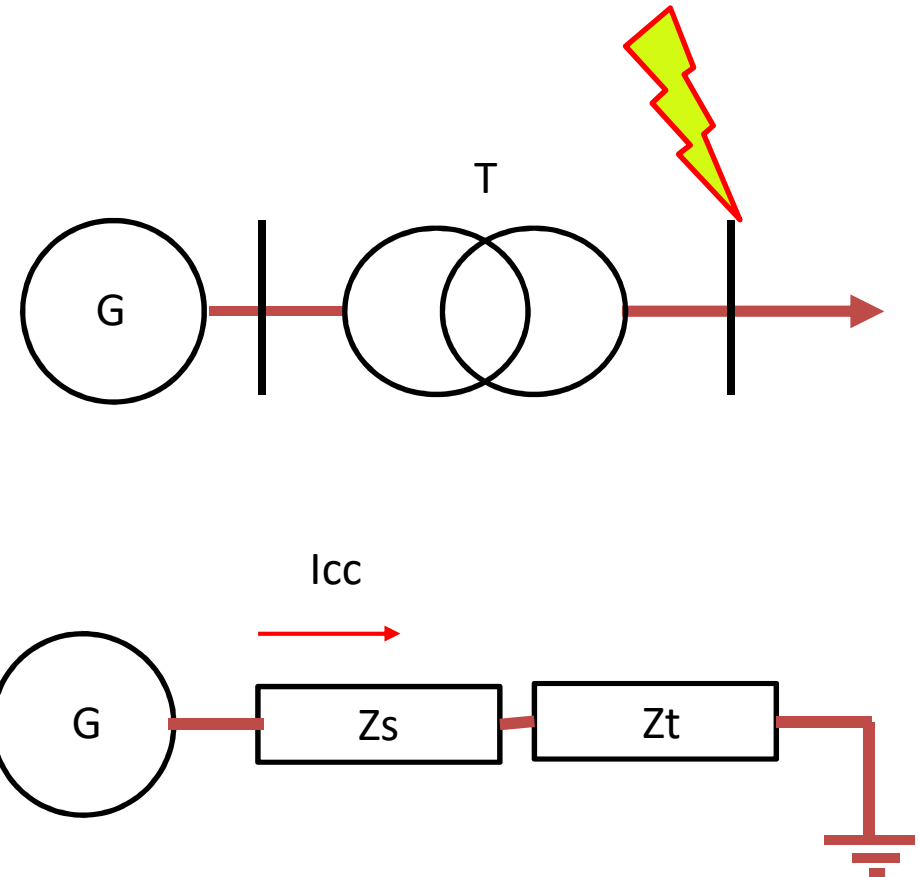
$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \text{ (kA)}$$

Impedancia de cortocircuito de la red

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}$$

Impedancia de transformador

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r}$$





Aptitud térmica para soportar cortocircuitos

Duración de la corriente de cortocircuito simétrica

- La duración de la corriente de cortocircuito simétrica I para soportar será de 2 segundos. Si la corriente es cortocircuito excede 25 veces de corriente asignada, se puede adoptar con acuerdo entre el fabricante y comprador una duración menor.

Valor máximo admisible de la temperatura media de cada arrollamiento

Tabla 3 – Valores máximos admisibles de la temperatura media de cada arrollamiento después del cortocircuito

Tipo de transformador	Temperatura del sistema de aislamiento, °C (clase térmica entre paréntesis)	Valor máximo de la temperatura, °C	
		Cobre	Aluminio
Sumergido en aceite	105 (A)	250	200
Seco	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

NOTA 1 En el caso de arrollamientos contruidos con aleaciones de aluminio de alta resistencia a la tracción, se pueden permitir valores máximos de temperatura más altos, por acuerdo entre fabricante y comprador, pero que no superen los correspondientes al cobre.

NOTA 2 Cuando se utilicen otros sistemas de aislamiento diferentes de la clase térmica A en transformadores sumergidos en aceite, se pueden permitir valores de temperatura máxima diferentes, por acuerdo entre fabricante y comprador.



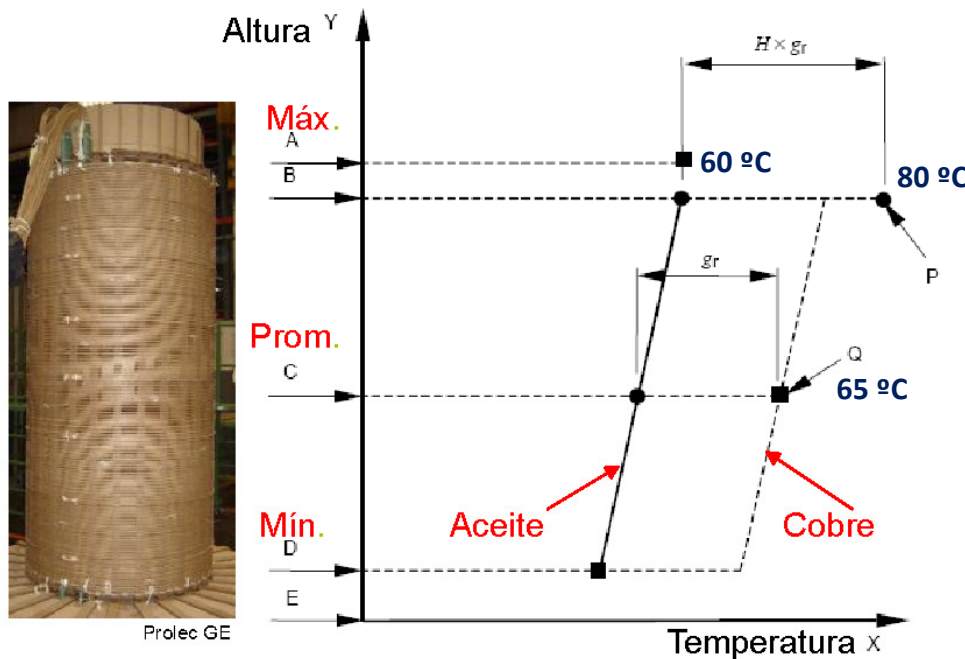
Aptitud térmica para soportar cortocircuitos

Diagrama térmico del transformador

Temperatura del Punto más Caliente del Devanado:

Es la temperatura más caliente de los componentes conductores de corriente de un transformador en contacto con aislamiento sólido o líquido aislante.

IEEE C57.12.80



Modelo para temperatura del Punto más caliente para Estado Estable:

$$P = A + H \times gr$$



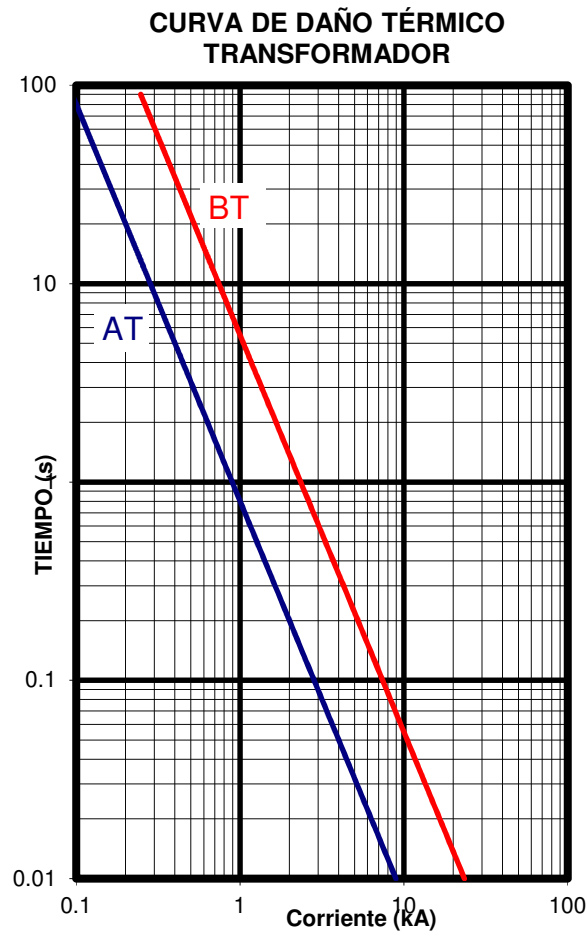
Indicador de Temp. de Devanado tradicional

- gr Gradiente Promedio Cobre-Aceite
- H Multiplicador de Punto mas Caliente
- P Temperatura de Punto mas Caliente
- Q Temperatura Promedio Devanado x Resistencia
- A Temperatura del Aceite en la Parte Superior



Aptitud térmica para soportar cortocircuitos

Temperatura de cortocircuito simétrica



$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106\,000}{J^2 \times t} - 1} \text{ para cobre (4)}$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45\,700}{J^2 \times t} - 1} \text{ para aluminio (5)}$$

donde

θ_0 es la temperatura inicial del arrollamiento, en grados Celsius (°C);

J es la densidad de corriente de cortocircuito basada en el valor eficaz de la corriente de cortocircuito simétrica, en amperios por milímetro cuadrado (A/mm²);

t es la duración, en segundos (s).



Introducción

- En la Empresa DELCROSA utilizamos nuevos métodos de evaluación de campos eléctricos y magnéticos en transformadores de potencia utilizando (a parte de los métodos analíticos) los métodos numéricos modernos, en especial el Método Elementos Finitos (MEF) con diferentes programas comerciales.
- Los resultados obtenidos con el MEF son importantes para la optimización en el diseño de transformadores.
- Predice con mayor exactitud los resultados de los parámetros de diseño antes de las pruebas.
- Los errores con respecto a las pruebas experimentales han resultado en promedio alrededor del 1%.



Método de Elementos Finitos (MEF)

- La siguiente ecuación diferencial de segundo orden, que es muy frecuente en ingeniería electromagnética puede ser resuelto por el MEF:

$$-\frac{\partial}{\partial} \left(\alpha_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial} \left(\alpha_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \beta \varphi = f \quad (1)$$

- En el tema de Electroestática o conducción se cumple la ecuación diferencial de Laplace para el potencial escalar.

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

- El campo Eléctrico que es muy importante conocer, se obtiene como el menos gradiente de V , es decir $\vec{E} = -\nabla V$.
- En el tema de magnetostatica se cumple la ecuación diferencial de Poisson para el potencial vectorial magnético $\vec{A}$. Así:

$$-\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} = \vec{J} \quad (3)$$

- El campo magnético se obtiene como el rotacional de $\vec{A}$, es decir $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$.
- Aquí μ es la permeabilidad del medio y $\vec{J}$ es la densidad de corriente volumétrica



Método de Elementos Finitos (MEF)

El MEF consiste en dividir la región donde se desea la solución en elementos, en dos dimensiones casi siempre son triángulos. Resolver la ecuación diferencial (1) mediante el MEF de Ritz, equivale a desarrollar un funcional en cada elemento triangular dado por:

$$F^e(\varphi) = \frac{1}{2} \iint_{S_e} \left\{ \alpha_x \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial x} \right)^2 + \alpha_y \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial y} \right)^2 \right\} dS - \iint_{S_e} f \varphi^e dS \quad (4)$$

Aquí φ^e es la función desconocida dentro del elemento (triángulo) e . Esta función se aproxima a una interpolación lineal, en algunos casos no lineal de los valores de φ en los vértices del elemento triangular e :

$$\varphi^e(x, y) = \sum_{j=1}^3 N_j^e(x, y) \varphi_j^e \quad (5)$$

Aquí φ_j^e es la posible solución en los vértices del elemento triangular, $N_j^e(x, y)$ son los polinomios de interpolación. Reemplazamos (5) en (4) se evalúa las integrales. Como siguiente paso se suma todos los funcionales (ensamblamiento) para obtener el funcional global:

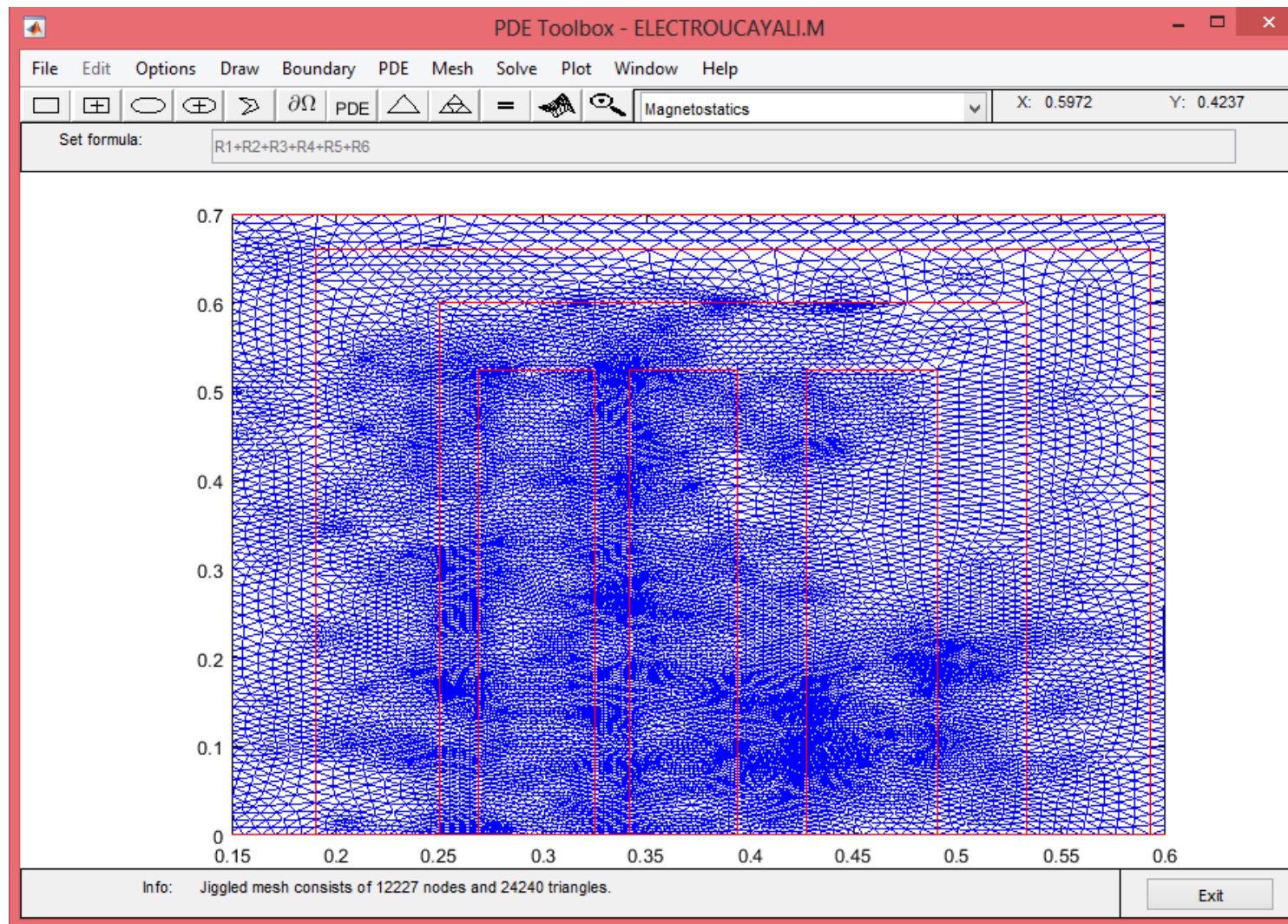
$$F = \sum_{e=1}^{ne} F^e \quad (6)$$

Según el MEF de Ritz el mínimo del funcional global equivale a resolver la ecuación diferencial (1). Para encontrar el mínimo se deriva con respecto a los φ_j^e e igualamos a cero, de aquí se obtiene un sistema de ecuaciones. Luego de imponer las condiciones de frontera se resuelve el sistema de ecuaciones y se obtiene la solución de los φ_j^e en los vértices de cada elemento triangular.



Dibujo de la malla de Elementos finitos

Matlab





Tensión de Cortocircuito

Transformador de Potencia

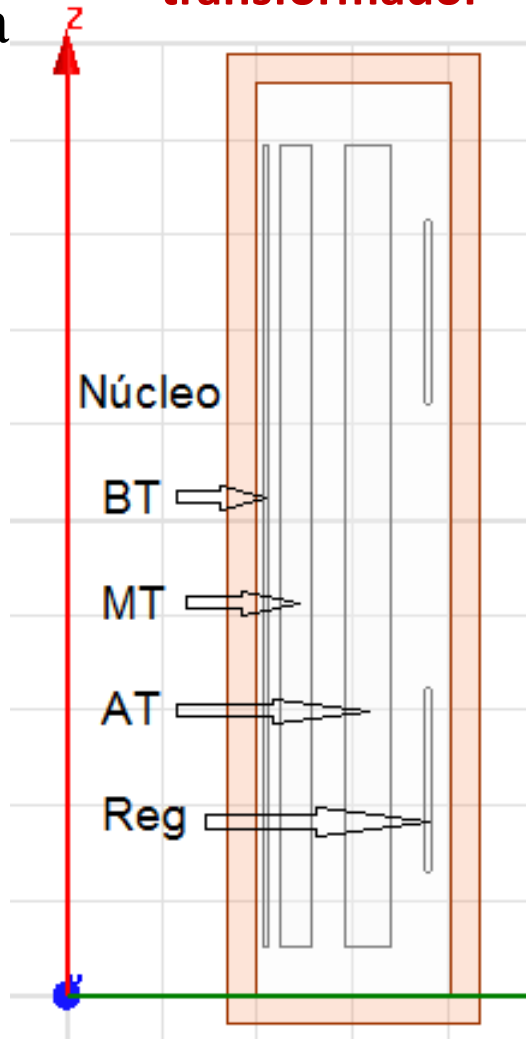
Potencia 100 MVA

AT 220 kV Estrella

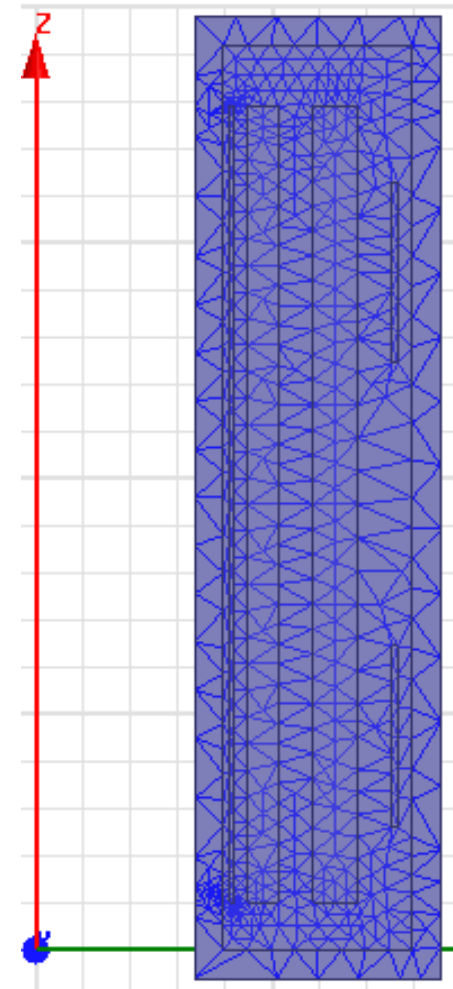
MT 60 kV Estrella

BT 10 kV Delta

Dibujo de una fase del transformador



División de la región en elementos finitos





Simulación del Campo Magnético

Distribución campo B

- Caso AT/MT Tap Sup.
Programa Ansys Maxwell

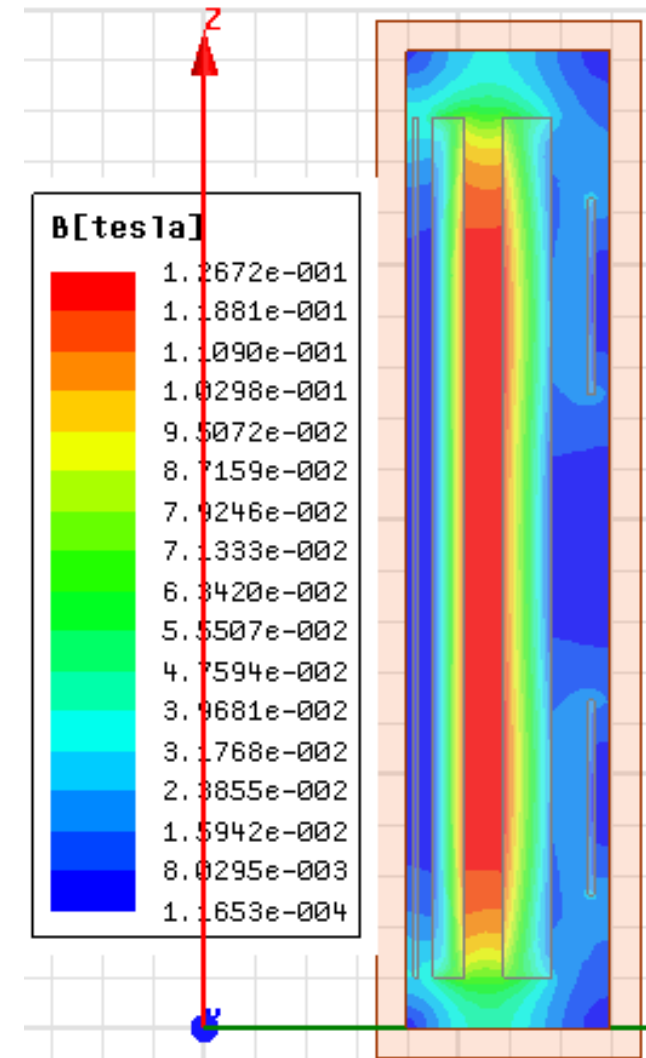
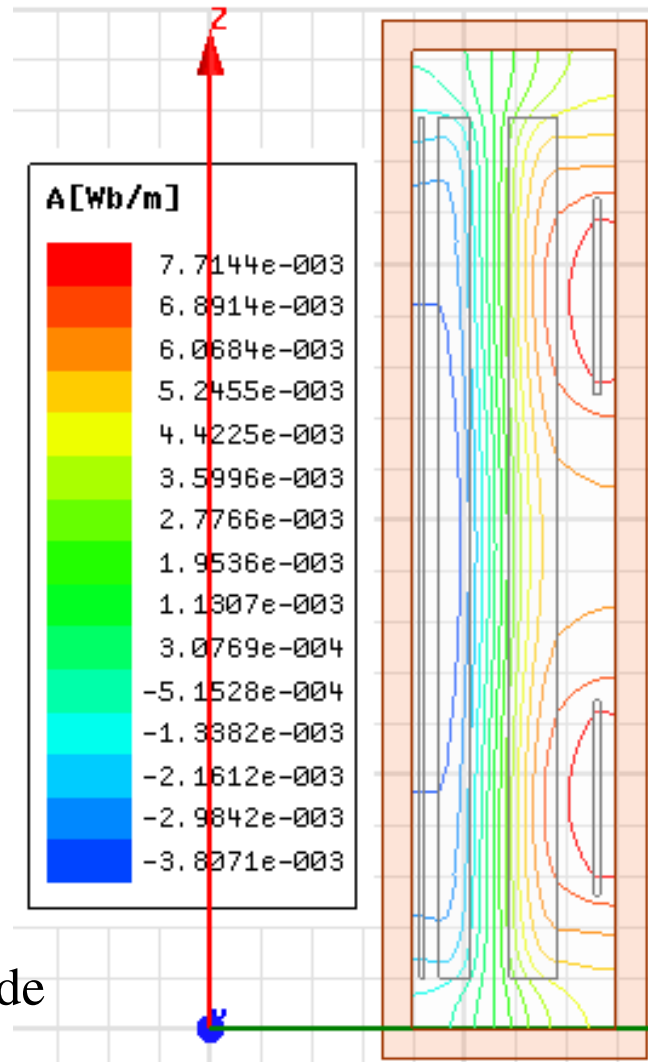
- Fig. Izquierda
Líneas de campo A

- Fig. Derecha
Módulo campo B

- $X_{pu}=0.102255$
(obtenido con FEM)

- Mediante la Prueba de
cortocircuito

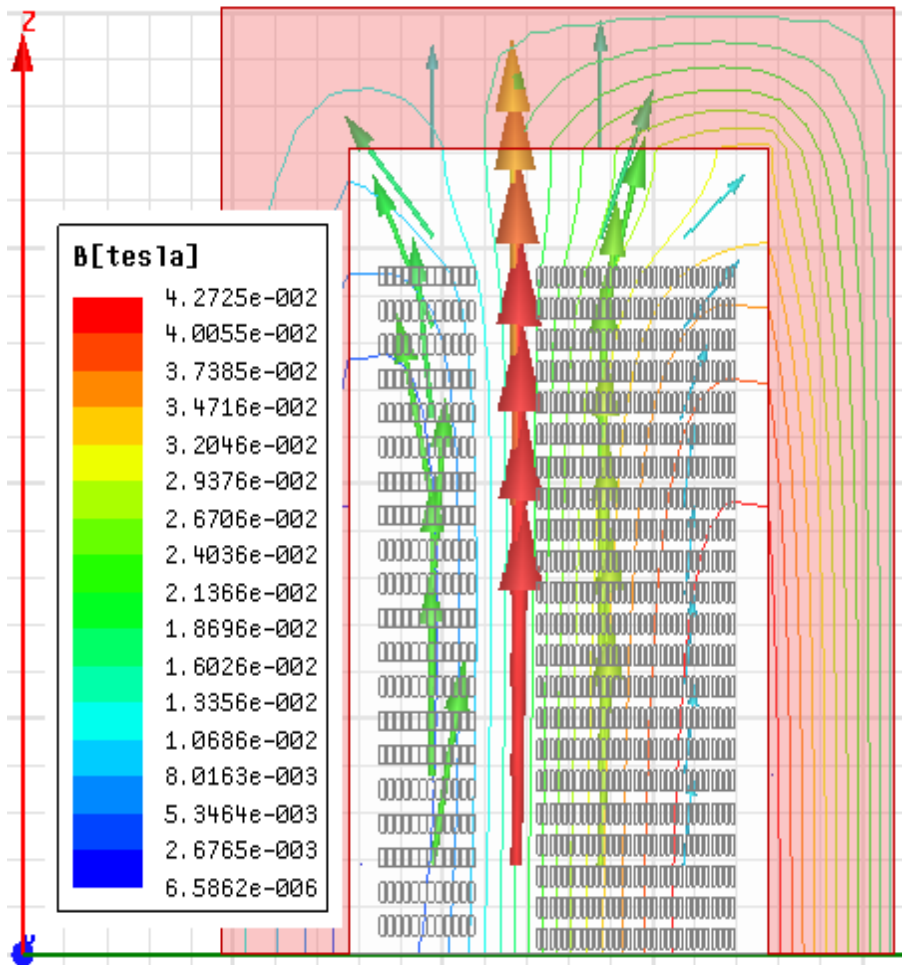
$X_{pu}=0.105$



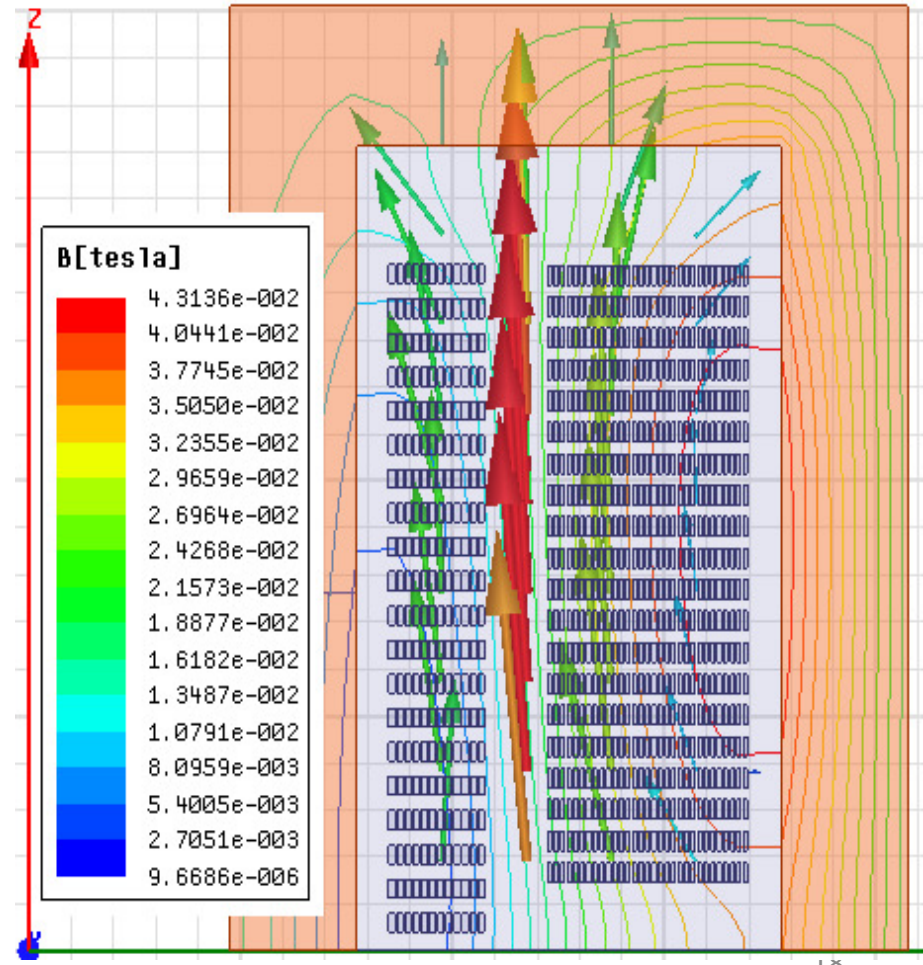


Analítico y numérico (Transformador Innovate Perú)

- Para Tap 1



- Para Tap 5





Resultado de la comparación

La solución analítica considera la aproximación del campo magnético de dispersión puramente axial (libro Transformer Design Principles R. Del Vecchio)

La solución numérica mediante el MEF considera el campo magnético de dispersión tanto la componente radial como la axial. Luego se calcula la energía magnética, la inductancia, la reactancia por unidad.

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint \vec{A} \cdot \vec{j} \, dv = \frac{1}{2\mu_0} \iiint B^2 \, dv ; \quad L = \frac{2W_m}{I^2} ; \quad x_{pu} = \frac{2\pi f L}{Z_B}$$

Método	x_{PU} (tap 1)	x_{PU} (tap 3)	x_{PU} (tap 5)
Analítico	0.065393345	No se garantiza	No se garantiza
Numérico FEM (Maxwell)	0.065712076	0.065737268	0.066514741

Fuerza de Corto Circuito

- Según la norma IEC 60076-5. La corriente de cortocircuito más crítica es:

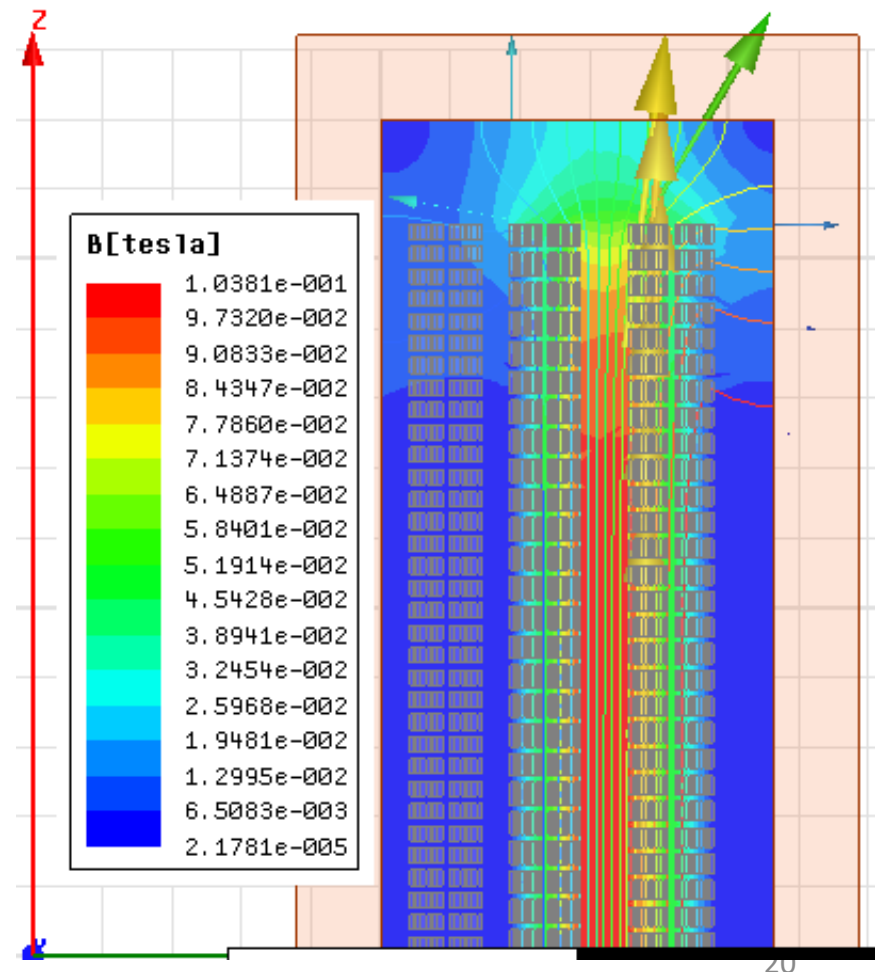
$$I_{CC} = \frac{1.8 \sqrt{2} I}{x_{PU}}$$

- La fuerza magnética sobre un diferencial de volumen del devanado es según la teoría electromagnética:

$$d\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} dv; \quad J = \frac{I_{CC}}{S}$$

- Aquí $\vec{J}$ es la densidad de corriente volumétrica, S la sección de la platina de cobre. $\vec{B}$ es el campo magnético producido por la densidad de corriente y obtenido con el FEM

Grafica del Campo magnético obtenido con el FEM (Maxwell) caso AT/MT transformador 20 MVA 60kV /22.9 kV/ 10 kV.





Comparación Método Analítico y Numérico para la Fuerza Cortocircuito transformador de Potencia

Ejemplo 1 : Transformador de Potencia

Potencia 20 MVA; AT 60 kV. Estrella;

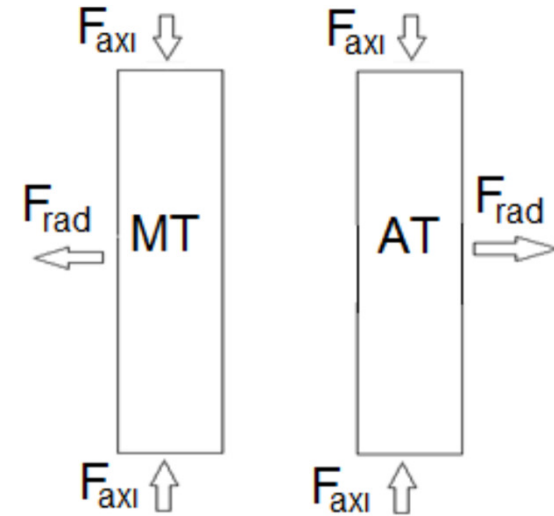
MT 20 kV. Estrella; BT 10 kV. Delta

- Existen varios procedimientos con el método numérico FEM. El más común es: $\vec{F}_m = \iiint \vec{J} \times \vec{B} d\mathbf{v}$ sobre las espiras

- De la expresión anterior se obtiene la fuerza radial y axial
- Se deduce una fórmula analítica solo para la fuerza radial

$$F_{rad} = \frac{\mu_0 (N I_{cc})^2}{H_w} \pi D_m$$

- I_{cc} es la corriente de cortocircuito, N numero de vueltas del devanado, D_m diámetro medio, H_w altura promedio .



Fuerza (Ton.)	Radial Analit.	Radial FEM	Axial Analit.	Axial FEM
MT	272.3 T	256.9 T	Fórm. Empir.	11.7 T
AT	388.0 T	307.7 T	Fórm. Empir.	23.1 T



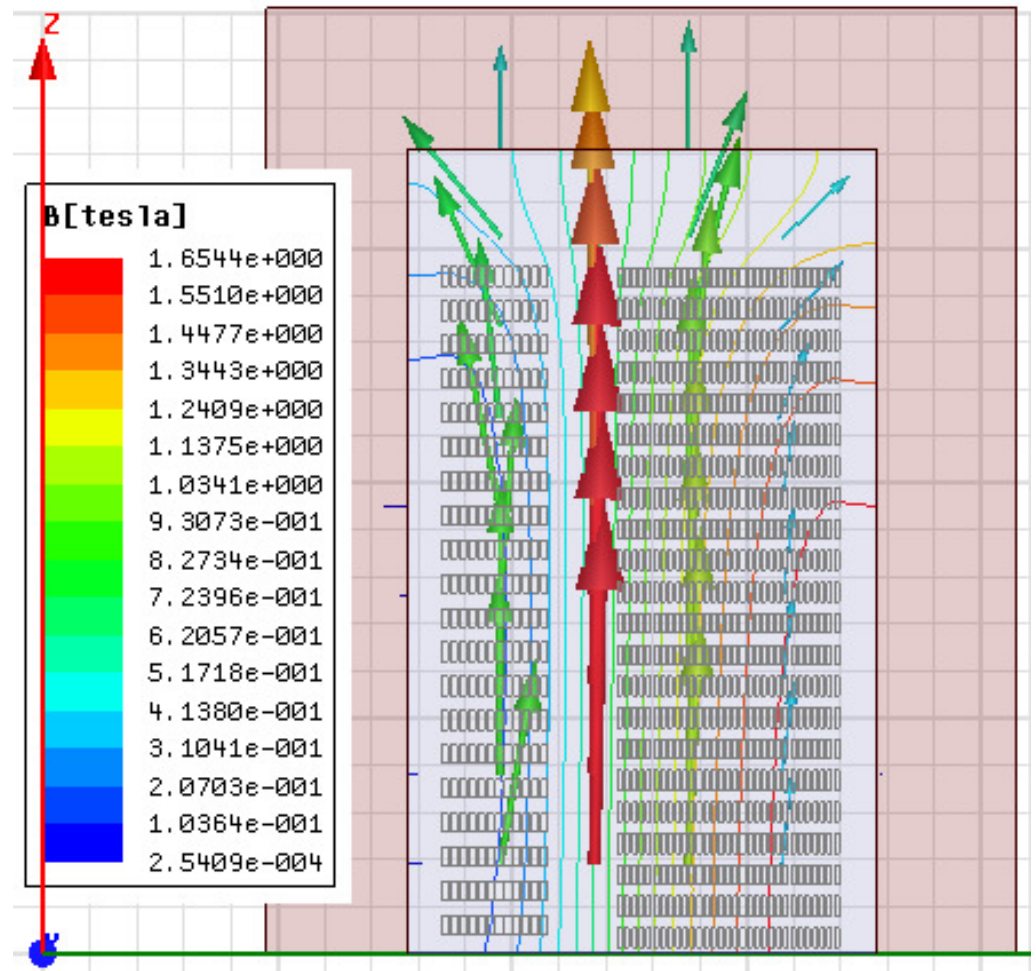
Fuerza de Cortocircuito transformador prototipo

Innovate Perú tap 1

Ejemplo 2 : Transformador Prototipo

- Innovate Perú. Potencia 1.5 MVA; AT 33 $\pm$ 2.5% kV. Delta 1 conductores en paralelo 31 conductores entre canales (44 discos). BT 0.44 kV. Delta Estrella 48 conductores en Paralelo. 12 conductores entre canales. (40 discos)
- La siguiente figura muestra la distribución de campo magnético (producido por la corriente de cortocircuito) en las espiras de una de las fases del transformador.

Simulación del campo magnético en una fase del transformador tap 1



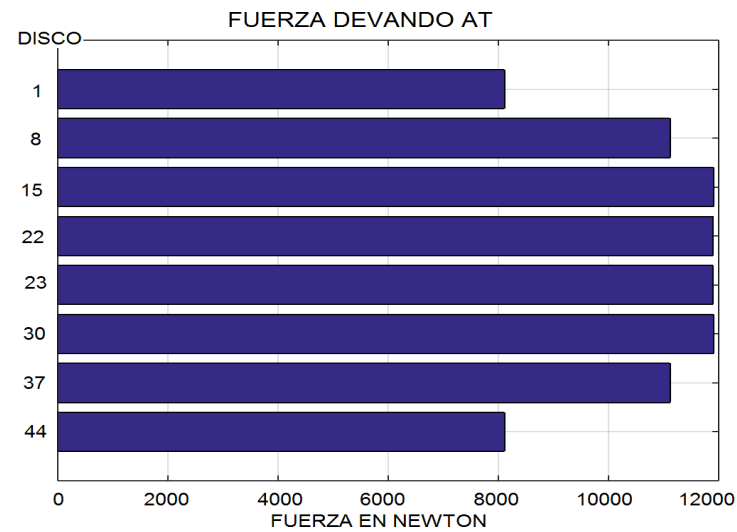
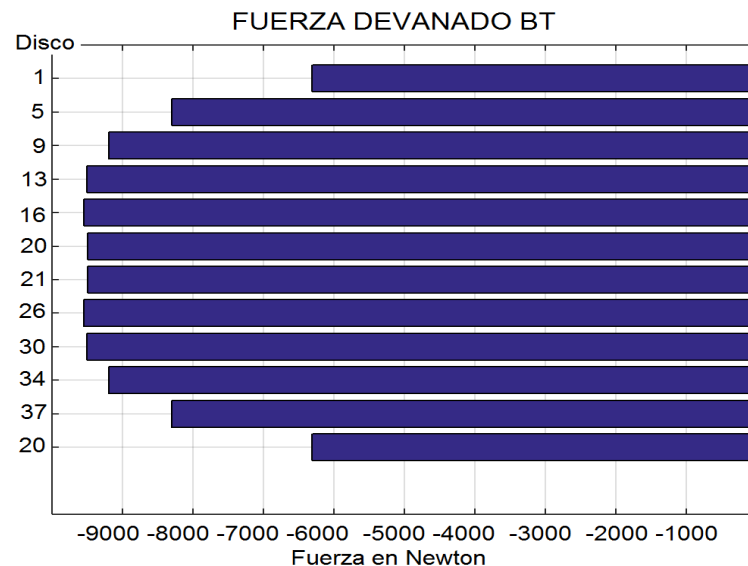


Fuerza radial y axial global y por disco tap 1

Fuerzas Radiales y axiales globales en el tap1		
Fuerza (N)	Fórmula analítica	MEF Maxwell
Radial BT	-365019.20	-353860.76
Radial AT	501446.65	487814.51
Axial BT	Fórmula empírica	-29023.53 (mitad superior) 29023.53 (mitad inferior)
Axial AT	Fórmula empírica	-56207.34 (mitad superior) 56207.34 (mitad inferior)

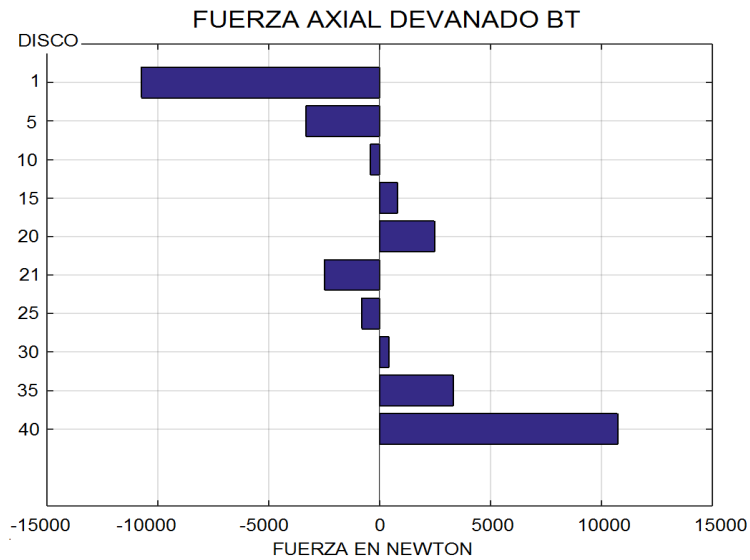
BT Disco 16 (25)	-9551.03
AT Disco 17 (28)	11953.52

BT Disco 1 (40)	-(+) 10728.62
AT Disco 1 (44)	-(+) 9782.11

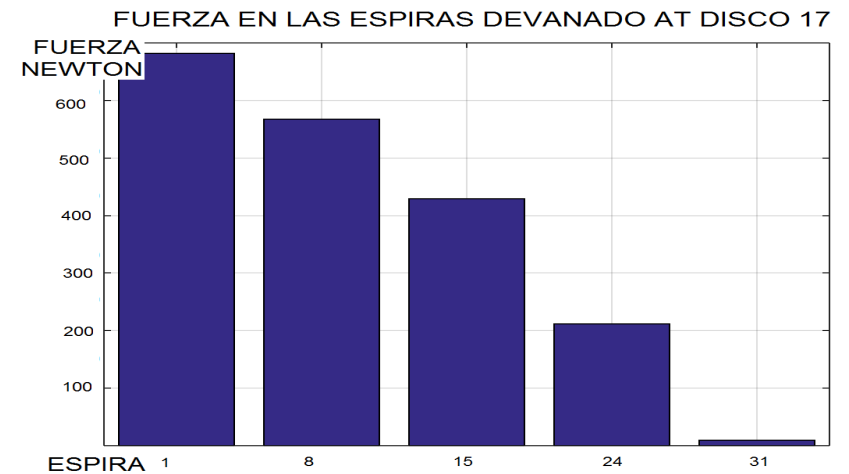
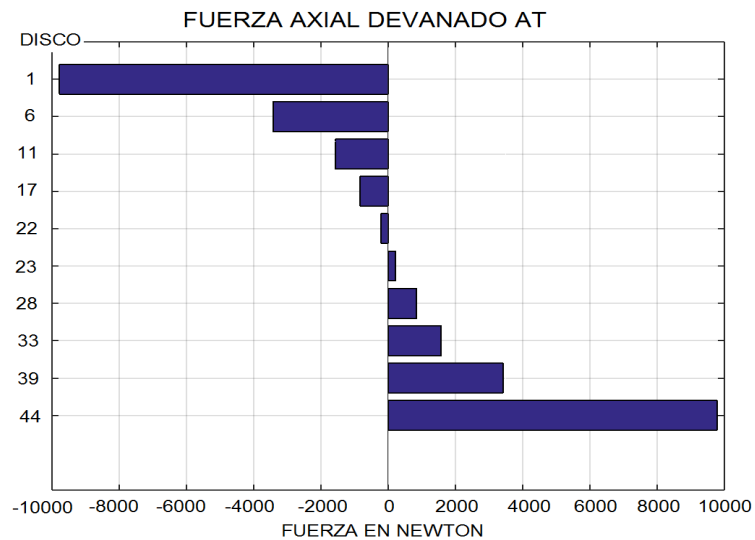




Fuerza radial y axial por espira tap 1



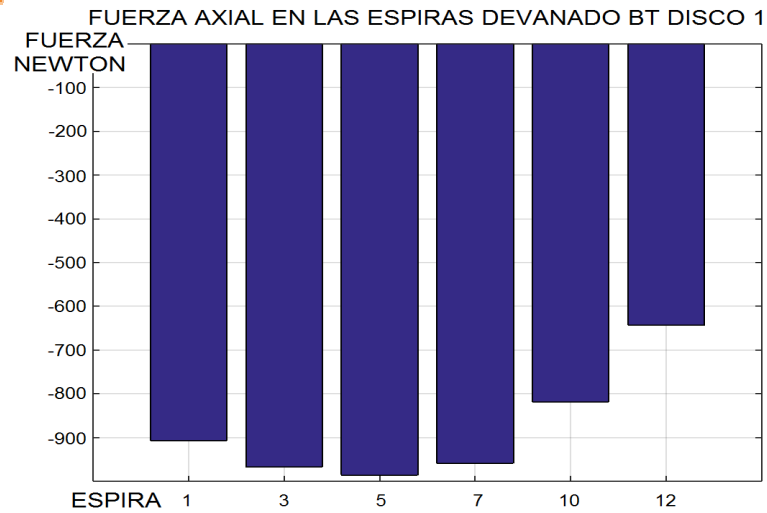
La fuerza radial máxima es -1655.27 N en la espira 12



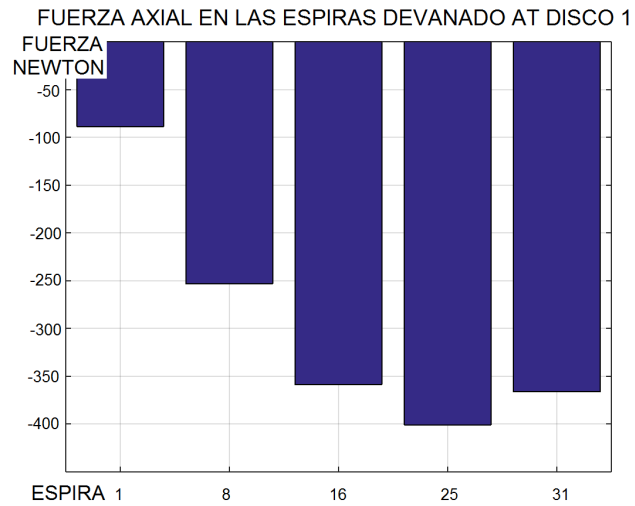
La fuerza radial máxima es 682.12 N en la espira 1



Fuerza radial y axial por espira tap 1



La fuerza axial máxima es -985.65 N en la espira 5



La fuerza axial máxima es -400.93 N en la espira 25



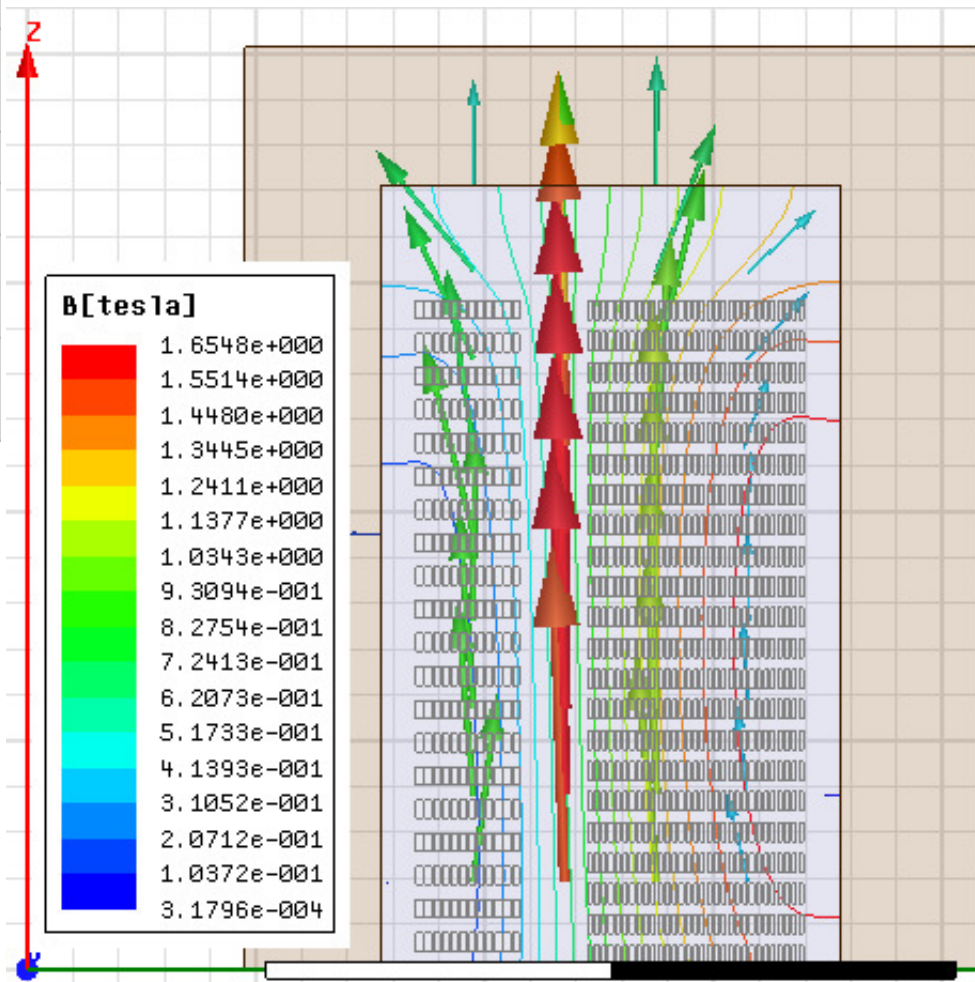
Innovate Perú tap 3

Simulación del campo magnético en una fase del transformador tap 3

Fuerzas Radiales y axiales en el tap3		
Fuerza (N)	Fórmula analítica	MEF Maxwell
Radial BT	Incierto	-353215.91
Radial AT	Incierto	486067.65
Axial BT	Incierto	-49818.86 (mitad superior) 49818.86 (mitad inferior)
Axial AT	Incierto	-16258.14 (mitad superior) 16258.14 (mitad inferior)

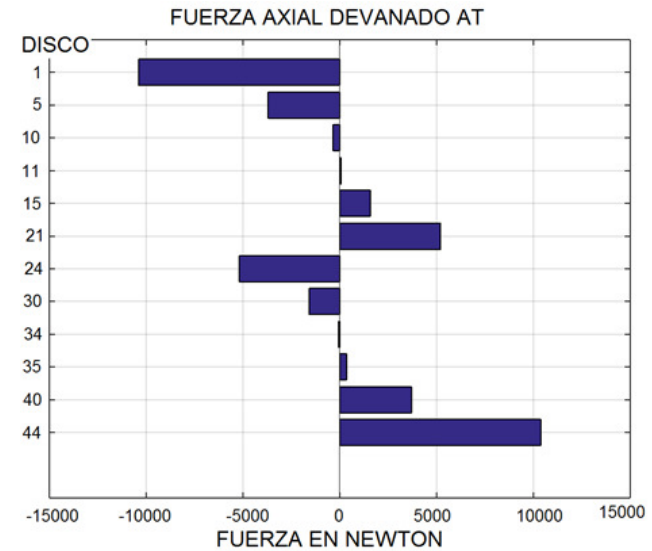
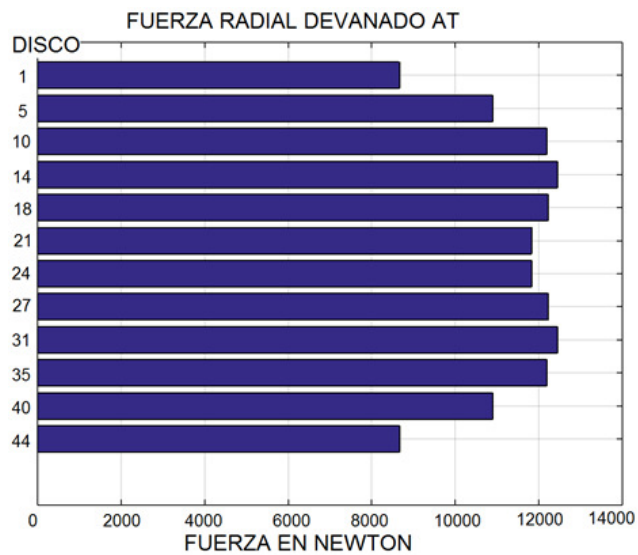
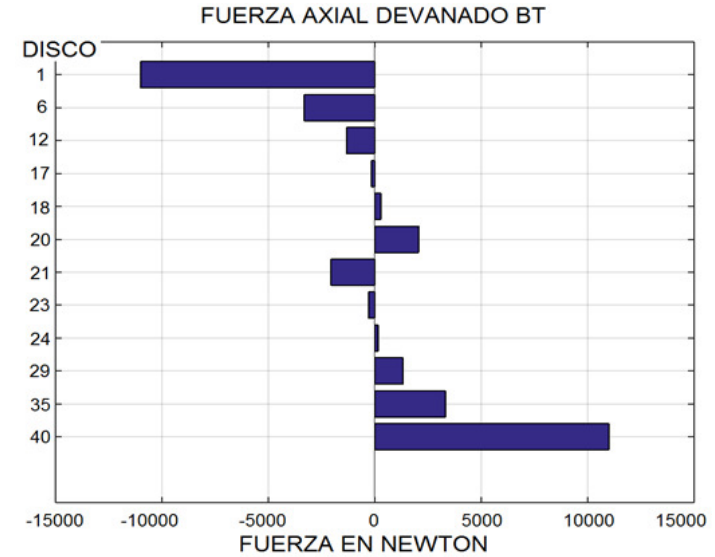
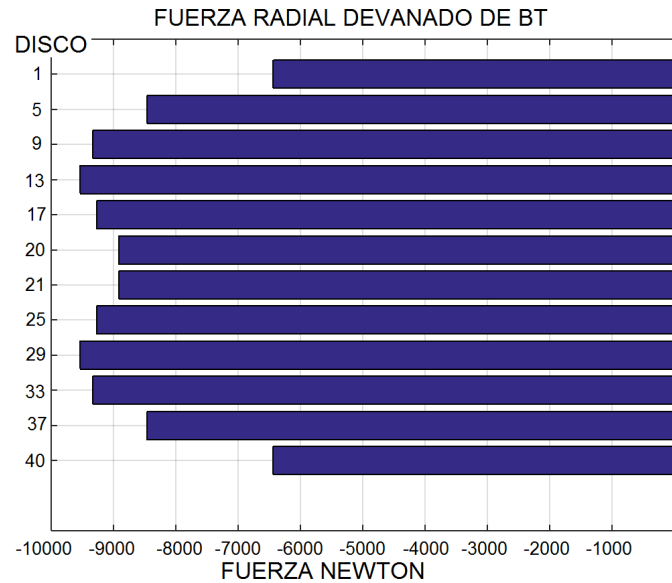
BT Disco 13 (28)	-9532.46
AT Disco 14 (31)	12447.36

BT Disco 1 (40)	-(+) 11004.31
BT Disco 20(21)	+(-) 2053.48
AT Disco 1 (44)	-(+) 10394.86
AT Disco 22(23)	+(-) 5201.67



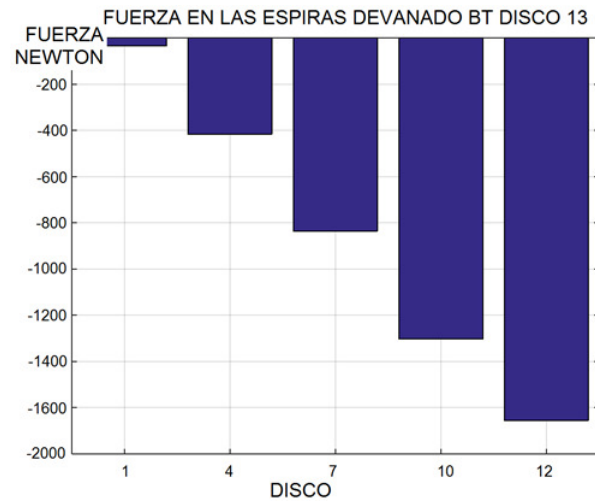


Innovate Perú tap 3

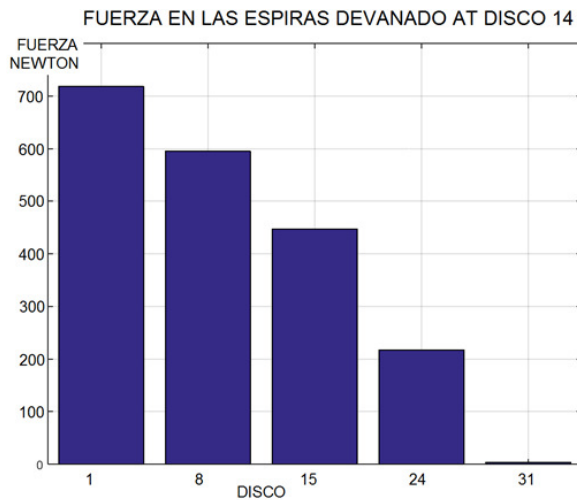




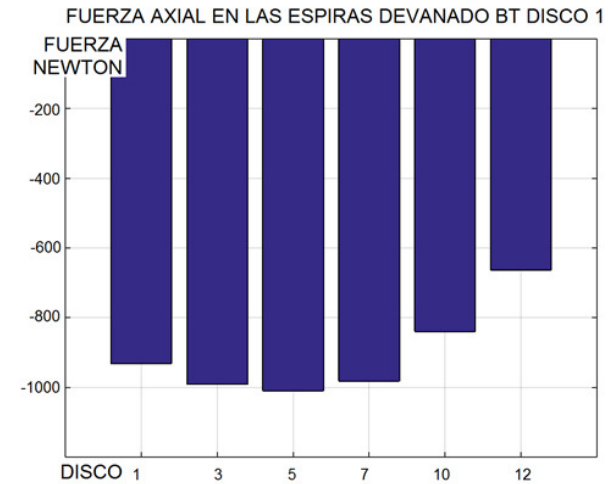
Innovate Perú tap 3



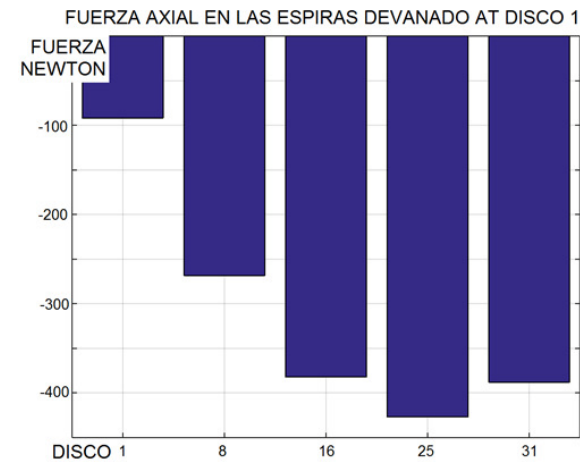
La fuerza radial máxima es -1654.72 N en la espira 12



La fuerza radial máxima es 718.14 N en la espira 1



La fuerza axial máxima es -1009.79 N en la espira 5



La fuerza axial máxima es -426.74 N en la espira 25



Transformadores de Potencia: Cortocircuito

*Aunque los **transformadores de potencia** han logrado un alto grado de confiabilidad en su operación, las **fallas** pueden ocurrir en una condición anormal llamado **cortocircuito**.*

¿Cómo verificar la capacidad del transformador para soportar un evento de Cortocircuito?



Los transformadores y los eventos de cortocircuito

Ahora, en el **diseño de transformadores**, se debe considerar una perspectiva especial: **el comportamiento mecánico del equipo durante un evento de cortocircuito.**

¿Cómo ha evolucionado el estado del arte?

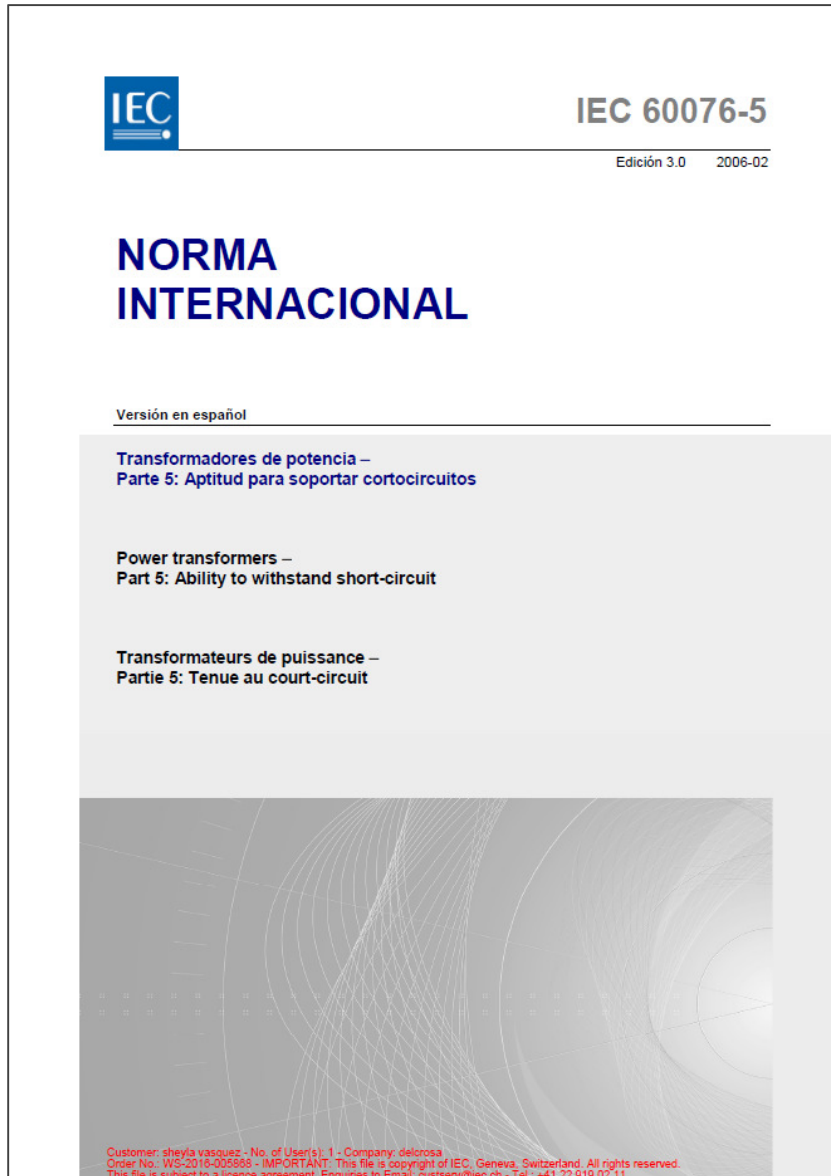
Hasta 1950:

- *M. Vidmar, un reconocido experto internacional en diseño de transformadores de potencia, concluyó lo siguiente:*
 - *El aspecto eléctrico del cortocircuito es “claro”;*
 - *El aspecto estadístico del cortocircuito está pobremente documentado;*
 - *El aspecto térmico durante el cortocircuito está escasamente “iluminado”;*
 - *El aspecto mecánico durante el cortocircuito todavía está en una profunda oscuridad.*

Desde 1950 hasta el presente:

- *Creación de nuevos materiales para la fabricación de la parte activa del transformador.*
- *Recopilación de datos en los transformadores que fallaron por cortocircuito.*
- *El cortocircuito fue el tema preferencial en el CIGRE de las sesiones 1956, 1962, 1980, 1996 y 2000.*

IEC60076-5 3ra Edición: Aptitud para soportar cortocircuitos



Alcance:

“Esta parte de la Norma IEC 60076 define los requisitos para que los transformadores de potencia soporten sin daño los efectos de las sobre-intensidades originadas por *cortocircuitos externos*.”

4.2 Aptitud para soportar los efectos dinámicos del cortocircuito:

“... *la aptitud para soportar los efectos dinámicos del cortocircuito se debe demostrar bien:*

- *por ensayos; o*
- *por cálculo y consideraciones de diseño y de fabricación (Anexo A).*

...”

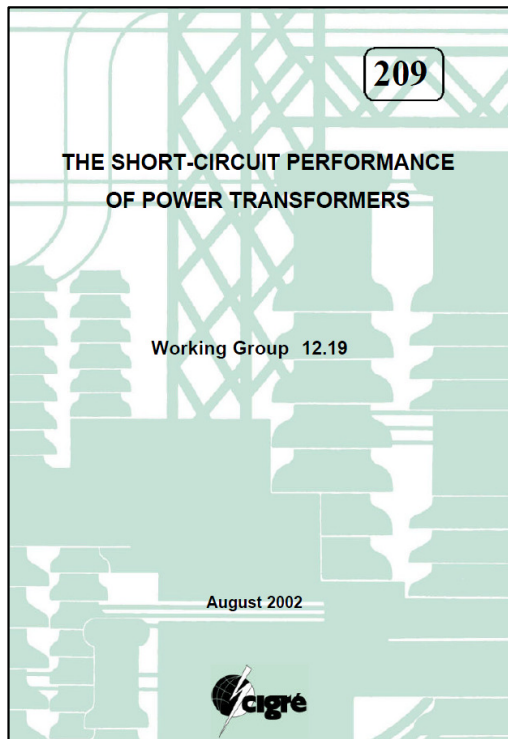
IEC60076-5 3ra Edición: Aptitud para soportar cortocircuitos

EVALUACIÓN TEÓRICA DE LA APTITUD PARA SOPORTAR LOS EFECTOS DINÁMICOS DE CORTOCIRCUITO

A.1 Objeto y campo de aplicación

Este anexo da las pautas para la evaluación teórica de la aptitud de un transformador de potencia para soportar los efectos dinámicos de cortocircuito, basadas en el cálculo y la consideración de las características de diseño y las prácticas de fabricación.

NOTA En el folleto 209 de CIGRE, "El comportamiento al cortocircuito de los transformadores de potencia", agosto 2002 se da información adicional sobre cuestiones técnicas relativas a la capacidad al cortocircuito de los transformadores de potencia.



$$1) \sigma = \frac{F_{rad} \times D}{2 \times a} \quad \text{Falla por excesivos esfuerzos tangenciales (AT)}$$

$$2) \sigma_{crit} = \frac{E(\delta) \times (kt)^2 \times (N)^2}{12 \times D^2} \quad \text{Falla por pandeo radial (BT)}$$

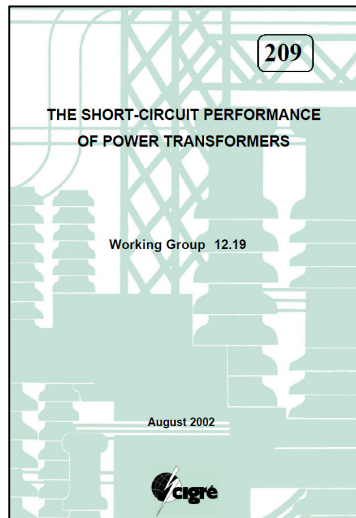
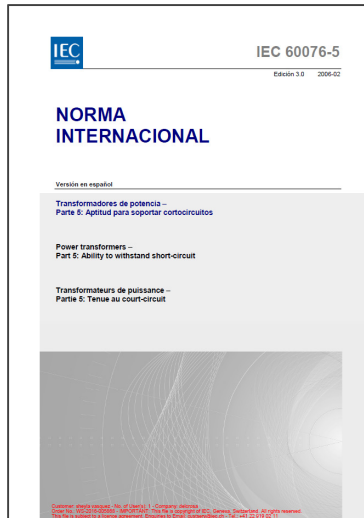
$$3) \sigma = \frac{F_{rad} \times l^2}{2 \times b \times t^2} \quad \text{Falla por flexión radial (BT)}$$

$$4) \sigma = \frac{F_{ax} \times L^2}{2 \times t \times b^2} \quad \text{Falla por flexión axial (AT y BT)}$$

$$5) \sigma_{crit} = \frac{E \times b^2}{14 \times R^2} + \frac{m \times s \times c \times t^2}{12 \times \pi \times R \times b^2} \quad \text{Falla por inclinación (AT y BT)}$$

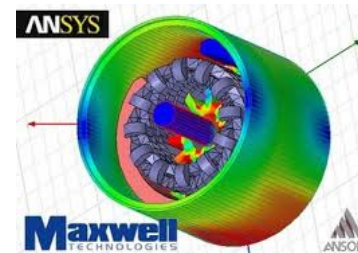
Diseño de Transformadores en un evento de Cortocircuito

Criterio de diseño de Transformadores utilizado por **DELCROSA**



Reglas de diseño por nuestra experiencia como fabricante.

Análisis por elementos finitos utilizando programas especializados en simulación computacional

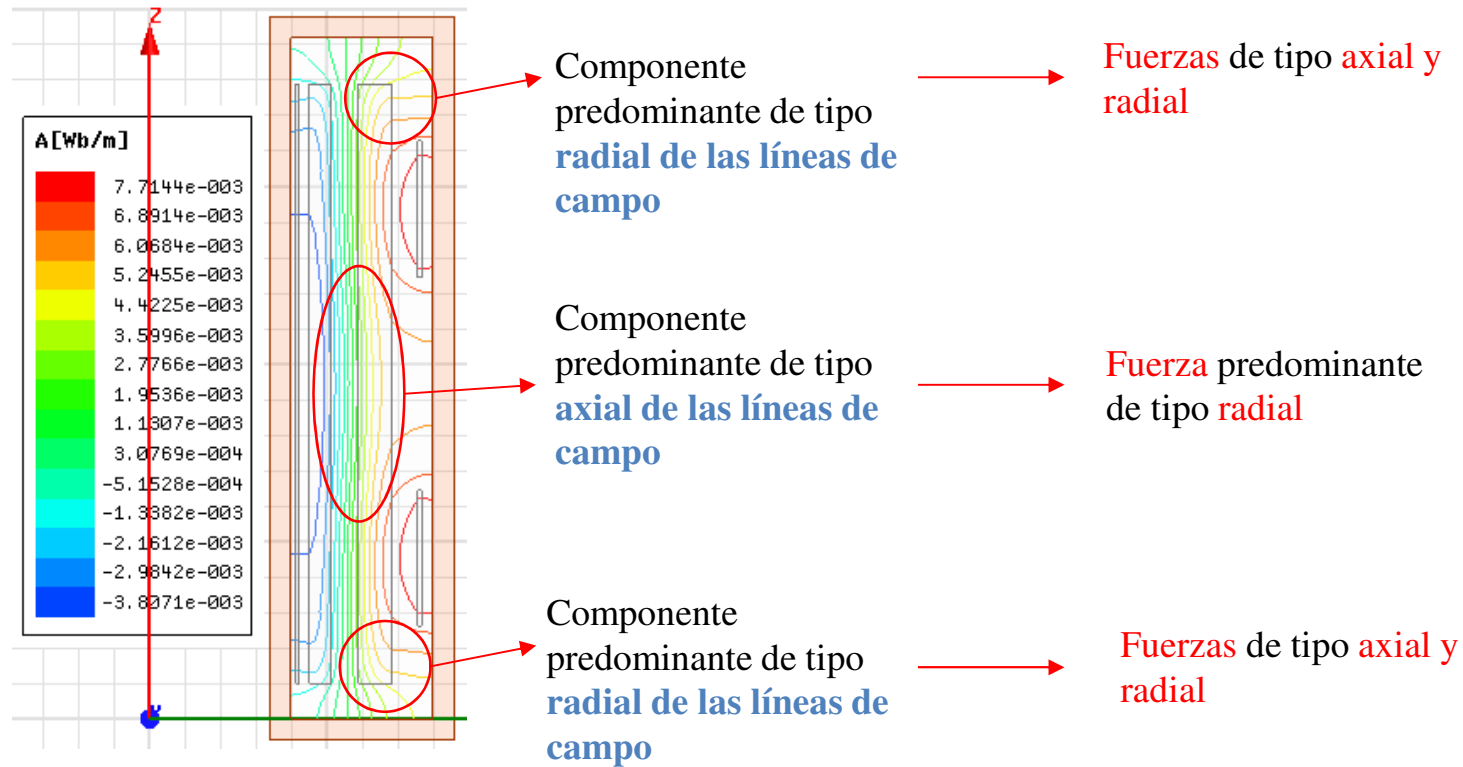


Consideraciones de fabricación:

- Prensaje de bobinas.
- Secado de la parte activa.



Fuerzas electromagnéticas en transformadores de potencia



Patrón 2D de las líneas de campo

Fuerzas de cortocircuito

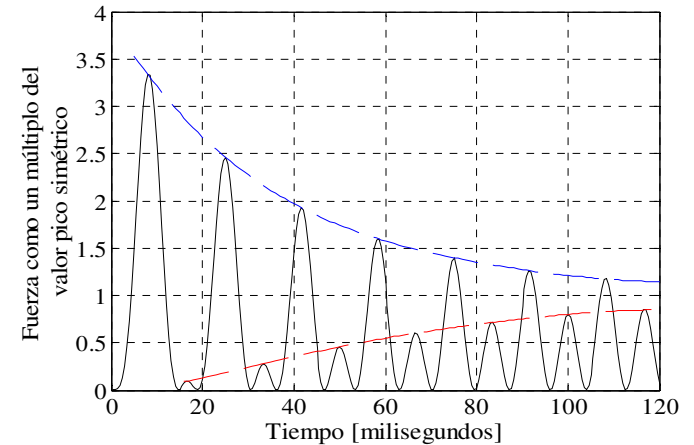


Fuerzas electromagnéticas en transformadores de potencia

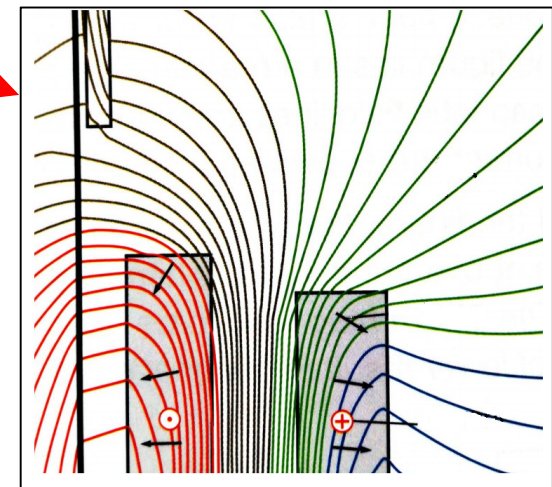
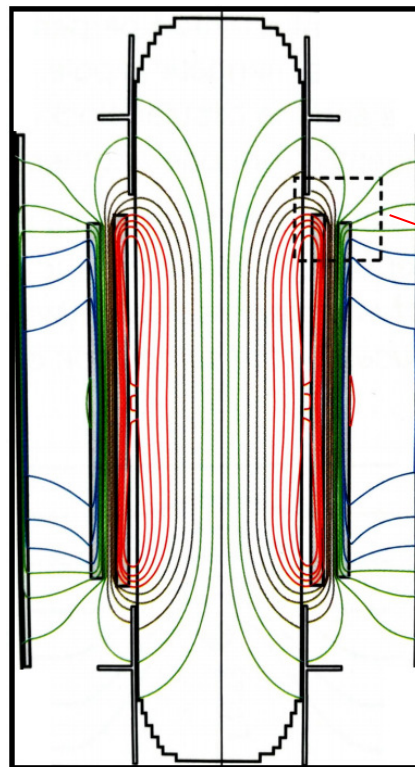
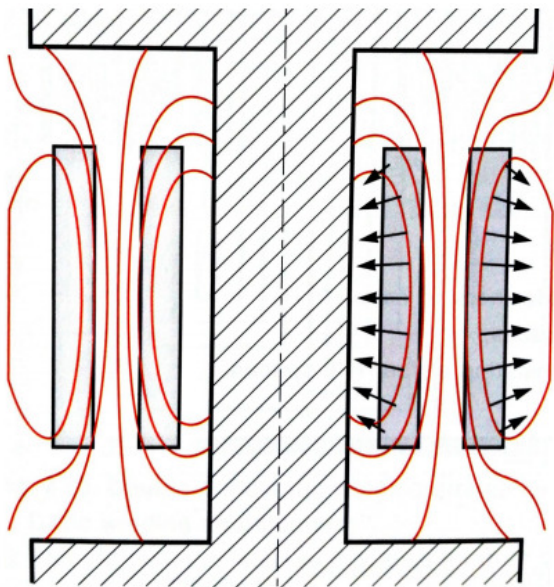
Fuerzas de cortocircuito

$$F_{(t)} = F_{max} \left(\frac{1}{2} + e^{-2t/\tau} - 2e^{-t/\tau} \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right)$$

La fuerza máxima es utilizada en los cálculos para las verificaciones de diseño



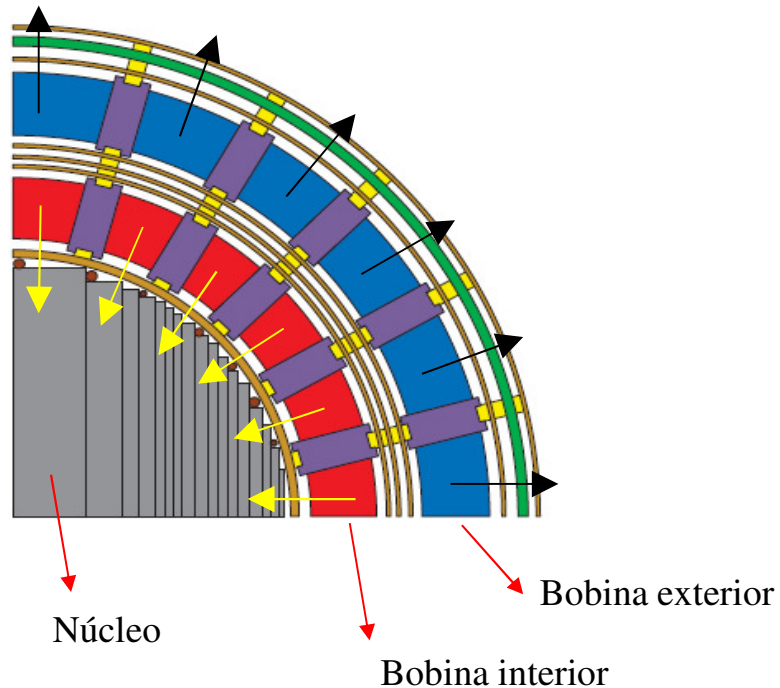
Distribución de las Fuerzas de Cortocircuito



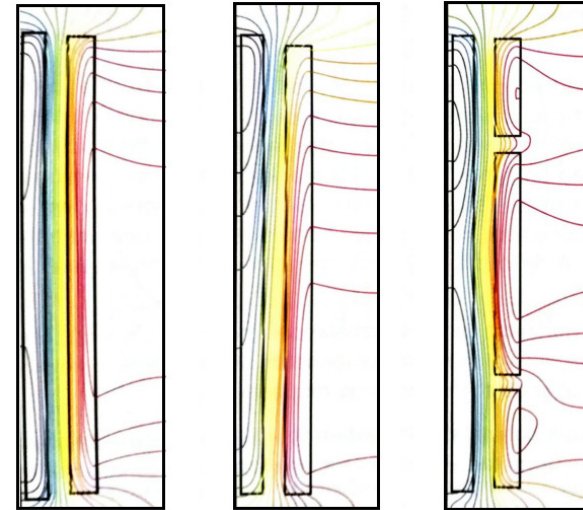


Patrones típicos de la fuerza electromagnética

Fuerza Radial



Fuerza Axial



Patrón 2D de las líneas de campo para diferentes casos

¡El patrón de la fuerza axial presenta una gran dependencia de la geometría de las bobinas y el tipo de operación del transformador!

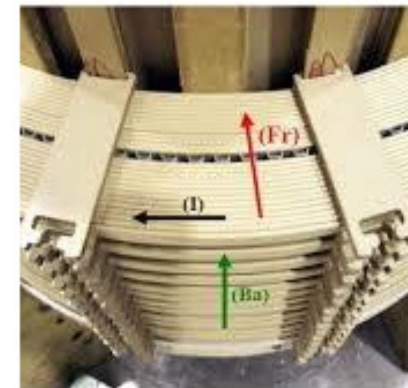


Análisis mecánico de las bobinas de un transformador de potencia

Verificación de la bobina para prevenir las siguientes fallas:

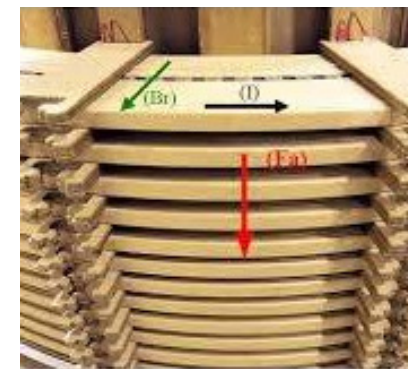
1. Fallas debido a la fuerza radial

- a) Falla por excesivos esfuerzos tangenciales, en las bobinas exteriores.
- b) Falla por pandeo radial, en las bobinas interiores.
- c) Falla por flexión debido a la fuerza radial, en las bobinas interiores.



2. Fallas debido a la fuerza axial

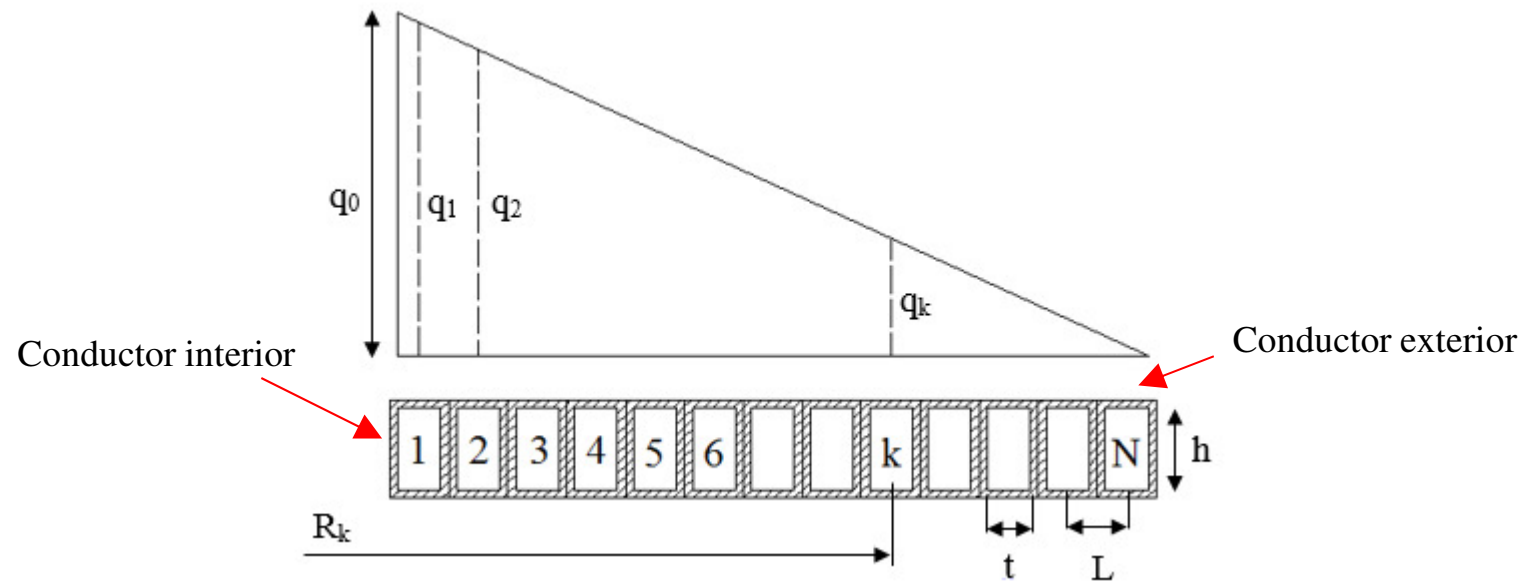
- a) Falla por inclinación o colapso axial
- b) Fallas flexión debido a la fuerza axial



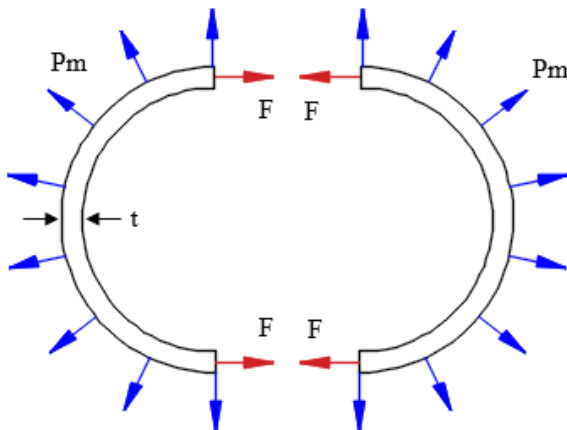


Verificación por esfuerzos tangenciales

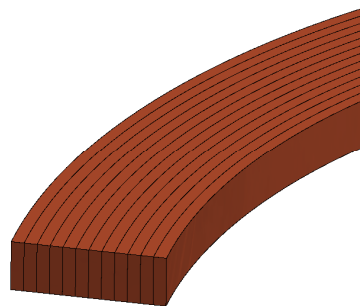
Análisis de un disco de la Bobina



Modelo N°1



Modelo N°2

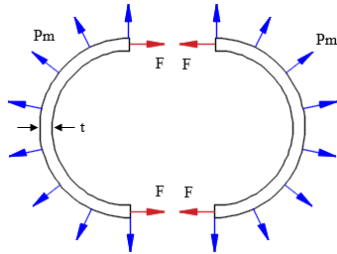


Modelo N°3



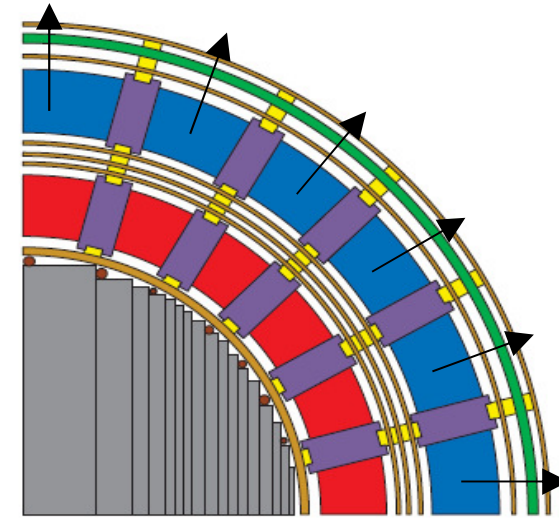
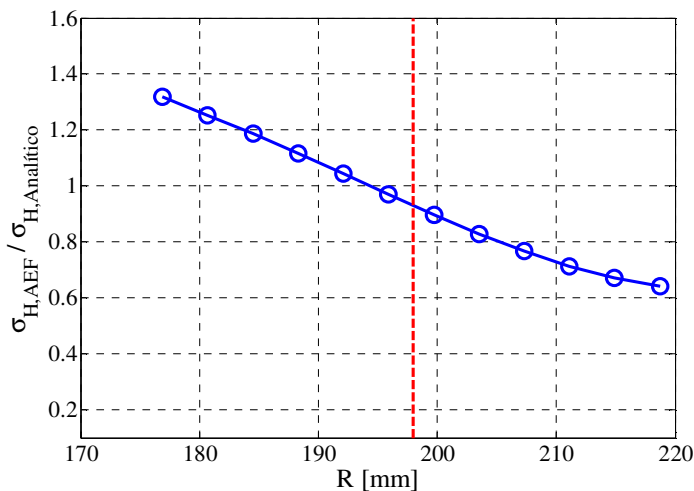
Verificación por esfuerzos tangenciales

Esfuerzo tangencial medio (válido sólo para el conductor medio):

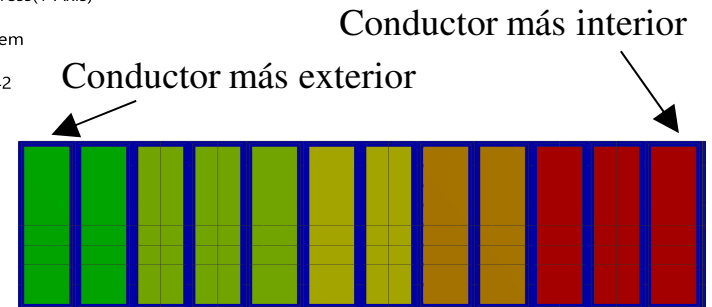
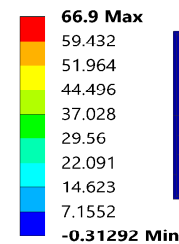


$$\sigma_H = \frac{F}{A} = \frac{P_m R_m}{t}$$

Análisis por elementos finitos (Modelo completo):



D: HOOP STRESS ANALYSIS
 Normal Stress
 Type: Normal Stress(Y Axis)
 Unit: MPa
 Coordinate System
 Time: 1
 11/08/2017 17:42

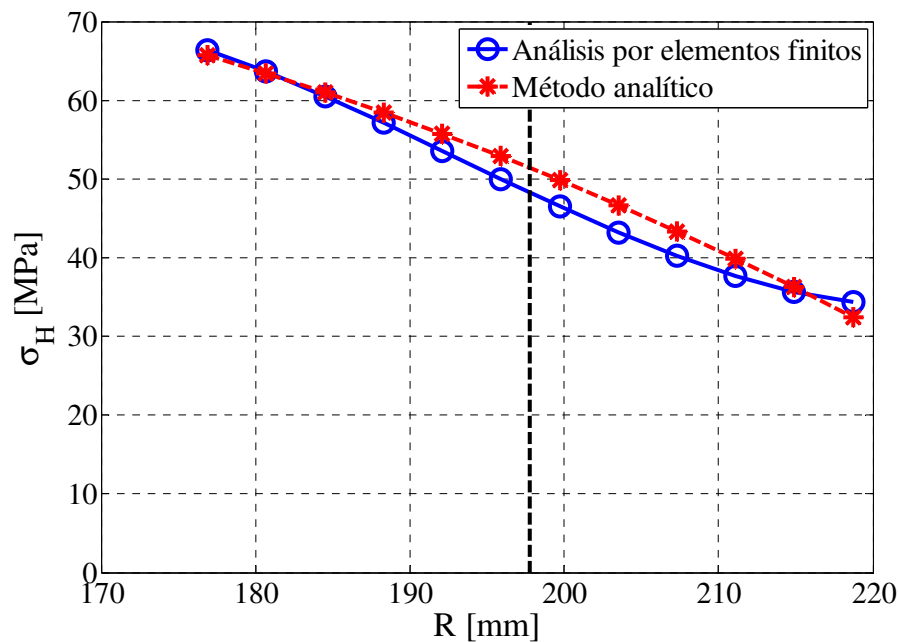


División entre los esfuerzos obtenidos por ANSYS y el método analítico (fórmula):
 Los conductores interiores están más esforzados (30 % mayor que el esfuerzo medio)

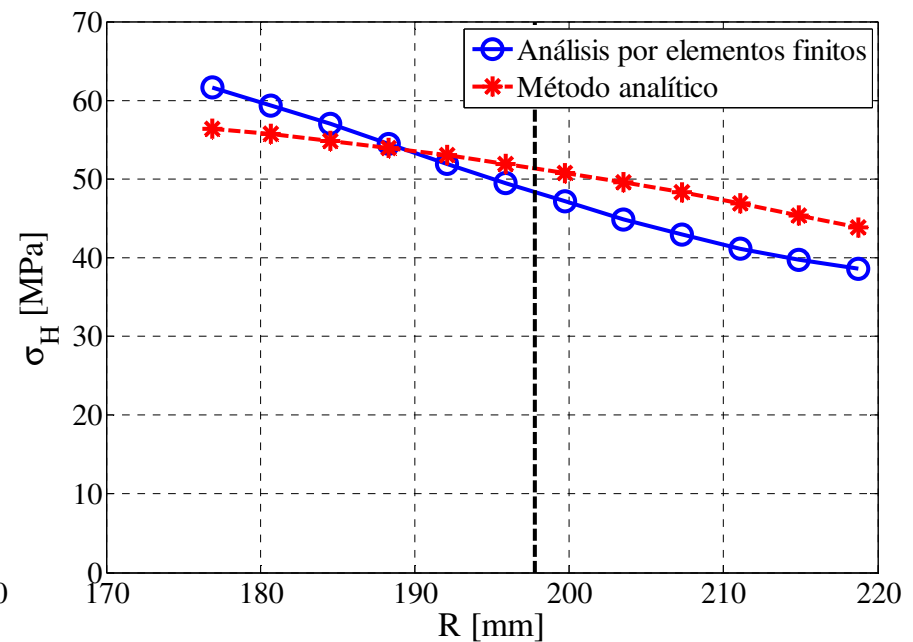


Verificación por esfuerzos tangenciales

Esfuerzo tangencial medio (válido sólo para el conductor medio):



(a) $E_{papel} = 202$ MPa

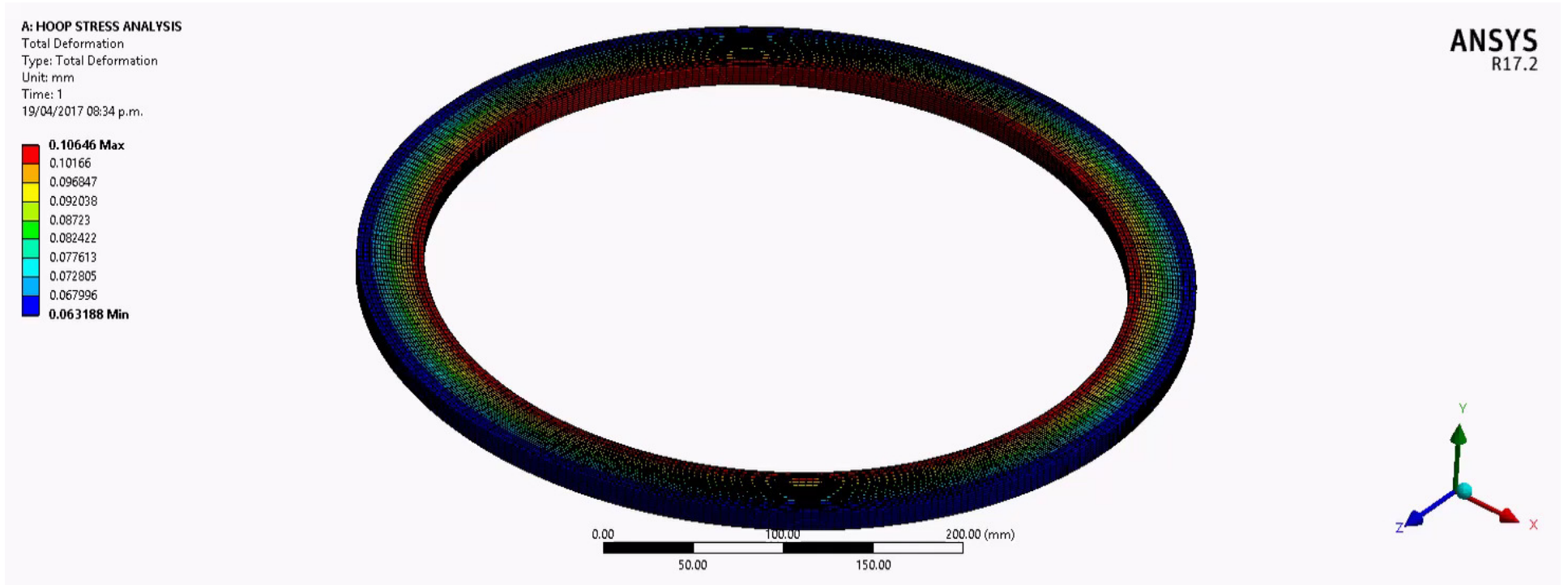


(b) $E_{papel} = 500$ MPa

Según la norma IEC 60076-5 (Anexo A), el **esfuerzo tangencial medio** máximo permitido es: $0.9R_{p0.2}$



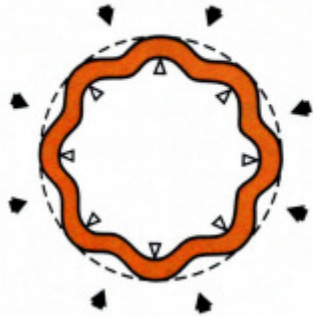
Verificación por esfuerzos tangenciales



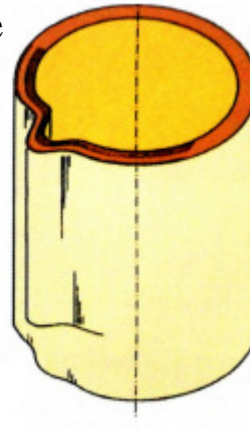
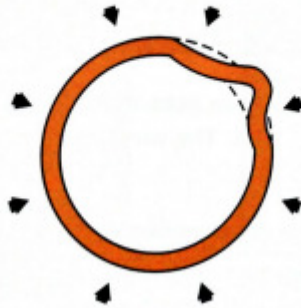


Verificación por pandeo radial

Pandeo radial con
soportes radiales



Pandeo radial libre



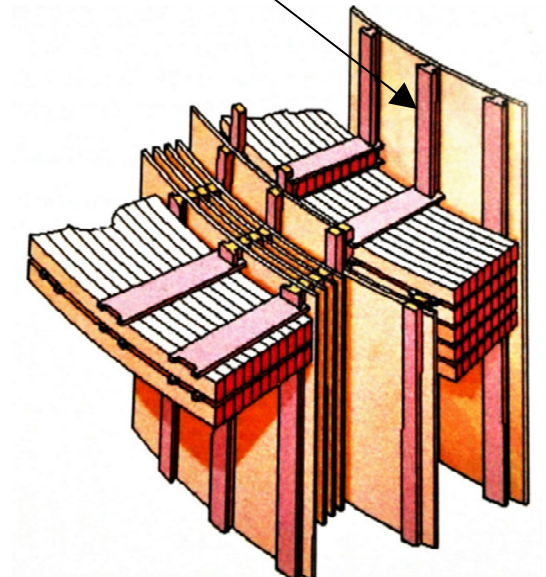
Modos de falla debido a la compresión de la bobina interior:

- Inestabilidad mecánica (pandeo radial).
- Deformaciones excesivas.

Tipos de pandeo radial

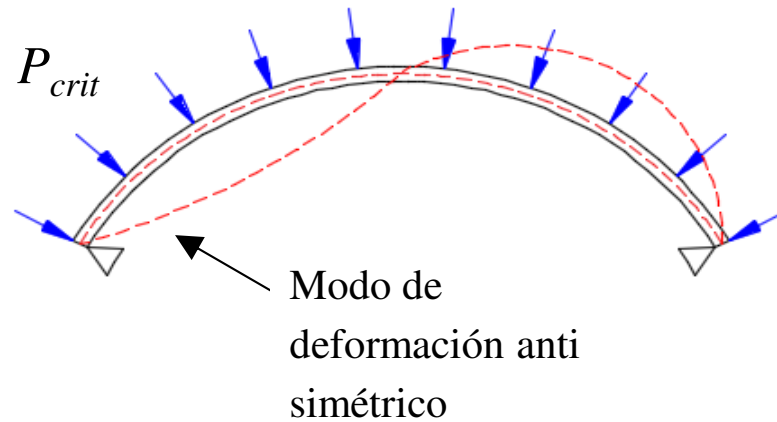
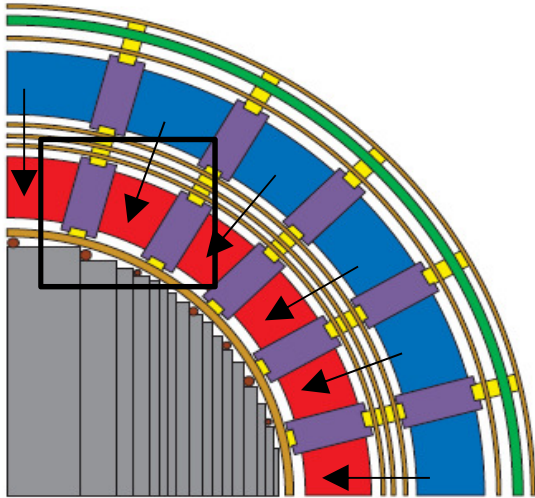
- Con soportes radiales (espaciadores axiales)
- Sin soportes radiales o “Libre”

Espaciadores axiales





Verificación por pandeo radial



Método analítico:

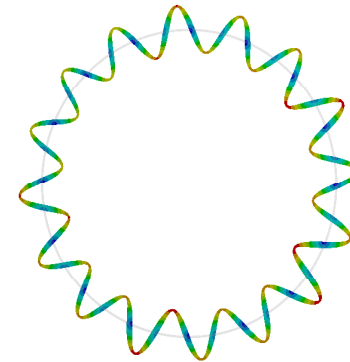
Fórmula propuesta en el Cigré 209

(Agosto 2002):

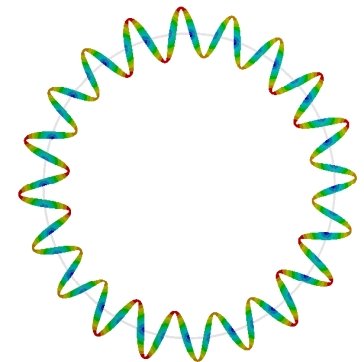
$$P_{crit} = \frac{E_{(\sigma)}}{12} \left(\frac{t}{R_m} \right)^3 (Z^2 - 1)$$

Módulo de elasticidad variable en función de la curva esfuerzo-deformación del cobre (análisis no lineal).

Modos de deformación por pandeo a través de ANSYS:



16 apoyos

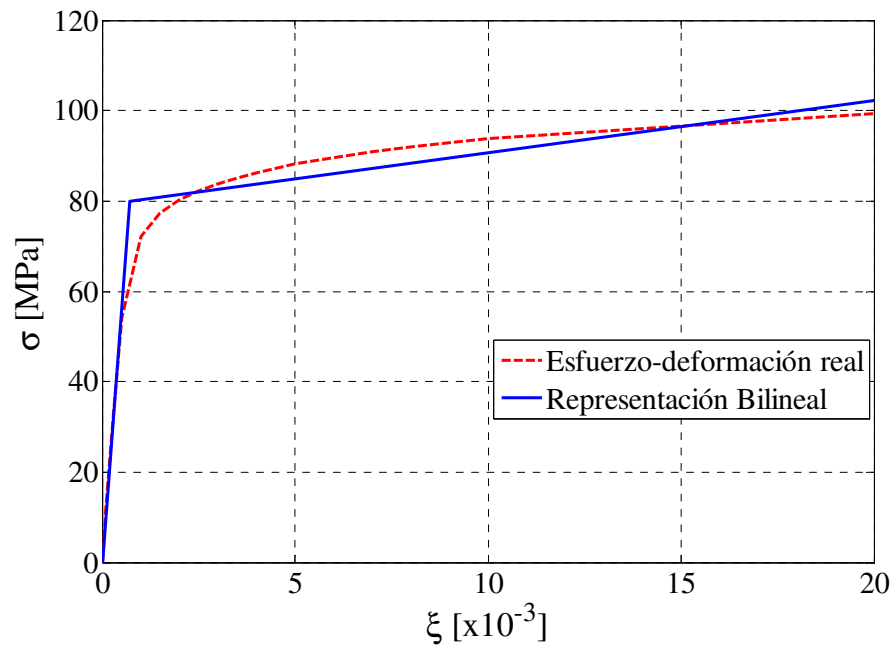


20 apoyos



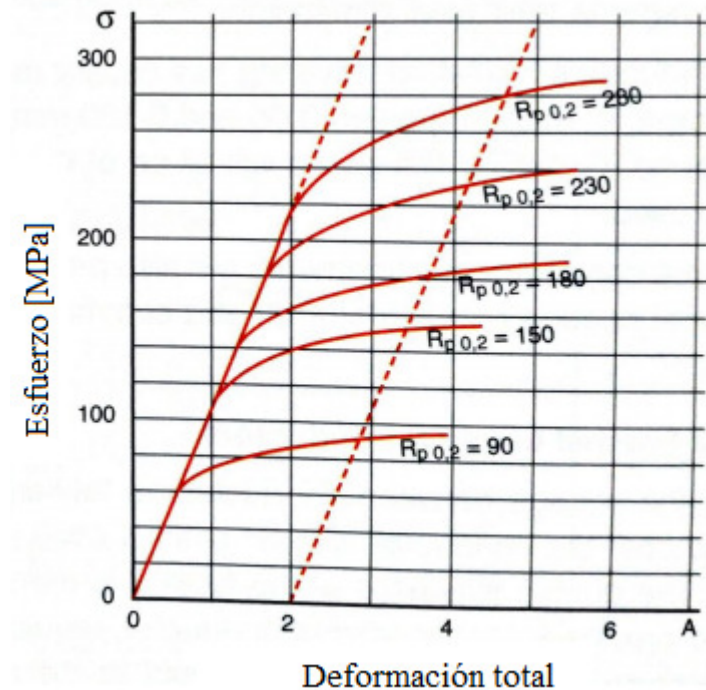
Verificación por pandeo radial

Curva de esfuerzo-deformación unitaria



E_σ : Módulo de elasticidad variable

$$E_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \xi}$$



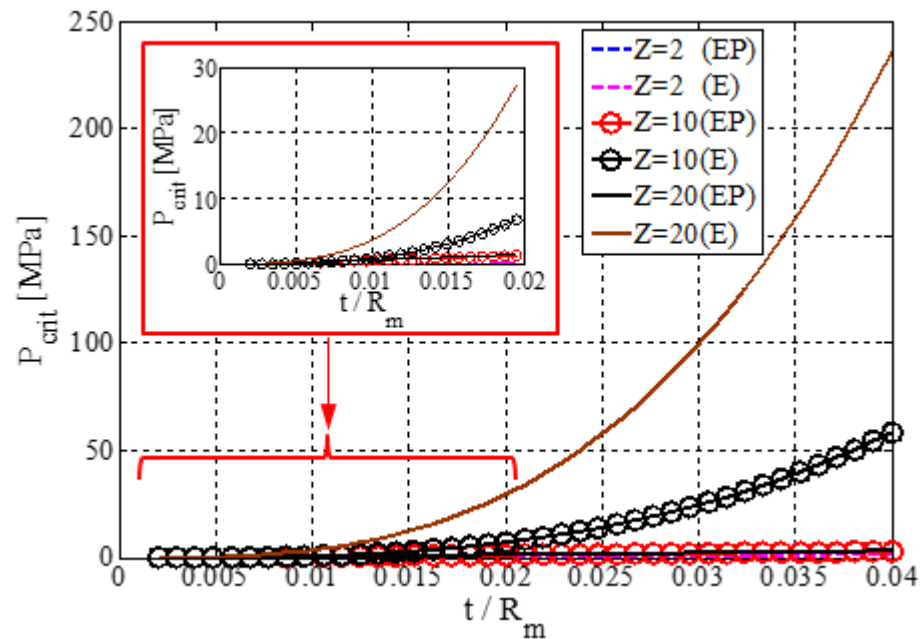
La curva Esfuerzo – deformación depende del tipo de cobre:

- Recocido
- Endurecido con trabajo en frío



Verificación por pandeo radial

Comparación del comportamiento elástico (E) y elasto-plástico (EP) del material en los resultados de la presión crítica de pandeo P_{crit}



Método elástico: $E_\sigma = 110 \text{ MPa}$ (constante)

Método elasto – plástico: $E_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \xi}$

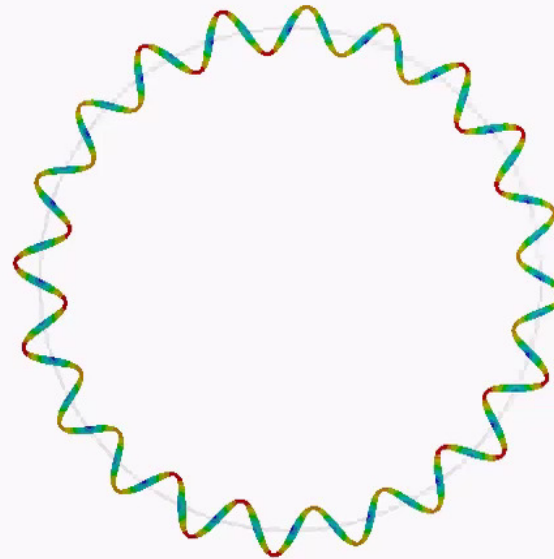
Según la norma IEC 60076-5 (Anexo A), el “esfuerzo de compresión medio” máximo permitido es: $0.35R_{p0.2}$



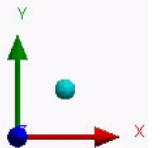
Verificación por pandeo radial

M: BUCKLING_20 SUPPORT
Total Deformation - Mode 1
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Linear): 31.531
Unit: mm
19/04/2017 08:39 p.m.

1.007 Max
0.8951
0.78321
0.67132
0.55944
0.44755
0.33566
0.22377
0.11189
0 Min

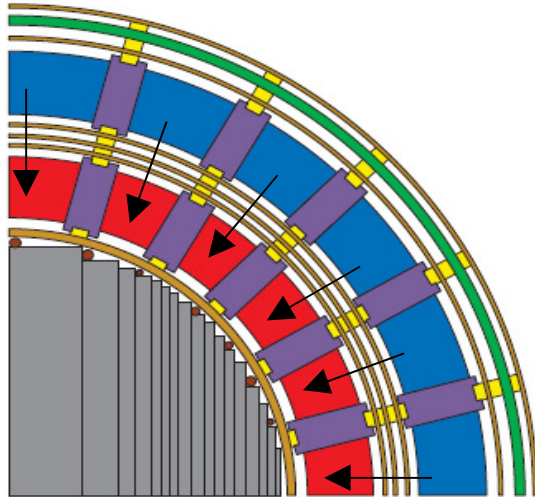


ANSYS
R17.2





Verificación por flexión radial



Método analítico (válido sólo para el **conductor medio**)

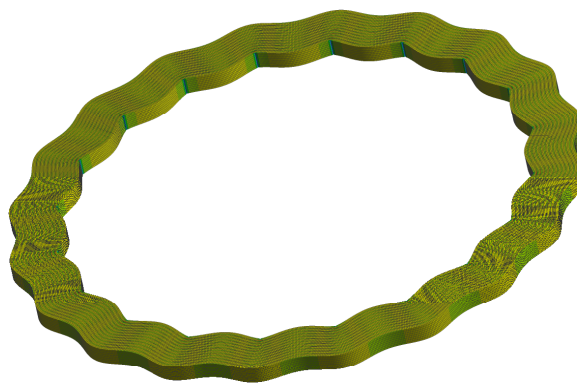
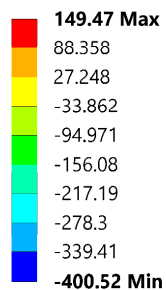
Esfuerzos de flexión en función de la relación geométrica t/R_m y el número de apoyos N .

$$\frac{\sigma_{Cmax}}{P_m} = \frac{R_m}{t} \left(\frac{\cos(\alpha)}{2\sin(\alpha)} \left(\frac{1}{f_1 + 12 \left(\frac{R_m}{t} \right)^2 f_2} \right) - 1 \right) + 3 \left(\frac{R_m}{t} \right)^2 \left(\frac{\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} - \frac{1}{\alpha} \right) \left(\frac{1}{f_1 + 12 \left(\frac{R_m}{t} \right)^2 f_2} \right)$$

Método de elementos finitos (esfuerzos en **todos los conductores**)

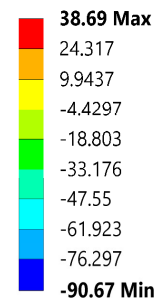
E: RADIAL BENDING ANALYSIS

Y Axis - Normal Stress - 1. s
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: MPa
Coordinate System
Time: 1
17/04/2017 09:56 p.m.

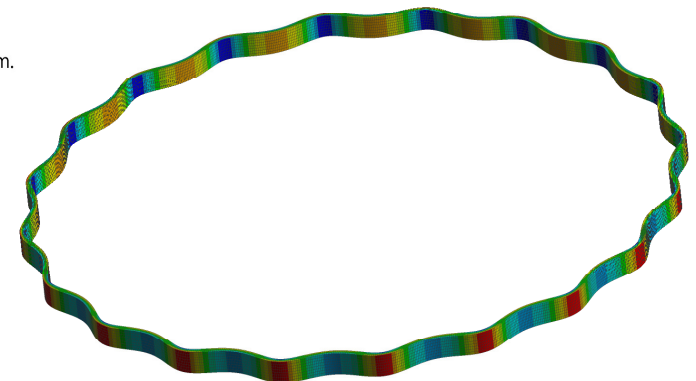


E: RADIAL BENDING ANALYSIS

Y Axis - Normal Stress - cond6 - 1. s
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: MPa
Coordinate System
Time: 1
17/04/2017 10:01 p.m.

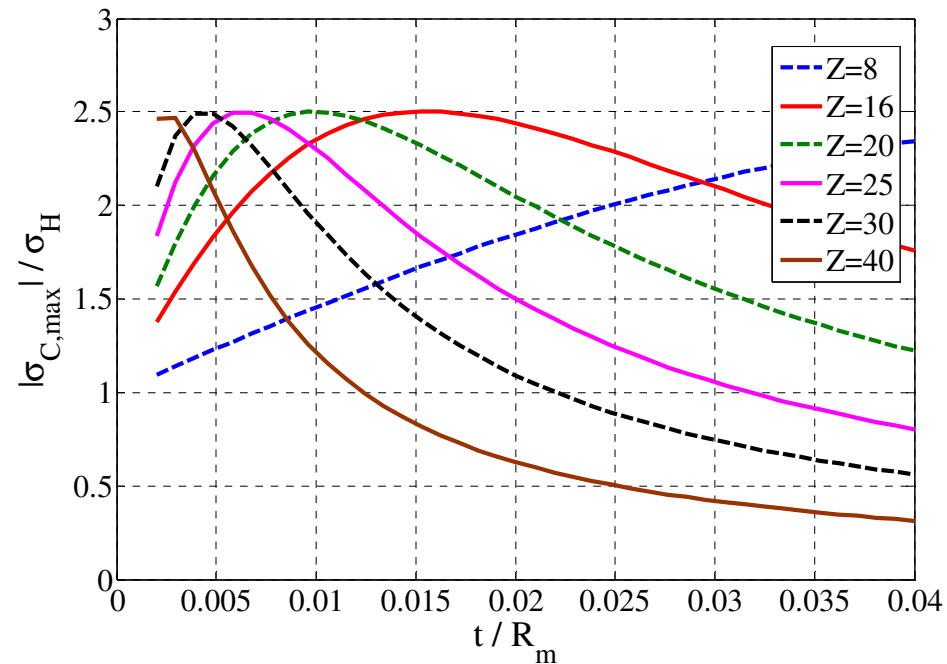


Esfuerzos en el conductor #6





Verificación por flexión radial

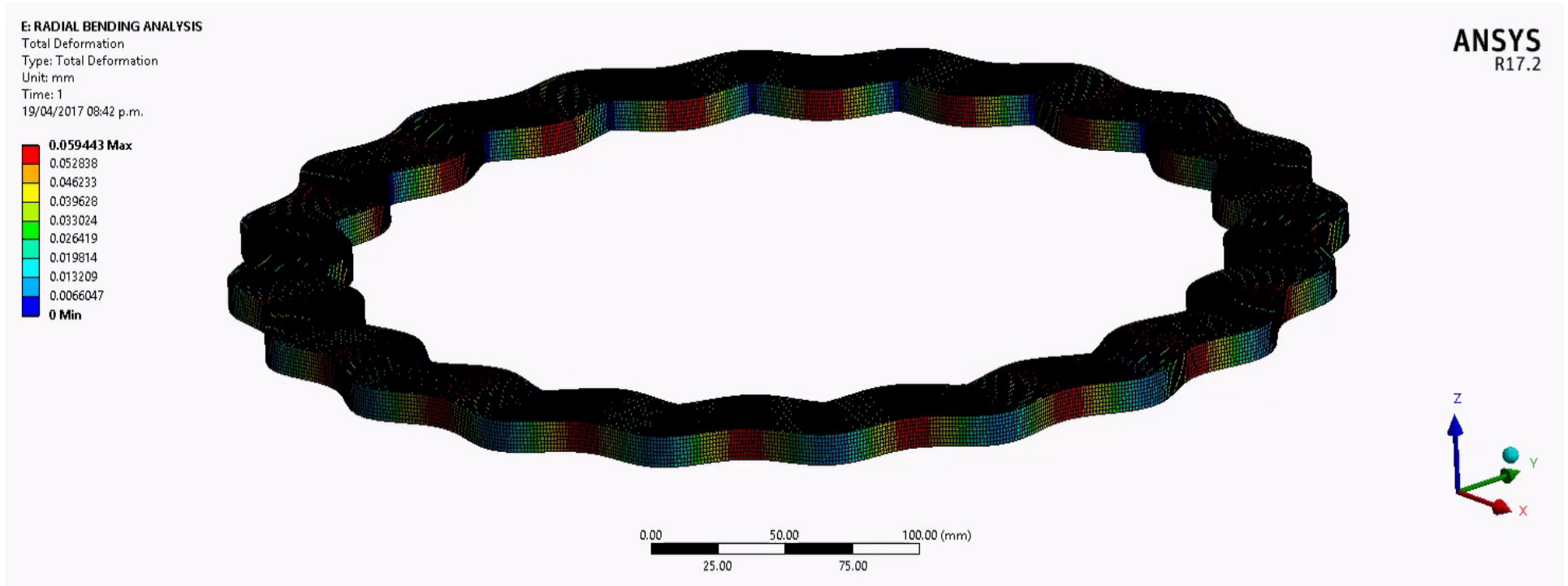


Variación de $|\sigma_{C,max}|/\sigma_H$ en función de t/R_m

Según la norma IEC 60076-5 (Anexo A), el **esfuerzo de flexión radial** máximo permitido es: $0.9R_{p0.2}$

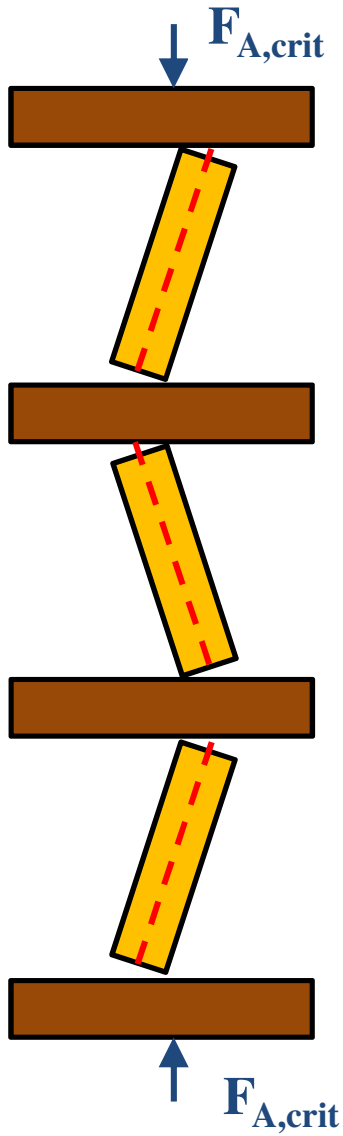


Verificación por flexión radial





Verificación por inclinación



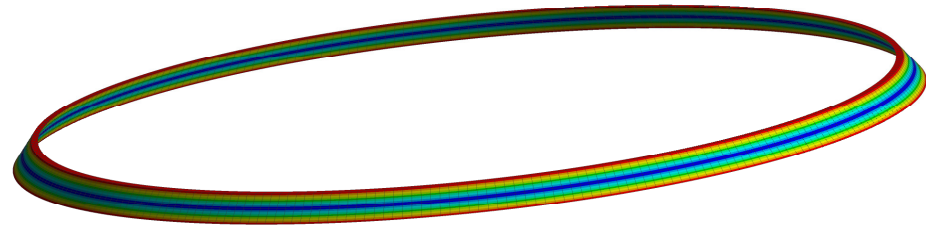
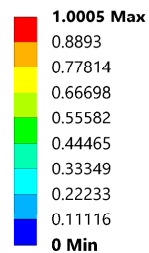
Método analítico:

$$F_{A,crit} = C_1 C_2 N_e \left[\frac{Eh^2 t}{4R_m} + 45 \left(\frac{BZt^3}{h} \right) \right]$$

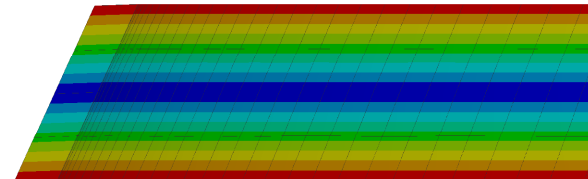
Propuesto por la norma IEC 60076-5

Método de elementos finitos

B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Linear): 225.9
 Unit: mm
 05/06/2017 12:59 p.m.



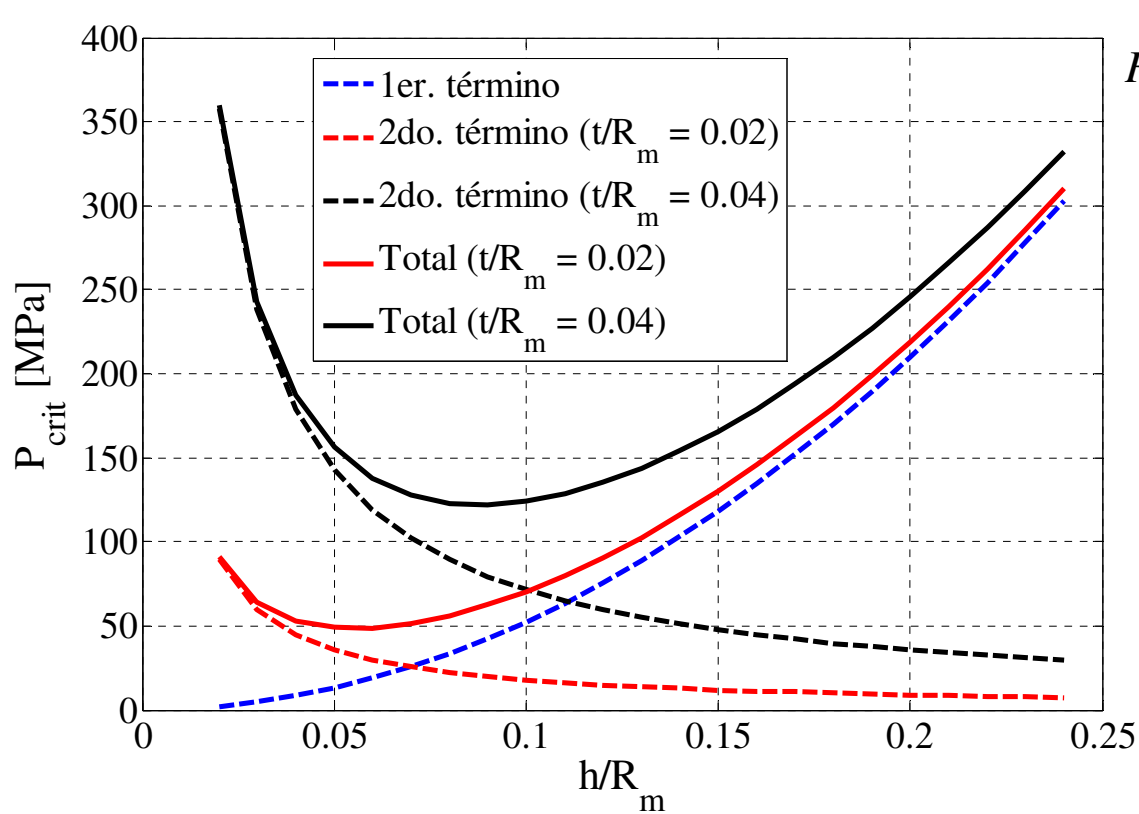
Vista de corte:



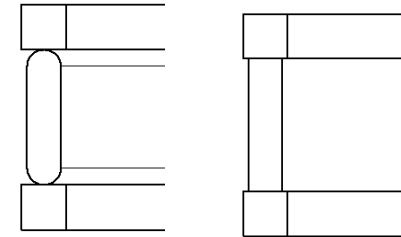


Verificación por inclinación

Presión crítica de inclinación



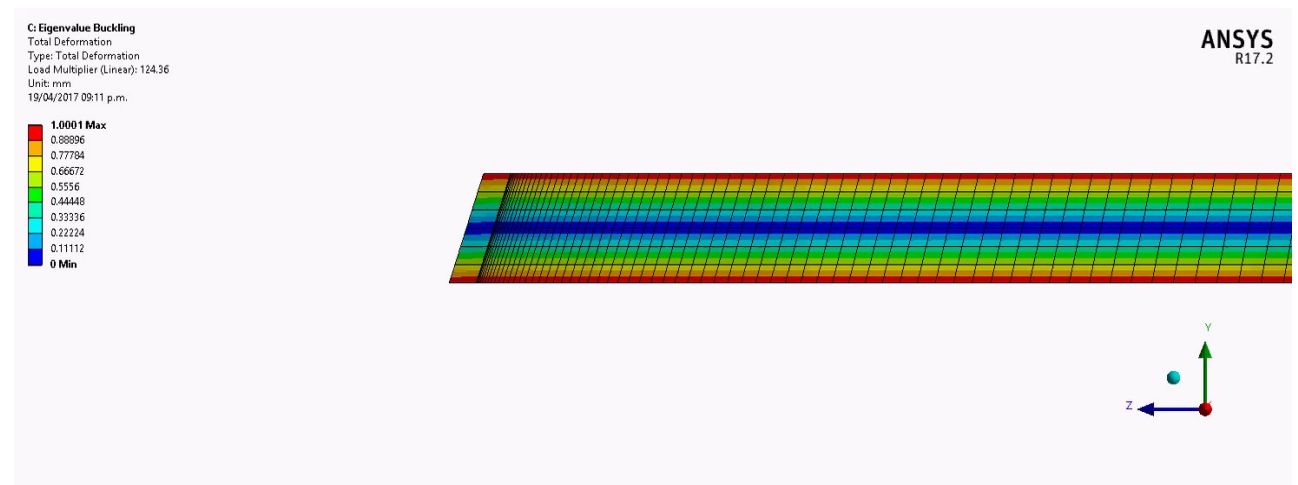
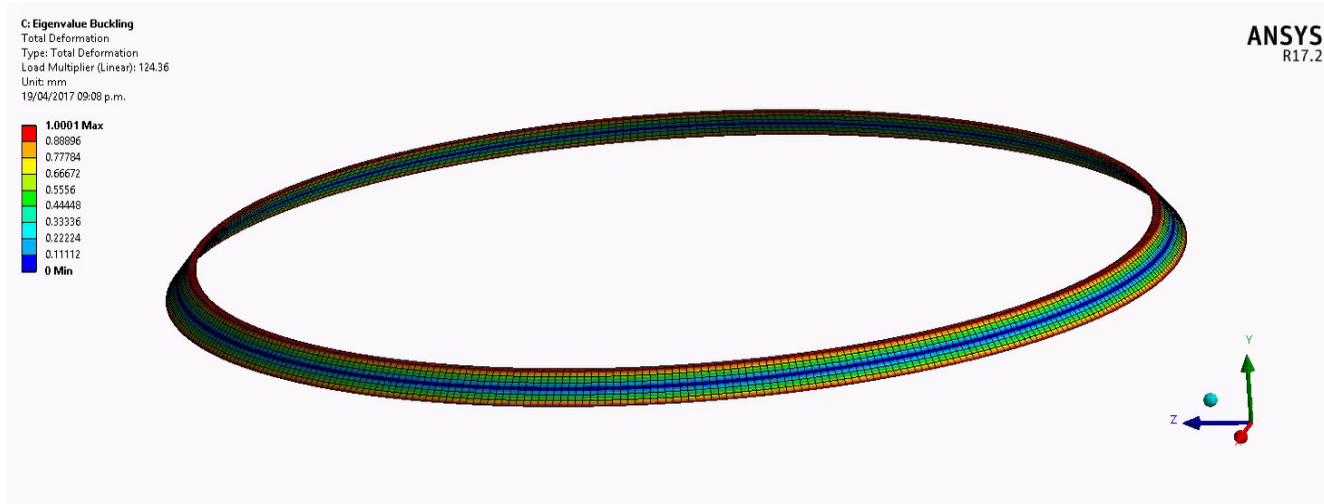
$$F_{A,crit} = C_1 C_2 N_e \left[\frac{E h^2 t}{4 R_m} + 45 \left(\frac{B Z t^3}{h} \right) \right]$$



Según la norma IEC 60076-5 (Anexo A), el **fuerza de inclinación** máximo permitido es: $0.8 F_{crit}$



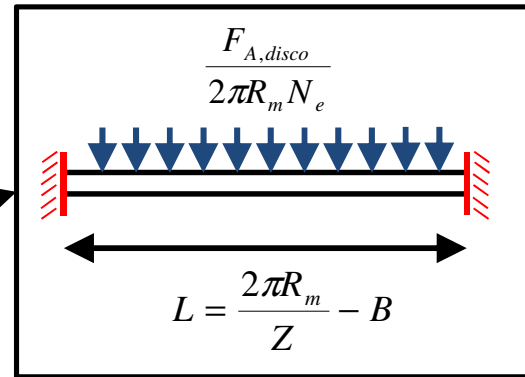
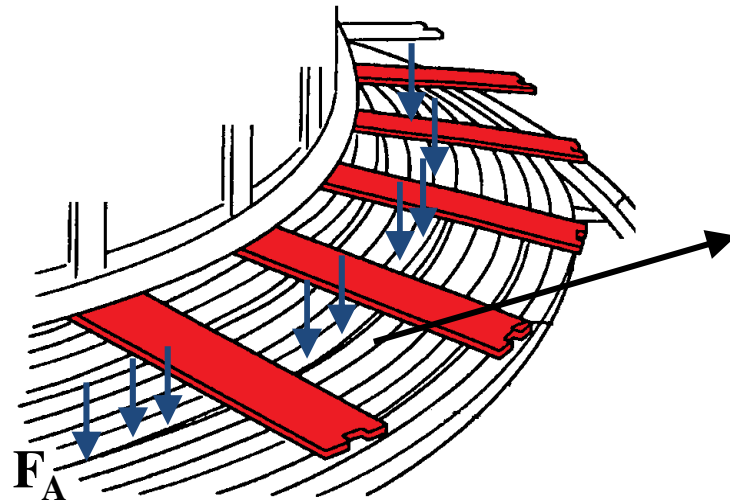
Verificación por inclinación





Verificación por flexión axial

Método analítico:

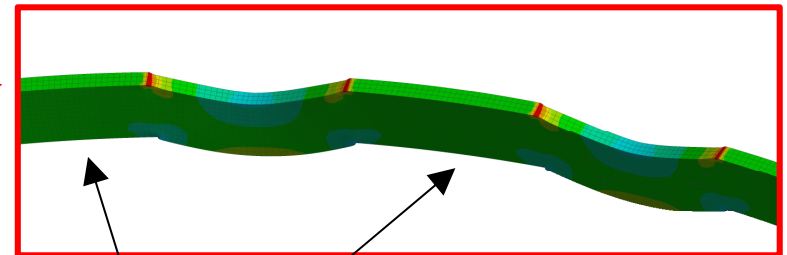
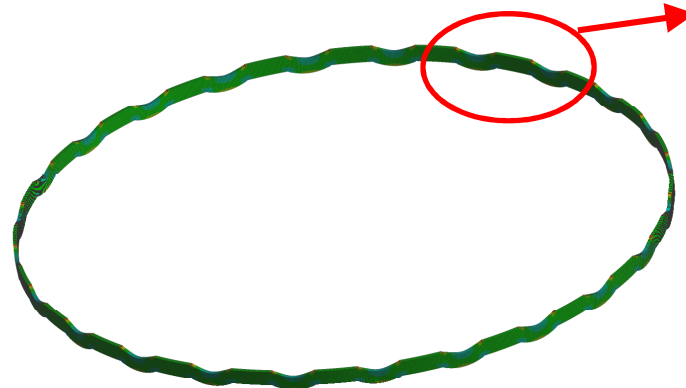
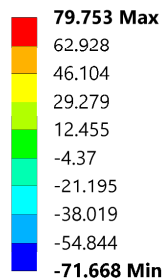


Según la norma IEC 60076-5 (Anexo A), el **esfuerzo de flexión axial** máximo permitido es: $0.9R_{p0.2}$

$$\sigma_F = \frac{F_{A,disco}}{4\pi R_m t N_e} \left(\frac{L}{h} \right)^2$$

Método de elementos finitos:

A: Static Structural
 Normal Stress
 Type: Normal Stress(Y Axis)
 Unit: MPa
 Coordinate System
 Time: 1
 18/04/2017 09:11 p.m.



Ubicación de los espaciadores radiales:



Verificación por flexión axial

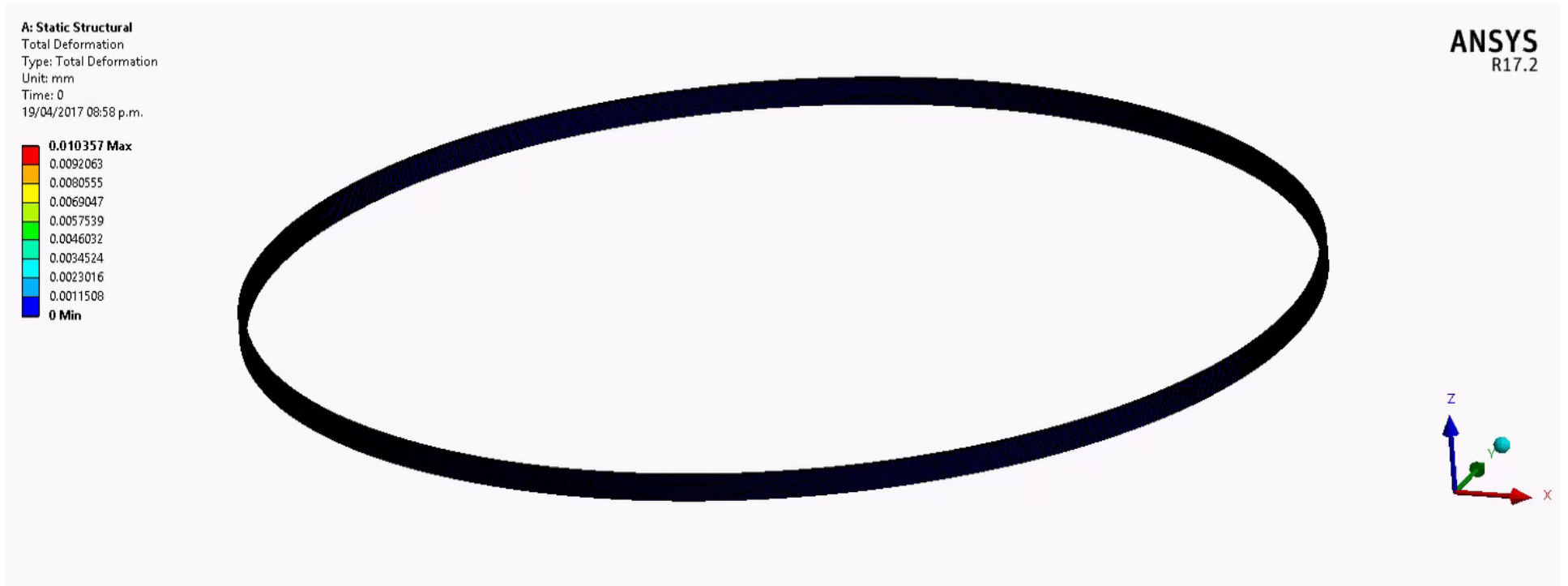




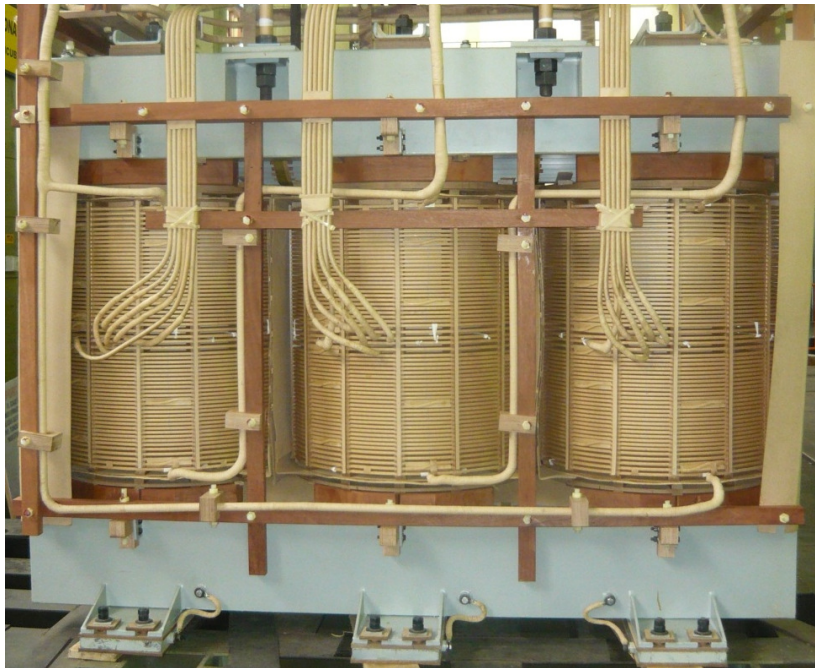
Tabla resumen según la norma IEC 60076-5

Modo de falla	Bobinas					
	AT			BT		
	<i>Act.</i>	<i>Perm.</i>	<i>Obs.</i>	<i>Act.</i>	<i>Perm.</i>	<i>Obs.</i>
Esfuerzo circunferencial	68.5 MPa	80 MPa	OK	N.A.	N.A.	N.A.
Pandeo radial	N.A.	N.A.	N.A.	0.44 MPa	0.92 MPa	OK
Flexión por fuerza radial	N.A.	N.A.	N.A.	20.1 MPa	31.5 MPa	OK
Inclinación o colapso axial	303.6 kN	1166 kN	OK	140.4 kN	2140.7 kN	OK
Flexión por fuerza axial	14.8 MPa	80 MPa	OK	4.62 MPa	80 MPa	OK

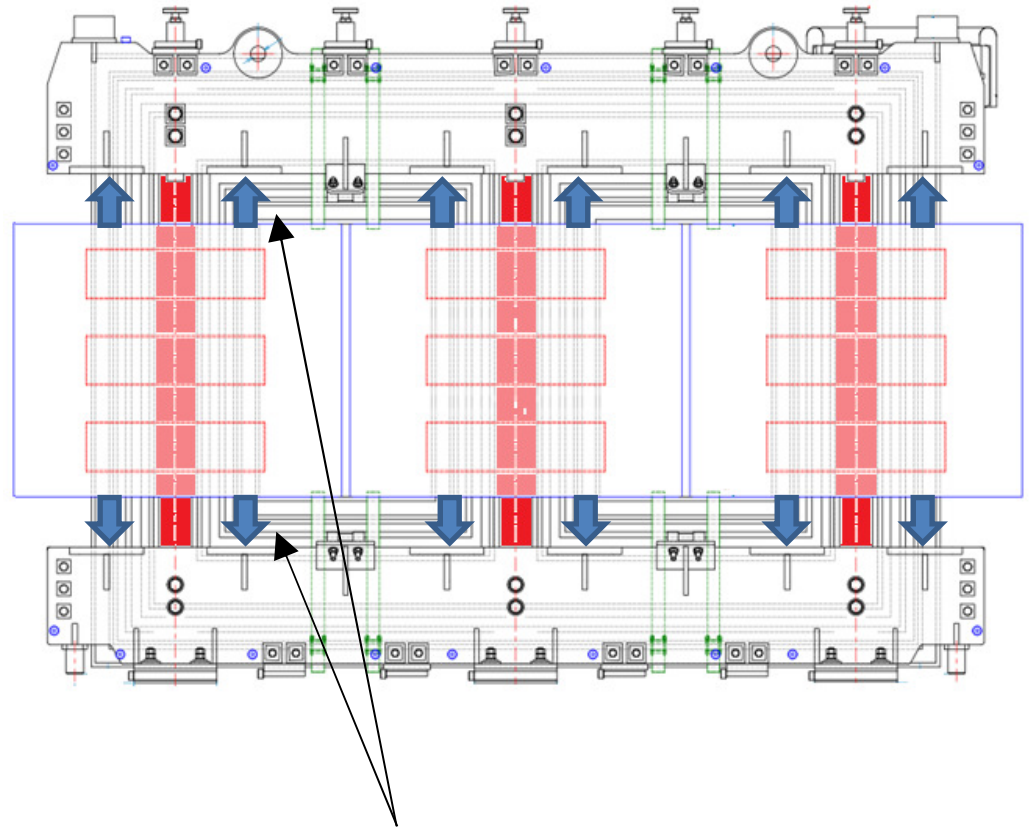


Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia

Parte activa de un transformador de potencia

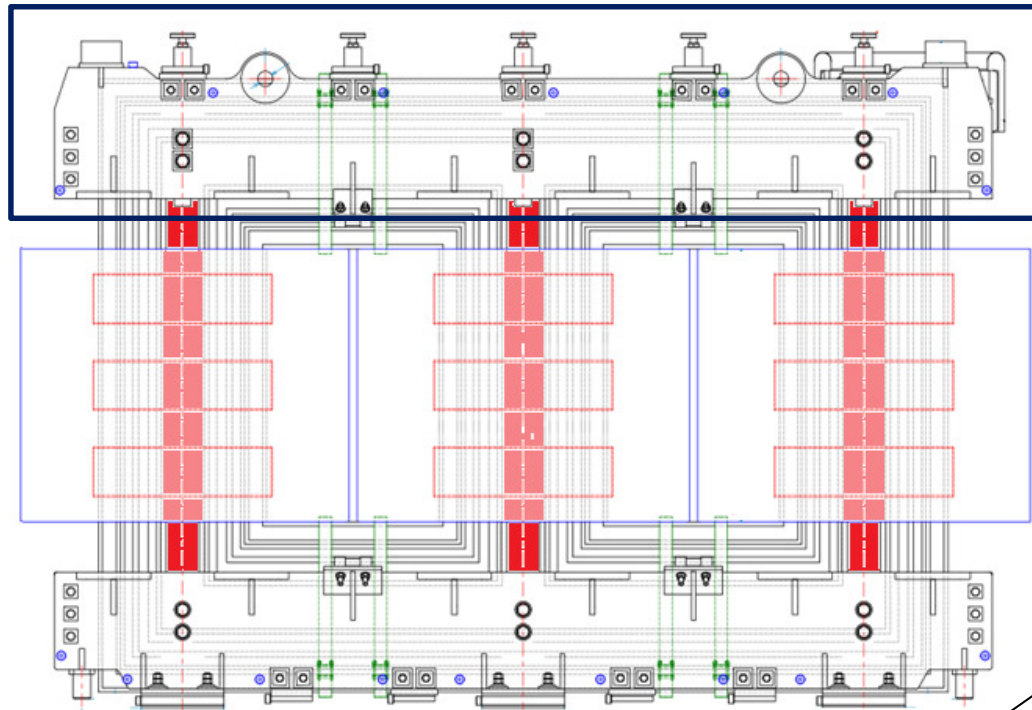


Caso de análisis: **Fuerzas de cortocircuito**



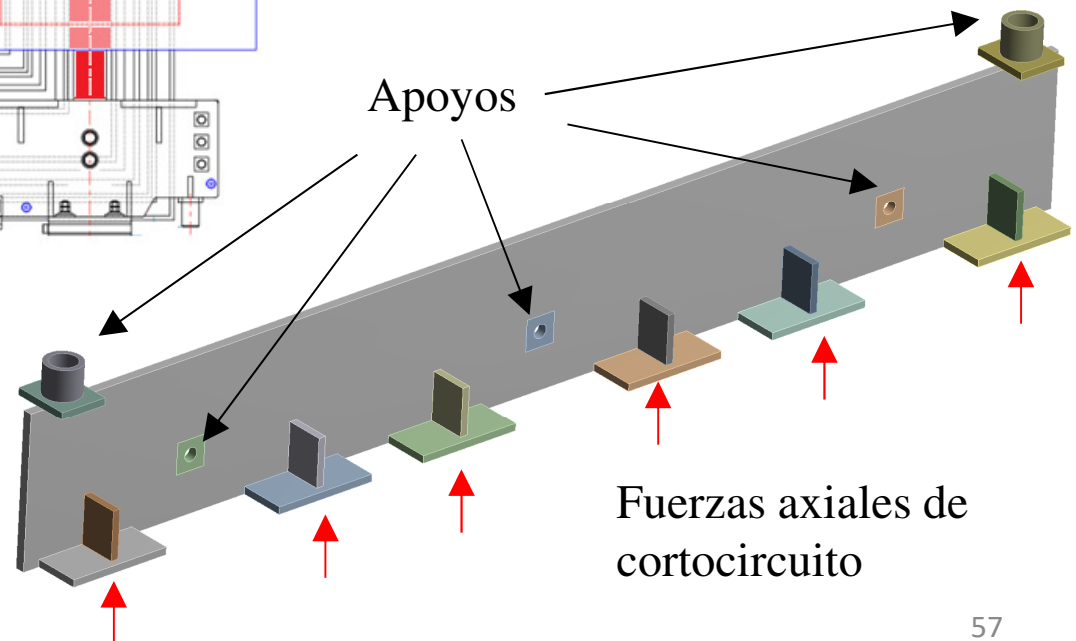
Fuerzas axiales (*hacia afuera*) de cortocircuito

Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia



Análisis del Travesaño

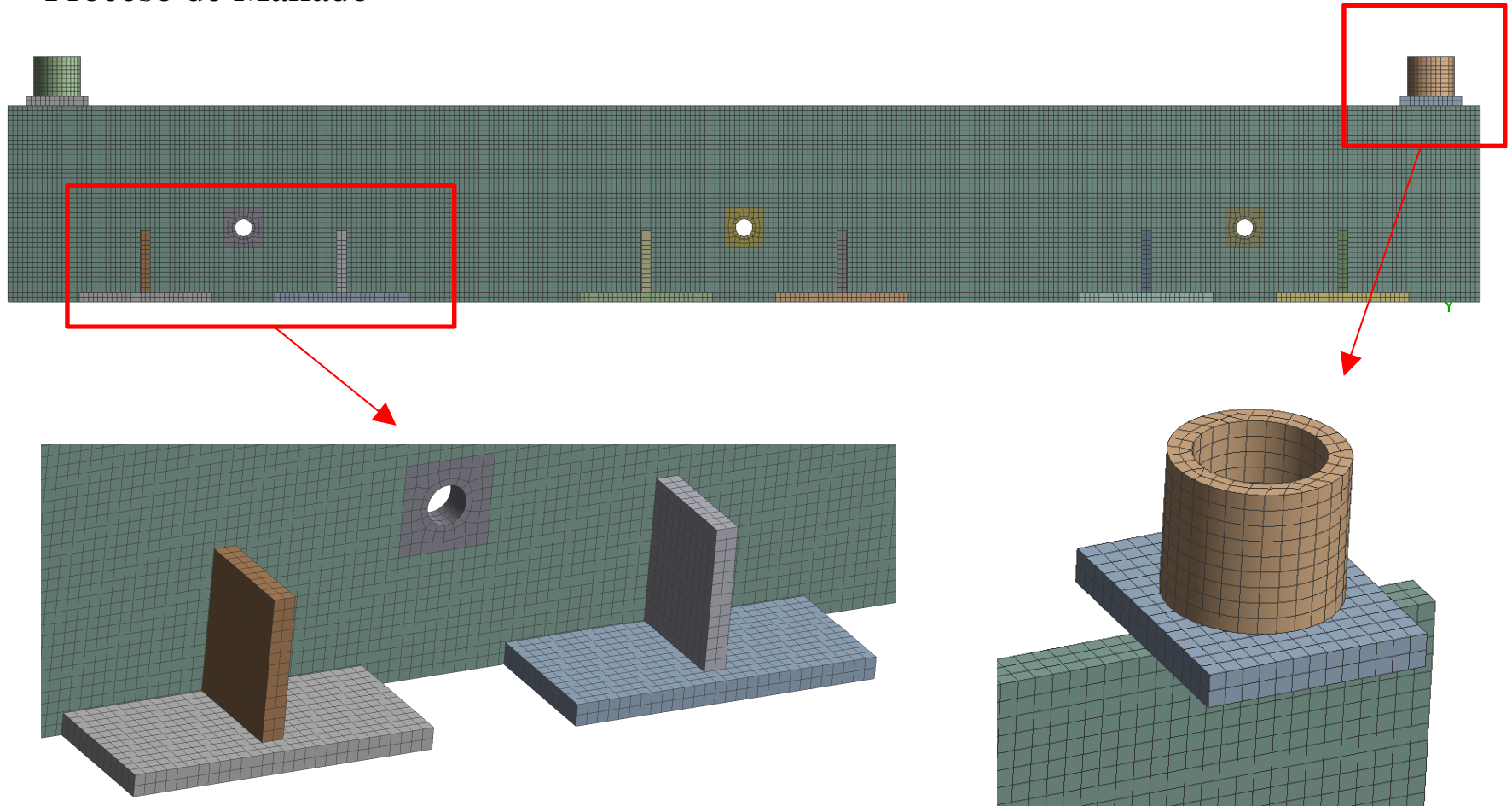
Simplificación del modelo





Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia

Proceso de Mallado





Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia

F: Static Structural

Normal Stress

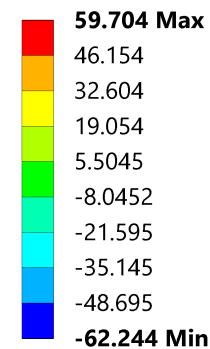
Type: Normal Stress(X Axis)

Unit: MPa

Global Coordinate System

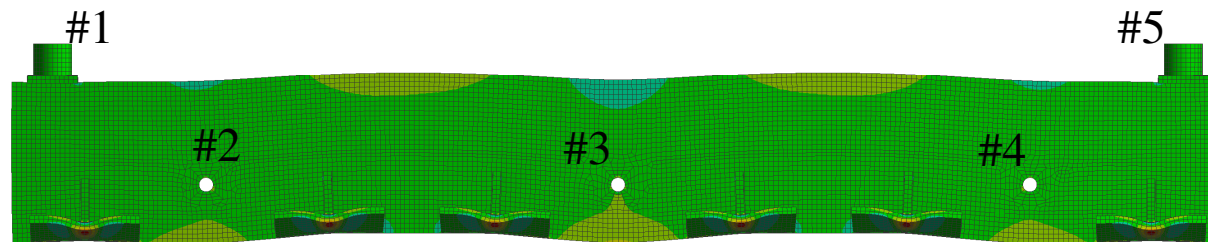
Time: 1

25/05/2017 10:42



Esfuerzo normal

σ_x
→

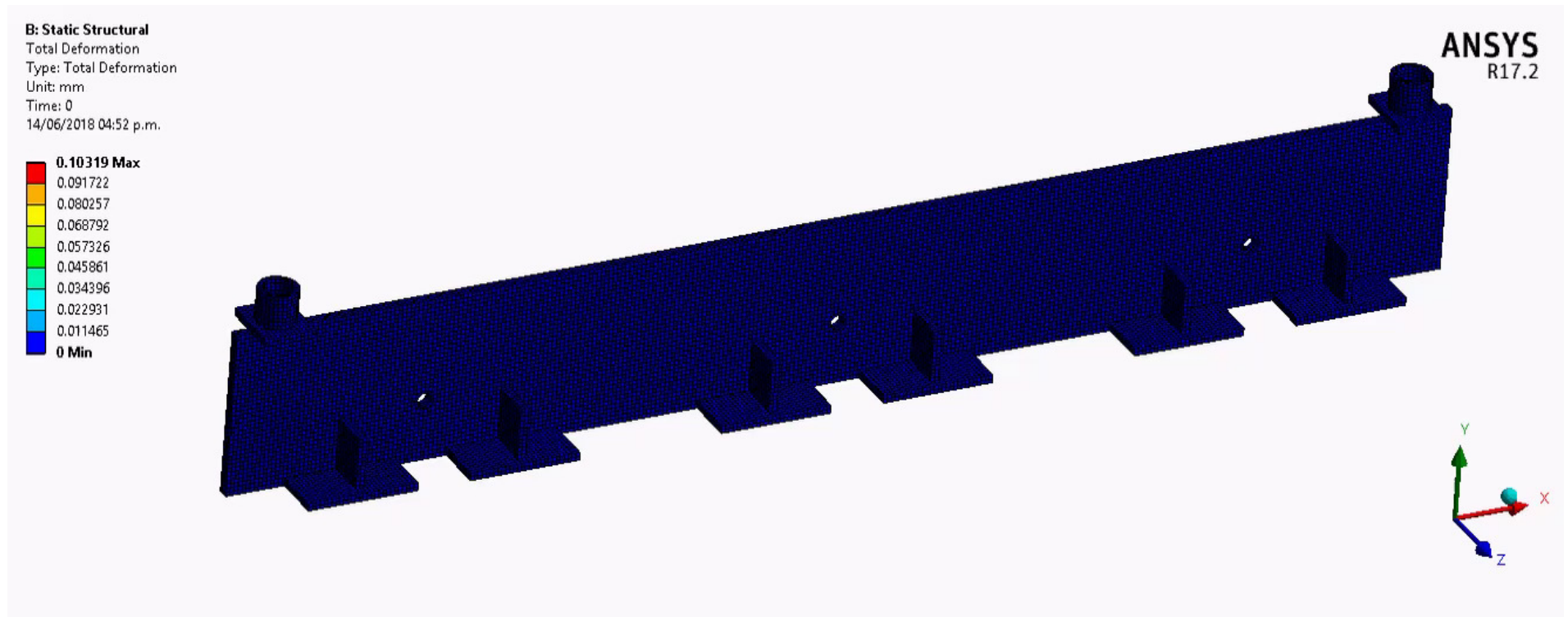


Fuerzas de reacción sobre los apoyos:

#1: 1676 N #2: 120 473 N #3: 123 576 N
#4: 120 473 N #5: 1676 N



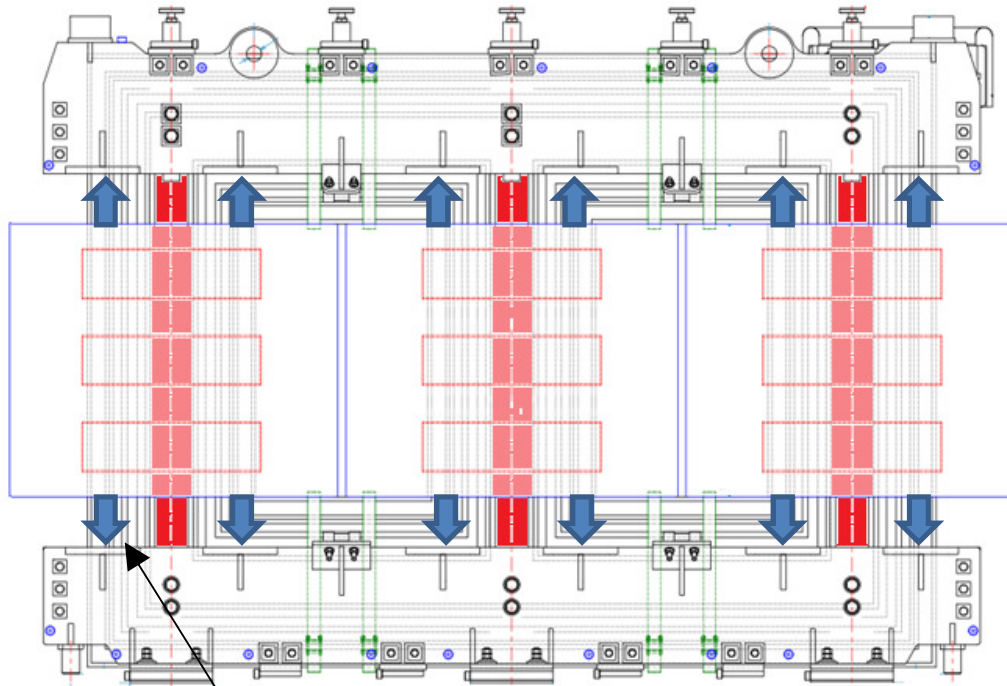
Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia





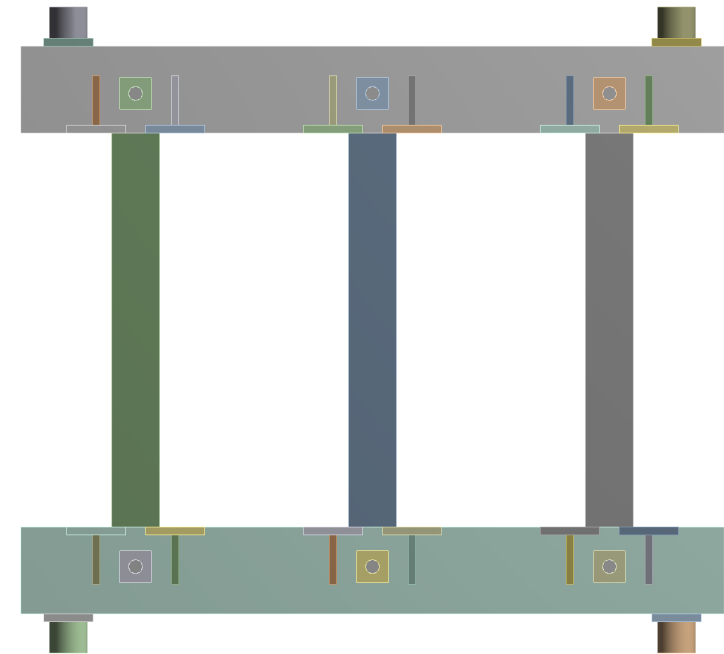
Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia

Análisis modal (Vibración natural)



Fuerzas axiales armónicas
de cortocircuito

Modelo simplificado





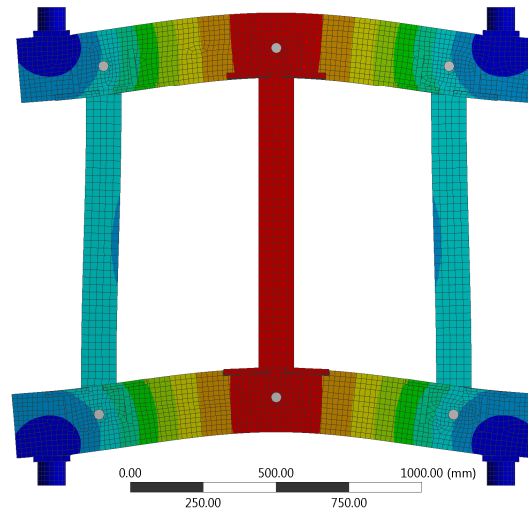
Análisis estructural de la parte activa de un transformador de potencia

Análisis modal:

Modo #4 de
vibración:
 $f = 287.32 \text{ Hz}$

A: Modal
Total Deformation - Mode 4 - 287.32 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 287.32 Hz
Unit: mm
25/05/2017 10:51

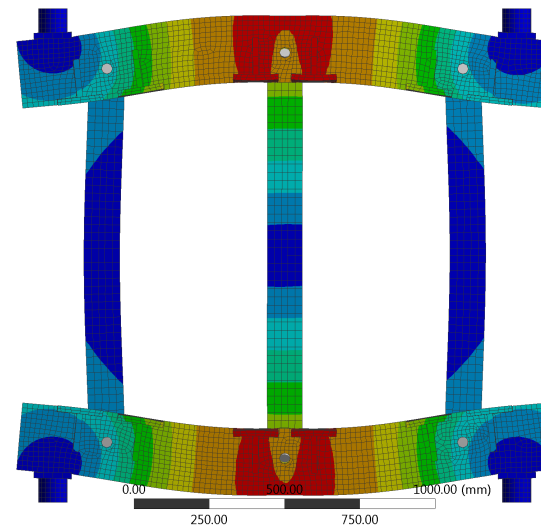
2.716 Max
2.4142
2.1124
1.8107
1.5089
1.2071
0.90533
0.60355
0.30178
0 Min



Modo #6 de
vibración:
 $f = 591.92 \text{ Hz}$

A: Modal
Total Deformation - Mode 6 - 591.92 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 591.92 Hz
Unit: mm
25/05/2017 10:52

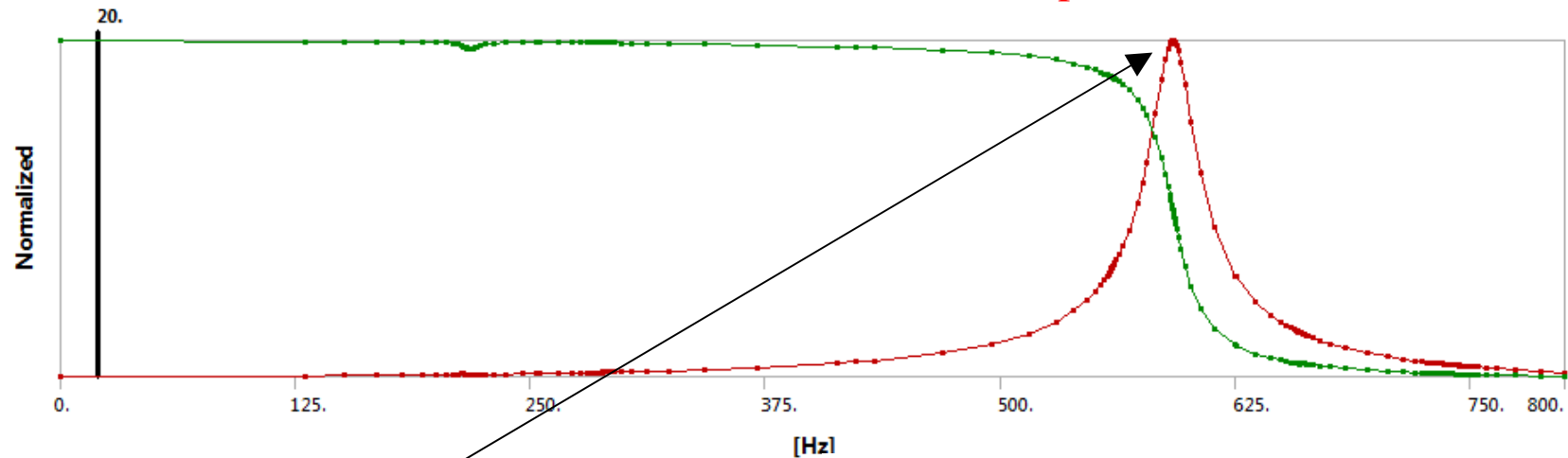
2.9004 Max
2.5781
2.2559
1.9336
1.6113
1.2891
0.9668
0.64453
0.32227
0 Min





Análisis Armónico

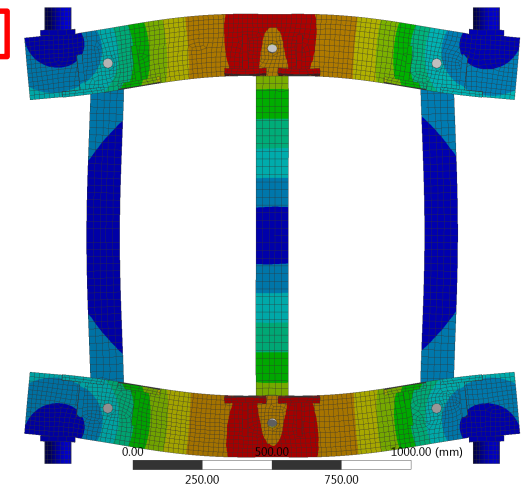
Análisis armónico: Verificación del modo de vibración predominante



Existe un pico a una frecuencia de 591.69 Hz. Por lo tanto, el modo de vibración predominante es el Modo #6. (Esta frecuencia es mucho mayor que 60 Hz o 120 Hz por lo que la estructura no fallará por resonancia).

A: Modal
Total Deformation - Mode 6 - 591.92 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 591.92 Hz
Unit: mm
25/05/2017 10:52

2.9004 Max
2.5781
2.2559
1.9336
1.6113
1.2891
0.9668
0.64453
0.32227
0 Min





DELCROSA 
ENERGÍA PARA EL PERÚ