Especificaciones y Revisión de Diseño de Transformadores y Reactores

Álvaro Portillo

Transformer Consultant – Uruguay

17 de junio de 2021

In memoriam

Ing. José Vicente Camargo (1947-2021)

Q.E.P.D.

Introducción

Los transformadores y reactores son los activos más importantes y costosos de los sistemas eléctricos de potencia y el proceso de adquisición de estos debe considerarse como estratégico para las empresas eléctricas.

Con el proceso de globalización que se ha producido en los últimos años, han entrado en el mercado nuevos fabricantes de transformadores, en la mayoría de los casos desconocidos para los usuarios.

La introducción de nuevos proveedores sin una selección cuidadosa generalmente implica riesgos y problemas.

En este contexto, la elaboración de las especificaciones técnicas y la revisión del diseño se han convertido en los procesos más importantes en la adquisición de transformadores y reactores, principalmente en servicios públicos con licitaciones abiertas y con un alto enfoque en el precio de compra más bajo.

Introducción

Como dice el refrán: **“Lo barato sale caro”**

Ejemplo real de una empresa eléctrica estatal latinoamericana obligada a comprar al fabricante de menor precio que cumpla con las especificaciones técnicas.

Se compraron **4** transformadores de **63 MVA, 150/31.5 kV**, a un **fabricante de India**, a un precio del orden del 70% del precio de los fabricantes usuales de fama internacional (ABB, SIEMENS, General Electric, etc.).

A las 24 horas de entrar en servicio una de las unidades generaba gases en categoría 4 de la norma IEEE C57.104 y a las 48 horas salió de servicio por disparo Buchholz. Al poco tiempo a otra unidad le sucedió lo mismo. Se hicieron inspecciones internas por parte del fabricante, no se encontró nada y el fabricante se desentendió del problema.

Conclusión de las 4 unidades hoy solo hay 2 en servicio:

$4 \times 0.7 = 2.8 \Rightarrow 2.8 / 2 = 1.4 \Rightarrow$ **terminaron saliendo 40% más caros**

Introducción

Los procesos esenciales para adquirir un producto confiable que cumpla con los requisitos deseados para su uso en servicio sin problemas durante muchos años son los siguientes:

- Desarrollo de especificaciones técnicas claras y completas
- Precalificación de proveedores
- Auditorías de fábrica antes de la firma del contrato
- Revisión del diseño antes de comenzar la fabricación
- Inspecciones en fábrica durante el proceso de fabricación
- Pruebas de recepción en fábrica (FAT = Factory Acceptance Tests)
- Pruebas de recepción en sitio (SAT = Site Acceptance Tests)

CIGRE Technical Brochures

CIGRE Working Group A2.36
"Guide for Transformer Procurement Process"

- **"Guide for preparation of specifications for power transformers"**, Technical Brochure Nº528, 2013

- **"Guidelines for conducting design reviews for power transformers"**, Technical Brochure Nº529, 2013

- **"Guide for conducting factory capability assessment for power transformers"**, Technical Brochure Nº530, 2013

Especificación Técnica

El proceso de adquisición comienza con el desarrollo de una especificación técnica clara y completa para complementar los estándares aplicables de la industria.

El precio del equipo va a depender de esta especificación.

El transformador es un equipo maduro, pero de alta tecnología y esencial para la continuidad del servicio eléctrico.

Su complejidad no sólo depende de su potencia y tamaño. El proyecto de un transformador de 5 kVA de 30 kV presenta tantos desafíos como el de un 100 MVA de 150 kV.

Producto muy difícil de estandarizar debido a las diferencias en las características de los sistemas eléctricos.

La especificación técnica es el documento contractual fundamental y está incluso por encima de las normas nacionales e internacionales aplicable en la industria.

Especificaciones Técnicas

La elaboración de una especificación técnica es un proceso de prueba y error que puede llevar muchos años.

Para comenzar podríamos preguntarnos:

¿ Qué es un una Especificación Técnica ideal ?

Una especificación técnica ideal es aquella que no deja ninguna duda respecto a lo que se está requiriendo, los fabricantes no necesitan realizar consultas para entender lo que quiere el comprador y durante todo el proceso de adquisición no se genera ninguna discusión entre el comprador y el fabricante ya que todo está claramente definido en la especificación.

Especificación Técnica

Requerimientos Generales

- Aplicación del Equipo
- Datos del Sistema Eléctrico (Pot CtoCto, Neutros, etc)
- Condiciones Ambientales (Temp, Salinidad, Sismos, NIsoCer)
- Condiciones Inusuales de Operación (GIS, Temperatura, Altitud)
- Posibles Sobrecargas
- Sobre-excitación (Principalmente GSU)
- Armónicos (Corriente y Tensión)
- Detalles del Lugar de Instalación (Interior o Intemperie)
- Transporte (Accesibilidad, Seguros, Registro de Impactos)
- Transporte con o sin aceite (atmósfera inerte N2 o Aire Seco)
- Embalaje para Transporte de los Accesorios
- Condiciones de Almacenamiento
- Regulaciones Laborales y Seguridad (cercas, escaleras, etc)
- Servicio de Post Venta y Garantía

Especificación Técnica

Requerimientos Técnicos

- Normas de Referencia (IEC Serie 60076, ANSI, CENELEC)
- Transformador Seco o en Líquido Aislante
- Potencia Nominal (prever crecimiento de la demanda)
- Frecuencia Nominal (50 Hz o 60 Hz)
- Tipo de Refrigeración (ONAN, ONAF, OFAF, ODAF)
- Grupo de Conexión (Dyn11, YNd1, YNynd11, etc)
- Tensiones Nominales y Tensiones Máximas de Servicio
- Terciario de compensación para YNyn0 (sólo si es necesario)
- Conmutadores (DETC u OLTC)
- Tensiones de Ensayo (Aplicada, Inducida, Impulso)
- Aumentos de Temperatura Máximas Admisibles (60 y 65ºC)
- Pérdidas Máximas y Nivel de Ruido
- Impedancia (Condiciones de Paralelismo)
- Dimensiones Máximas y Peso Máximo de Transporte

Especificaciones Técnicas

Certificados de gestión

El oferente deberá presentar copia de los certificados del:

- Sistema de Gestión de Calidad según norma **ISO 9001:2015**
- Sistema de Gestión Ambiental según norma **ISO 14001:2015**
- Sistema de Gestión en Seguridad y Salud Ocupacional según norma **ISO 45001:2018**.

  Esta nueva norma ISO sustituye a la OHSAS 18001 y las organizaciones que todavía están certificadas de acuerdo con la norma OHAS 18001 deberán certificarse de acuerdo con la norma ISO 45001 antes de marzo de 2021.
- Sistema de Gestión de Acreditación del Laboratorios de pruebas según norma **ISO/IEC 17025:2017** **“General requirements for the competence of testing and calibration Laboratories”**

Especificaciones Técnicas

Potencia nominal de cada devanado – IEC 60076-1

5.1 Rated power

5.1.1 General

The rated power for each winding shall either be specified by the purchaser or the purchaser shall provide sufficient information to the manufacturer to determine the rated power at the enquiry stage.

The transformer shall have an assigned rated power for each winding which shall be marked on the rating plate. The rated power refers to continuous loading. This is a reference value for guarantees and tests concerning load losses and temperature rises.

If different values of apparent power are assigned under different circumstances, for example, with different methods of cooling, the highest of these values is the rated power.

A two-winding transformer has only one value of rated power, identical for both windings.

For multi-winding transformers, the purchaser shall specify the required power-loading combinations, stating, when necessary, the active and reactive outputs separately.

When the transformer has rated voltage applied to a primary winding, and rated current flows through the terminals of a secondary winding, the transformer receives the relevant rated power for that pair of windings.

Especificaciones Técnicas

Nivel de aislamiento de cada devanado – IEC 60076-3

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
<1,1	–	–	–	3
3,6	20	22	–	10
	40	44	–	10
7,2	60	66	–	20
	75[a]	83[a]	–	20
12	75	83	–	28
	95	105	–	28
	110[a]	121[a]	–	34[a]
17,5	95	105	–	38
	125[a]	138[a]	–	38
24	125	138	–	50
	145	160	–	50
	150[a]	165[a]	–	50
36	170	187	–	70
	200[a]	220[a]	–	70
52	250	275	–	95
72,5	325	358	–	140
	350[a]	385[a]	–	140
100	450	495	375[a]	185
123	550	605	460[a]	230
145	550	605	460[a]	230
	650	715	540[a]	275
170	650	715	540[a]	275
	750	825	620[a]	325
245	850	935	700[a]	360
	950	1 045	750[a]	395
	1 050	1 155	850[a]	460
300	950	1 045	750	395
	1 050	1 155	850	460
362	1 050	1 155	850	460
	1 175	1 290	950	510
420	1 175	1 290	950	510
	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175[a]	630

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
550	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175	630
	1 550	1 705	1 300[a]	680
	1 675[a]	1 845[a]	1 390[a]	–
800	1 800	1 980	1 425	–
	1 950	2 145	1 550	–
	2 050[a]	2 255[a]	1 700[a]	–
	2 100	2 310	1 675[a]	–
1 100	1 950	2 145	1 425	–
	2 250	2 475	1 800	–
1 200	2 250	2 475	1 800	–

[a] These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included either because they represent common practice in some parts of the world or for some switching impulse levels, because they represent a co-ordinated value for a particular value of lightning impulse level.

Especificaciones Técnicas

Impedancias de cortocircuito recomendadas por la IEC 60076-5

Table 1 – Recognized minimum values of short-circuit impedance for transformers with two separate windings

Short-circuit impedance at rated current	
Rated power kVA	**Minimum short-circuit impedance** %
25 to 630	4,0
631 to 1 250	5,0
1 251 to 2 500	6,0
2 501 to 6 300	7,0
6 301 to 25 000	8,0
25 001 to 40 000	10,0
40 001 to 63 000	11,0
63 001 to 100 000	12,5
above 100 000	>12,5
NOTE 1 Values for rated power greater than 100 000 kVA are generally subject to agreement between manufacturer and purchaser.	
NOTE 2 In the case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to three-phase bank rating.	

Especificaciones Técnicas

Potencia de cortocircuito y relación Z_0/Z_1 de la red – IEC 60076-5

Table 2 – Short-circuit apparent power of the system

Highest voltage for equipment, U_m kV	Short-circuit apparent power MVA	
	Current European practice	Current North American practice
7,2; 12; 17,5 and 24	500	500
36	1 000	1 500
52 and 72,5	3 000	5 000
100 and 123	6 000	15 000
145 and 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
NOTE If not specified, a value between 1 and 3 should be considered for the ratio of zero-sequence to positive-sequence impedance of the system.		

Especificaciones Técnicas

Tensión de la red en el momento del cortocircuito – IEC 60076-1

5.4.3 Operation at higher than rated voltage and/or at other than rated frequency

Methods for the specification of suitable rated voltage values and tapping range to cope with a set of loading cases (loading power and power factor, corresponding line-to-line service voltages) are described in IEC 60076-8.

Within the prescribed values of U_m, for the transformer windings, a transformer shall be capable of continuous operation at rated power without damage under conditions of 'overfluxing' where the value of voltage divided by frequency (V/Hz) exceeds the corresponding value at rated voltage and rated frequency by no more than 5 %, unless otherwise specified by the purchaser.

At no load, transformers shall be capable of continuous operation at a V/Hz of 110 % of the rated V/Hz.

At a current K times the transformer rated current ($0 \leq K \leq 1$), the overfluxing shall be limited in accordance with the following formula:

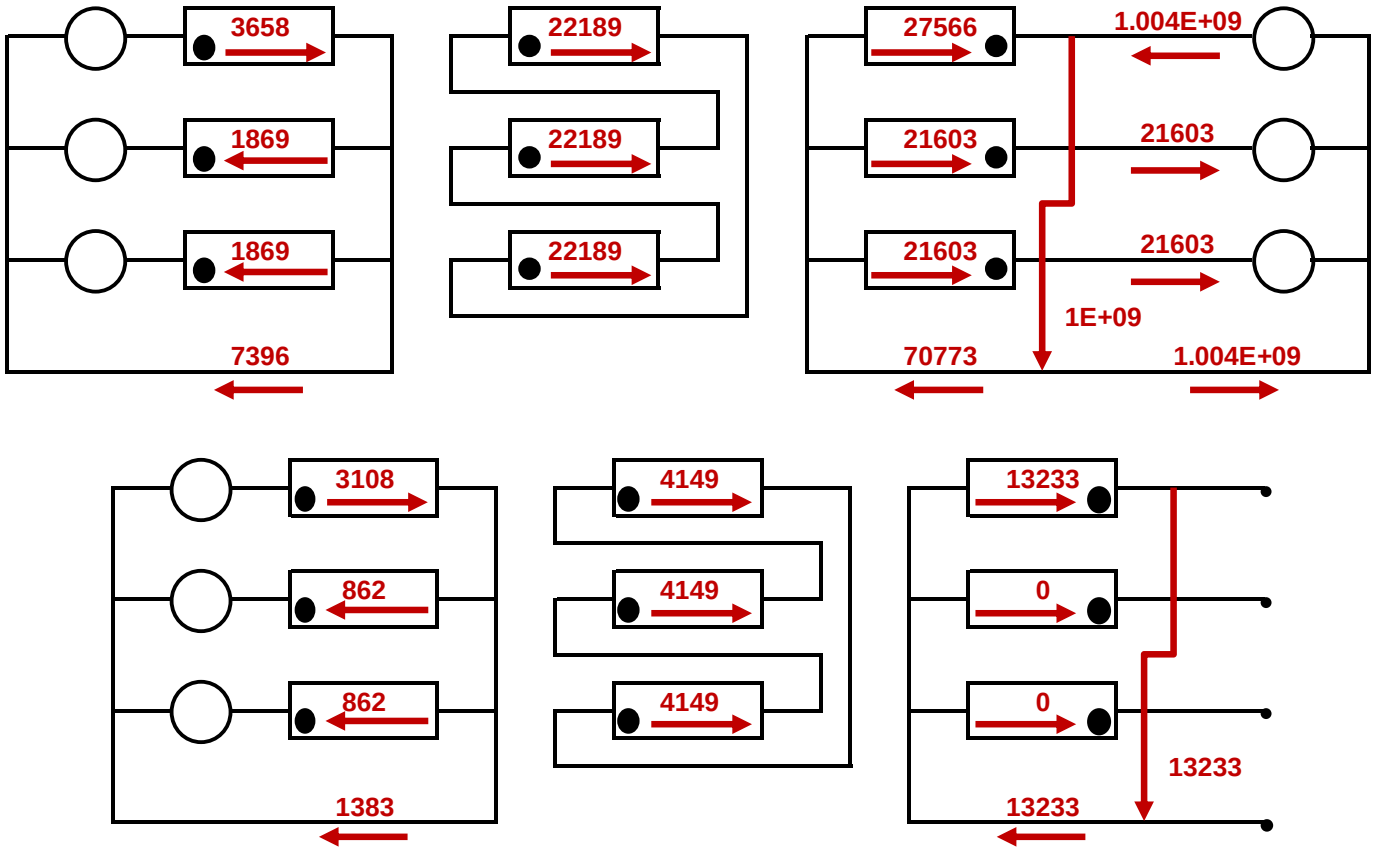
$$\frac{U}{U_r}\frac{f_r}{f} \times 100 \leq 110 - 5K \quad (\%)$$

If the transformer is to be operated at V/Hz in excess of those stated above, this shall be identified by the purchaser in the enquiry.

Especificaciones Técnicas

Terciario de compensación no accesible

Se debe informar la potencia de cortocircuito de la red del lado de baja tensión si aplica.



Especificaciones Técnicas

Antecedentes y ensayo de cortocircuito

La evaluación de la soportabilidad al cortocircuito deberá ser sometida a aprobación por parte del comprador antes de comenzar el proceso de fabricación durante la revisión del diseño. Dicha evaluación se realizará de acuerdo con lo especificado en el ***Anexo A de la Norma IEC 60076-5:2006****.*

El fabricante deberá presentar antecedentes de ensayos de cortocircuito*, realizados de acuerdo con la norma* ***IEC 60076-5:2006****, sobre transformadores similares a los del suministro (****Anexo B de la norma IEC 60076-5:2006****).*

El oferente deberá cotizar los ensayos de cortocircuito*, para todos los tipos de transformadores ofertados, en un laboratorio de reconocido prestigio internacional, acreditado según la norma* ***ISO/IEC 17025****, perteneciente a la "Short-Circuit Testing Liaison".*

El costo de estos ensayos se incluirá en el análisis comparativo de las ofertas.

Ante falta de antecedentes de ensayos de cortocircuito sobre transformadores similares a los ofertados el comprador podrá solicitar realizar los ensayos de cortocircuito de acuerdo con la Norma IEC 60076-5:2006 que considere necesarios.

Especificaciones Técnicas

Detalles constructivos – Recomendaciones

- Todos los materiales aislantes sólidos en contacto con el núcleo deben ser de clase térmica 155ºC. Los conductos de refrigeración dentro del núcleo deben construirse con barras de fibra de vidrio o NOMEX o piezas cerámicas (no deben permitirse materiales derivados de celulosa).

- Es preferible tener las derivaciones en un bobinado separado y no incorporadas en bobinado principal para mejorar la resistencia de cortocircuito.

- Siempre que sea posible, se deben usar conductores continuamente transpuestos (CTC) con pegamento de resina epoxi entre conductores.

- No permitir el uso de madera laminada para tensiones máximas de servicio de 170 kV o superior.

Especificaciones Técnicas

Materiales de calidad y siempre de acuerdo con normas

- **Hierro silicio**:
  Especificar grado mínimo aceptable (IEC 60404-8-7)
- **Materiales conductores**: cobre o aluminio en diferentes formas
  Especificar valores de pureza y conductividad mínimos requeridos
- **Líquido aislante**: aceite mineral, ésteres naturales o sintéticos, líquido siliconado, etc.
  Especificar sus características principales de acuerdo con las normas IEC, ANSI/IEEE o ASTM
- **Materiales aislantes:** La especificación de materiales aislantes de alta calidad tiene un impacto insignificante en el precio general y aumenta significativamente la eficiencia, confiabilidad y longevidad del activo.
  Especificar, si es posible, marcas de reconocida calidad mundial que cumplan las normas IEC de materiales aislantes.

Especificación Técnica

Ensayos

- **Ensayos de Rutina**
- **Ensayos de Tipo**
- **Ensayos Especiales**

Se debe definir que ensayos se van a realizar y la secuencia de realización de los mismos.

Estos ensayos son el resultado de más de 100 años de experiencia y en general se acepta que si un transformador pasa con éxito estos ensayos tiene una probabilidad muy alta de trabajar por muchas décadas en servicio sin presentar problemas.

No dejar nunca ningún ensayo como especial. Los ensayos especiales que se quieran realizar se deben incluir como ensayos de rutina o de tipo.

Especificación Técnica

Certificados de ensayos de tipo y rutina de todos los accesorios

Especificar, si es posible, marcas de reconocida calidad mundial

- ***IEC 60137***
  Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V

- ***IEC 60214-1***
  Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods

- ***IEC 60076-22 Series***
  Power Transformers and reactor fittings
  Buchholz, Relé de Flujo del OLTC, Indicadores de Temperatura (Top-Oil e Imagen Térmica), Indicadores de Nivel, Deshidratadores Inteligentes, Válvulas de Alivio de Presión, Válvulas de Presión Súbita, Válvula de Bloqueo, Válvulas, etc.

Especificación Técnica

Revisión del Diseño

La especificación debe indicar claramente que antes de comenzar a fabricar los transformadores, se realizará una revisión del diseño en las instalaciones del fabricante.

También debe indicarse claramente que la revisión del diseño no elimina la responsabilidad del fabricante, que garantizará el funcionamiento correcto de los transformadores en todas las pruebas de aceptación de fábrica y durante el servicio.

Es conveniente dedicar un capítulo de la especificación para detallar la información que deberá suministrar el fabricante, las verificaciones que se realizarán y los requisitos mínimos de herramientas de cálculo que se le requerirán al fabricante para realizar el proyecto del transformador ofertado.

Precalificación de Proveedores

Evaluación de los Fabricantes

- Antecedentes y Lista de Referencias
- Calidad de los Materiales utilizados
- Documentación de los Procedimientos de Fabricación
- Auditoría de los Procesos de Fabricación:
    - Corte y Montaje de Núcleo
    - Bobinados
    - Estabilización y Prensado
    - Impregnación y Secado (Horno o Vapour-Phase)
- Capacidad Límite (no siempre es garantía, Ej. 10 MVA UTE)
- Controles de Calidad (recepción de materiales y producción)
- Facilidades de Ensayo
- Antecedentes de ensayos de cortocircuito (IEC 60076-5)
- Antecedentes de ensayos a VFTO’s en caso de conexión a GIS

Auditorías e Inspecciones de Fábrica

La importancia de comprender la capacidad de una fábrica es clave para garantizar la adquisición y la puesta en servicio de un producto de calidad que sea adecuado para su propósito.

El objetivo de esta etapa es obtener la mayoría, si no toda, la información requerida para responder la pregunta clave:

"¿Debo comprar un transformador de esta fábrica?"

y la siguiente pregunta:

"Si compro en esta fábrica, ¿qué más debo hacer para garantizar que el transformador finalmente entregado cumpla con todos los requisitos especificados?"

Auditorías e Inspecciones de Fábrica

Las auditorías de fábrica pueden aplicarse como un proceso de **precalificación** antes de emitir una licitación para evitar que las fábricas inadecuadas sean invitadas a licitar.

También se aplican como una evaluación de adjudicación previa a la firma del contrato.

Finalmente, las **inspecciones en fábrica durante el proceso de fabricación** son una herramienta muy útil para garantizar y auditar la calidad de los materiales y procesos aplicados a la fabricación del transformador que se está fabricando.

Es altamente recomendable realizar inspecciones en distintas etapas de la fabricación tomando muestras de los materiales utilizados para su análisis en laboratorios independientes (papel termo estabilizado, proof stress o $\sigma_{0.2}$ de los conductores, pressboard, etc.).

Objetivos de la Revisión de Diseño

- Asegurarse de que hay un entendimiento claro y mutuo de los requisitos técnicos del transformador de acuerdo con la especificación técnica del comprador y las normas vigentes en la industria
- Entender la aplicación requerida y verificar los requisitos del sistema y de los transformadores
- Identificar las áreas donde se puede requerir atención especial
- Verificar que el diseño cumple con todos los requisitos técnicos
- Identificar las características del prototipo y evaluar su fiabilidad y sus posibles riesgos
- Intercambiar experiencias que puedan ser utilizadas para identificar eventuales mejoras en el diseño y mejoras o cambios en la especificación técnica

Objetivos de la Revisión de Diseño

- Identificar y determinar los márgenes de diseño relevantes en las pruebas de aceptación en fábrica y evaluar la importancia de estos márgenes de diseño para el funcionamiento exitoso en servicio del transformador

- Comprender mejor las capacidades técnicas del fabricante

- Fortalecer la relación técnica entre el comprador y el fabricante y con el tiempo mejorar y profundizar el conocimiento en el diseño de transformadores por el lado de los compradores

Alcance de la Revisión de Diseño

La revisión del diseño debe incluir una revisión cuidadosa del **diseño dieléctrico, térmico, de cortocircuito y mecánico** del transformador y también verificar que todas las características calculadas están de acuerdo con los valores garantizados.

También debe incluir una auditoría de:

- la calidad de los materiales usados
- los procesos de fabricación más importantes

Las deficiencias detectadas en el proyecto durante la revisión del diseño deben corregirse antes de comenzar la fabricación del transformador

Mejorar un diseño no siempre implica costos más altos

El proyecto del transformador es lo que requiere la mayor parte de la atención durante la revisión del diseño.

Alcance de la Revisión de Diseño

El fabricante debe demostrar que su proyecto funcionará de forma fiable dentro de los requisitos operativos, incluyendo las condiciones transitorias (sobretensiones, cortocircuitos, sobrecargas, etc.) y que además cumple con las garantías de rendimiento (pérdidas, impedancias, etc.).

Es imperativo que el fabricante demuestre que se han incluido en el proyecto márgenes de seguridad adecuados, que cubren los requisitos de prueba y las condiciones de funcionamiento.

Los objetivos mínimos de revisión de diseño son establecer los márgenes entre:

- los valores de proyecto calculados (pérdidas, impedancias, temperaturas, etc.) y los valores esperados en las pruebas
- los esfuerzos (dieléctricos, térmicos, mecánicos, etc.) calculados y los esfuerzos operativos que pueden ocurrir en los ensayos y en servicio

Alcance de la Revisión de Diseño

Además, durante la revisión de diseño en fábrica se auditarán:

- los procesos de compra de materiales
- los proveedores de los materiales estratégicos
- las capacidades de producción
- las capacidades de diseño
- los procesos de producción, en particular los procesos de bobinados y montaje de transformadores similares a los ofertados
- los procesos de secado, estabilización y prensado de las bobinas
- los procesos de secado final de la parte activa, el apriete final del prensado de las bobinas y llenado de aceite bajo vacío

Revisión de Diseño

Detalles Constructivos

El fabricante debe proporcionar toda la información necesaria para realizar la revisión del diseño, incluidos todos los detalles de construcción y geometría del transformador.

La información esencial para una revisión de diseño efectiva debe ser compartida, pero las copias de cualquier información relacionada con la tecnología del fabricante (know-how) normalmente no se entregan.

Algunos fabricantes pueden requerir que el comprador firme un acuerdo de confidencialidad antes de poner dichos documentos a disposición del comprador.

Revisión de Diseño

Detalles Constructivos

- Núcleo
- Bobinados
- Parte Activa (aislamientos, prensado, ...)
- Conexiones, aisladores pasantes y conmutadores (OLTC y DETC)
- Reactores internos
- Pararrayos internos (ZnO)
- Diagrama de conexiones mostrando todos los elementos
- Tanque y accesorios
- Intercambiadores de calor (+Ventiladores, Bombas, Válvulas, etc.)
- Particularidades de diseño en el caso de reactores shunt (núcleo, prensado, vibraciones, ensayo)

Ejemplo en el Capítulo 17 del Technical Brochure Nº529 del CIGRE

Revisión de Diseño

Detalles Constructivos

Reactores Internos

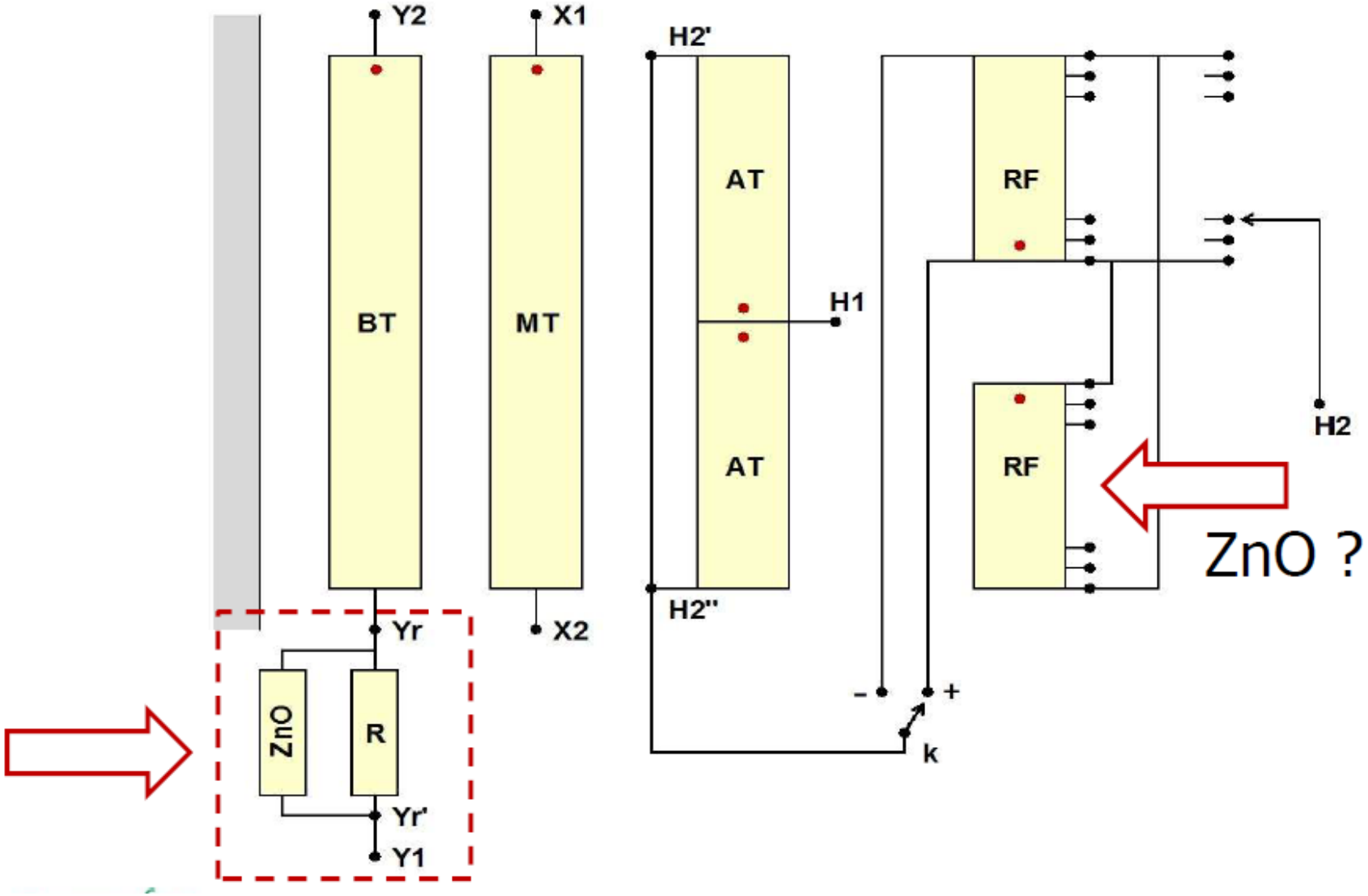
Si se utilizan reactores internos en serie con el terciario para lograr la adaptación de impedancia o para limitar las corrientes de cortocircuito, el fabricante debe suministrar el diseño completo de estos reactores para su aprobación durante la revisión del diseño (Influencia en la resistencia dieléctrica)

Pararrayos Internos

El fabricante debe proporcionar las características completas de los descargadores de sobretensiones conectados internamente que se usan para el control de transitorios de tensión. La justificación, ubicación y disposición de montaje debe ser revisada.

Revisión de Diseño

Detalles Constructivos – Diagrama de Conexiones



Revisión de Diseño

Verificaciones

- El diseño de un transformador es muy complejo y es casi imposible llevarlo a cabo de manera eficiente sin el uso de herramientas de cálculo especializadas (software).

- Para la revisión del diseño, podemos utilizar las herramientas de cálculo del fabricante o nuestras propias herramientas de cálculo. Si vamos a utilizar las herramientas de cálculo del fabricante, es necesaria una validación previa de estas herramientas (por ejemplo, mediante el uso de los Technical Borchure del CIGRE).

- Durante la revisión del diseño es muy importante definir cómo se harán las pruebas de recepción, principalmente para los ensayos dieléctricos y para todas aquellas pruebas que requieren un acuerdo previo entre el fabricante y el comprador.

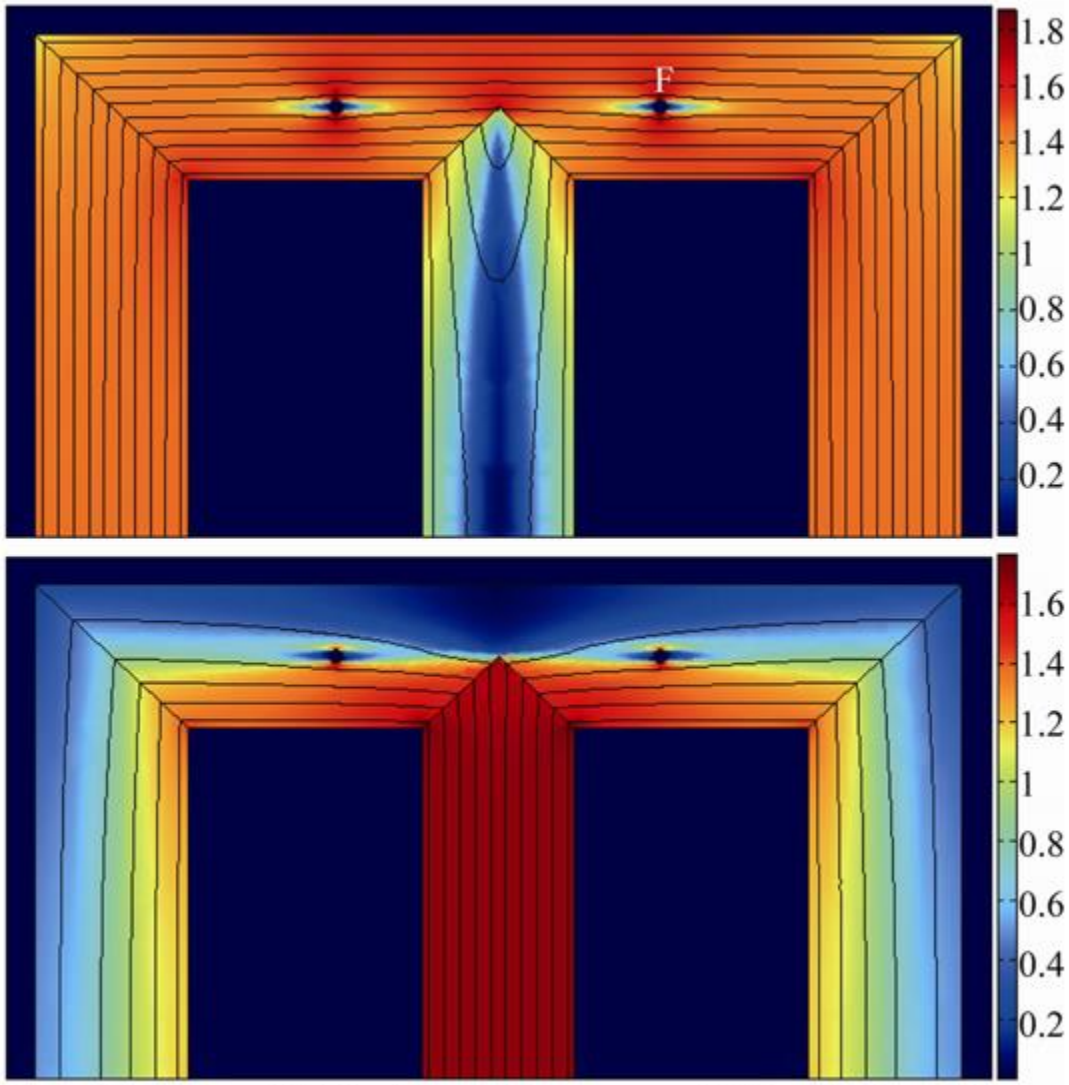
Revisión de Diseño

Verificaciones

- Datos del sistema de potencia
- Información ambiental
- Características de vacío
  - Pérdidas y corriente de vacío (90%, 100%, 110%)
  - Nivel ruido (control) y vibraciones
  - Reactancia de núcleo de aire y corriente de inrush
  - Soportabilidad a la sobreexcitación
- Características en carga
  - Control de pérdidas Eddy y corrientes de circulación en bobinados
  - Control de las pérdidas en partes estructurales (Stray losses)
- Pesos y dimensiones

Revisión de Diseño

Flux Density in the Core



Flux Density distribution in the core at 2 instants of time

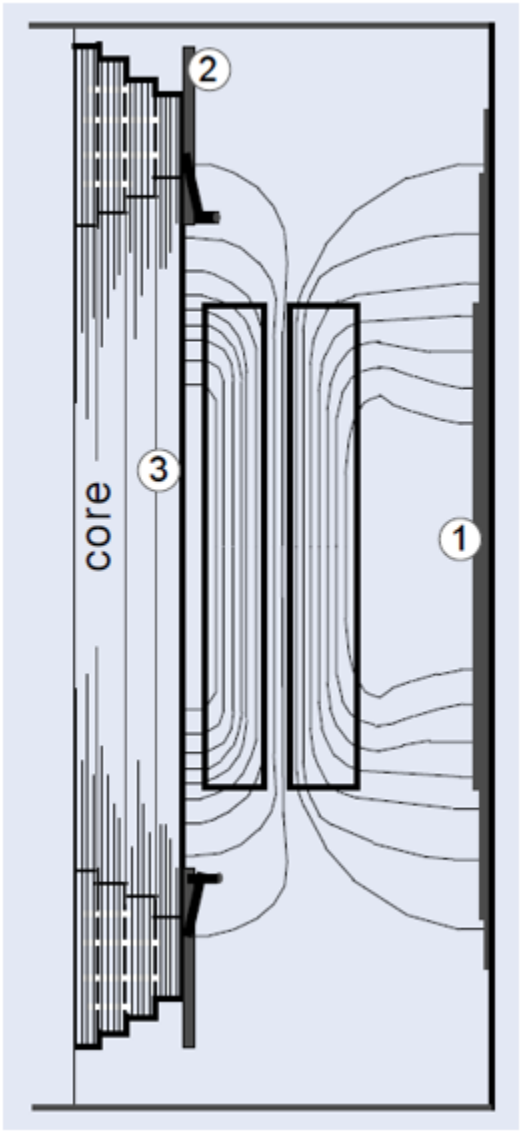
The Flux Density in the Core is proportional to the applied voltage in the windings

$$E_1 = 4.44 N_1 f S_{FE} B_{MAX}$$

- *No-load Losses*
- *No-load Current*
- *Noise Level*
- *Inrush Current*

Revisión de Diseño

Flux Density outside the Core (Leakage Flux)



The Leakage Flux Density is proportional to the current in the windings

$$B_{MAX} = \mu_O \frac{NI}{h_{ROG}}$$

- *Short-Circuit Reactance*
- *Other or Additional Load Losses*
  - *Eddy Losses (Skin)*
  - *Eddy Losses (Proximity)*
  - *Circulating Current Losses*
  - *Stray Losses (structural parts)*
- *Short-Circuit Forces*
- *Air Core Reactance*

1. Magnetic shield on the tank
2. Yoke clamping plate
3. Outer package of the core limb

Revisión de Diseño

Cálculo de las Pérdidas por Flujo de Dispersión – Stray Losses

"3D Calculation and Modeling of Eddy Current Losses in a Large Power Transformer"

A.M.Milagre, M.V.Ferreira da Luz, G.M.Cangane, A.Komar and P.A.Avekino

SIEMENS - Brasil

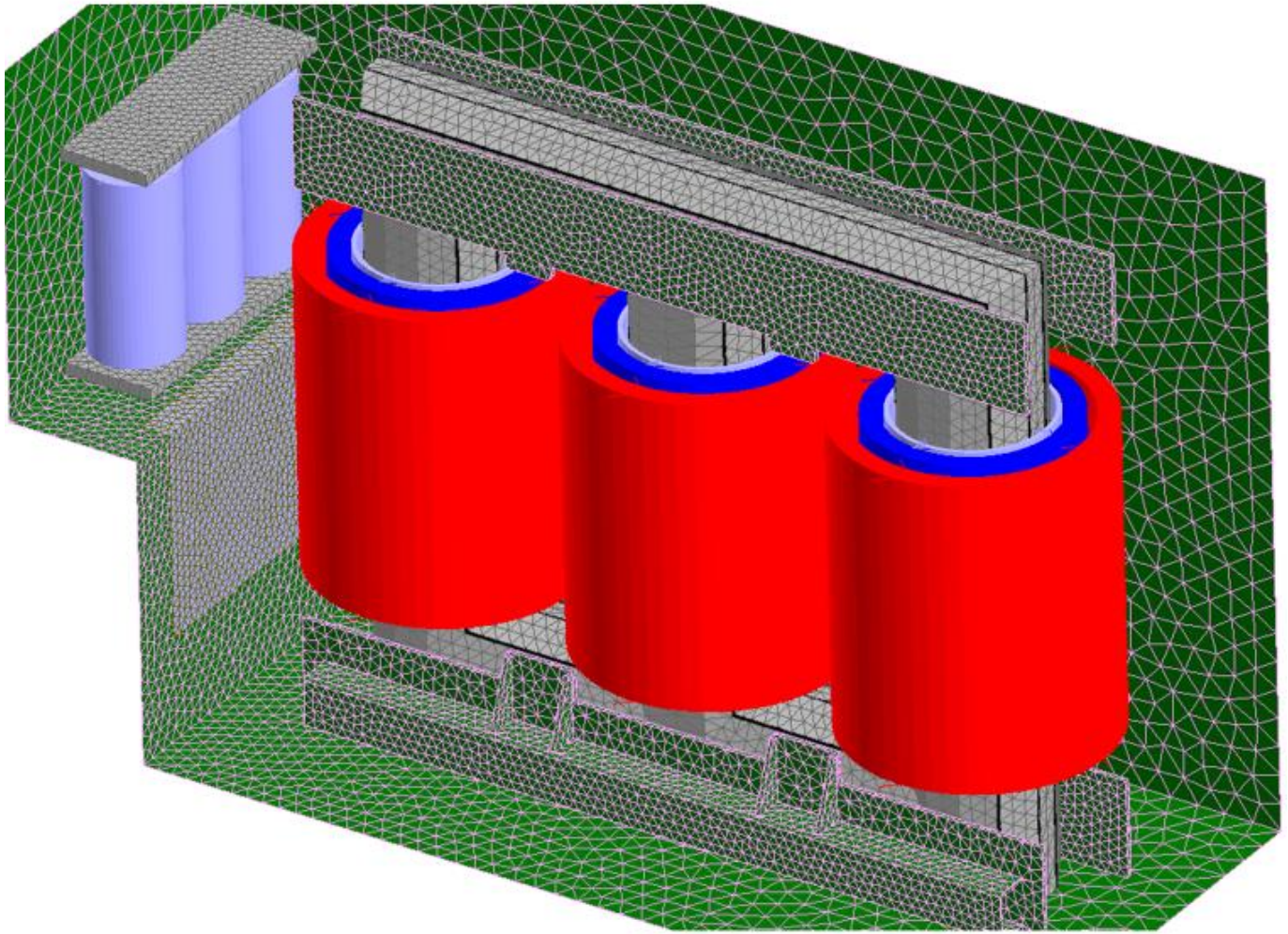
XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM)

2012, Marseille, pp 2282-2286

Revisión de Diseño

Cálculo de las Pérdidas por Flujo de Dispersión – Stray Losses

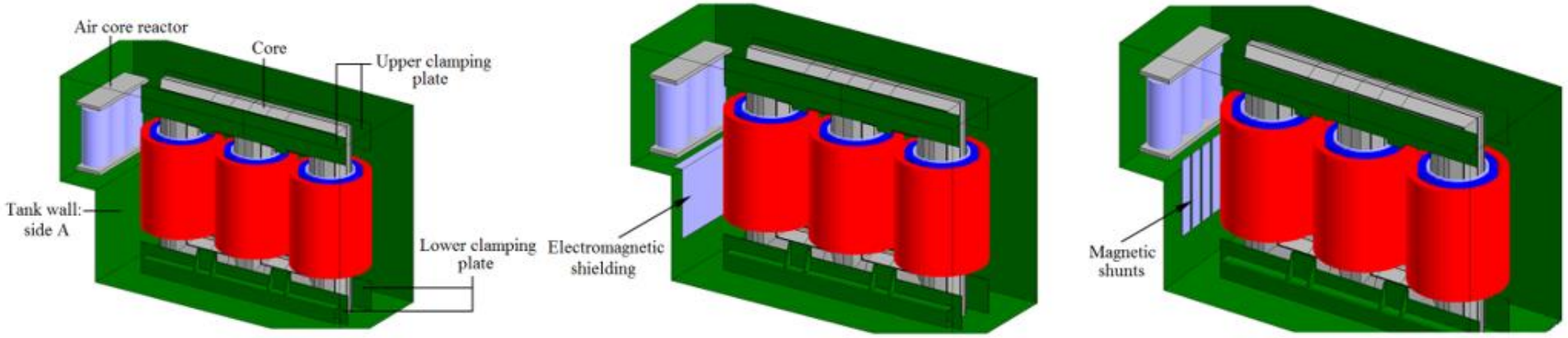
"3D Calculation and Modeling of Eddy Current Losses in a Large Power Transformer"

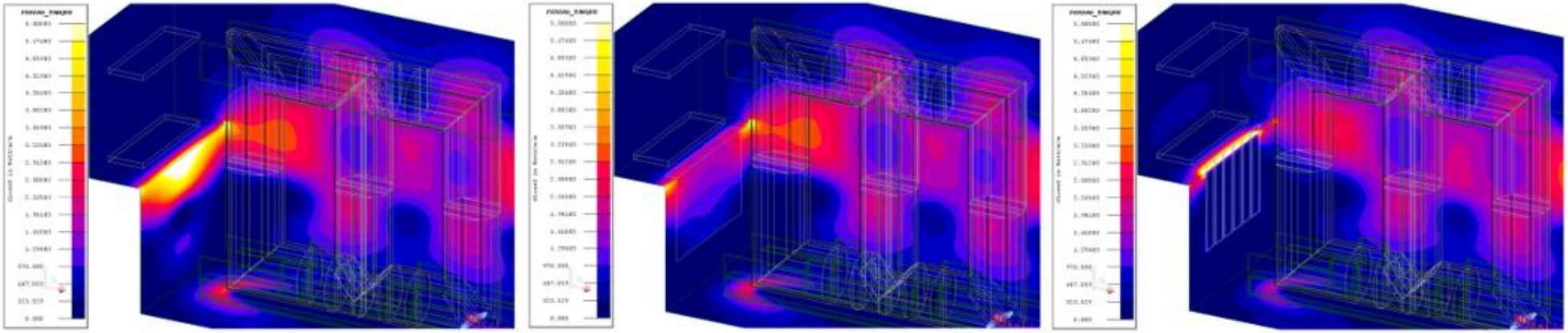


Revisión de Diseño

Cálculo de las Pérdidas por Flujo de Dispersión – Stray Losses

"3D Calculation and Modeling of Eddy Current Losses in a Large Power Transformer"

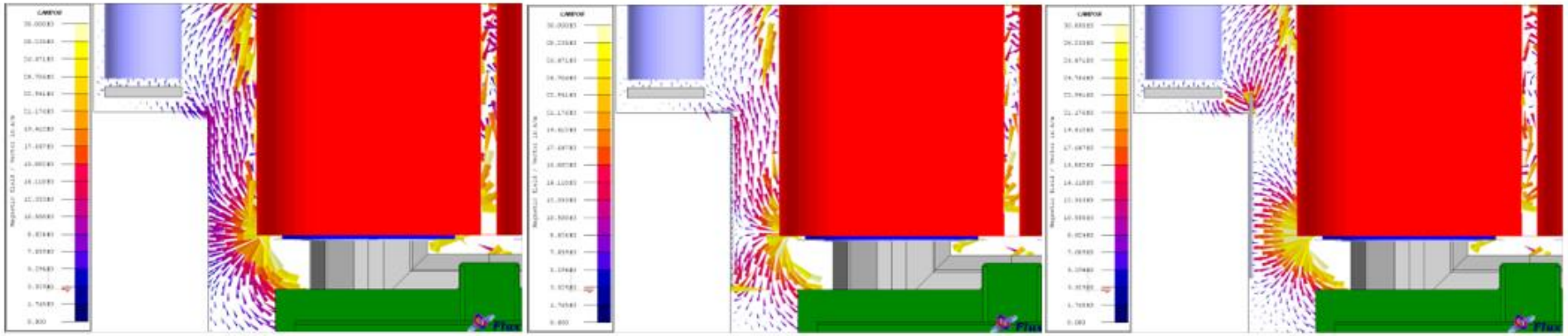


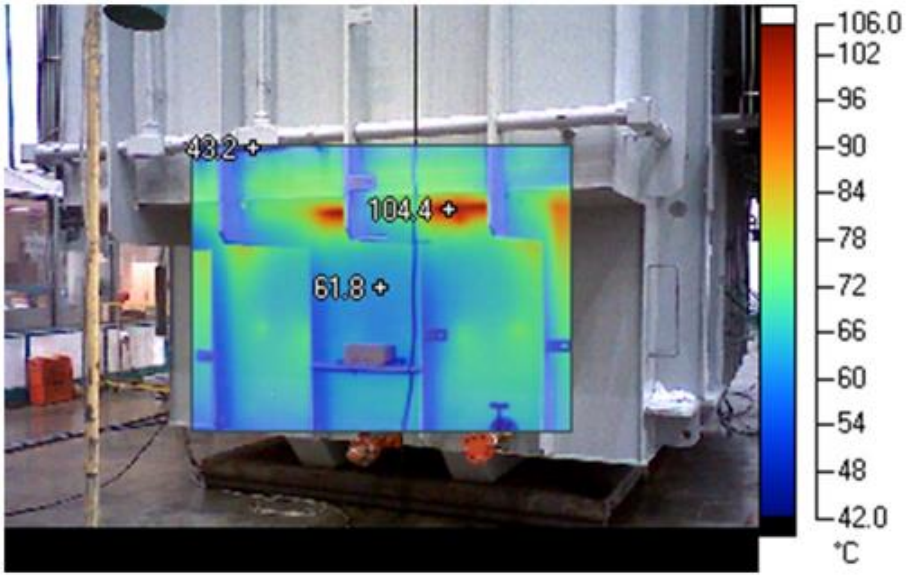


Revisión de Diseño

Cálculo de las Pérdidas por Flujo de Dispersión – Stray Losses

"3D Calculation and Modeling of Eddy Current Losses in a Large Power Transformer"





La termografía de la pared del tanque (lado A) con shunt magnéticos mostró la presencia de puntos calientes en la misma región donde los valores de pérdida por corrientes de Foucault son más altos.

La medición de la temperatura se usa con frecuencia como un control y verificación indirecta de las pérdidas calculadas.

Revisión de Diseño

Diseño Dieléctrico

“AC Insulation Design of Power Transformers”

Álvaro Portillo

ARWtr2013, 28-30 October, Baiona, Spain

Validación de Software

CIGRE JWG A2/C4.39

"Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System - Part 1: Expertise”

Technical Brochure Nº577

2014

Chapter 9 – “Fictitious Transformer”

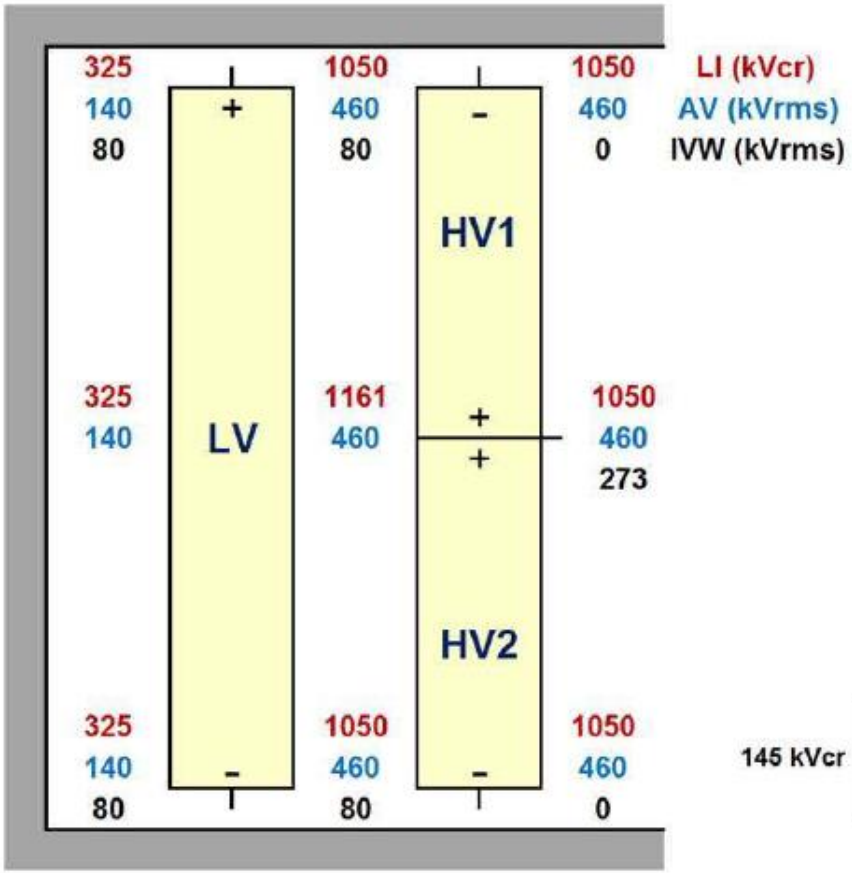
CIGRE JWG A2/C4.52

“High-Frequency Transformer and Reactor Models for Network Studies”

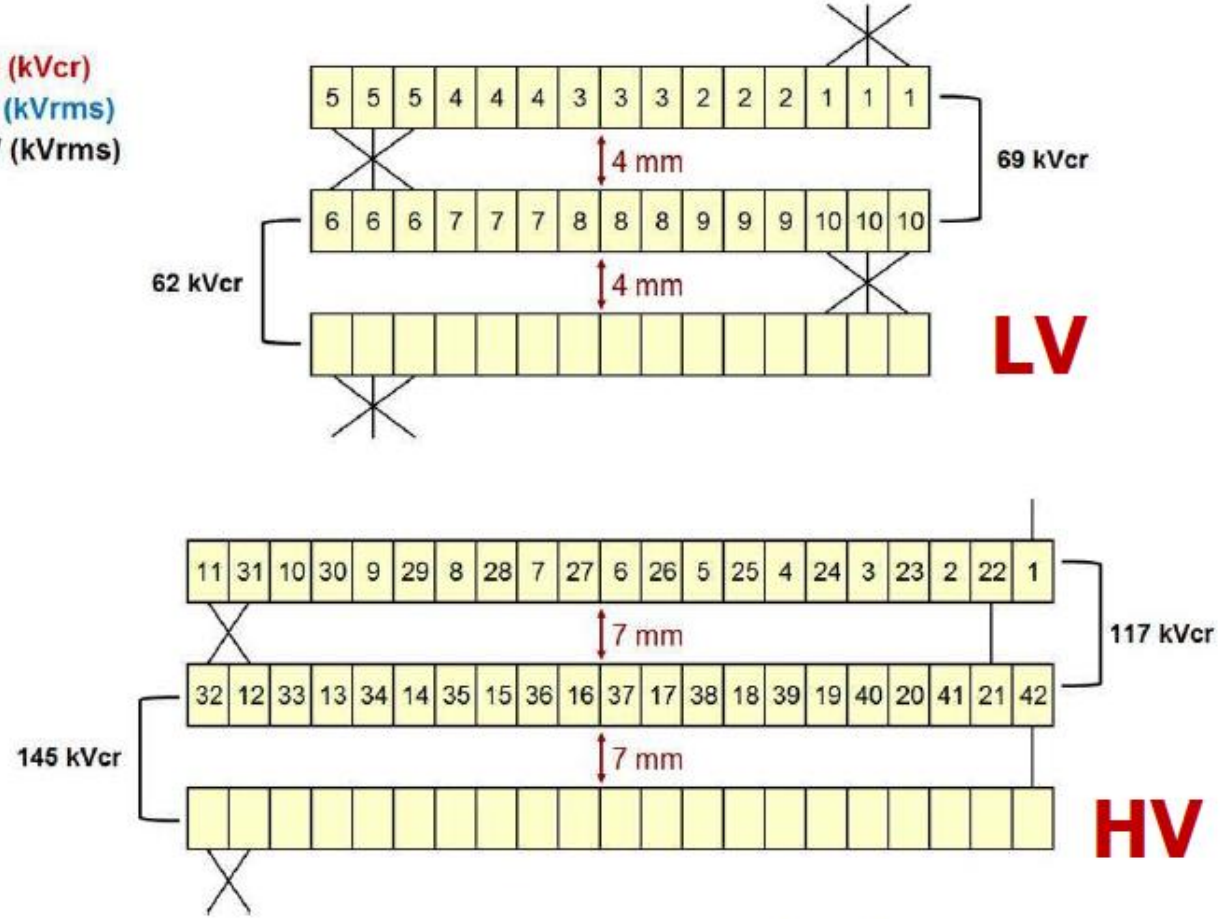
Task Force 1: Transformer White-Box Models

Revisión de Diseño

Diseño Dieléctrico – Verificaciones



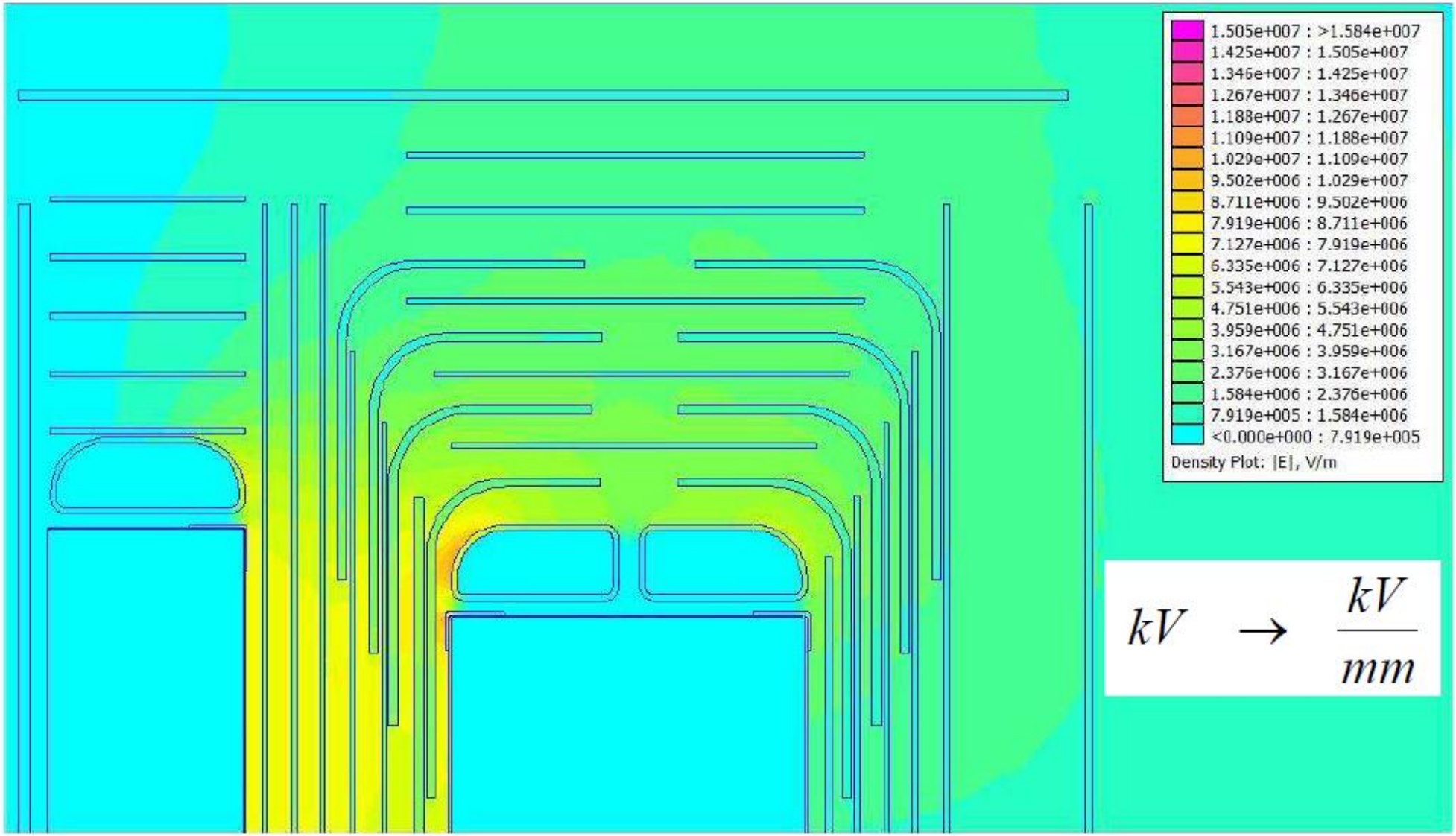
External Insulations



Internal Insulations

Revisión de Diseño

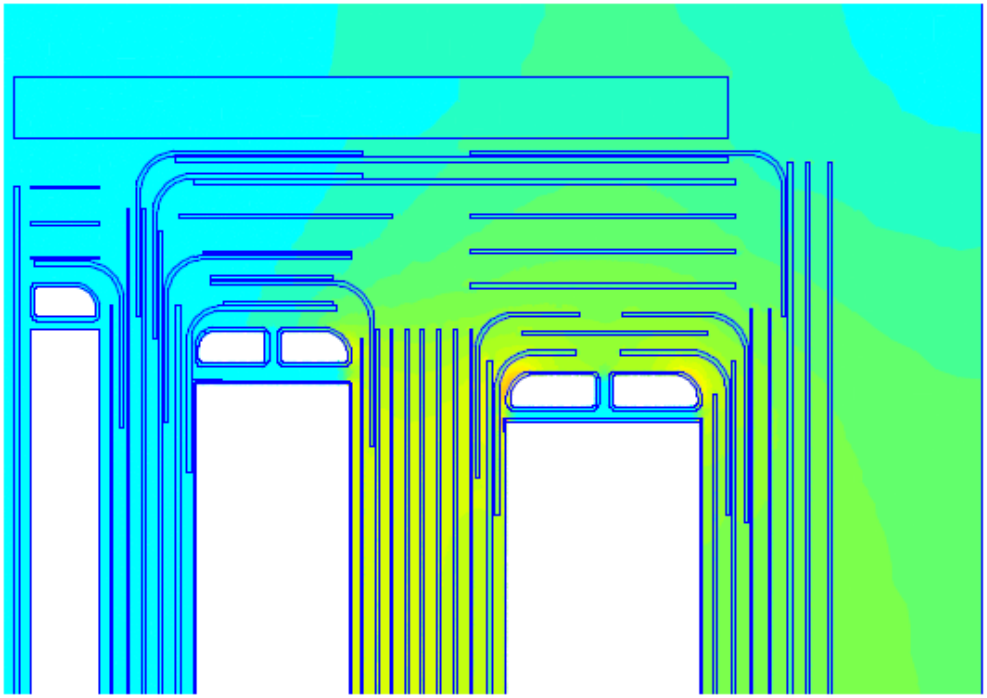
Diseño Dieléctrico – Verificaciones

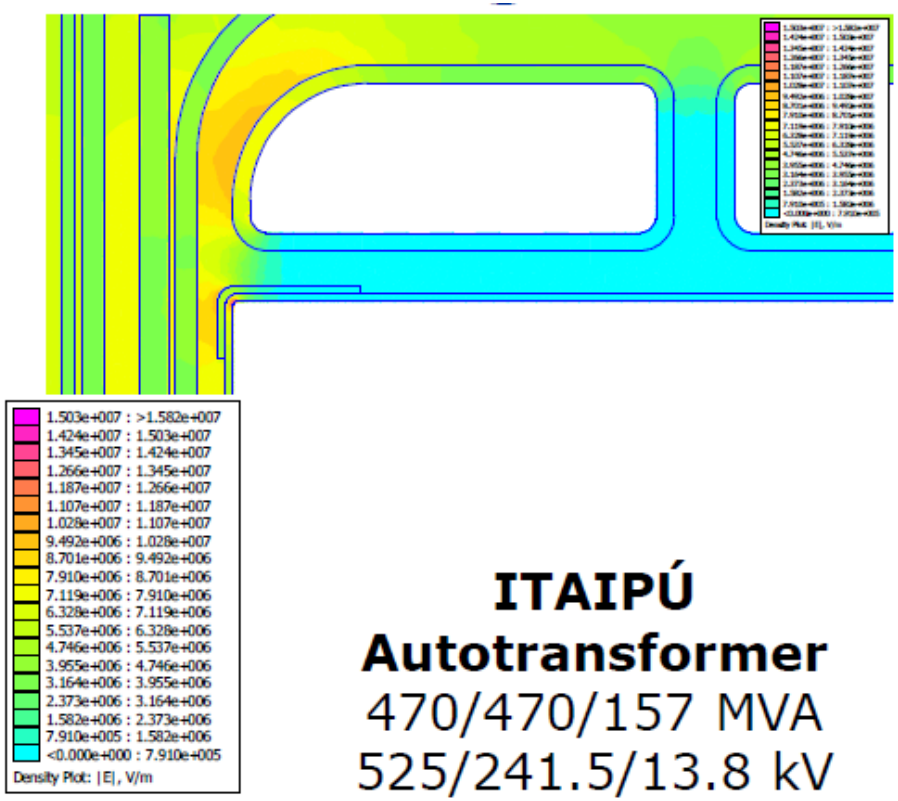


Revisión de Diseño

Diseño Dieléctrico – Verificaciones

kV → kV/mm

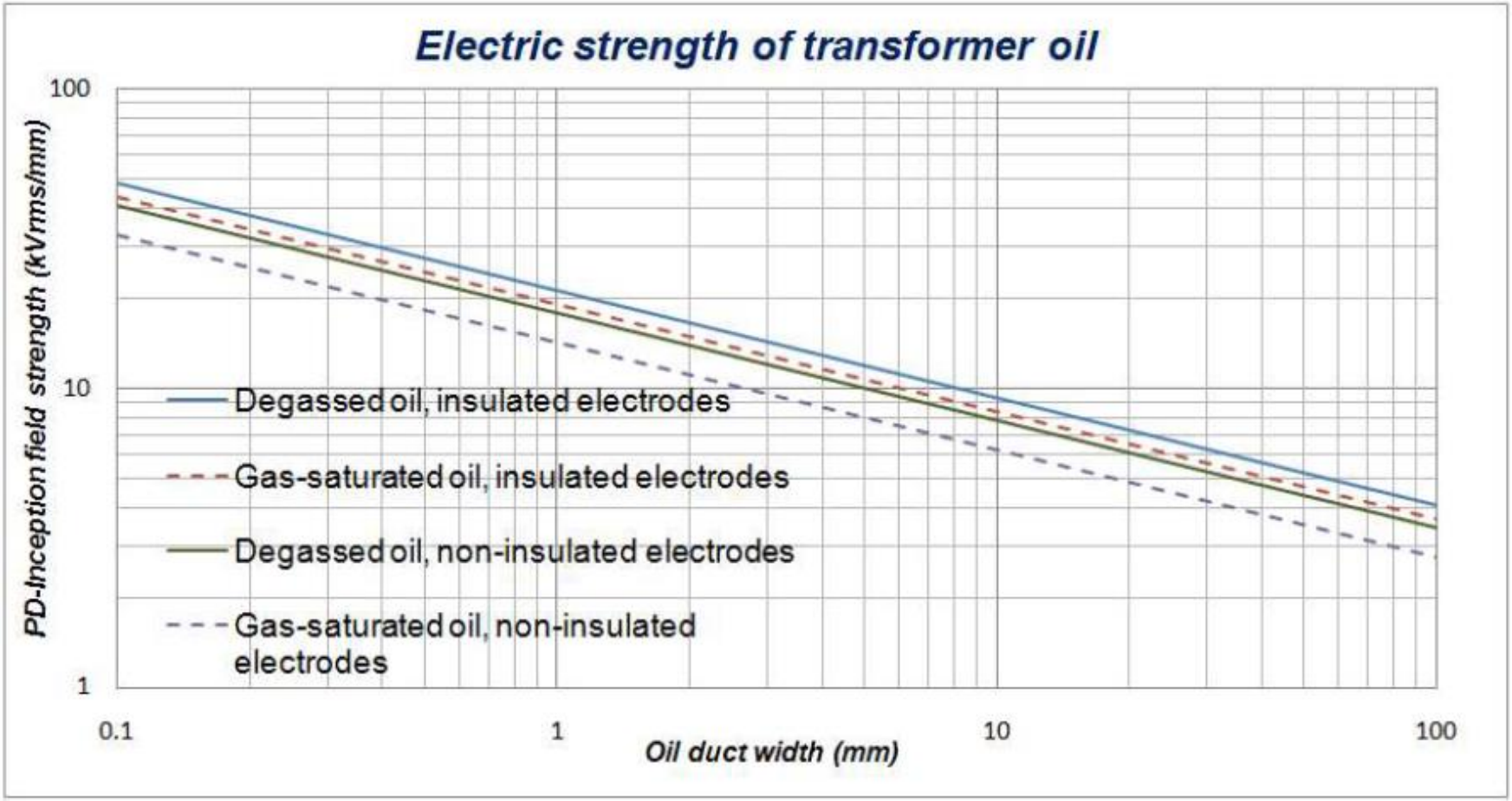




ITAIPÚ
Autotransformer
470/470/157 MVA
525/241.5/13.8 kV

Revisión de Diseño

Diseño Dieléctrico – Verificaciones

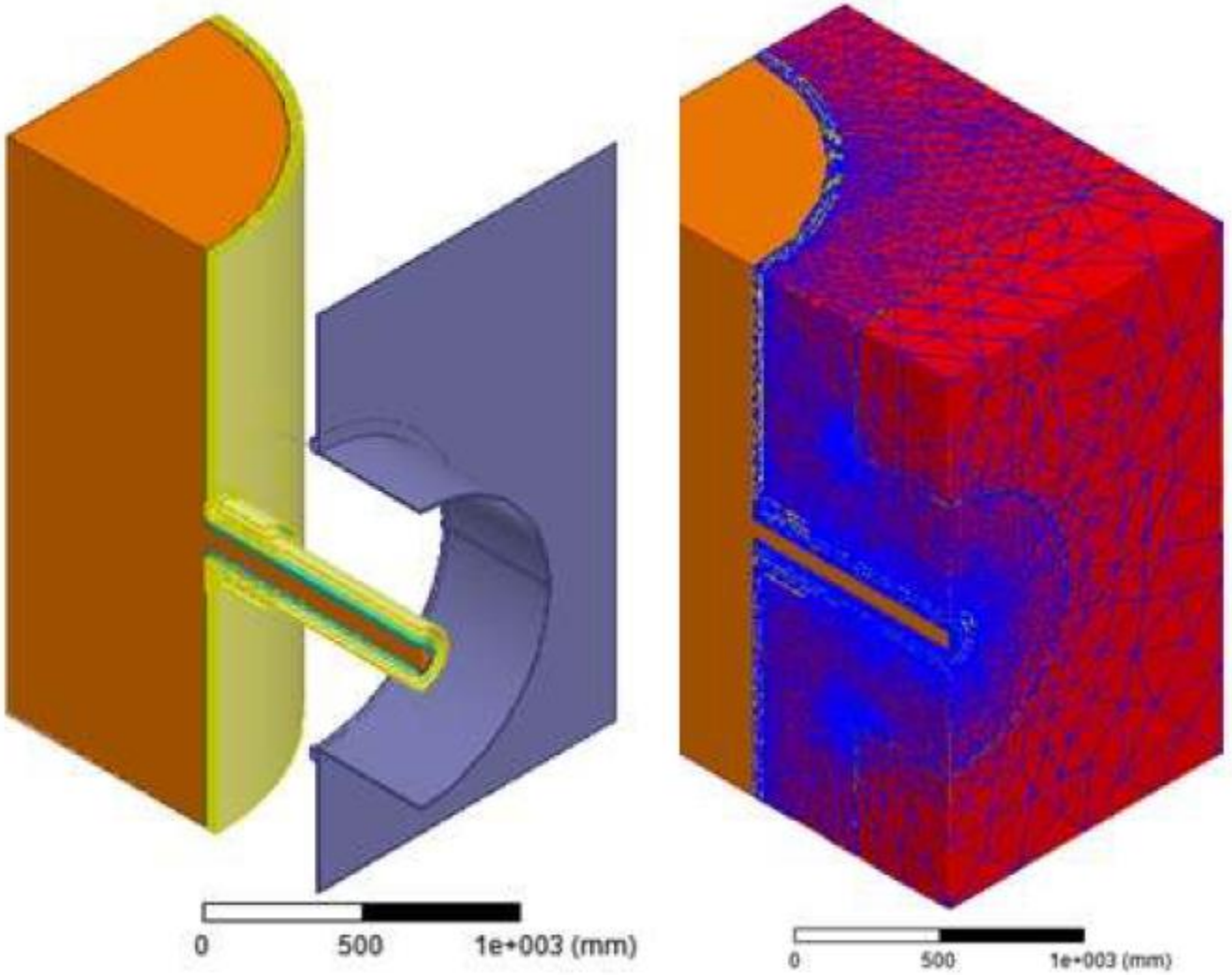


These Kappeler - Weidmann curves express the maximum admissible design value as a value of **uniform electric field** of low probability of partial discharge inception for 1 min AC test voltage (less than 1%)

Revisión de Diseño

Diseño Dieléctrico – Verificaciones

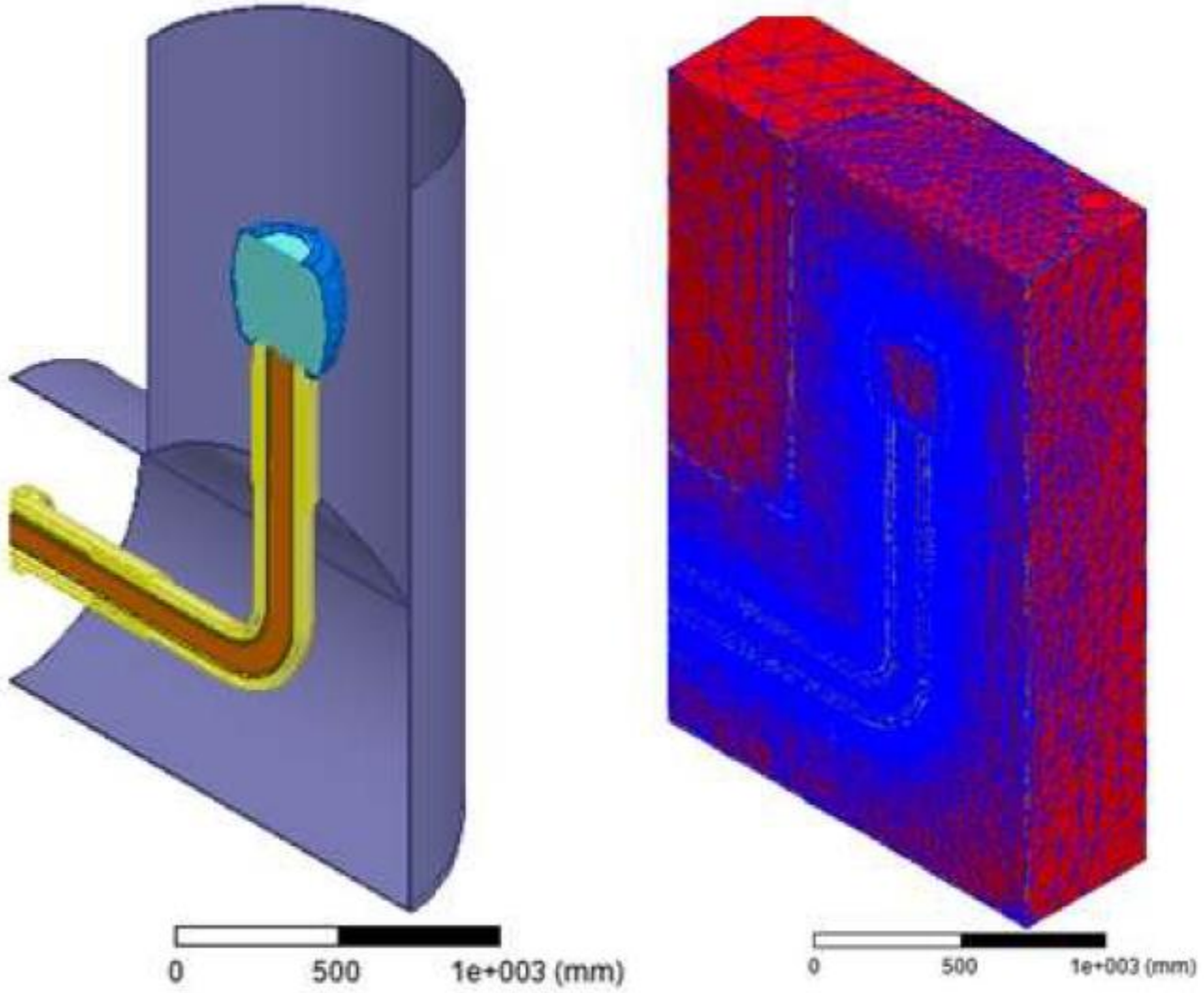
Example of FEM calculation of HV exit



Revisión de Diseño

Diseño Dieléctrico – Verificaciones

Example of FEM calculation of HV exit



Revisión de Diseño

Diseño Térmico – Verificaciones

Norma IEEE Std 1538-2000

"IEEE Guide for Determination of Maximum Winding Temperature Rise in Liquid-Filled Transformers"

Validación de Software

CIGRE WG A2.38

"Transformer Thermal Modelling"

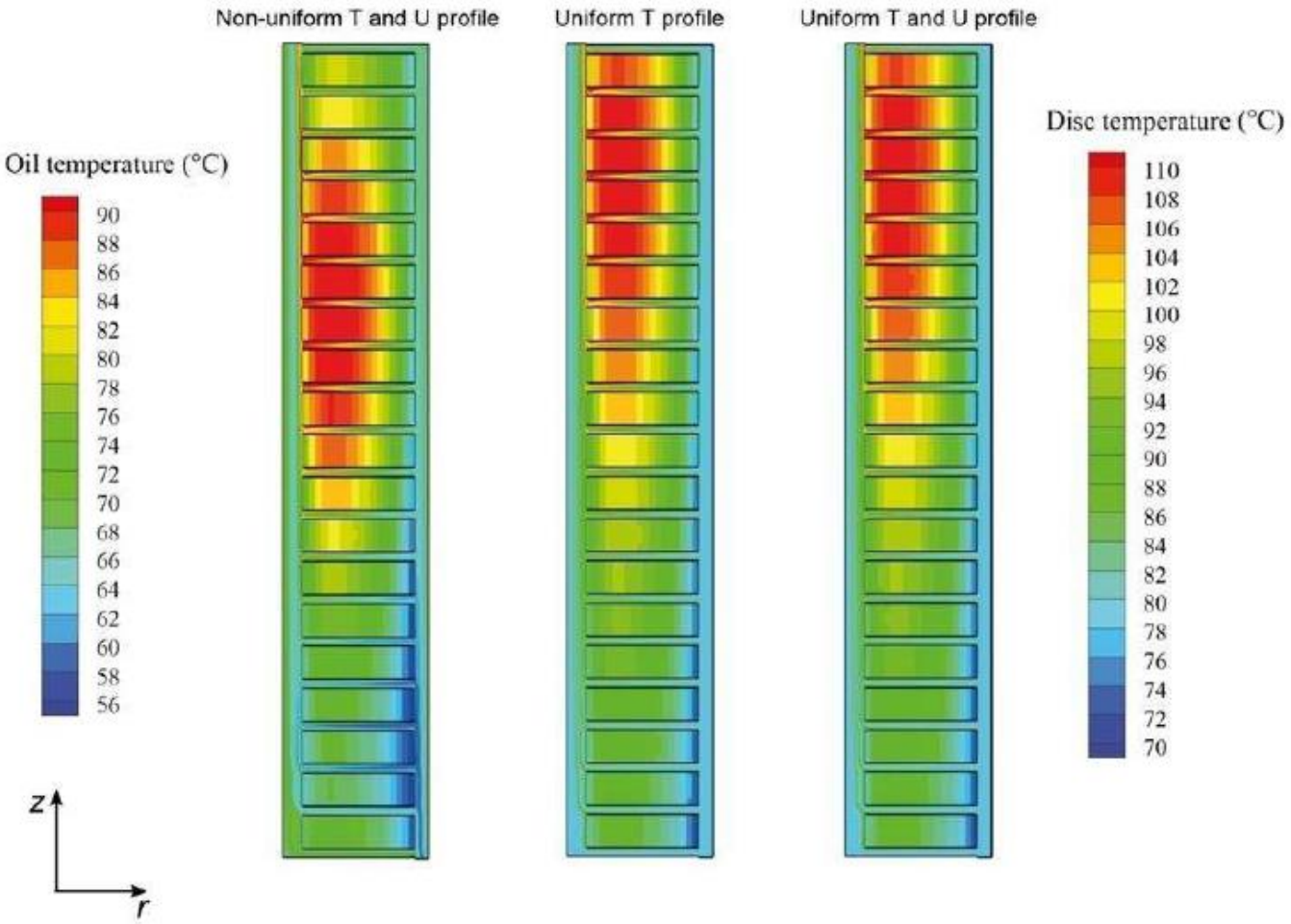
Technical Brochure Nº 659

2016

Revisión de Diseño

Diseño Térmico – Verificaciones

Example of winding CFD calculation



Hot-Spot location in each winding

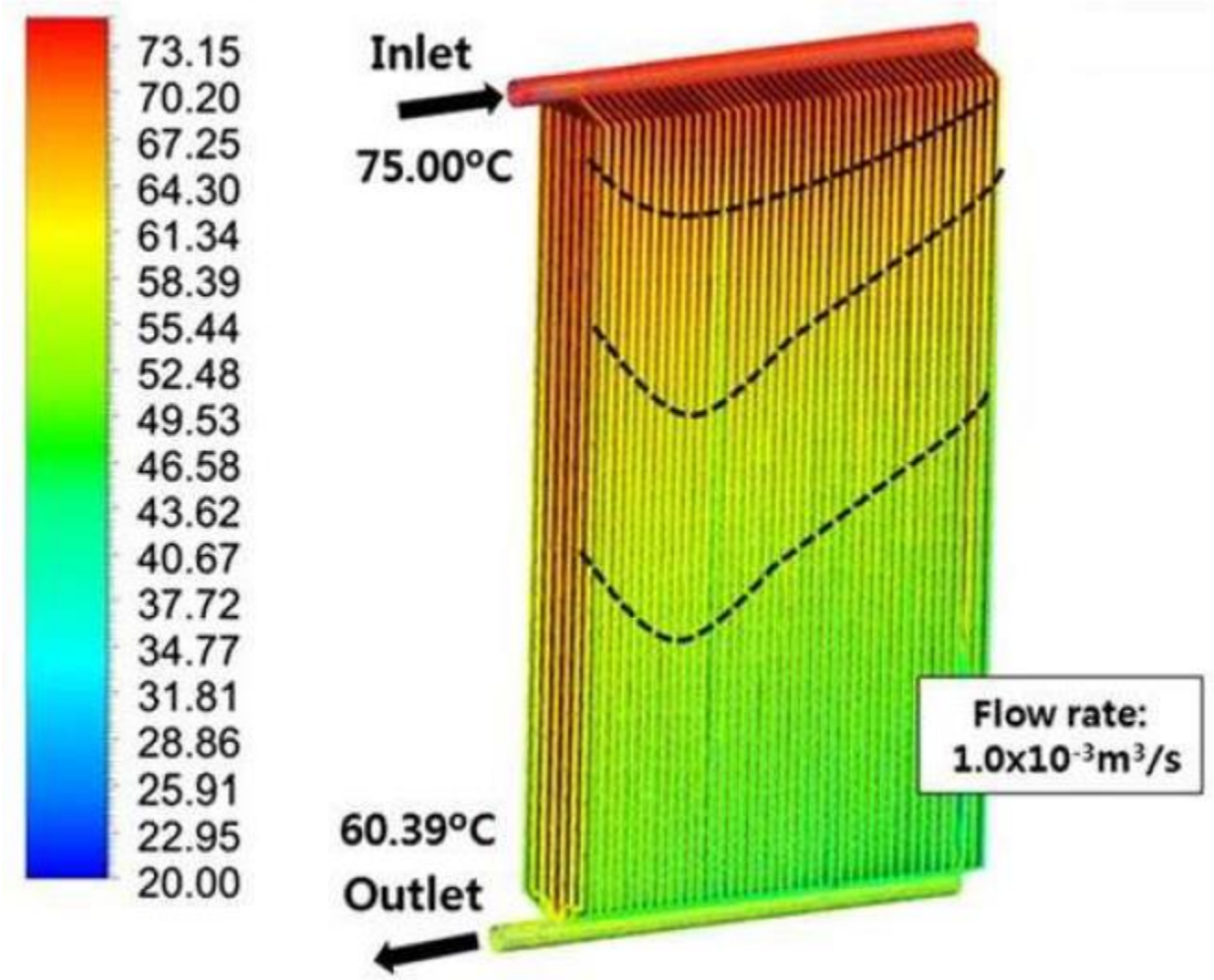
Analysis of distribution of **oil velocities** in windings verifying limits related to static electrification principally of **OD..** cooling systems

Require **direct windings hot-spot temperature** during heat-run tests

Revisión de Diseño

Diseño Térmico – Verificaciones

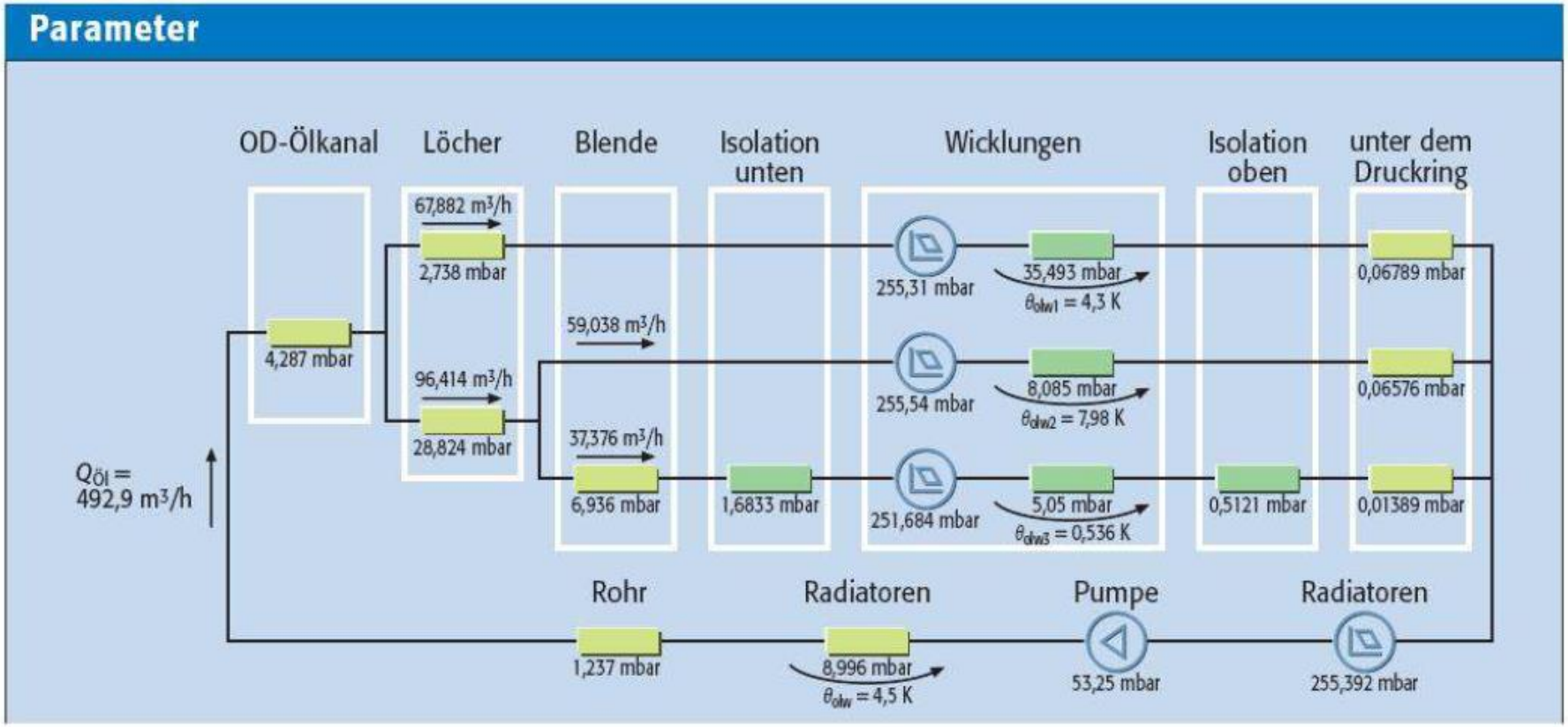
Example of radiator CFD calculation



Revisión de Diseño

Diseño Térmico – Verificaciones

Example of THNM calculation



Zoran Radakovic and Marko Sorgic: "Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 2, APRIL 2010*

Revisión de Diseño

Diseño de Cortocircuito – Verificaciones

Giogio Bertagnolli (ABB)

“Power Transformers & Short Circuits – Evaluation of the short-circuit performance of power Transformers”
2014

Álvaro Portillo

“Diseño de Transformadores para Soportar las Corrientes de Cortocircuito y Ensayos de Cortocircuito”
IntegraCIER, 2104, Punta del Este, Uruguay

IEC 60076-5:2006 Annex A

"Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit"

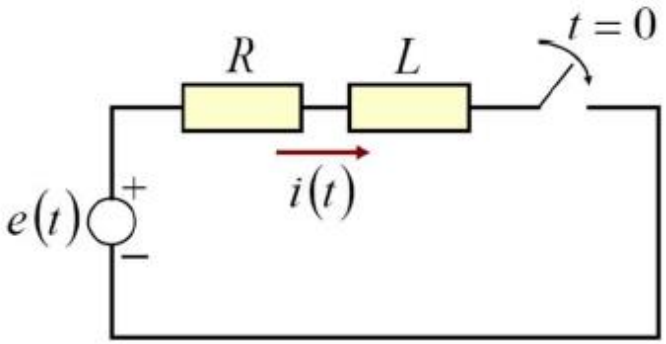
Validación de Software

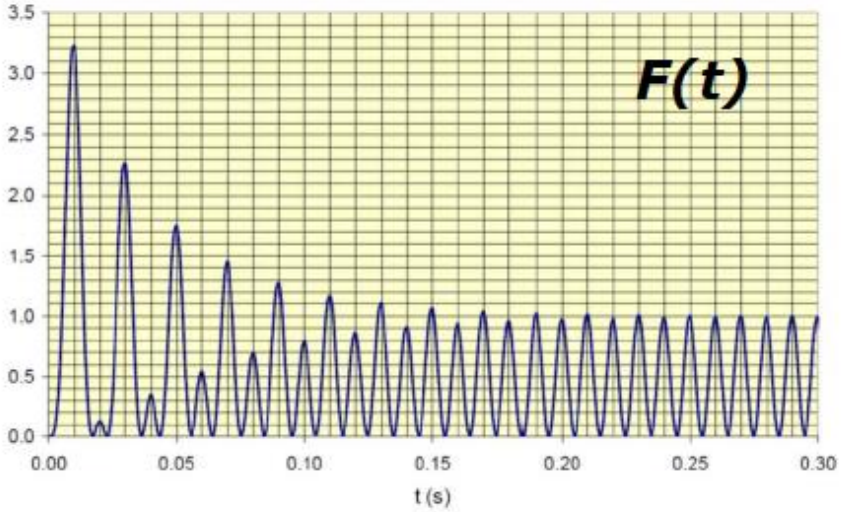
CIGRE WG 12-04

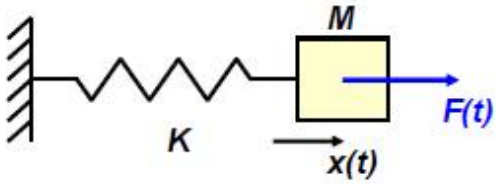
"Calculation of Short-Circuit Forces in Transformers”
ELECTRA, Nº67, pp.29-75, 1979

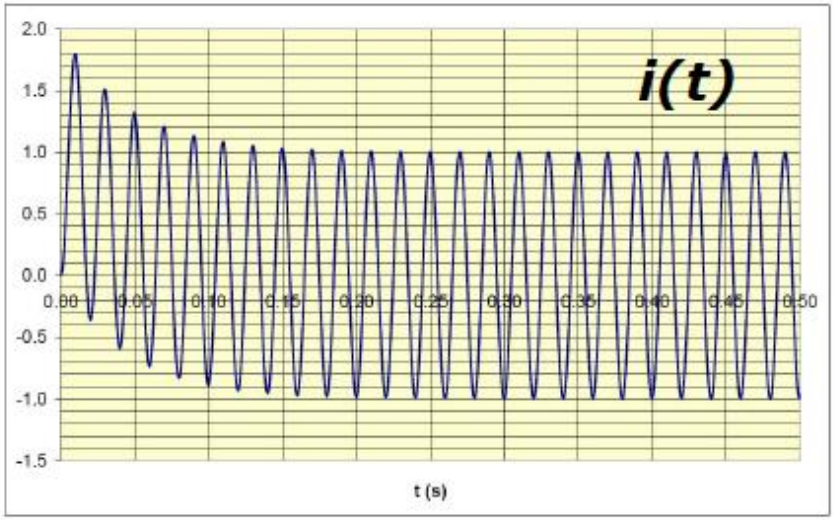
Revisión de Diseño

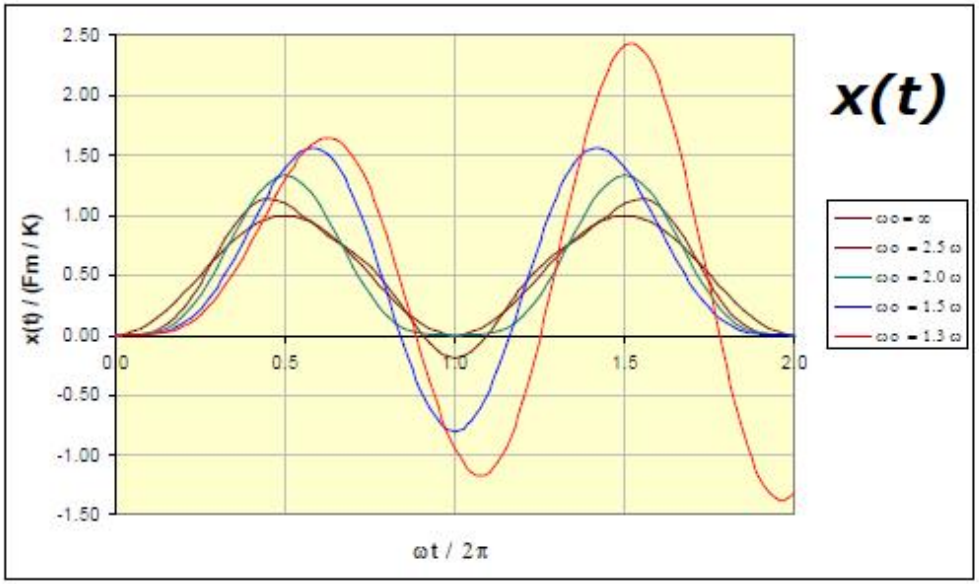
Diseño de Cortocircuito - Verificaciones





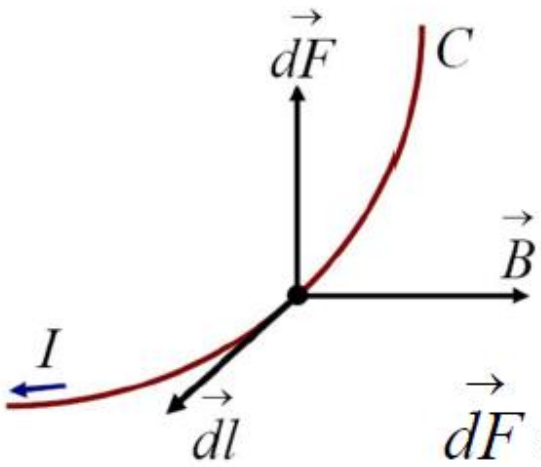






Revisión de Diseño

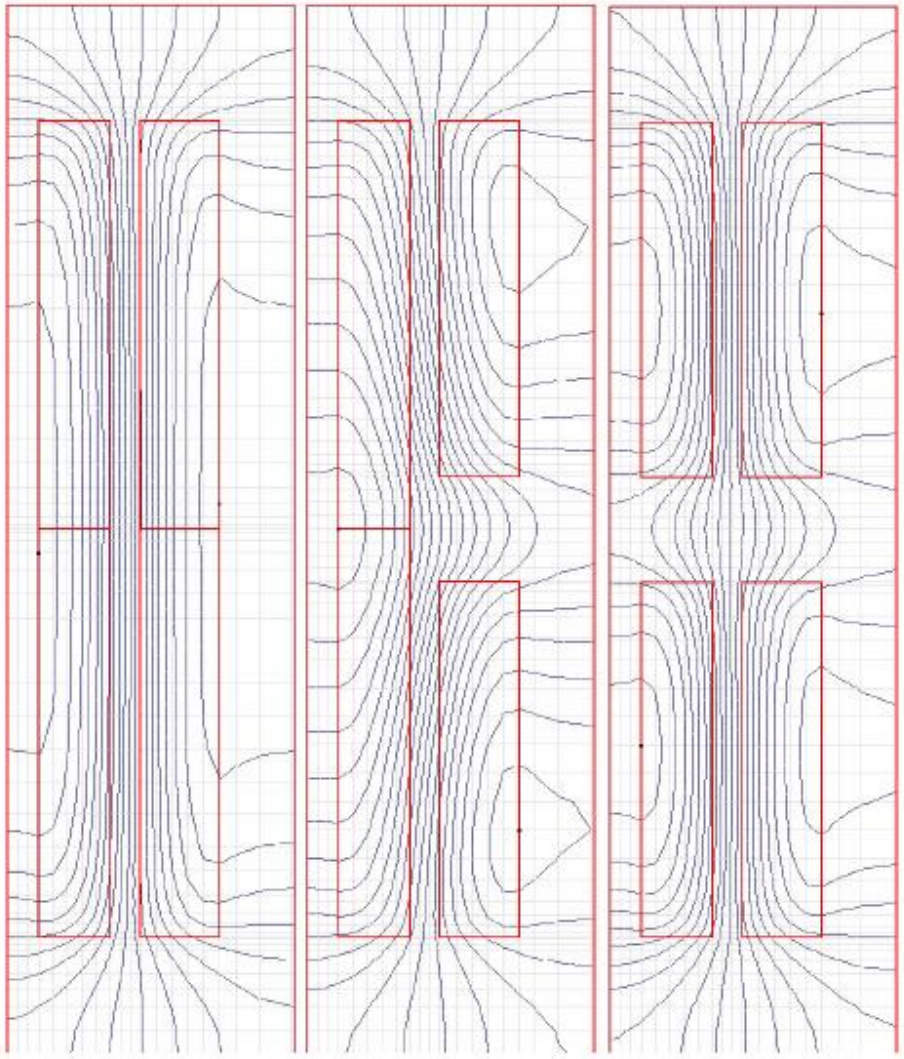
Diseño de Cortocircuito - Verificaciones



$$\vec{dF} = I\,\vec{dl} \wedge \vec{B}$$

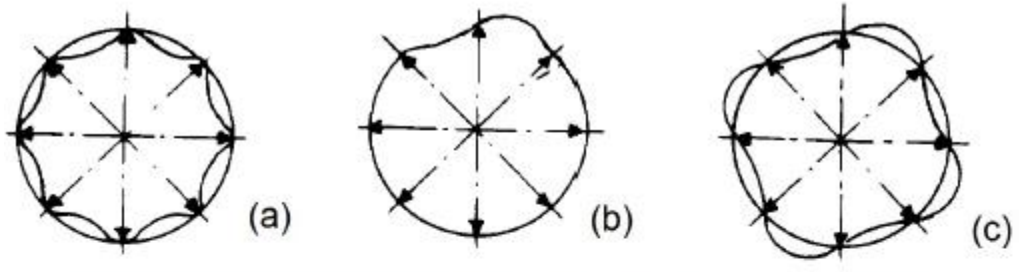
$$\vec{B} = \nabla \wedge \vec{A}$$

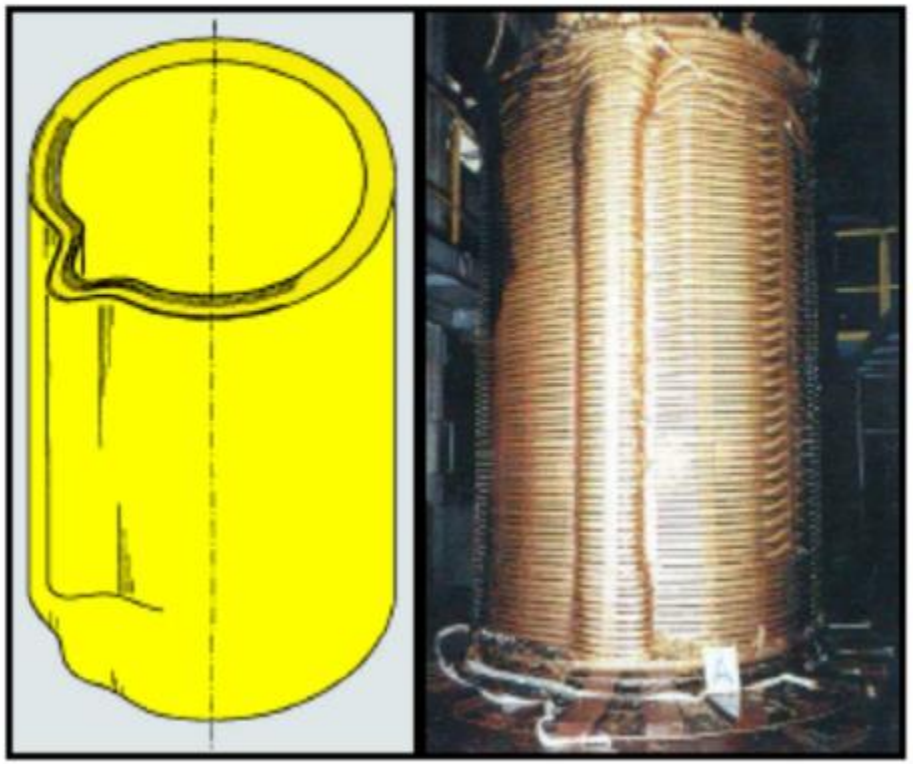
$$\nabla \wedge \left(\nabla \wedge \vec{A} \right) = \mu_O \cdot \vec{J}$$



Revisión de Diseño

Diseño de Cortocircuito – Verificaciones
Esfuerzos Radiales – Bending & Buckling





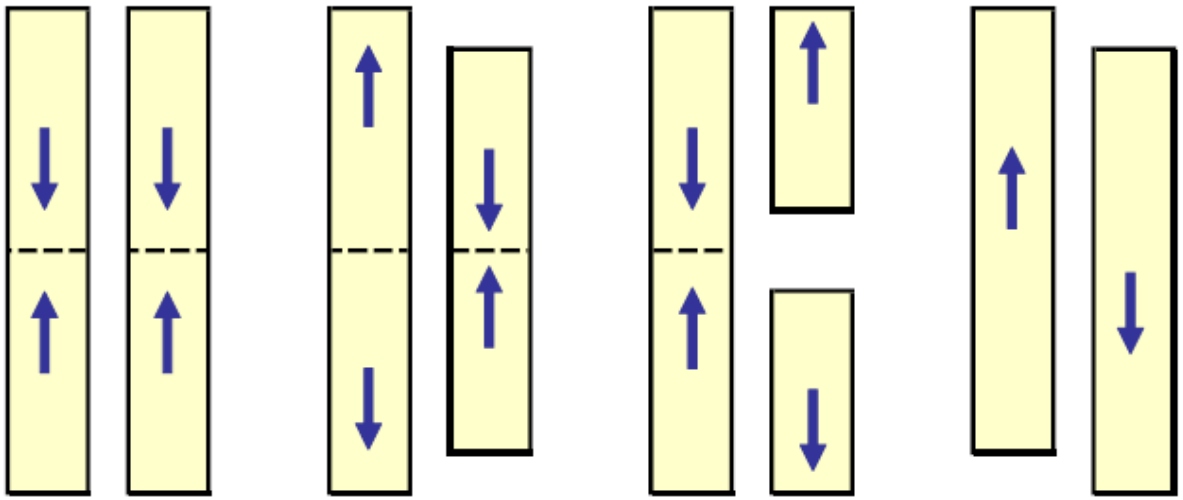
Todas las bobinas que durante los cortocircuitos están sujetas a fuerzas radiales dirigidas hacia la columna del núcleo deben especificarse como auto soportadas.

Esto significa que la bobina debe soportar las fuerzas del cortocircuito radial sin considerar el efecto de los soportes que puedan existir contra el núcleo.

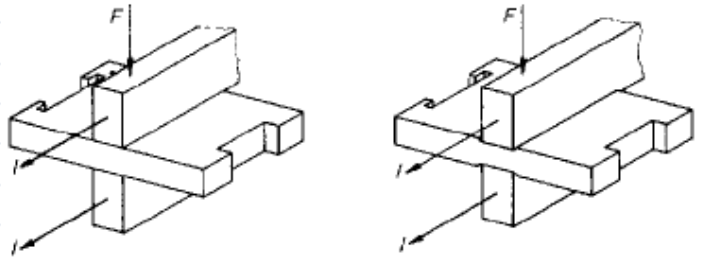
Revisión de Diseño

Diseño de Cortocircuito – Verificaciones

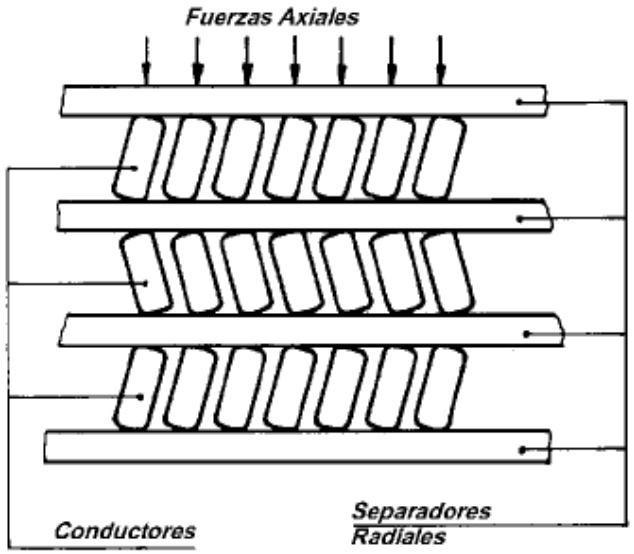
Esfuerzos Axiales



Bending



Compression



Tilting

Revisión de Diseño

Diseño de Cortocircuito – Verificaciones

Esfuerzos Especiales – Spiraling

$$\vec{J} = J_\theta \vec{k}_\theta + J_z \vec{k}_z \qquad \vec{B} = B_r \vec{k}_r + B_\theta \vec{k}_\theta + B_z \vec{k}_z$$

$$\vec{F} = S\vec{J} \wedge \vec{B} = \left(J_\theta B_z - J_z B_\theta\right)\vec{k}_r + J_z B_r \vec{k}_\theta - J_\theta B_z \vec{k}_z$$

Revisión de Diseño

Diseño de Cortocircuito – Ensayo de Cortocircuito

Si bien contar con una buena metodología de cálculo es una herramienta valiosa para realizar un diseño de cortocircuito exitoso, los supuestos que se deben realizar para simplificar el problema y hacer que el cálculo sea posible en un tiempo aceptable con las computadoras disponibles, y la complejidad extremadamente alta del problema, hacen que la única forma de verificar que el transformador soporta los efectos de las corrientes de cortocircuito es realizar la prueba de cortocircuito de acuerdo con la norma IEC 60076-5.

Esta es una prueba que se puede realizar en unos pocos laboratorios del mundo, es muy costosa, muy exigente, con un alto índice de fallas (25%, aumentando a 40% para transformadores de más de 100 MVA) y debe coordinarse con bastante anticipación para evitar comprometer el plazo de entrega de transformadores.

Revisión de Diseño

Diseño de Cortocircuito – Ensayo de Cortocircuito

La experiencia que los fabricantes obtienen al realizar y analizar los resultados de estas pruebas es esencial para mejorar la calidad de su diseño al cortocircuito.

Uno de los transformadores más grandes ensayados:

Transformador Trifásico de 775 MVA, GSU, en IREQ Canadá

Los transformadores más grandes que se pueden ensayar en KEMA:

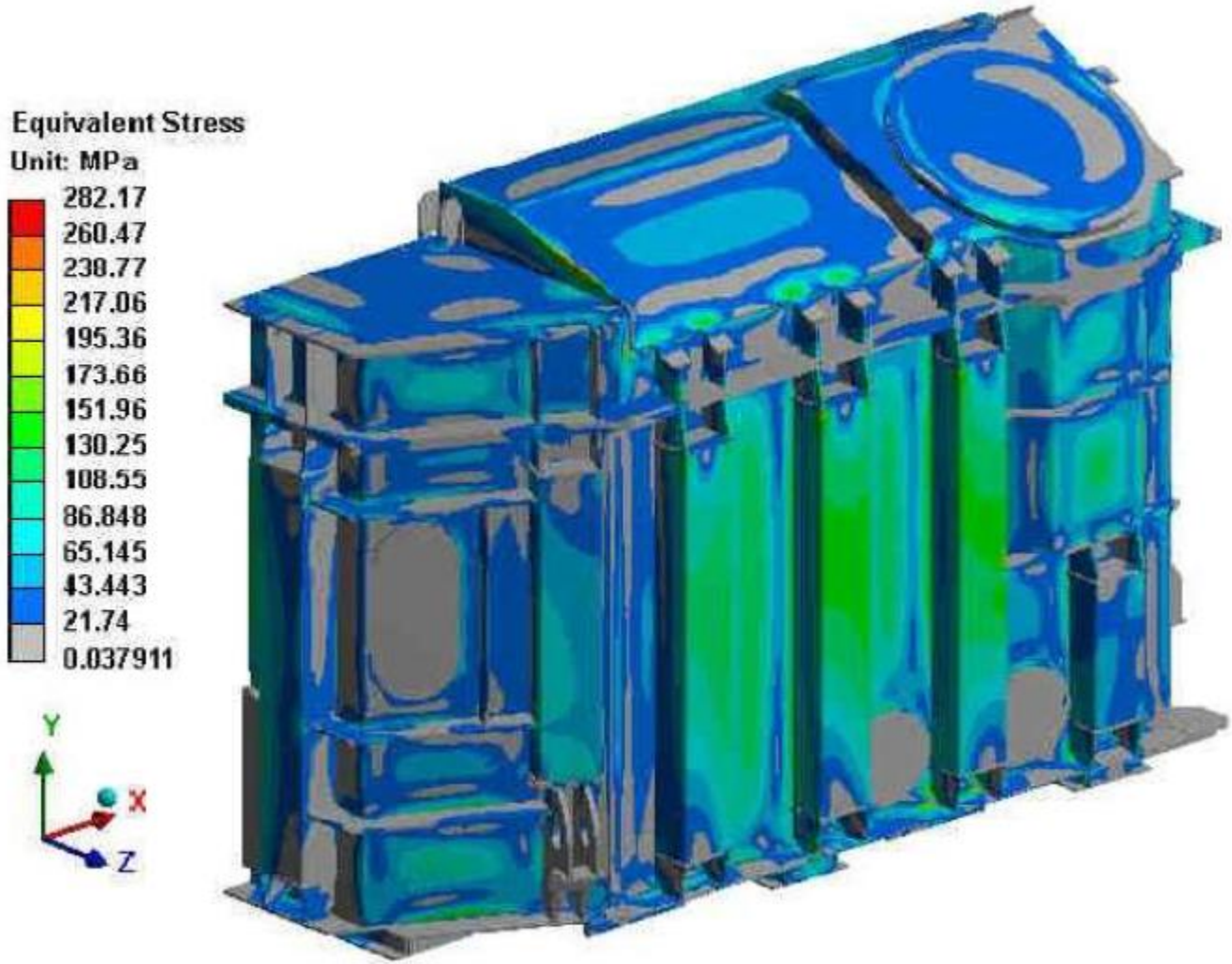
- Monofásicos hasta ≈ 1000 MVA
- Trifásicos hasta ≈ 750 MVA

Si la prueba de cortocircuito se ha especificado todos los detalles de la prueba se deben definir durante la revisión del diseño.

Revisión de Diseño

Diseño Mecánico

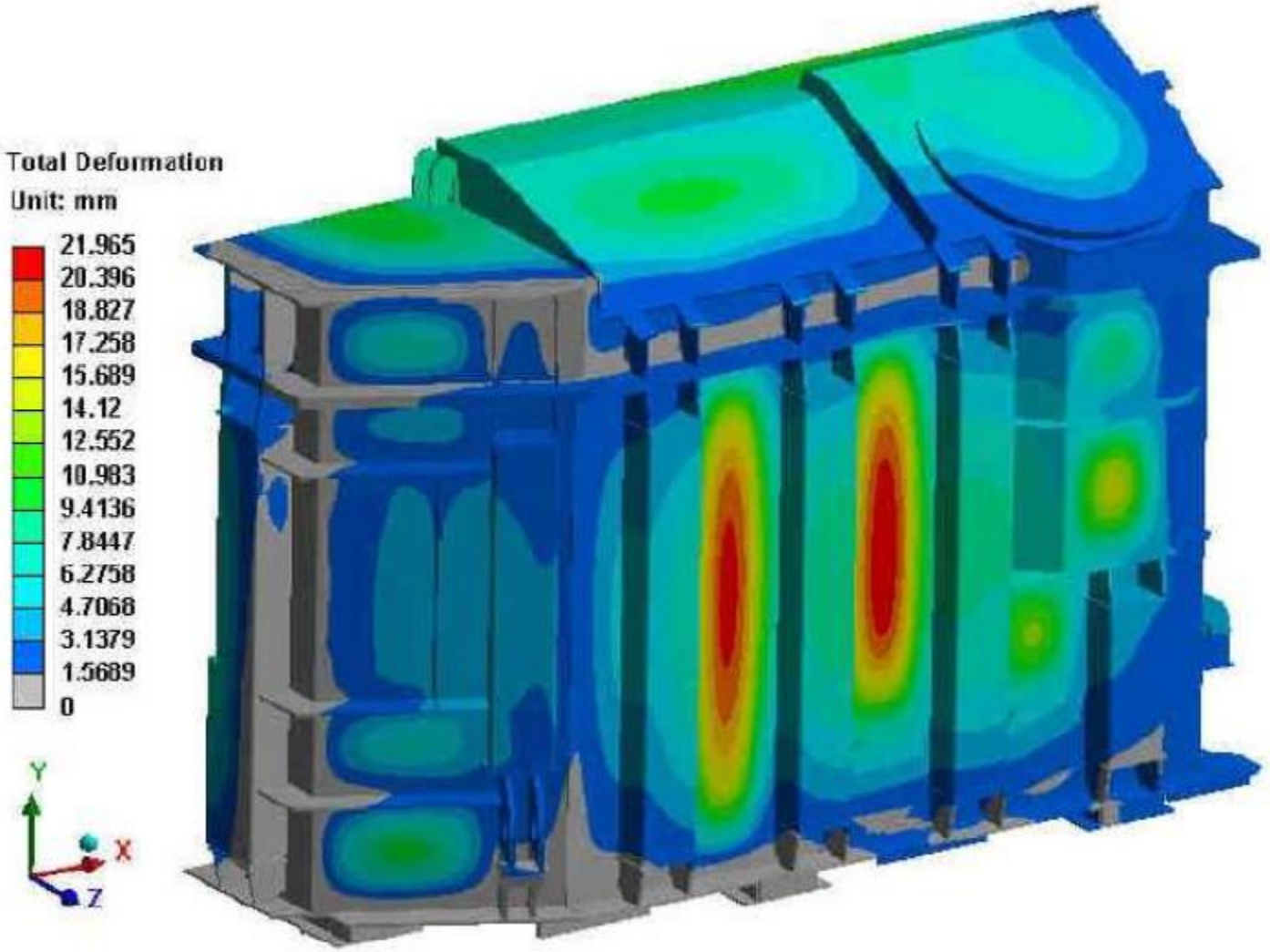
Stress calculation at an internal pressure of 0.1 MPa



Revisión de Diseño

Diseño Mecánico

Tank deflection at an internal pressure of 0.1 MPa



Revisión de Diseño

Diseño Mecánico

Mitigación de la Ruptura del Tanque

Revisión de Diseño

Diseño Mecánico

Mitigación de la Ruptura del Tanque

Canadian Electric Association – 1994
"Power Transformer Tank Rupture"

CIGRE 2010 – M.Foata & J.B.Dastous
"Power transformer tank rupture prevention"

IEEE C57.156-2016
"Guide for Tank Rupture Mitigation of Liquid-Immersed Power Transformers and Reactors"

CIGRE WG A2.33
"Guide for Transformer Fire Safety Practices"
Technical Brochure 537 – 2013

Revisión de Diseño

Diseño Sísmico

Revisión de Diseño

Diseño Sísmico

IEEE C57.114-1990

"IEEE Seismic Guide for Power Transformers and Reactors"

IEEE Std 693-2018

"IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations"

MCEER

(Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)

"Modeling and Seismic Performance Evaluation of High Voltage Transformers and Bushings"

2011

Revisión de Diseño

Conclusiones

La revisión del diseño es una herramienta útil para ayudar a las empresas de energía eléctrica a evaluar la calidad y las capacidades de proveedores desconocidos.

Durante la revisión del diseño es necesario evaluar si el proyecto del fabricante es correcto y seguro y también si este proyecto cumple con todos los requisitos especificados por el usuario.

El diseño del transformador es una tarea multidisciplinaria que involucra, además del electromagnetismo, otros campos como

la transferencia de calor,
la hidráulica,
la resistencia de materiales,
los cálculos numéricos,
el desarrollo de software especializado, etc.,

por lo tanto, para llevar a cabo esta tarea con éxito, se necesita tener profesionales con experiencia y un profundo conocimiento de los detalles de construcción, diseño y procesos de fabricación de los transformadores.

Revisión de Diseño

Conclusiones

La fabricación exitosa de un transformador de buena calidad es como una mesa de tres patas:

Las tres patas son:

- Calidad de Diseño
- Calidad de Materiales
- Calidad de Procesos

¡Si cualquiera de las patas falla la mesa se cae!

6 y 7 de setiembre de 2021

13h00 a 17h00 (Hora de Costa Rica)

Especificaciones y Revisión de Diseño de Transformadores de Potencia

Muchas gracias
por
vuestra atención !

Álvaro Portillo
acport18@gmail.com