



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN**

**ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA AISLANTE DE UN TRANSFORMADOR  
TIPO COLUMNAS POR EL MÉTODO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS**

**TRABAJO PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:**

**CUITLÁHUAC SAN VICENTE FUENTES**

**ASESOR: ING. CASILDO RODRÍGUEZ ARCINIEGA**

**CUAUTILÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**2006**

---

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: EVALUACION DEL INFORME  
 DEL DESEMPEÑO PROFESIONAL  
 FACULTAD DE ESTUDIOS  
 SUPERIORES CUAUTITLAN



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 26 del Reglamento General de Exámenes y el art. 66 del Reglamento de Exámenes Profesionales de FESC, nos permitimos comunicar a usted que revisamos EL TRABAJO PROFESIONAL:

Estudio para la Optimización del Sistema Aislante de un  
Transformador tipo Columnas por el Método de Análisis -  
por Elementos Finitos.  
 que presenta el pasante: Cuitláhuac San Vicente Fuentes  
 con número de cuenta: 7124170-6 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios, otorgamos nuestra  
 ACEPTACION


ATENTAMENTE  
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
 Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de Agosto de 2006.

PRESIDENTE	<u>Ing. Casildo Rodríguez Arciniega</u>	
VOCAL	<u>Ing. Francisco Gutiérrez Santos</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Jaime Rodríguez Martínez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Víctor Hugo Landa Orozco</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Diana Fabiola Arce Zaragoza</u>	

Gracias,  
A Nelly, mi esposa amada  
A mis hijas Quetzalli y Anetzi, el motor de mi vida  
A mis padres (In Memoriam) y hermanos  
A mis amigos y compañeros  
Y sobre todo, gracias a mi Dios.

---

---

A photograph of a large industrial transformer, likely a column-type transformer, with a person standing next to it for scale. The transformer is white and has several large cooling fans on top. The person is wearing a blue shirt and dark pants. The background is a light-colored wall.

**Estudio para la Optimización del Sistema Aislante de un Transformador tipo Columnas por el Método de Análisis por Elementos Finitos.**

Cuitláhuac San Vicente Fuentes

---

# INDICE.

- I. Introducción.
- II. Análisis por elementos finitos.
  - a. Metodología de análisis dieléctrico de EHV-Weidmann.
- III. Caso práctico.
  - a. Características.
  - b. Procedimiento.
    - i. Obtener diseño original del Transformador.
    - ii. Realizar el análisis por elementos finitos del diseño original.
    - iii. Definir áreas de oportunidad de optimización.
    - iv. Sugerencias de rediseño.
    - v. Análisis por elementos finitos del rediseño.
- IV. Análisis y Discusión.
- V. Conclusiones.
- VI. Bibliografía.

# I. INTRODUCCION.

En un entorno de altos niveles de competitividad internacional, donde la globalización ha alcanzado a la mayoría de los procesos productivos, se hace necesaria la aplicación de la Ingeniería para la optimización de los productos, procesos y servicios que cada empresa oferta.

Durante mi vida laboral he participado activamente en los procesos de mejora de transformadores tanto de distribución como de potencia, incrementando tanto la eficiencia de los mismos como su rentabilidad, optimizando el diseño eléctrico, es decir, los núcleos y las bobinas; los parámetros de diseño definidos hace muchos años han venido modificándose conforme la tecnología es aplicada a los materiales utilizados en la manufactura de esos componentes mejorando sus propiedades, el acero eléctrico al silicio de grano orientado es un claro ejemplo de ello.

Para transformadores de potencia tipo acorazado (Shell Type Transformer), participé en un proyecto de mejora de distancias dieléctricas modificando las que se utilizaban a la fecha y que se habían estado utilizando por más de veinte años, basado en los procesos de secado e impregnación, logrando reducciones considerables en los costos de manufactura, el tamaño de los transformadores, su peso y las pérdidas evaluadas.

En transformadores de distribución desarrollamos una mejora sustancial en la utilización del acero eléctrico para núcleos incrementando la eficiencia en su utilización con el consiguiente ahorro en costos y evaluación de pérdidas de 10% promedio por diseño.

Actualmente, el área en que laboro me permite visualizar un potencial de mejora para la industria de transformadores eléctricos en México, ya que, siendo los aislamientos el elemento más importante dentro del transformador, aún hoy día no hay un gran desarrollo aplicado a ellos.

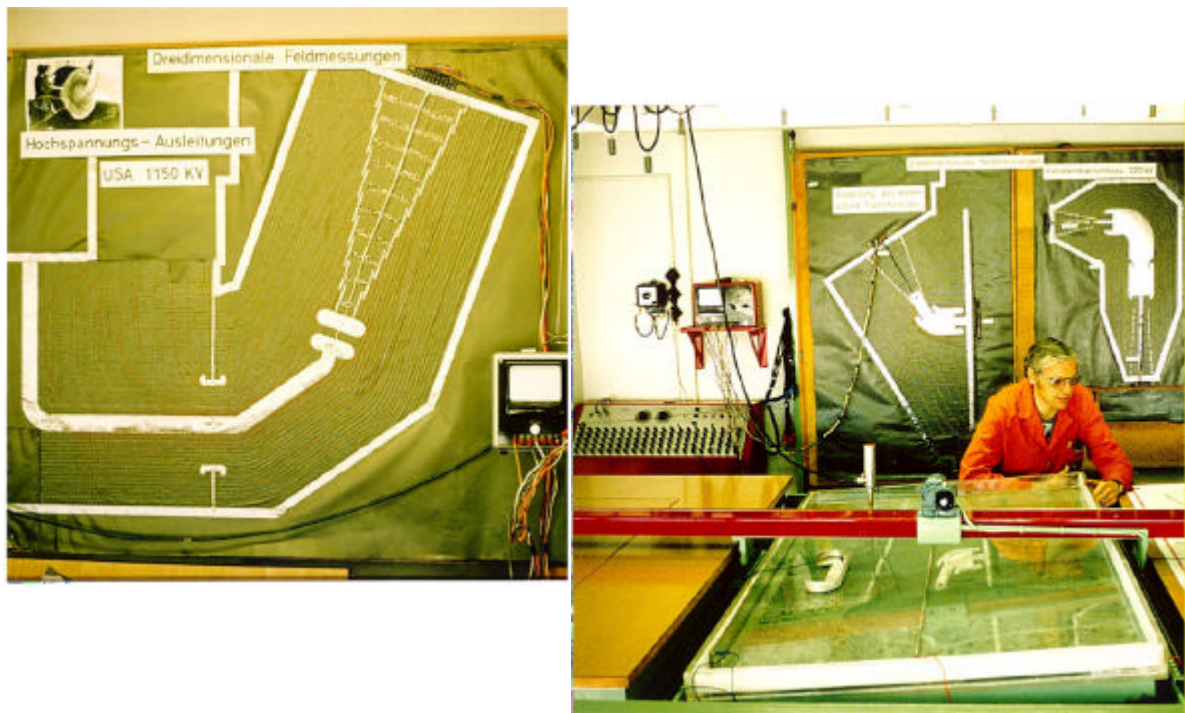
Se han realizado varios proyectos de optimización del sistema aislante para transformadores de distribución, transformadores tipo industrial y también para transformadores de potencia, con resultados satisfactorios en todos ellos, razón por la cual se está mostrando en este estudio un caso práctico de la utilización del método de Análisis por Elementos Finitos para la Optimización del Sistema Aislante de un Transformador de Potencia Tipo Columnas (Core Type Transformer).

## II. Análisis por Elementos Finitos

### a) METODOLOGIA DE ANALISIS DIELECTRICO DE EHV-WEIDMANN.

#### Historia.

Los análisis de este tipo se desarrollaban en laboratorio, donde, a través de soluciones salinas, se simulaba la distribución del campo eléctrico, para posteriormente analizarlo, este proceso podía tomar meses para su ejecución pues cada modelo tendía que repetirse varias ocasiones hasta completar el análisis del área correspondiente y esto sin tener en cuenta las posibilidades de falla del modelo. Actualmente, con el uso de computadoras, el proceso se ha expeditado radicalmente haciéndose factible su aplicación práctica.

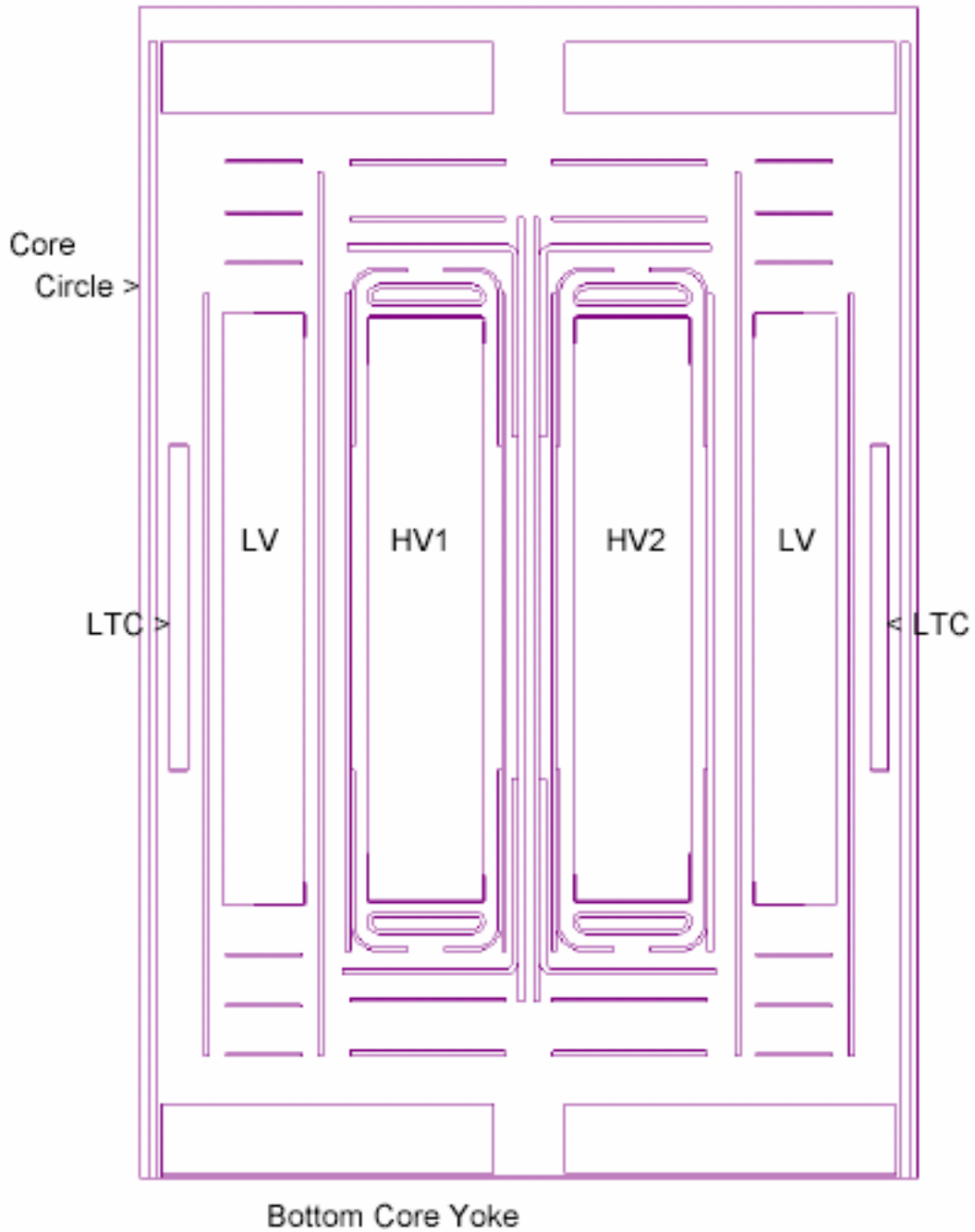


En esta sección se dará una descripción del Método de Análisis por Elementos Finitos, las Técnicas de Análisis y el Análisis de los Resultados utilizado en el proceso de Optimización de Transformadores de Potencia.

El software utilizado por EHV-Weidmann para este tipo de análisis ha sido desarrollado por ANSOFT; pero, además, EHV-Weidmann ha creado software adicional para el análisis automatizado de los resultados, obteniéndose así un paquete completo para el desarrollo de este tipo de proyectos.



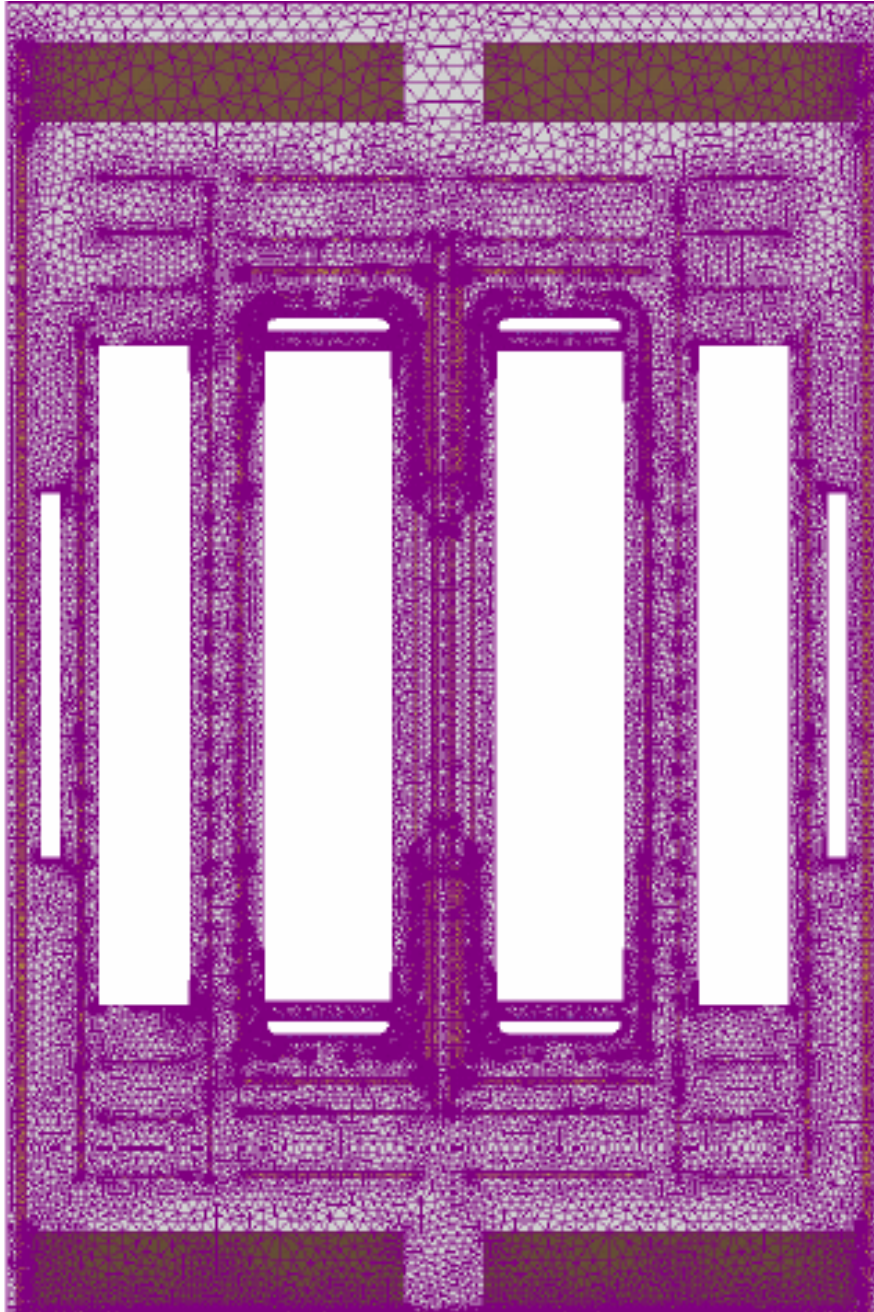
La geometría del Transformador a ser analizado, se introduce a través de cualquier programa de dibujo donde se pueda generar el archivo .DXF



Geometría

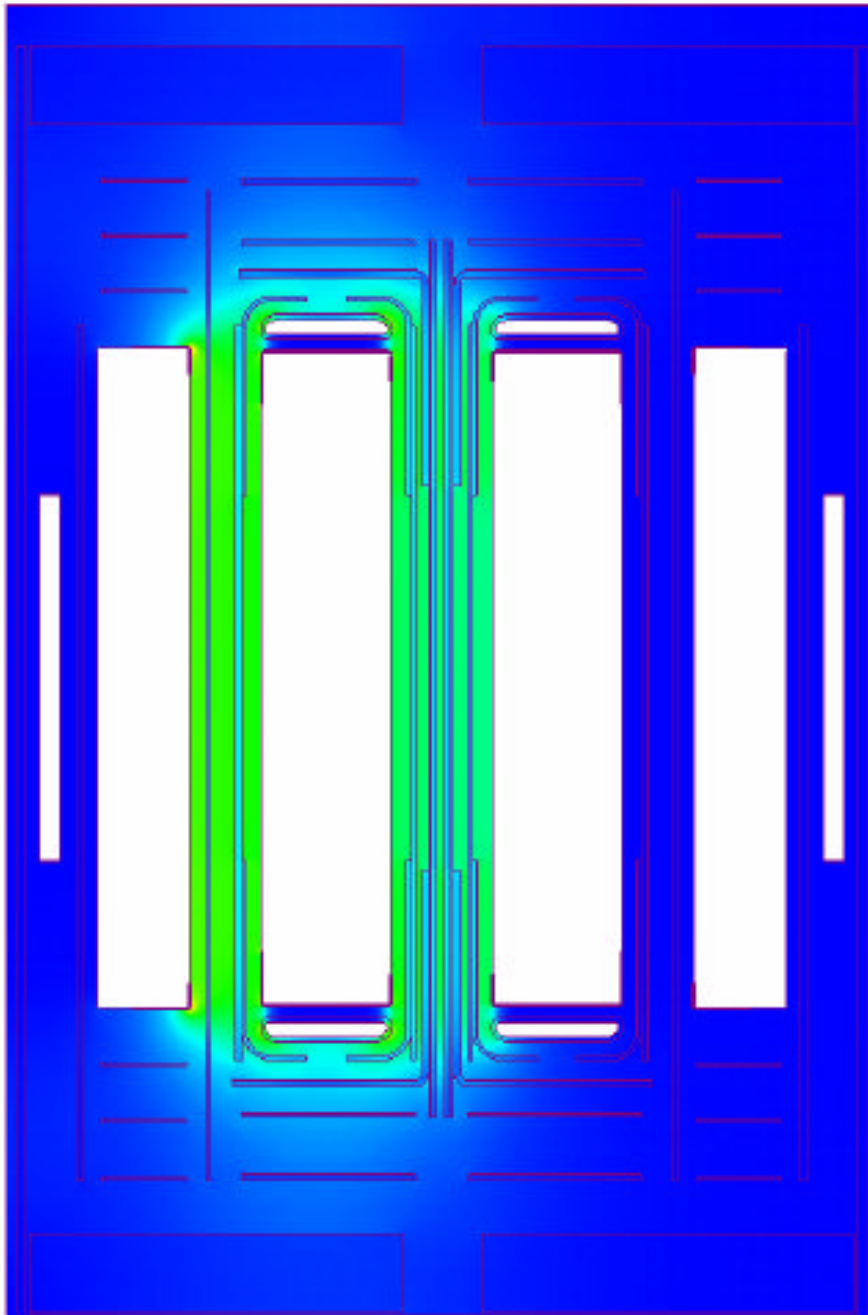


El programa entonces crea una malla con la finalidad de dividir el problema en un gran número de pequeñas regiones a ser analizadas. El programa utiliza triángulos donde cada vértice se considera un nodo.



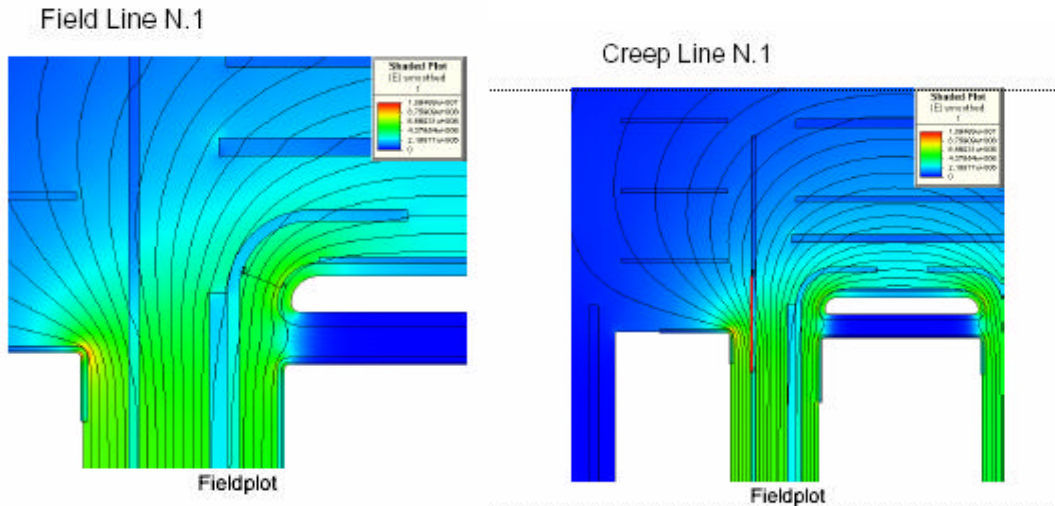
Malla

Durante el proceso de solución, el programa calcula las cantidades electromagnéticas en cada nodo dentro del problema, interpolando los puntos dentro de cada triángulo para generar un valor para el campo continuo.

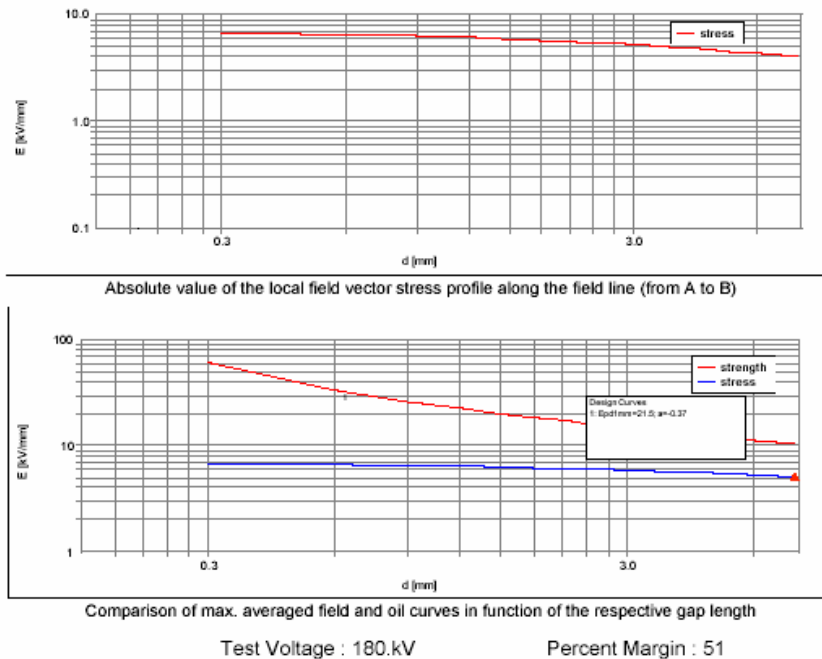


Distribución de Campo Eléctrico.

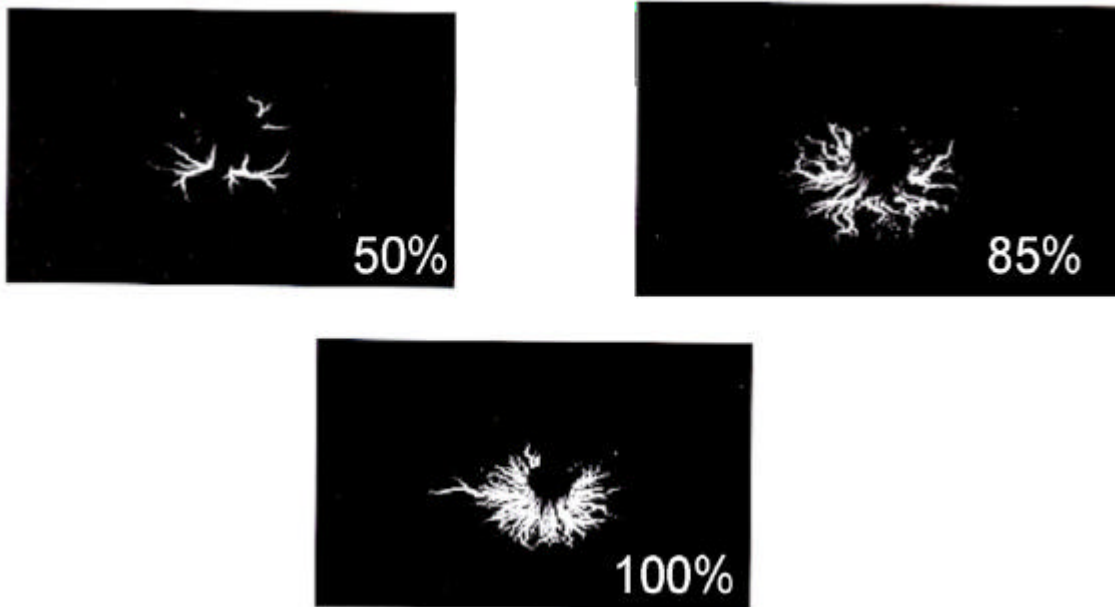
Posteriormente a que se ha calculado el campo electromagnético en cada nodo, se podrán calcular los esfuerzos dieléctricos a que son sometidos los elementos dentro del sistema, esto es, los ductos de aceite, los esfuerzos concentrados en determinados puntos de interés y los esfuerzos en las zonas interfaciales, generalmente conocidos como esfuerzos de arrastre.



Estos esfuerzos son introducidos al software desarrollado por EHV-Weidmann y comparados con las Curvas de Diseño para calcular el diferencial entre ambos valores y definir que margen porcentual de seguridad se tiene con respecto al momento del inicio de una descarga.



## Canales de Descarga al Voltaje de Ruptura (En Aceite)



EHV-Weidmann ha desarrollado cinco diferentes Curvas de Diseño (Ver Chart 1 y 2) a ser utilizadas según la situación/localización del área analizada:

1. Electrodo Aislado, Aceite Degasificado.
2. Electrodo Aislado, Aceite Saturado.
3. Electrodo Desnudo, Aceite Degasificado.
4. Electrodo Desnudo, Aceite Saturado.
5. Resistencia al arrastre.

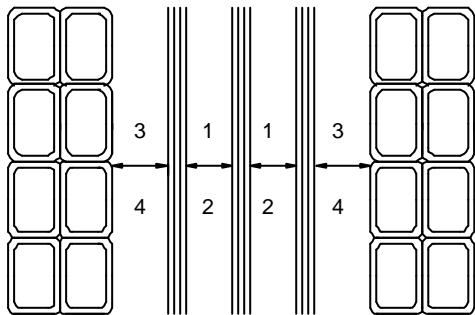
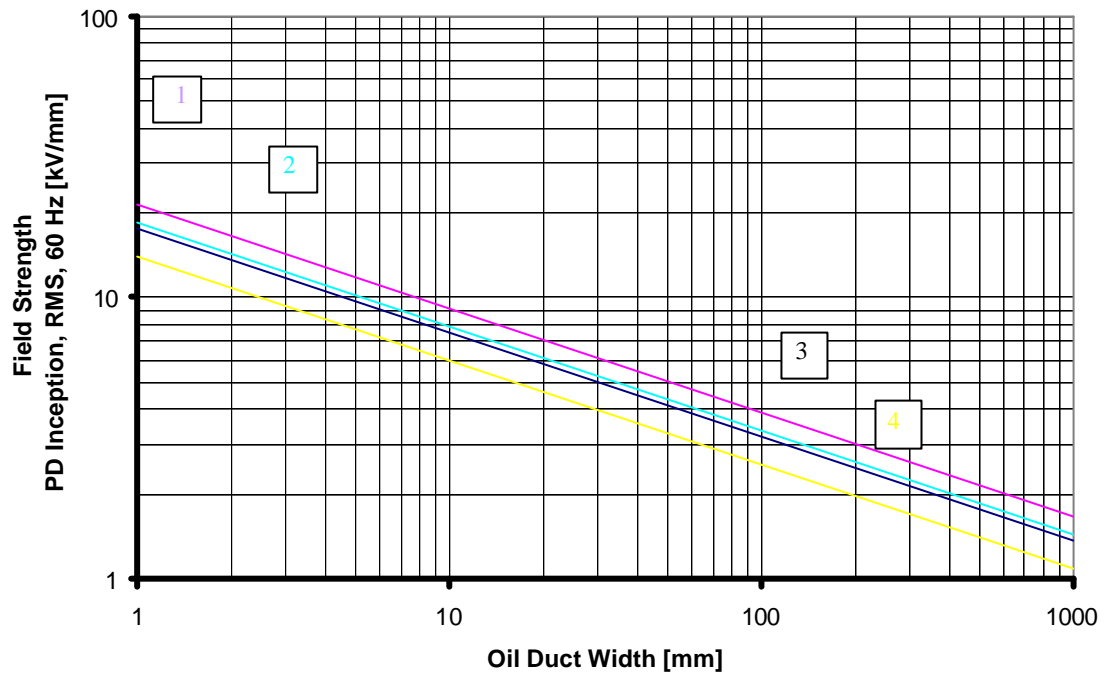
Las líneas 3 y 4 son utilizadas para analizar los ductos de aceite junto a los conductores, ya sea que estos estén desnudos o aislados.

Las líneas 1 y 2 son utilizadas para analizar ductos localizados entre barreras aislantes.

La línea 5 se utiliza para el análisis de la interface aceite/cartón.

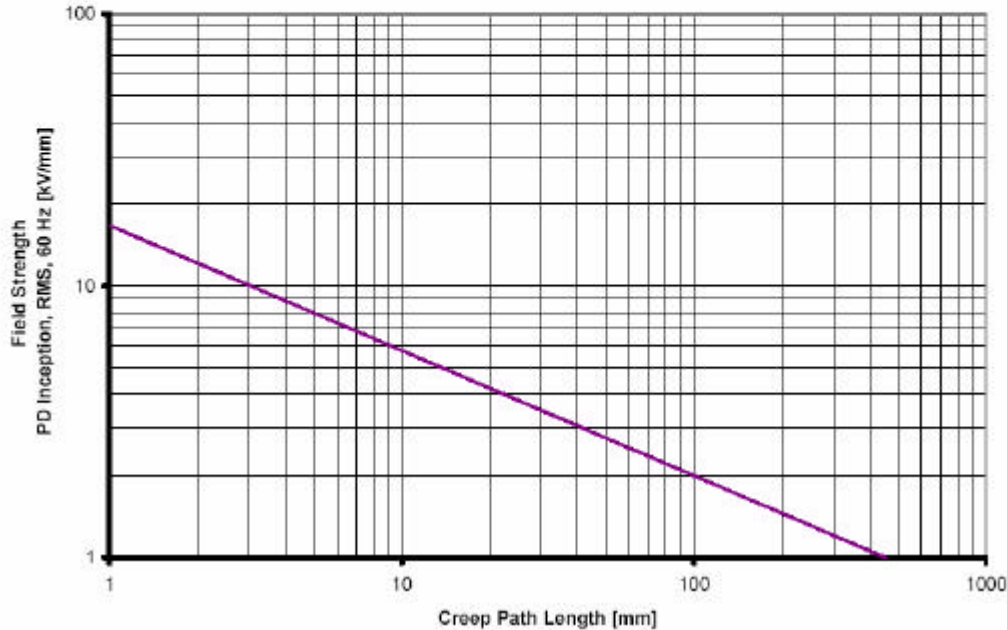
Los esfuerzos concentrados son las áreas dieléctricamente de mayor esfuerzo y se utilizan para un control adicional de las condiciones del sistema aislante.

**Chart 1. Oil Curves  
Strength of Transformer Oil**



- 1 - Degassed Oil, Insulated Electrodes
- 2 - Gas Saturated Oil, Insulated Electrodes
- 3 - Degassed Oil, Non-Insulated Electrodes
- 4 - Gas Saturated Oil, Non-Insulated Electrodes

Chart 2. Creep Curve  
Strength of Transformerboard - Oil Interface





### III. CASO PRACTICO

#### a) CARACTERISTICAS.

Transformador tipo:	Columnas.
Número de fases:	tres
Capacidad:	240/320 MVA
Frecuencia de operación:	60 Hz.
Elevación de Temperatura:	55oC
Altura de operación:	1000 m.s.n.m.
Voltaje Baja Tensión:	20 000 V. (Delta)
Voltaje Alta Tensión:	230 000 V. (Estrella)
Regulación:	+2.5%, -2.5% en A.T.
Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (BIL) B.T.:	150/150/150 Kv.
Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (BIL) A.T.:	350/1050/350 Kv

#### b) PROCEDIMIENTO.

Se ha establecido un procedimiento estándar para la optimización del sistema aislante de cualesquier transformador, incluyendo los pasos que a continuación se mencionan:

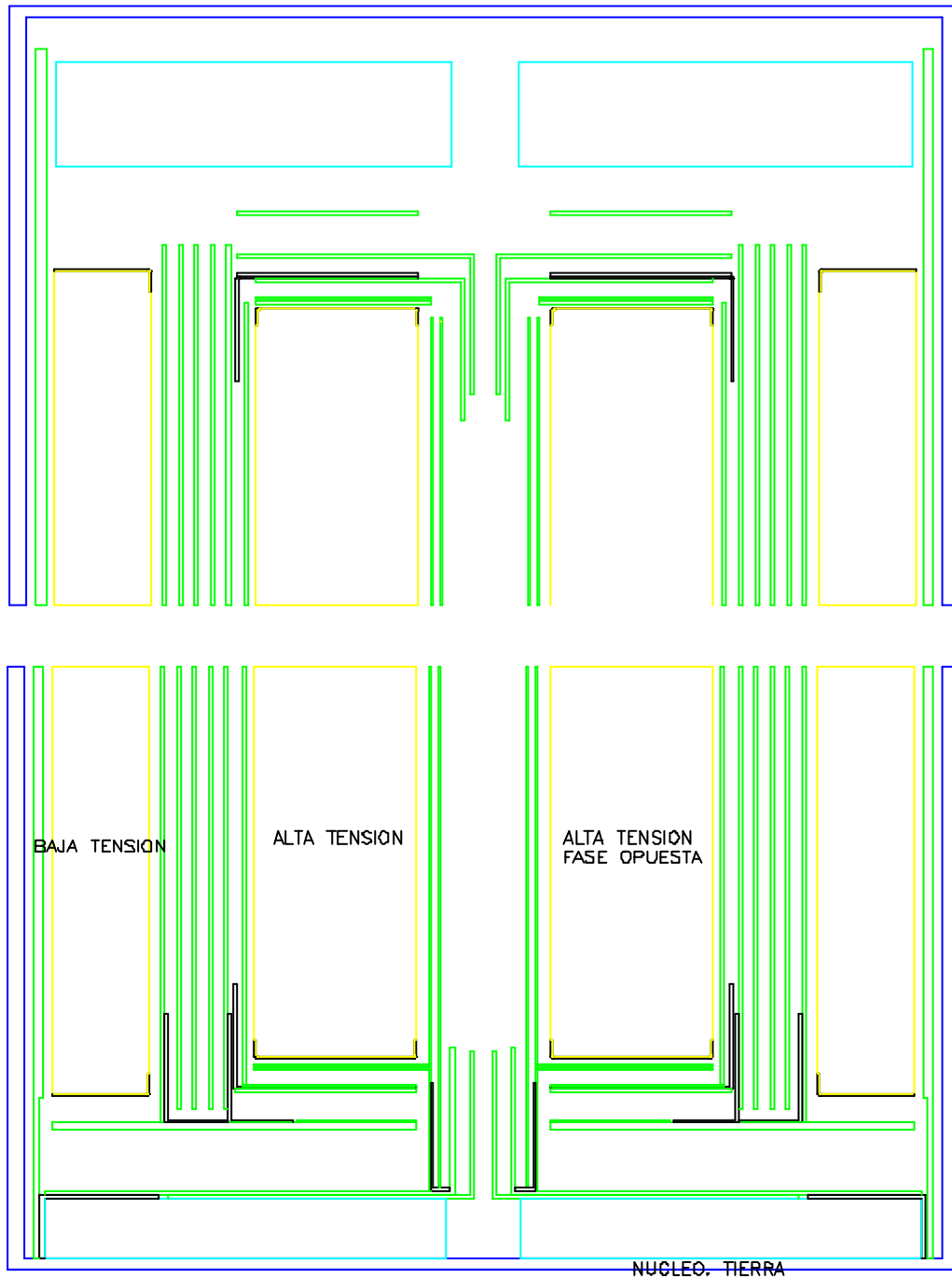
- i. Obtener el diseño original del Transformador.
- ii. Realizar el análisis por elementos finitos del diseño original.
- iii. Definir áreas de oportunidad de optimización.
- iv. Recomendaciones de rediseño.
- v. Análisis por elementos finitos del rediseño.

Es muy importante el análisis del diseño original, ya que nos dará a conocer la manera en que el fabricante del transformador está considerando los esfuerzos dieléctricos permitidos dentro de su organización. Estos esfuerzos están basados fundamentalmente en las características propias de la fábrica, es decir, la capacidad de los equipos, la habilidad del personal operario, la calidad de los procesos y en general de la limpieza y manejo del producto, entre otras cosas.

#### i. DISEÑO ORIGINAL.

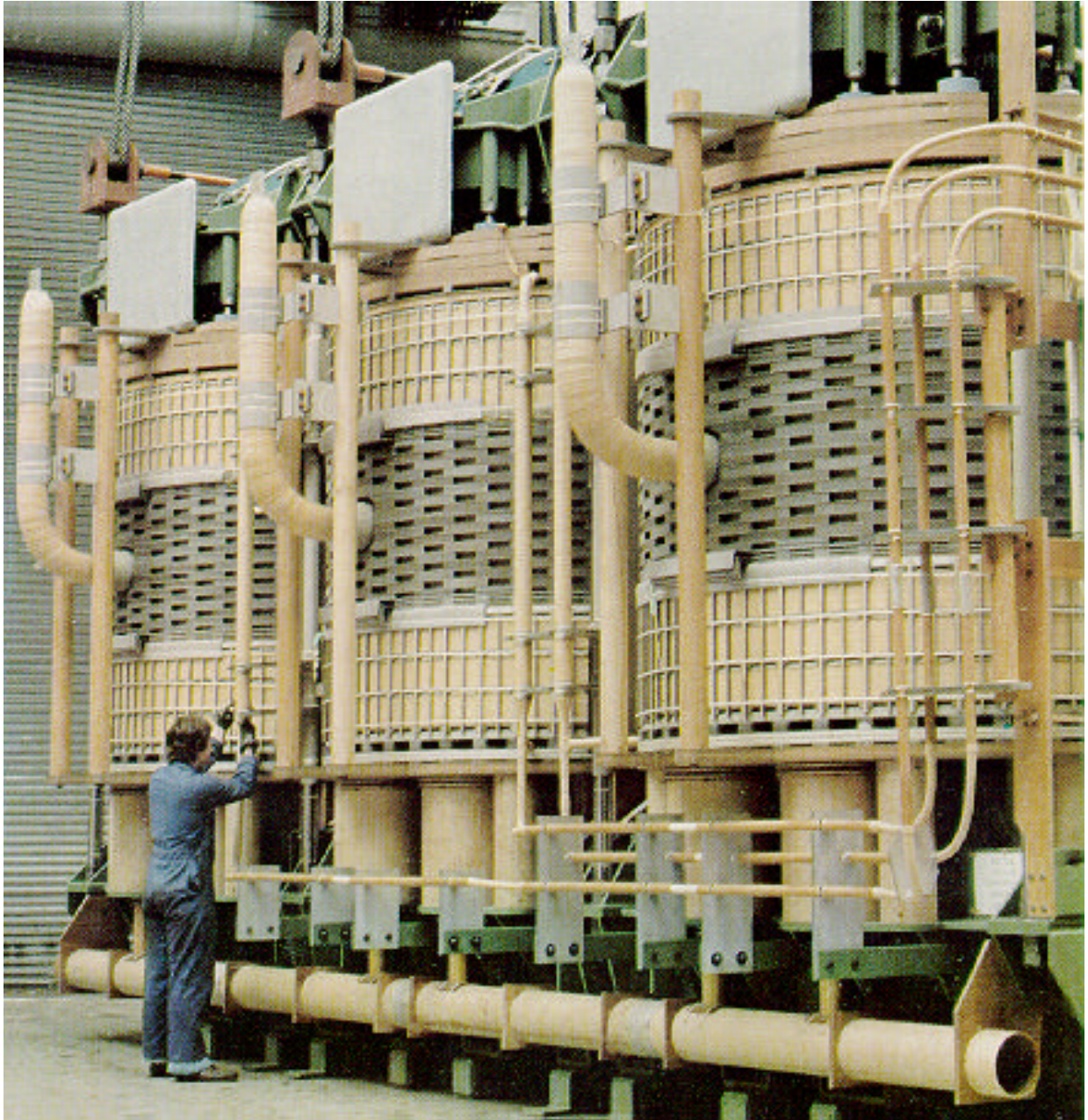
El diseño de este Transformador ha sido realizado con la guía de Alta Tensión ubicada al centro del devanado, con el claro objetivo de tener un nivel de aislamiento menor en los extremos del devanado y reducir distancias dieléctricas para lograr un ahorro considerable en dimensiones, lo cual es práctica común entre los fabricantes de transformadores.

Se procede a obtener el modelo electrónico a escala, del diseño original para su análisis.



Diseño Original

Fecha - 25 ABR 05.



## ii. ANALISIS DEL DISEÑO ORIGINAL POR ELEMENTOS FINITOS.

### DESARROLLO.

Cuando se observa el modelo del diseño original se detectan las zonas de interés, donde se considera que se tienen las áreas de mayor riesgo dieléctrico posibles, así como las zonas con oportunidad de mejora.

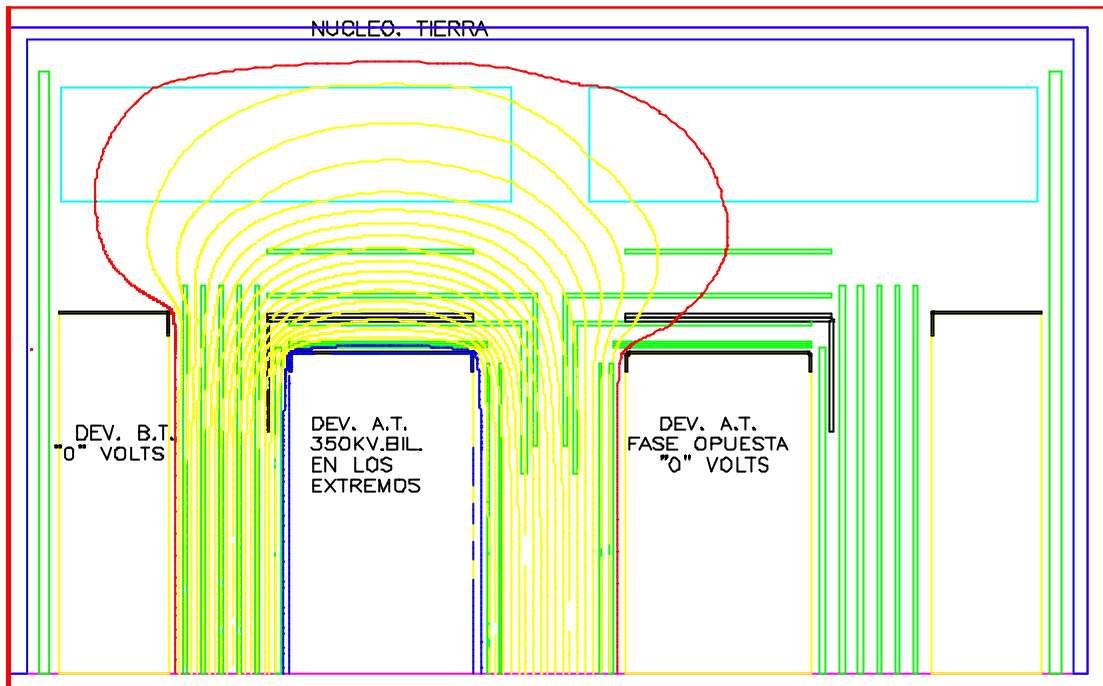
Se definen entonces los siguientes análisis:

1. Estudio y análisis del diseño original en la porción superior para el espacio Alta – Baja (Ver Fig. 1 y 1A).
2. Estudio y análisis del diseño original en la porción inferior para el espacio Alta – Baja. Similar a las figuras 1 y 1A (Ver Fig. 2 y 2A).
3. Estudio y análisis del diseño original en la porción central para verificar guía de salida al centro (Ver Fig. 3 y 3A).
4. Estudio y análisis del diseño original en la parte superior para el espacio entre fases (Ver Fig. 4).
5. Estudio y análisis del diseño original en la parte inferior para el espacio entre fases (Ver Fig. 5 y 5A).
6. Estudio y análisis del diseño original en la parte central para el espacio entre fases (Ver Fig. 6=.

1. Estudio de la Parte superior del diseño original en la zona del espacio Alta Tensión – Baja Tensión.

## AISLAMIENTO PARTE SUPERIOR:

PLOTEO PARA ESPACIO ALTA – BAJA



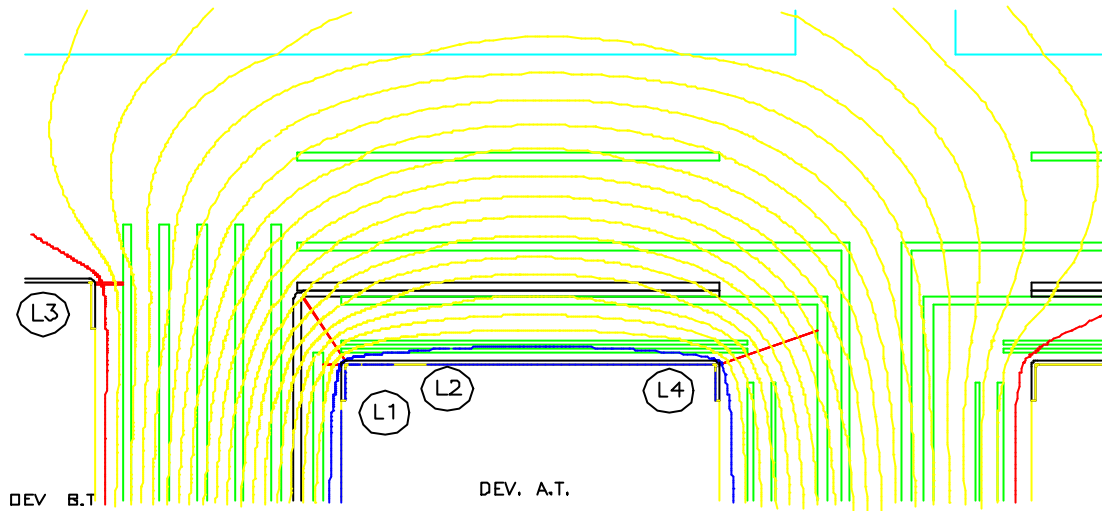
Fig#.1

FECHA – 25 ABR 05.

Análisis de la parte superior del diseño original en la zona del espacio entre Alta y Baja Tensión.

ANALISIS Fig.1

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS



MARGENES

⊙ L1	68.9%.
⊙ L2	65.3%.
⊙ L3	78.9%.
⊙ L4	64.4%.

MAX. ESFUERZOS CONCENTRADOS.

⊙ INICIO L1.	= 3.93KV/mm.
⊙ INICIO L3.	= 2.6KV/mm.
⊙ INICIO L4.	= 3.6KV/mm.

Fig#.1A

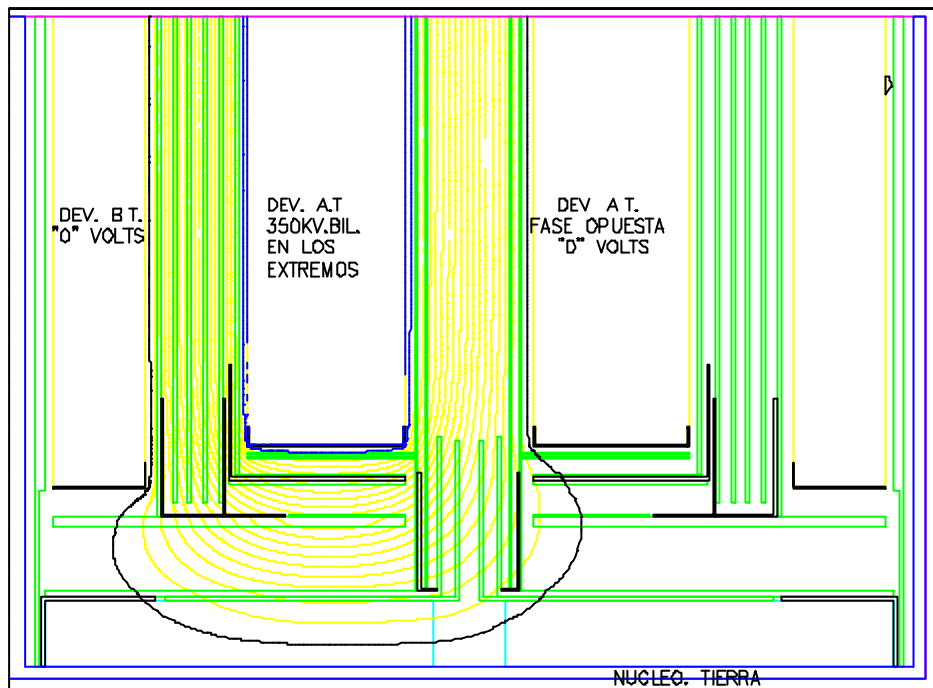
FECHA - 25 ABR 05.

Los resultados obtenidos muestran bajos niveles de esfuerzo y altos márgenes de seguridad comparados con los permitidos (12 Kv/mm y 25%), debido a la configuración utilizada de la guía de salida al centro.

2. Estudio de la Parte inferior del diseño original en la zona del espacio Alta Tensión – Baja Tensión – Similar a Fig. 1 y 1A.

### AISLAMIENTO INFERIOR.

PLÓTEO GENERAL PARA ANALISIS DEL ESPACIO ALTA – BAJA.



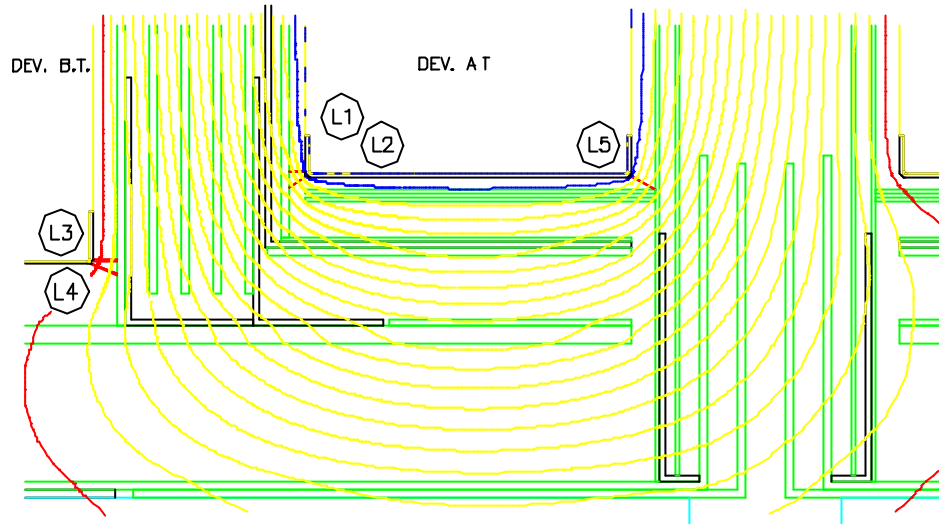
Fig#.2

FECHA 25 ABR 05.

Análisis de la parte inferior del diseño original en la zona del espacio entre Alta y Baja Tensión.

ANALISIS Fig. 2

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS



<u>MARGENES</u>		<u>MAX. ESFUERZOS CONCENTRADOS</u>
L1	66.4%	@INICIO L1. = 4.6KV/mm.
L2	64.4%	
L3	80.3%	@INICIO L3. = 2.4KV/mm.
L4	80.8%	
L5	66.3%	@INICIO L5 = 3.9KV/mm.

Fig#.2A

FECHA 26 ABR 05

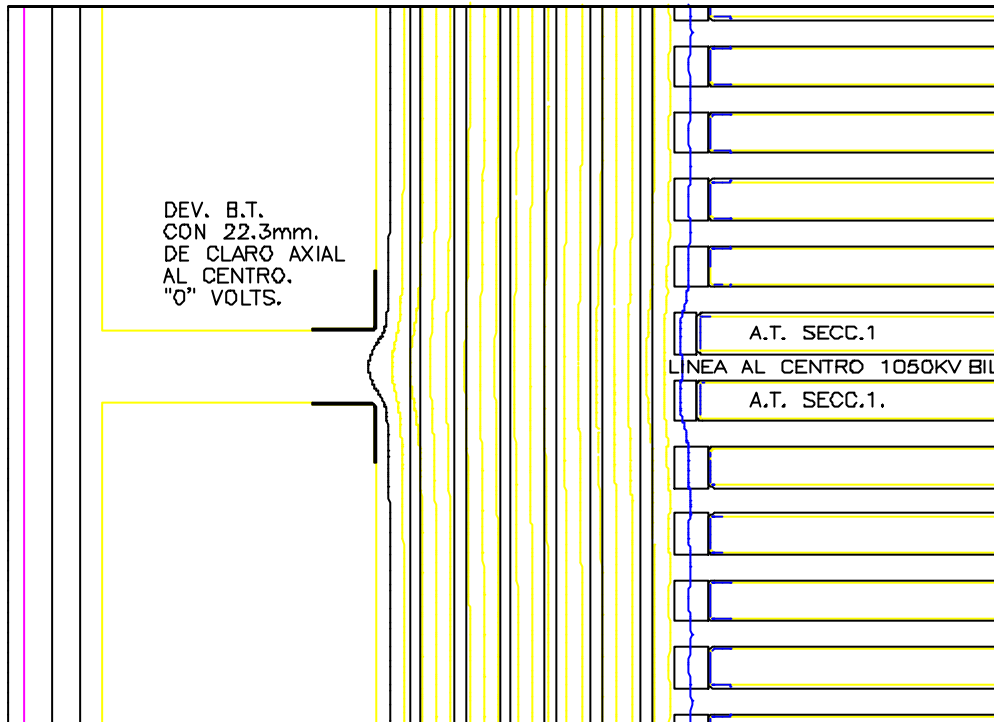
Resultados similares a los obtenidos para la figura 1, donde también se muestran bajos niveles de esfuerzo y altos márgenes de seguridad comparados con los permitidos (12 Kv/mm y 25%).



3. Estudio del diseño original en la porción central para verificar guía de salida al centro.

## AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO GENERAL PARA ANALISIS DEL ESPACIO ALTA - BAJA.



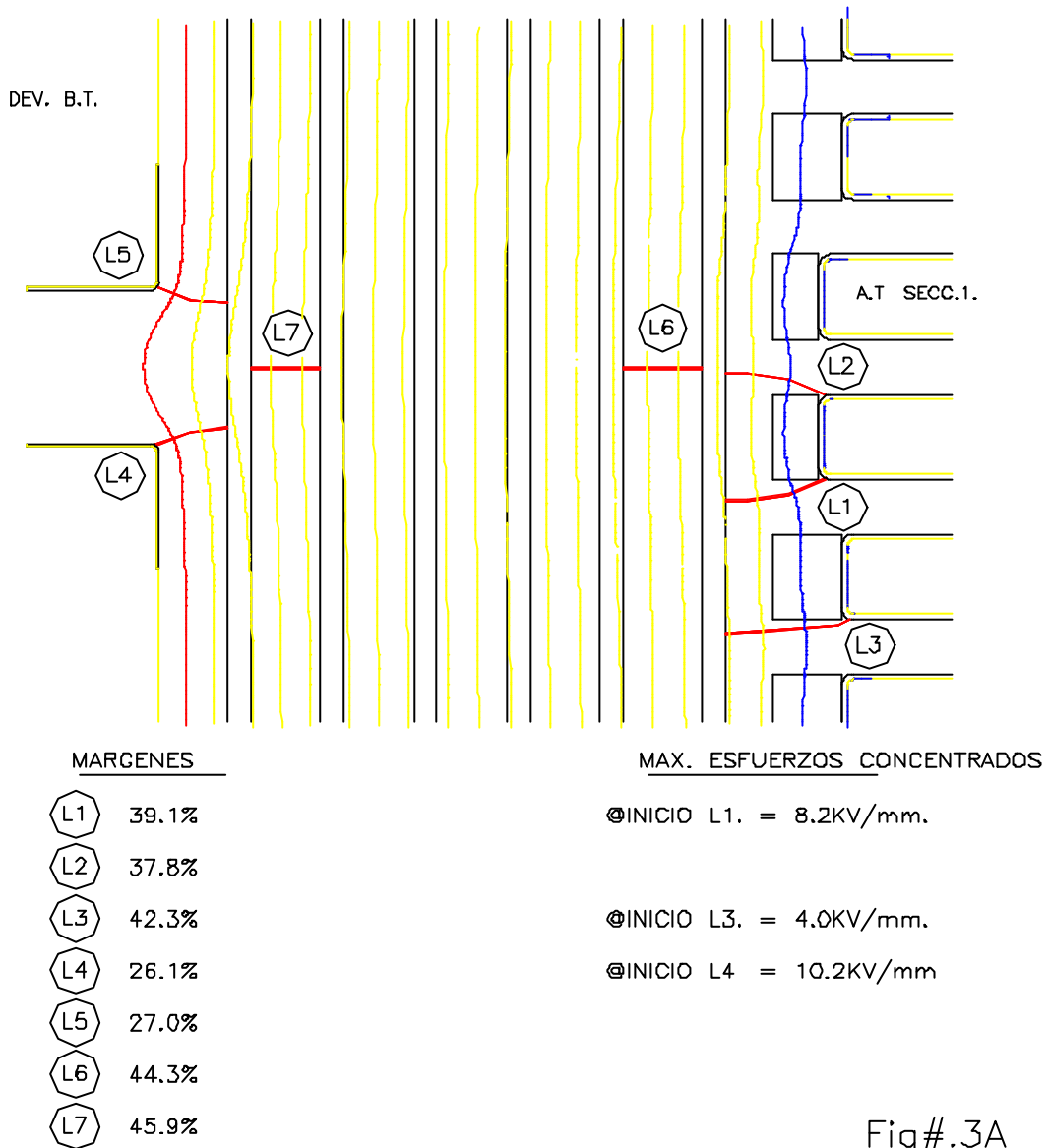
Fig#.3

FECHA 26 ABR 05.

Análisis del diseño original en la porción central para verificar guía de salida al centro.

ANALISIS Fig 3.

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS.



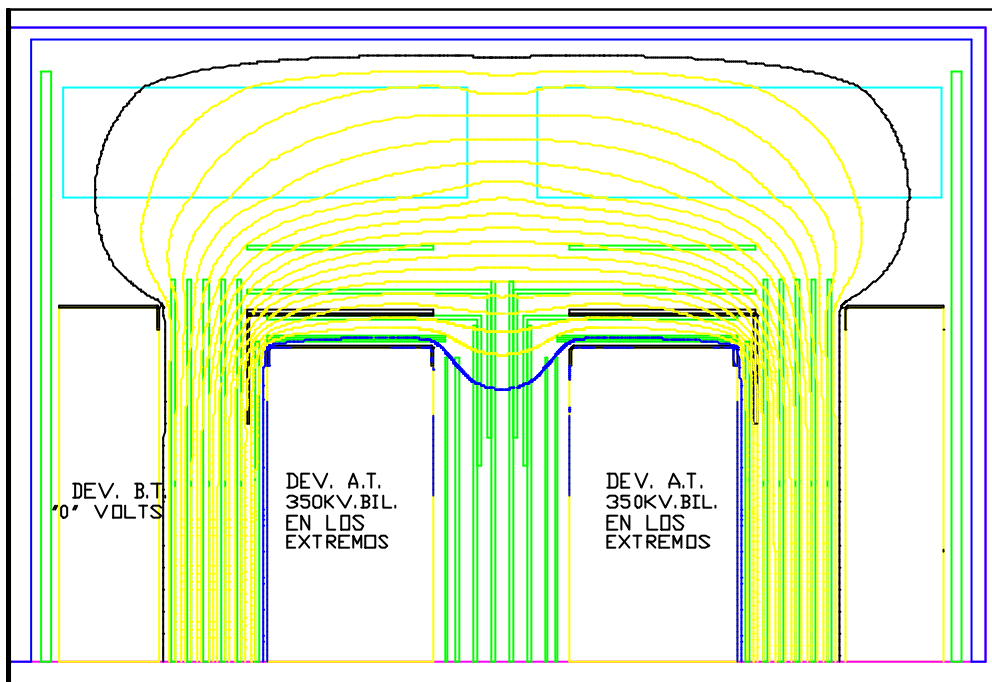
Fig#.3A

FECHA 29 ABR 05.

Debido al claro axial (22.3 mm) en el centro del devanado, los esfuerzos y los márgenes de seguridad en el lado de Baja Tensión, están muy cercanos a los máximos permisibles.

4. Estudio y análisis del diseño original en la parte superior para el espacio entre fases.

AISLAMIENTO SUPERIOR.  
PLOTED GENERAL PARA ANALISIS ENTRE FASES.



NOTA - NO SE ANALIZARON ESFUERZOS DE ARRASTRE. SE CONSIDERA LA PARTE INFERIOR COMO LA MAS CRITICA DEBIDO A LA DISTANCIA DIELECTRICA. VER. Figs. 5 & 5A.

Fig#.4.

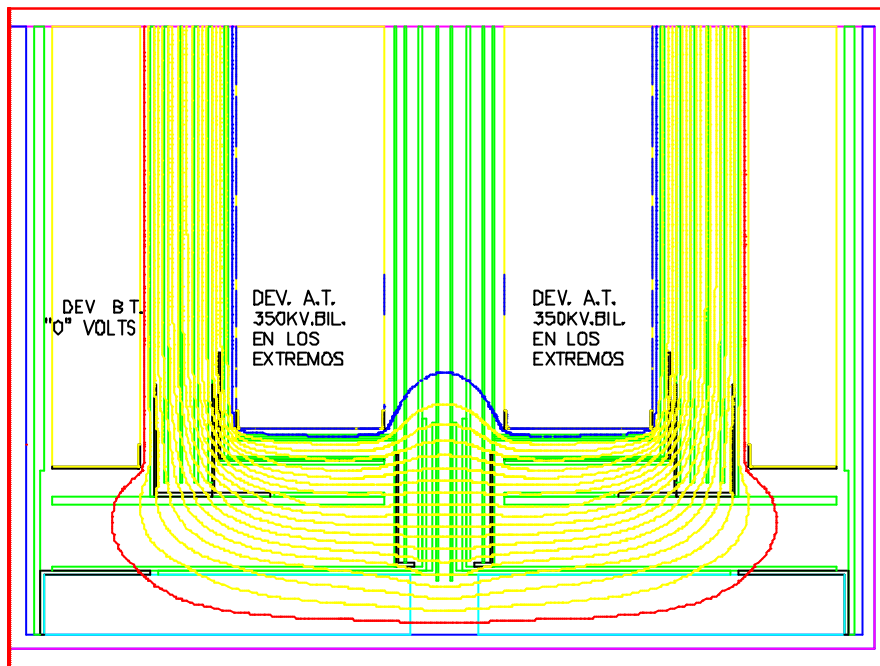
FECHA 29 ABR 05.

- Se considera que la parte inferior es mucho más crítica, por lo que no se realiza el análisis de la parte superior.

5. Estudio y análisis del diseño original en la parte inferior para el espacio entre fases.

AISLAMIENTO INFERIOR.

PLOTEO GENERAL PARA ANALISIS DEL ESFUERZO ENTRE FASES



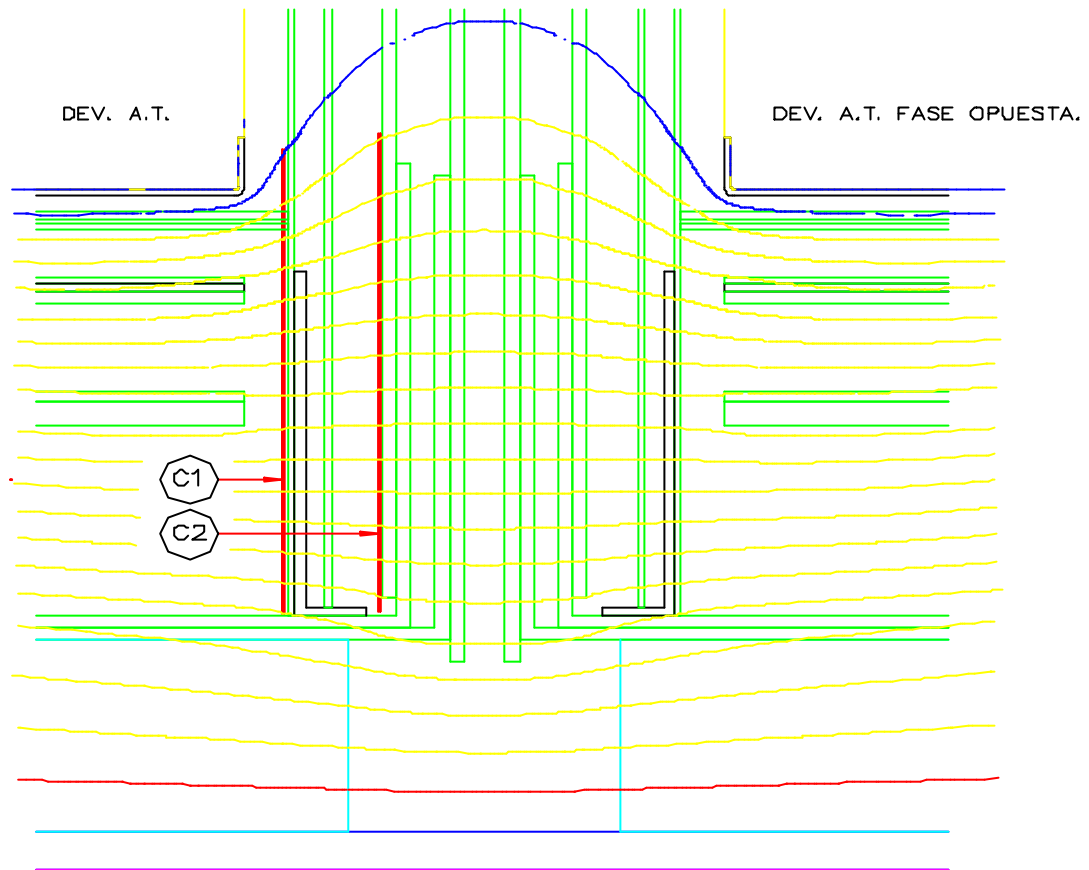
Fig#.5

FECHA 29 ABR 05.

Análisis del diseño original en la parte inferior para el espacio entre fases.

### ANALISIS Fig. 5

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS.



#### MARGENES LINEA DE ARRASTRE

- ⬡ C1 56.3% ( COMPARADO CON CURVA DE ARRASTRE)
- ⬡ C2 61.8% ( COMPARADO CON CURVA DE ARRASTRE).

Fig#.5A

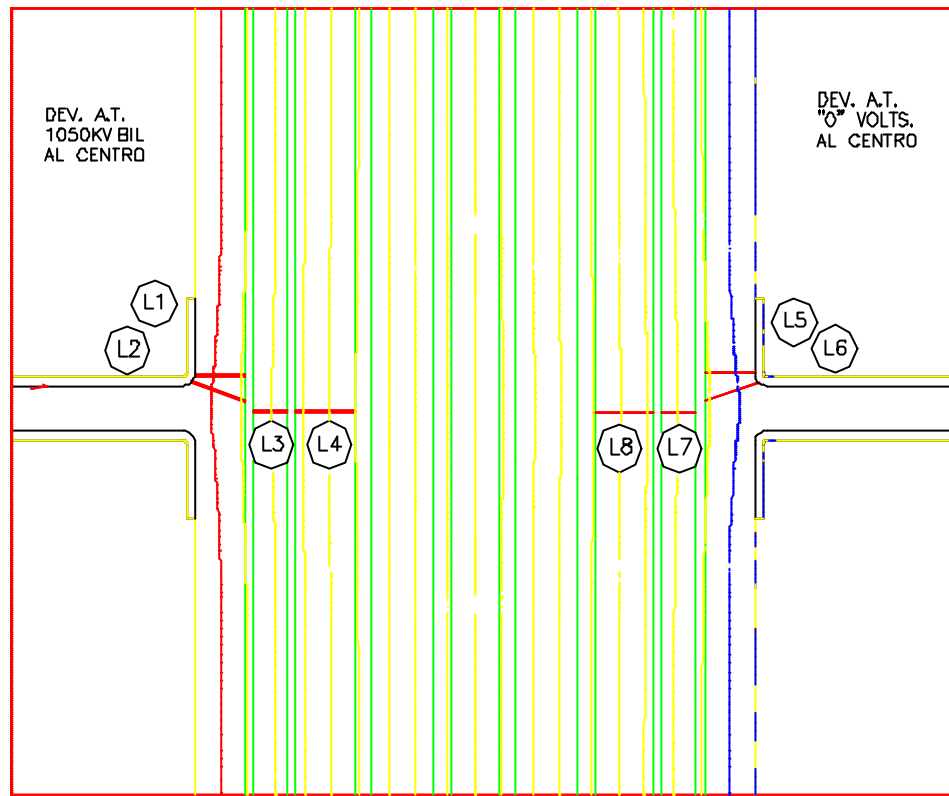
FECHA 29 ABR 05.

Análisis de la parte inferior, entre fases, del diseño original, con valores considerablemente conservadores.

6. Estudio y análisis del diseño original en la parte central para el espacio entre fases.

AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO PARA ANALIZAR ESFUERZOS EN LA LINEA CENTRAL A 1050KV.BIL. ( PRUEBA 420KV.).



MARGENES

L1	46.1%
L2	50.9%
L3	62.4%
L4	52.8%
L5	46.4%
L6	50.9%
L7	62.6%
L8	52.9%

MAX. ESFUERZOS CONCENTRADOS.

⊙ INICIO L1. = 4.9KV/mm.

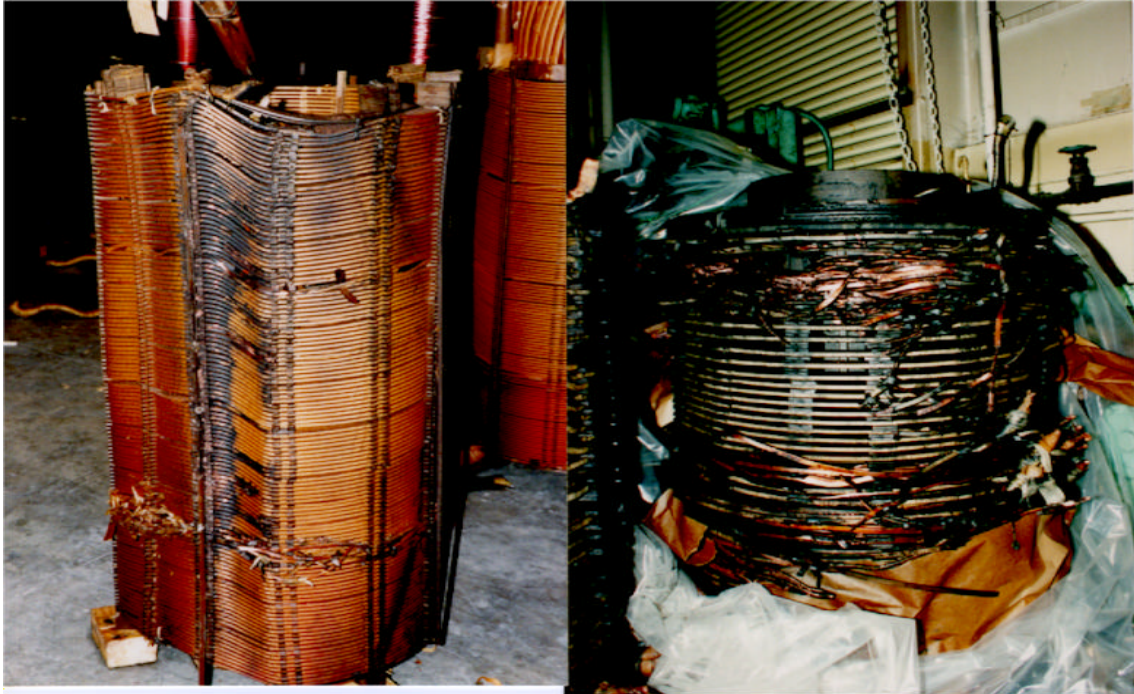
⊙ INICIO L5. = 4.85KV/mm.

Fig#.6.

FECHA 29 ABR 05.

Esfuerzos en la parte central con resultados bastante arriba de los máximos permitidos.

Ejemplo de Bobinas Falladas.

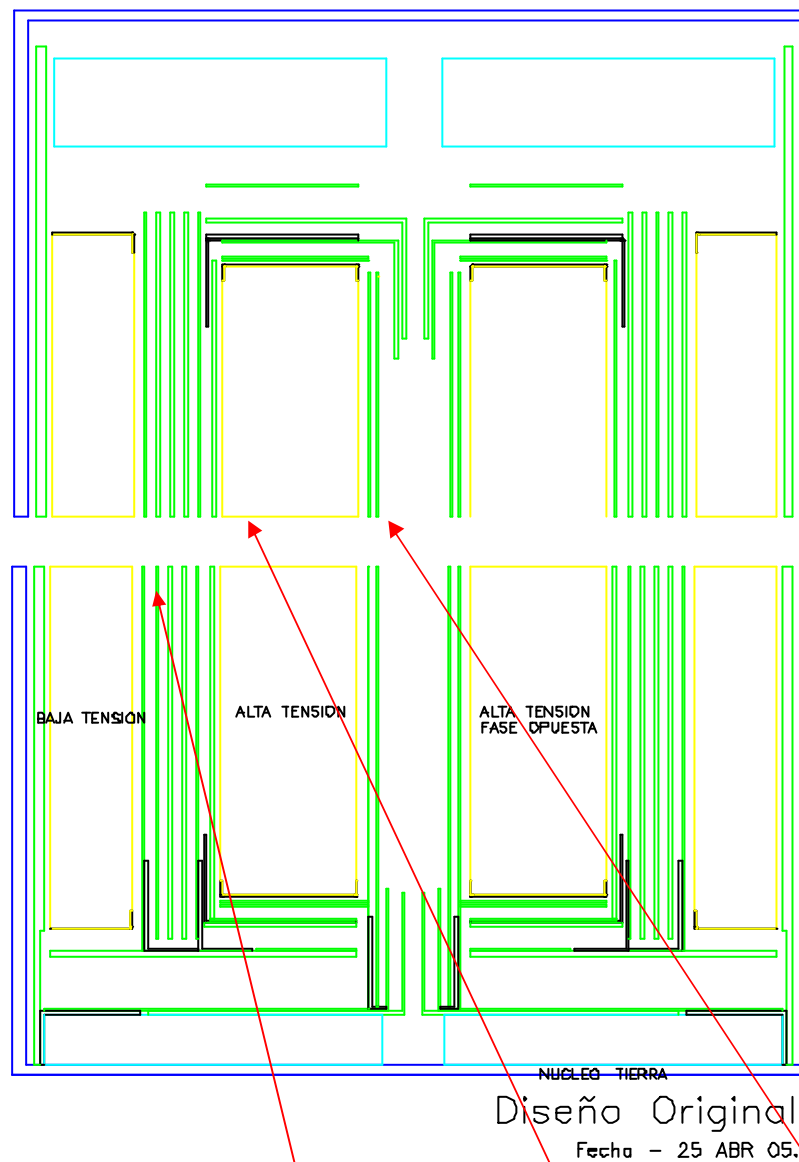


Ejemplo de Falla entre Devanados



### iii. AREAS DE OPORTUNIDAD PARA OPTIMIZACION.

Una vez realizado el análisis del diseño original, se detectan las áreas de oportunidad de reducción de distancias dieléctricas y se procede a realizar dichas reducciones en los modelos originales.



**AREAS DE OPORTUNIDAD:- ESPACIO ALTA-BAJA -- GAP CENTRAL -- ENTRE FASES - DETECTADAS**



#### iv. RECOMENDACIONES DE REDISEÑO.

Se sugiere modificar el diseño original en el gap central llevándolo de 22 mm. a 8 mm., además, modificar el espacio Alta-Baja y entre fases reduciéndolos en 20 mm. También se sugiere eliminar una pieza aislante del espacio entre fases.

Todas estas sugerencias están basadas en experiencia previa donde se ha determinado que el subdividir el espacio total disponible utilizando barreras delgadas de material aislante y pequeños ductos de aceite funciona de mejor manera que conservar amplios ductos y barreras de mayor espesor.

## v. ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL REDISEÑO. DESARROLLO.

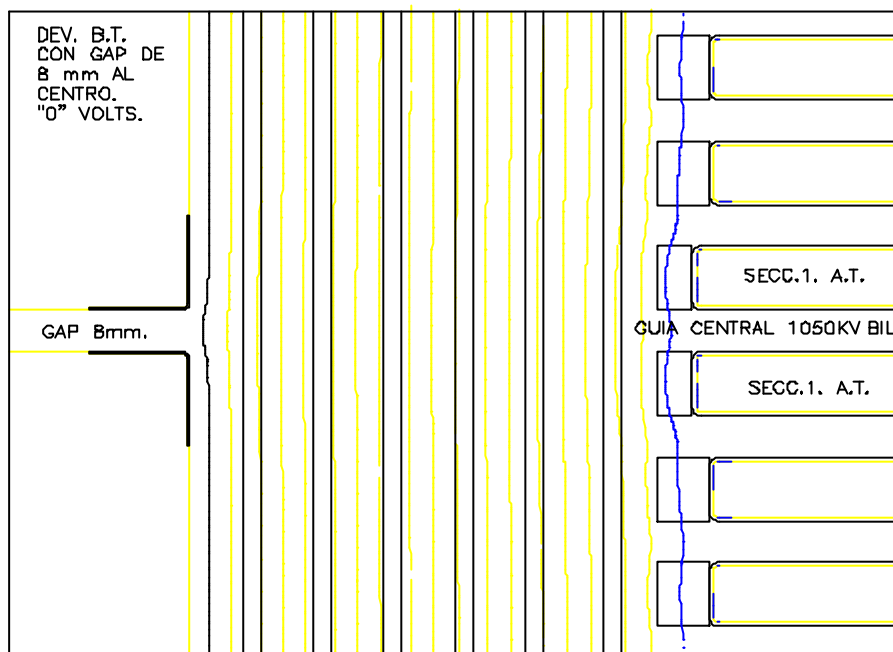
El siguiente paso es el análisis de los modelos modificados siguiendo los mismos criterios aplicados al modelo original y entonces realizar las comparaciones necesarias para verificar que el nuevo sistema cumpla satisfactoriamente con esos criterios. Por otro lado, es necesario verificar que el diseño modificado cumpla con todos los requerimientos normativos, para lo cual será necesaria la realización de análisis adicionales, de aquí se determinan los siguientes ocho puntos:

1. Estudio y análisis del gap central del devanado de Baja Tensión reducido de 22 mm a 8 mm y su comparación con los valores obtenidos en las fig. 3 y 3A (Ver Fig. 7 y 7A).
2. Estudio y análisis del diseño modificado en la fig. 7 y el espacio Alta – Baja reducido en 13 mm, además, se elimina una barrera del diseño original (Ver Fig. 8 y 8A).
3. Estudio y análisis del diseño modificado para el espacio entre fases con una reducción de 20 mm y eliminando una barrera (Ver Fig. 9).
4. Estudio y análisis del diseño original para el espacio entre fases y prueba de Impulso por Switcheo (Ver Fig. 10).
5. Estudio y análisis del diseño modificado para el espacio entre fases y prueba de Impulso por Switcheo (Ver Fig. 11).
6. Estudio y análisis del diseño modificado con el espacio Alta – Baja de 71 mm y el gap central de Baja Tensión en 22 mm. (Ver Fig. 12 y 12A).
7. Estudio y análisis del diseño modificado similar a la fig.12 pero con el gap central de Baja Tensión modificado a 8 mm. (Ver Fig. 13 y 13A).
8. Estudio y análisis del diseño modificado para verificar los esfuerzos existentes entre las puntas de Baja Tensión y el devanado de Alta Tensión (Ver Fig. 14 y 14A).

1. Estudio del gap central del devanado de Baja Tensión reducido de 22 mm a 8 mm y su comparación con los valores obtenidos en las fig. 3 y 3A.

## AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO GENERAL PARA ANALISIS DEL ESPACIO ALTA - BAJA  
GAP CENTRAL DE BAJA TENSION REDUCIDO A B mm

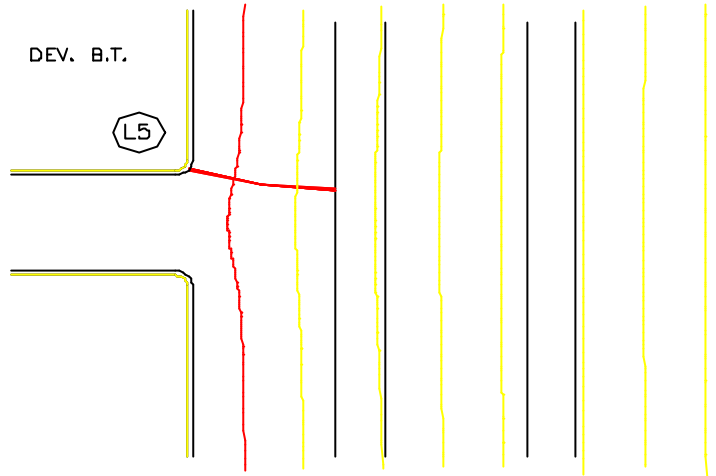


Fig#.7

FECHA - 30 ABR 05

Análisis del gap central del devanado de Baja Tensión reducido de 22 mm a 8 mm y su comparación con los valores obtenidos en las fig. 3 y 3A.

ANALISIS DE Fig. 7  
PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS



MARGENES.

Ⓛ5 34.1%

MAX. ESFUERZOS CONCENTRADOS

Ⓛ INICIO L5. = 7.9 KV/mm.

Fig#.7A

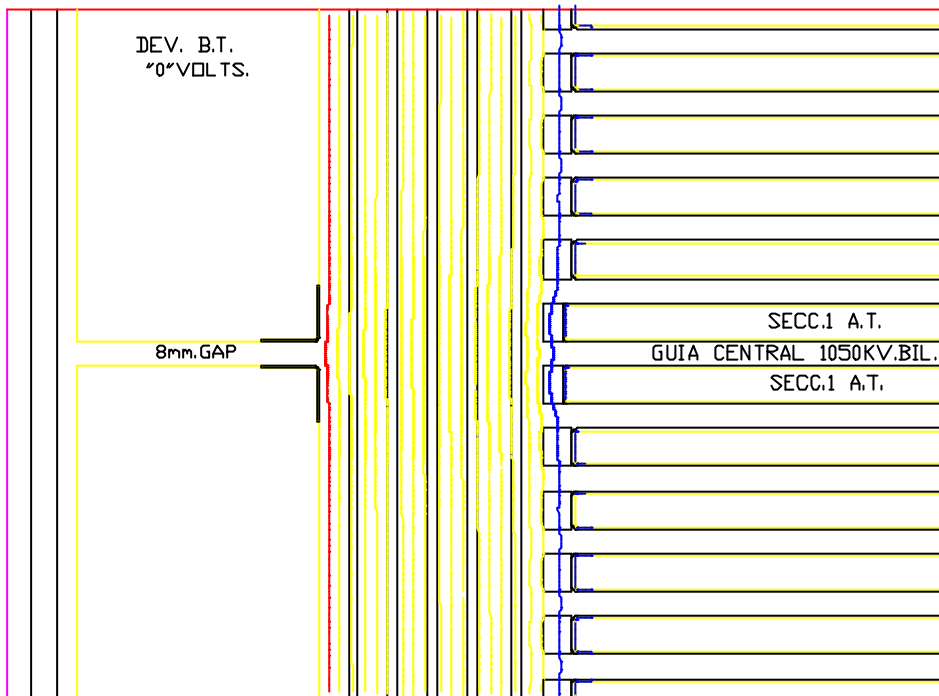
FECHA - 30 ABR 05.

Al reducir el gap central, los niveles de esfuerzo se mejoran sustancialmente; aún cuando no se reduzca el costo del transformador, se incrementa su nivel de confiabilidad, esto en sí es una forma de optimización.

2. Estudio del diseño modificado en la fig. 7 y el espacio Alta – Baja reducido en 13 mm, además, se elimina una barrera del diseño original

## AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO GENERAL PARA ESFUERZOS ALTA - BAJA  
GAP CENTRAL DE B.T. REDUCIDO DE 22mm A 8mm  
ESPACIO ALTA BAJA REDUCIDO EN 12.7mm. SE ELIMINA UNA BARRERA.



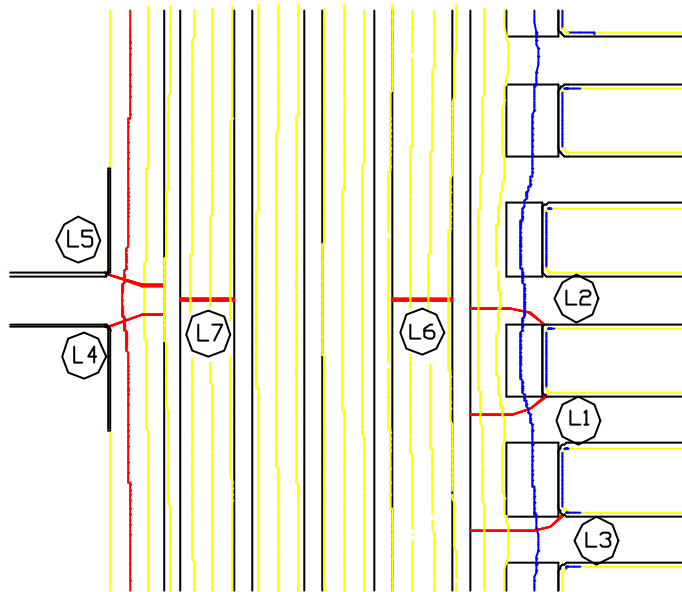
Fig# 8

FECHA - 30 ABR 05.

Análisis del diseño modificado en la fig. 7 y el espacio Alta – Baja reducido en 13 mm, además, se elimina una barrera del diseño original

### ANALISIS Fig. 8

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS.



#### MARGENES.

(L1)	27.9%
(L2)	26.9%
(L3)	31.0%
(L4)	22.3%
(L5)	23.1%
(L6)	34.2%
(L7)	36.5%

#### ESFUERZOS CONCENTRADOS

eINICIO L1 = 10.1 KV/mm.

eINICIO L4 = 9.1 KV/mm.

Fig#.8A

FECHA - 30 ABR 05.

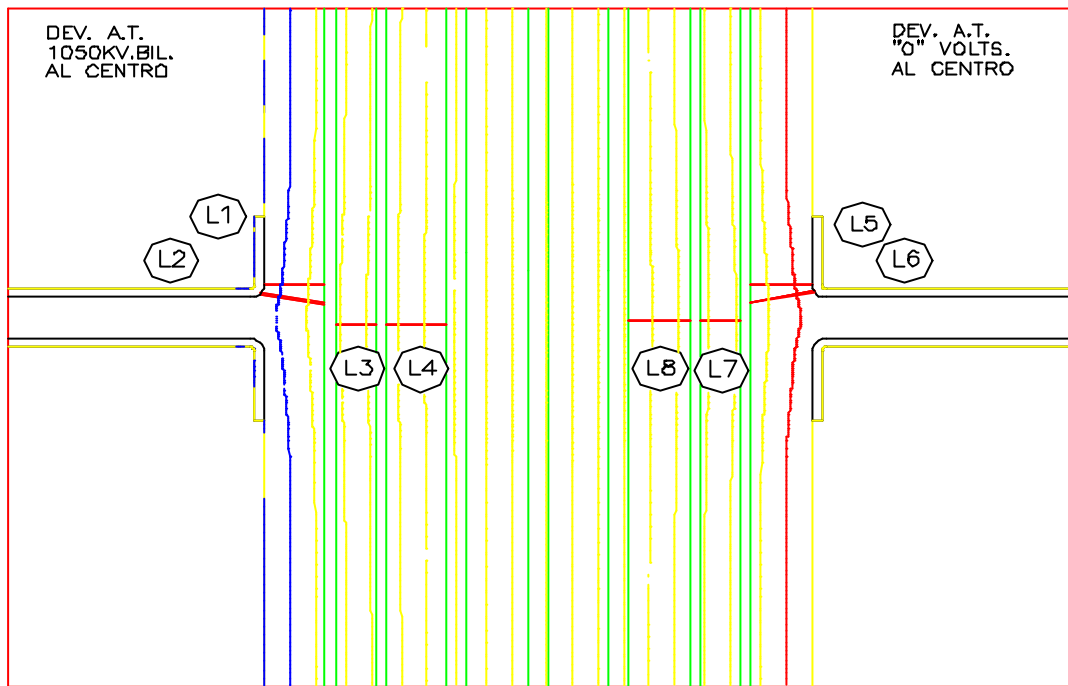
El análisis del diseño modificado según la Fig. 7, con el gap reducido a 13 mm. Y eliminando una barrera muestra que, según los resultados obtenidos esta

sugerencia es adecuada, ya que los valores se encuentran dentro de los niveles permitidos.

3. Estudio y análisis del diseño modificado para el espacio entre fases con una reducción de 20 mm y eliminando una barrera.

### PLOTEO DEL AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO PARA EL ANALISIS DEL ESFUERZO ENTRE FASES A 1050 KV,BIL  
DISTANCIA ENTRE FASES REDUCIDA EN 20mm. UNA BARRERA ELIMINADA.



#### MARGENES

L1	34.6%
L2	37.3%
L3	54.7%
L4	46.2%
L5	36.2%
L6	40.3%
L7	54.9%
L8	46.3%

#### ESFUERZOS CONCENTRADOS

@ INICIO L1. = 6 0KV/mm.

@ INICIO L5. = 5 7KV/mm.

Fig#9.

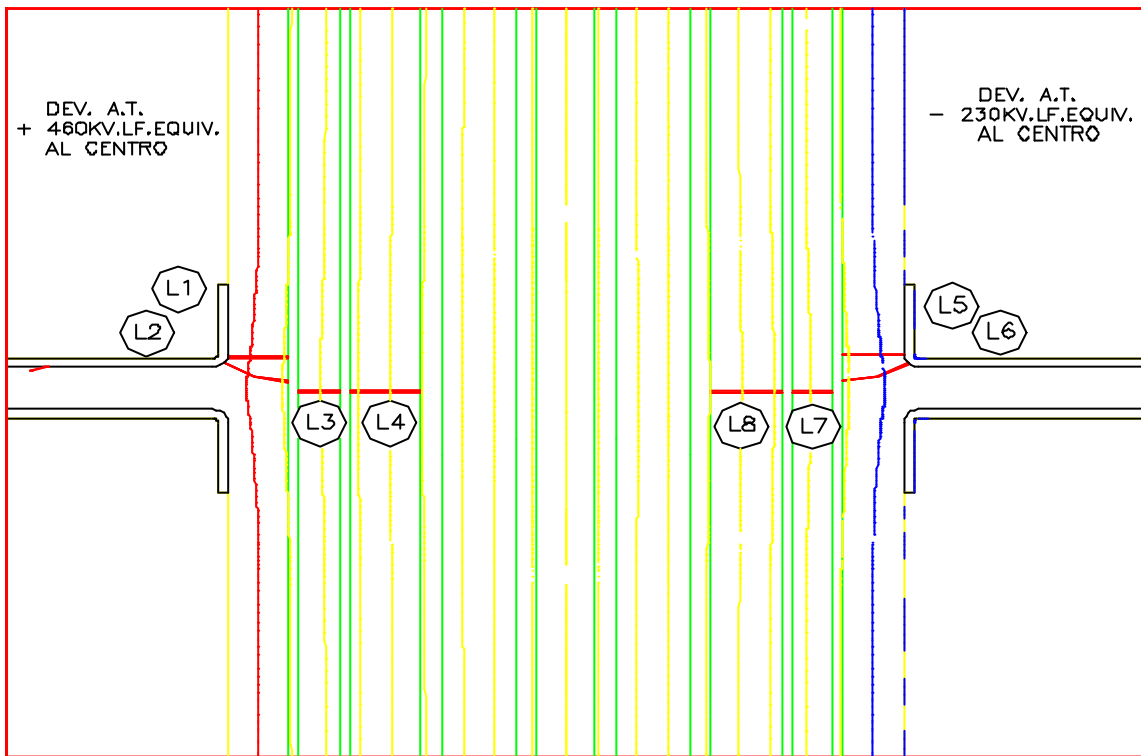
FECHA - 30 ABR 05.

Análisis del diseño modificado, se reduce en 20 mm. el espacio Alta – Baja, se elimina una barrera. Todos los esfuerzos están dentro de los niveles permitidos.

4. Estudio y análisis del diseño original para el espacio entre fases y prueba de Impulso por Switcheo.

PLOTEO AISLAMIENTO CENTRAL. DISEÑO ORIGINAL

PLOTEO PARA ANALISIS FASE A FASE EN LA GUIA CENTRAL A 870 KV POR SWITCHEO.



MARGENES

L1	11.4%
L2	16.3%
L3	38.7%
L4	22.7%
L5	11.9%
L6	16.5%
L7	38.9%
L8	22.8%

ESFUERZOS CONCENTRADOS.

⊗ INICIO L1. = 8.0KV/mm.

⊗ INICIO L5. = 5.2KV/mm.

Fig#.10.

FECHA - 30 ABR 05.

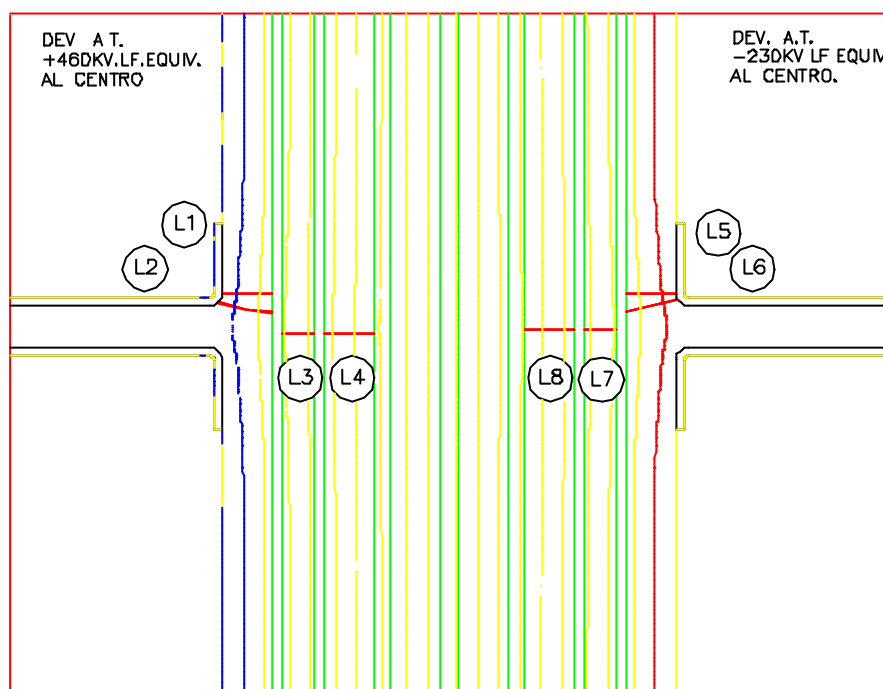


El análisis del diseño original para prueba de switching muestra que los niveles encontrados están por debajo de los límites permitidos.

5. Estudio y análisis del diseño modificado para el espacio entre fases y prueba de Impulso por Switcheo.

PLOTEO AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO PARA ANALISIS FASE A FASE EN LA GUIA CENTRAL A 870 KV POR SWITCHEO.  
 ESPACIO ALTA - BAJA REDUCIDO EN 20 mm., UNA BARRERA ELIMINADA.



MARGENES.

⊙ L1	-6.7%.
⊙ L2	-2.2%.
⊙ L3	25,6%.
⊙ L4	11.5%.
⊙ L5	-6.5%.
⊙ L6	-1.3%.
⊙ L7	25.9%.
⊙ L8	11.8%.

POINT STRESSES.

⊙ INICIO L1. = 9.7KV/mm.

⊙ INICIO L5. = 6.7KV/mm

Fig#.11.

FECHA - 30 ABR 05.

Los resultados obtenidos muestran niveles de esfuerzo más altos de los permitidos.

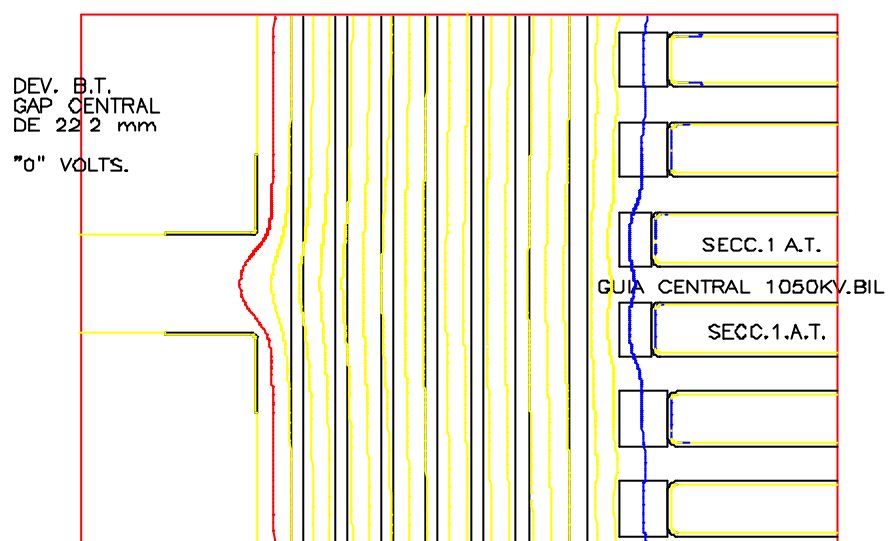
6. Estudio del diseño modificado con el espacio Alta – Baja de 71 mm y el gap central de Baja Tensión en 22 mm.

## PLOTEO AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO PARA ANALISIS ESPACIO ALTA – BAJA

GAP CENTRAL DISEÑO ORIGINAL DE 22.2mm

ESPACIO ALTA – BAJA REDUCIDO A 71 mm. CON SEIS BARRERAS



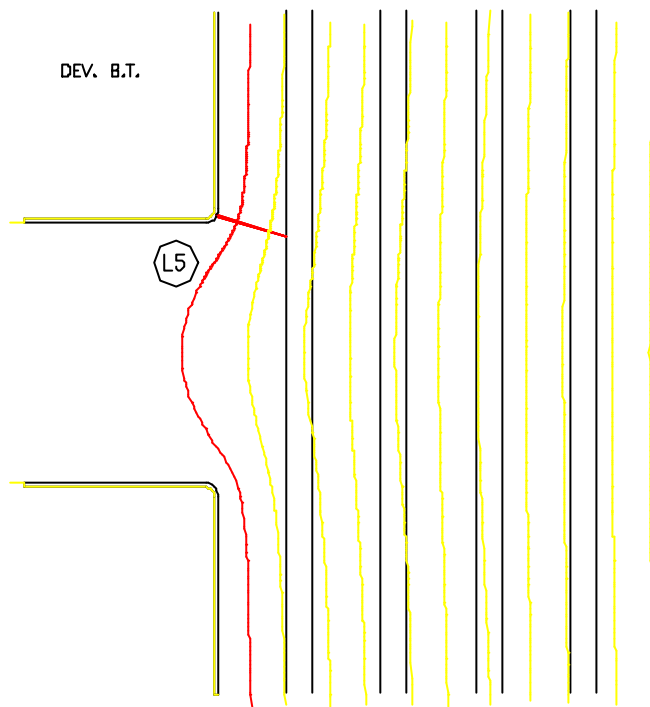
Fig#.12

FECHA – 30 ABR 05.

Análisis del diseño modificado con el espacio Alta – Baja de 71 mm y el gap central de Baja Tensión en 22 mm.

PLOTEO Fig. 12.

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS.



MARGENES.

Ⓛ5 17.5%.

ESFUERZOS CONCENTRADOS.

Ⓛ INICIO L5. = 12.2KV/mm.

Fig#.12A.

FECHA – 30 ABR 05

Los resultados mostrados están por debajo de los niveles permitidos.

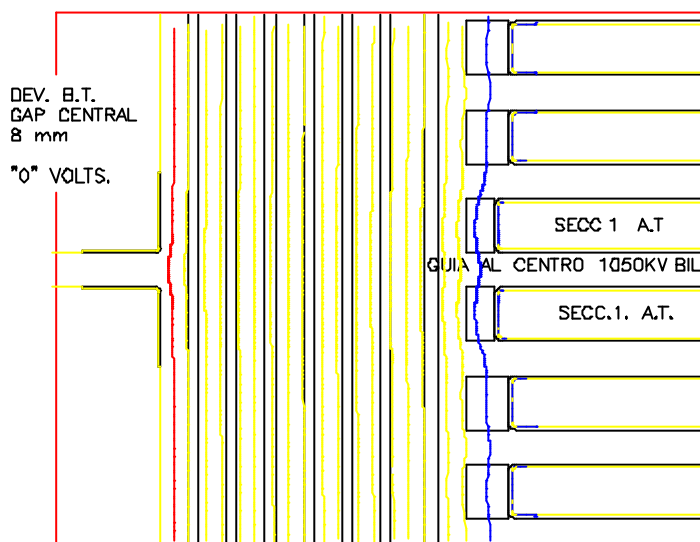
7. Estudio del diseño modificado similar a la fig.12 pero con el gap central de Baja Tensión modificado a 8 mm.

### PLOTEO AISLAMIENTO CENTRAL.

PLOTEO PARA ANALISIS ALTA - BAJA.

GAP CENTRAL REDUCIDO A 8 mm.

ESPACIO ALTA - BAJA REDUCIDO A 71mm. CON SEIS BARRERAS.



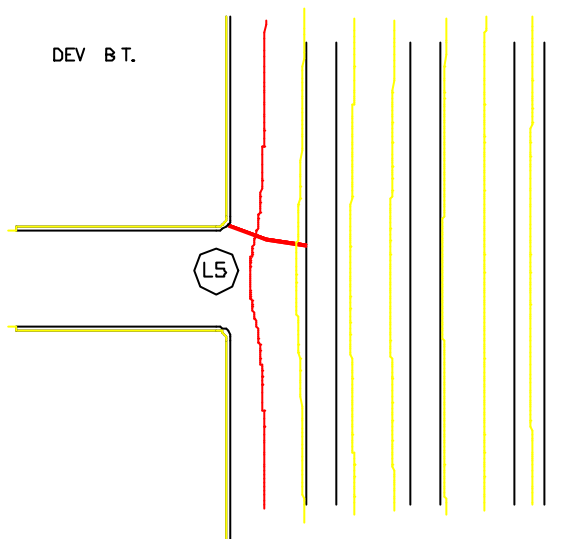
Fig#.13

FECHA - 30 ABR 05.

Análisis del diseño modificado similar a la fig.12 pero con el gap central de Baja Tensión modificado a 8 mm.

PLOTEO Fig13.

PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS.& STRESS LINES ANALYSED



MARGENES.

⊕ L5 26.9%.

ESFUERZOS CONCENTRADOS.

⊕ INICIO L5. = 9.3KV/mm.

Fig#.13A

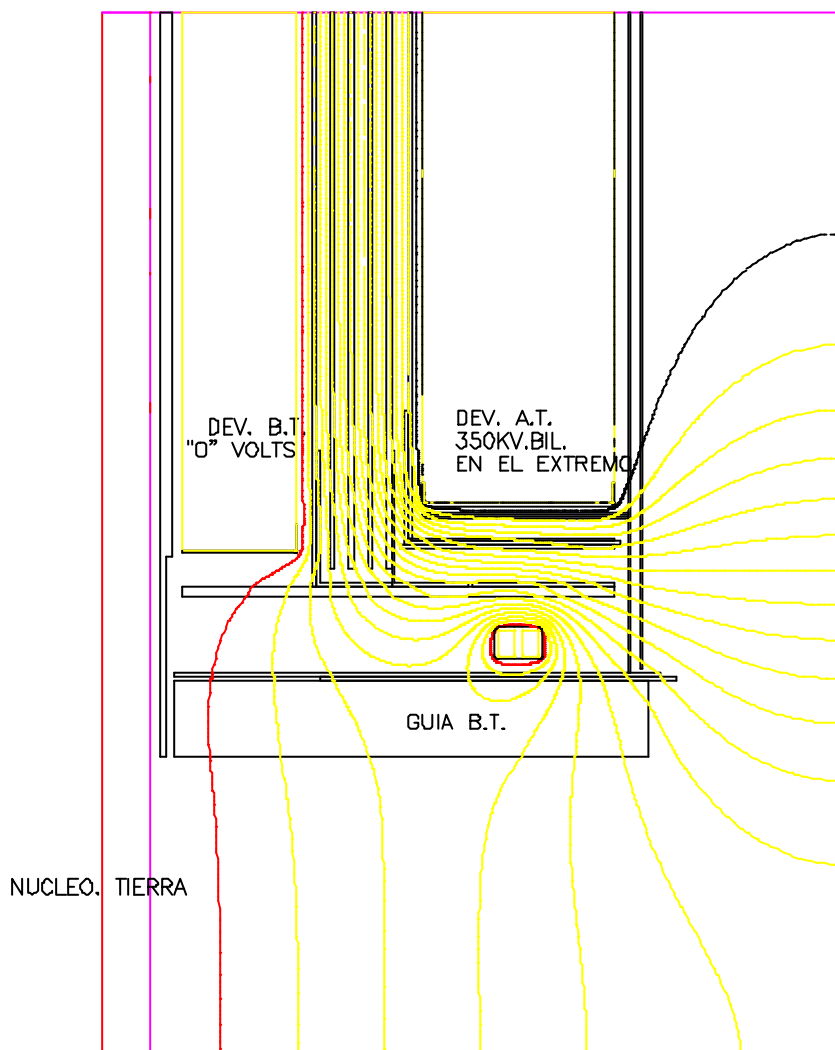
FECHA - 30 ABR 05.

Análisis del diseño optimizado, valores dentro de niveles permitidos.

8. Estudio del diseño modificado para verificar los esfuerzos existentes entre las puntas de Baja Tensión y el devanado de Alta Tensión.

### PLOTEO DEL AISLAMIENTO INFERIOR.

PLOTEO PARA ANALISIS DEL ESFUERZO EN LA GUIA EN EL ESPACIO ALTA - BAJA

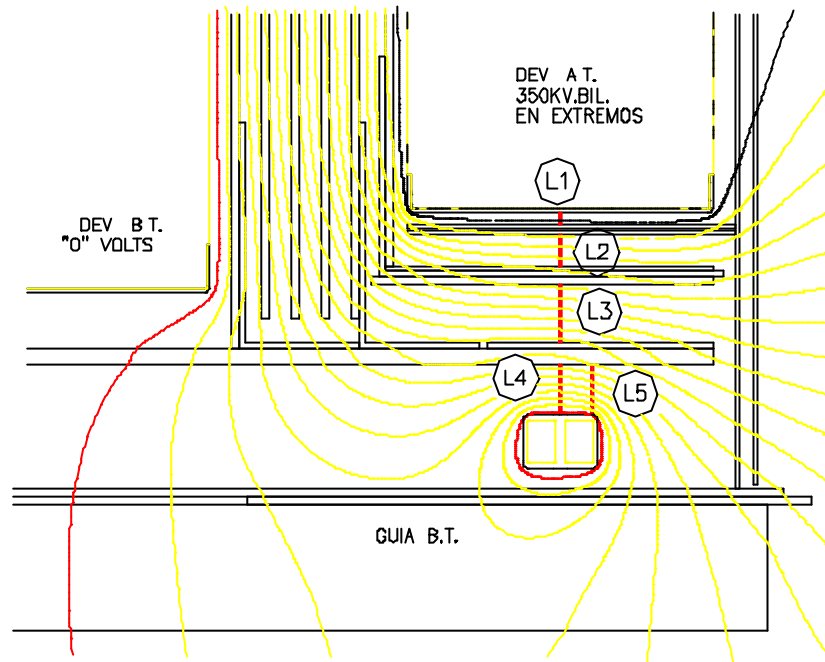


Fig#.14

FECHA - 30 ABR 05.

Análisis del diseño modificado para verificar los esfuerzos existentes entre las puntas de Baja Tensión y el devanado de Alta Tensión.

PLOTEO FIG. 14.  
PUNTOS Y LINEAS DE ESFUERZO ANALIZADAS.



MARGENES

⊗ L1	84.0%.
⊗ L2	80.8%.
⊗ L3	75.0%.
⊗ L4	87.0%.
⊗ L5	66.5%.

ESFUERZOS CONCENTRADOS.

⊗ INICIO L5. = 4.3KV/mm.

Fig#.14A

FECHA - 30 ABR 05.

Los resultados obtenidos muestran niveles de esfuerzo aceptables.

## IV. ANALISIS Y DISCUSION

- Para propósitos de optimización, se deduce que solamente se puede reducir el espacio Alta – Baja, la reducción posible es de 26 mm. en cada ventana del núcleo; para lograr esto, es necesario reducir el gap central del devanado de Baja Tensión de 22.2 mm. a 8 mm. y adicionar un aislamiento en las esquinas de los devanados.
- Para el caso del espacio entre fases, podría reducirse solamente si no fuese requerida la prueba por switcheo (Prueba definida como especial) y en el caso estudiado no hay posibilidades de reducción.
- En los extremos de los devanados, existe la posibilidad de reducciones, ya que los niveles de esfuerzo encontrados están por debajo de los permitidos, sin embargo, las dimensiones de las guías de Baja Tensión serán las que determinen el espacio físico necesario para llevarlas hacia afuera, por lo que cualquier optimización en esta área, será determinada no por los aspectos dieléctricos, sino mecánicos de las guías de Baja Tensión.
- El ahorro total calculado para esta unidad se localiza en el orden de los 3000 USD.



## V. CONCLUSIONES.

Se ha demostrado que la aplicación de la metodología de Análisis por Elementos Finitos en el proceso de optimización del sistema aislante de los transformadores de potencia es posible, convirtiéndose en una herramienta de gran importancia y lográndose los objetivos de mejora tanto en costos como en incrementos de niveles de seguridad.

Una de las ventajas más interesantes es el hecho de poder verificar los diseños en las computadoras sin enfrentar el costo de producir modelos físicos o el riesgo de aplicar ideas de mejora sin verificar en las unidades a manufacturarse.

La metodología también es aplicable al análisis de áreas de interés dentro del transformador tales como guías de salida de las bobinas, conexiones de guías con boquillas de salida (Bushings), e incluso esfuerzos dieléctricos en los núcleos, además, no está limitada al tamaño de los transformadores, habiéndose verificado su funcionalidad en aparatos de distribución.

## VI. BIBLIOGRAFIA.

- ANSOFT, 1994, Maxwell 2D Field Simulator, Estados Unidos.
- Richard L. Bean, Nicholas Chackan, Jr, Harold R. Moore, Edward C. Wentz, 1959, Transformers for the Electric Power Industry, Westinhouse Electric Corporation, Estados Unidos, 409 pags.
- H.P. Moser, 1979, Transformerboard, Scientia Electrica, Suiza/Estados Unidos, 120 pags.
- H.P. Moser, V. Dahinden, 1987, Transformerboard II, H. Weidmann AG, Suiza, 222 pags.
- ANSI standards.
- EHV-Weidmann. Field Plot analysis methodology.
- Department of Electrical Engineering, 1943/1962, Magnetic Circuits and Transformers Technology Press Massachussetts Institute of Technology, Estados Unidos, 718 pags.
- Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, 1964, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse Electric Corporation, Estados Unidos, 824 pags.
- Electric Utility Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, 1965, Distribution Systems, Westinghouse Electric Corporation, Estados Unidos, 567 pags.
- Design Manual. Westinghouse Electric Corporation.