

---

**ÍNDICE**

<b>CAPÍTULO</b>	1.0 INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO</b>	2.0 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
<b>CAPÍTULO</b>	3.0 MARCO TEÓRICO	4
	3.1 Descripción del flujo de dispersión	6
	3.2 Fuerzas producidas por campos magnéticos	8
	3.3 Teoría para el análisis magnetostático	8
	3.4 Condiciones de frontera y de continuidad	13
	3.5 Descripción de las fuerzas en el transformador	13
<b>CAPÍTULO</b>	4.0 PROGRAMA FLD5	15
	4.1 Secuencia del programa FLD5	16
	4.2 Datos de entrada y salida del programa FLD5	19
<b>CAPÍTULO</b>	5.0 PROGRAMA MAXWELL 2D DE ANSOFT	20
	5.1 Modelo del transformador en el programa Maxwell 2D	21
	5.2 Modelo de elemento finito	23
	5.3 Malla de elemento finito en Maxwell 2D	24
	5.4 Postprocesador en Maxwell 2D	25
<b>CAPÍTULO</b>	6.0 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR BAJO ESTUDIO	26
<b>CAPÍTULO</b>	7.0 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS	32
	7.1 Solución teórica a corriente nominal	32
	7.2 Solución teórica en condiciones de corriente de corto circuito	36
<b>CAPÍTULO</b>	8.0 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	38
	8.1 Simulación a corriente nominal	39
	8.2 Simulación con corriente de corto circuito	50
	8.3 Conclusiones	55
<b>CAPÍTULO</b>	9.0 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS	57
<b>CAPÍTULO</b>	10.0 BIBLIOGRAFÍA	58
<b>APÉNDICE</b>	A Descripción de los datos de entrada del FLD5	59
	B Datos de entrada del FLD5	62
	C Datos de salida del FLD11	63
	D Datos de salida del FLD5	70
	E Pasos para crear el modelo del transformador bajo estudio en Maxwell 2D de ANSOFT.	77

---

*La imaginación crea tu conocimiento, pero  
que la inspiración te encuentre trabajando*  
**Albert Einstein**

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

## 1.0 INTRODUCCIÓN

A mediados de 1820 fue descubierta la existencia del campo magnético alrededor de un cable conductor de electricidad por el Dr. Hans Christian Oesterd, en Dinamarca, un tiempo después, en Francia, el descubrimiento del Dr. Oesterd fue ampliado por el científico André Marie Ampère para complementar la descripción del campo magnético producido a una distancia y un ángulo del conductor al aplicarle una variación de la corriente eléctrica. Unos años más tarde, Michael Faraday descubrió la relación de lo que ahora conocemos como ley de inducción de Faraday, la cual establece que un campo magnético variable causa una variación de voltaje eléctrico en un conductor que se encuentra dentro de ese campo magnético.

Los dos descubrimientos anteriores son el fundamento de la operación de motores eléctricos, generadores, transformadores y otros dispositivos de los que depende la vida moderna.

El desarrollo de la presente tesis es en el estudio de transformadores de potencia. Un transformador es una máquina estática cuya función es la de transferir energía eléctrica. Es un dispositivo que enlaza magnéticamente circuitos eléctricos.

El transformador consiste de dos o más bobinas acopladas por un campo magnético común que fluye a través de un material ferromagnético llamado núcleo. El material ferromagnético concentra la mayoría de las líneas de flujo magnético principal y parte del flujo de dispersión generado por la corriente que circula en las bobinas. Los transformadores se clasifican como transformadores de distribución y transformadores de potencia.

Las bobinas que lo componen son designadas para su estudio como bobina primaria y secundaria; por lo regular se denomina como bobina primaria a la que se conecta a las líneas de alto voltaje y la secundaria a las cargas de menor voltaje.

Para un transformador ideal suponemos lo siguiente:

- El valor de la resistencia en sus conductores es despreciable.
- Todo el flujo magnético está confinado en el núcleo del transformador. Las pérdidas en el núcleo las consideramos despreciables.
- La permeabilidad del núcleo es infinita (i.e.  $\mu \rightarrow \infty$ ). De este modo la corriente de excitación requerida para generar flujo magnético en el núcleo es cero.

Las características del transformador real se obtienen por medio de pruebas de laboratorio (prueba de vacío, de corto circuito, marcas de polaridad, relación de vueltas) para así determinar las impedancias que modelan las distintas pérdidas. Con los resultados de las pruebas el modelo del transformador se constituye de estos elementos resistivos e inductivos conectados a un transformador ideal.

Los transformadores son conectados al sistema eléctrico de potencia ya sea como equipos monofásicos o trifásicos. Sus principales conexiones son, primario-secundario respectivamente: la conexión estrella-delta, delta-estrella, delta-delta, estrella-estrella.

El transformador opera al tener una diferencia de potencial, variable en el tiempo, aplicada en el lado primario del transformador, generando así el flujo magnético por medio de la ley de Faraday. El flujo magnético, confinado principalmente en el núcleo del transformador, induce un voltaje en terminales de la bobina secundaria. Al momento de aplicar una carga en el lado secundario comienza a circular una corriente que contrarresta el flujo magnético del lado primario. De este modo tenemos un flujo magnético común que enlaza ambos circuitos eléctricos.

Las personas dedicadas al diseño de equipo eléctrico para aplicaciones de potencia tienen que satisfacer muchos puntos importantes del equipo además de tener mejores resultados que la competencia. Este criterio de necesidades puede ser la combinación de bajo presupuesto, bajo costo de operación, alta eficiencia, mínimo peso o volumen, alto desempeño, etc. El diseñador debe de ser capaz de analizar éste y muchos aspectos más para llegar a una solución óptima. Para ello es necesario el uso de herramientas que se apliquen a necesidades como: geometrías irregulares, materiales magnéticos o eléctricos no lineales, corrientes inducidas, estudio de campos eléctricos y magnéticos.

Aunque las técnicas analíticas caen sobretodo en geometrías y características simples, éstas sentaron las bases para los métodos numéricos los cuales son capaces de modelar geometrías irregulares o materiales no homogéneos. Estos métodos se aplican a la teoría de los elementos finitos, diferencias finitas, entre otros.

Para el estudio y análisis de transformadores se han creado programas computacionales que apoyan en el diseño del mismo. Se realizan distintos análisis mecánicos, eléctricos, magnéticos con el fin de satisfacer las especificaciones del cliente. Los programas aplican distintas técnicas para poder determinar la distribución de esfuerzos mecánicos, flujo magnético, pérdidas en los transformadores, simulación del transformador en condiciones normales y fuera del punto de operación.

La parte de diseño a la cual se desea dar enfoque en la presente tesis es hacer un análisis comparativo entre dos herramientas computacionales que calculan fuerzas de corto circuito en un transformador de potencia por medio de la técnica de elemento finito. Los programas son el FLD5, del Dr. O. W. Andersen del Instituto Tecnológico de Noruega; y el producto Maxwell 2D de ANSOFT.

Parte de la comparación consta de un estudio teórico de las fuerzas de corto circuito como aproximación de los resultados de ambos programas.

---

**LISTA DE TABLAS**

No.	Descripción	Pág.
6.1	Características del transformador bajo estudio	26
6.2	Cálculos de corrientes y densidad de corriente para el transformador bajo estudio	28
6.3	Cálculos de los segmentos de la bobina de baja tensión	30
6.4	Cálculos de los segmentos de la bobina de alta tensión	31
7.1	Solución teórica de fuerzas radiales en el transformador para corriente nominal	35
7.2	Solución teórica de fuerzas radiales en el transformador en condiciones de corto circuito	37
8.1	Sumatoria de fuerzas radiales a corriente nominal del transformador	40
8.2	Variación porcentual de fuerzas radiales en el transformador	41
8.3	Fuerzas axiales a corriente nominal del transformador	42
8.4	Densidad de flujo máxima en FLD5	45
8.5	Densidad de flujo máxima teórica	45
8.6	Densidad de flujo máximas en dirección axial y radial y ubicación de estas Resultados obtenidos por el programa Maxwell	46
8.7	Posición de los dos puntos que generan las líneas de las figuras 8.8 y 8.9	47
8.8	Sumatoria de fuerzas radiales a corriente de corto circuito del transformador	50
8.9	Variación porcentual de fuerzas radiales en el transformador en corto circuito	51
8.10	Fuerzas axiales a corriente de corto circuito del transformador	51
8.11	Fuerzas axiales acumuladas, tabla 8.10, con corriente de corto circuito del transformador	52

A1	Descripción de la tabla de datos de entrada del FLD5	60
A2	Descripción de la tabla de datos de entrada del FLD5	61
B1	Tabla de Datos de entrada del FLD5 para el caso de estudio	62

---

**LISTA DE FIGURAS**

No.	Descripción	Pág.
3.1	Elementos resistivos, flujo de dispersión y mutuo en un transformador monofásico.	4
3.2	Modelo de un transformador monofásico con los elementos resistivos, inductivos y valores de voltaje referidos al lado primario.	5
3.3	Sección transversal de un transformador con bobina primaria y secundaria.	7
3.4	Bloque elemental por donde pasa un flujo magnético continuo.	10
3.5	Par de bobinas concéntricas con centros magnéticos alineados. En ellos se indica de manera general la dirección de las fuerzas.	14
4.1	Bobinas del transformador y líneas de flujo.	15
4.2	Bobinas y segmentos de un transformador ejemplo.	16
4.3	Primera división del área de análisis del transformador.	17
4.4	Segunda división, triangular, del área de análisis del transformador.	17
4.5	Tercera división, triangular, del área de análisis del transformador para un análisis con mayor número de elementos.	18
5.1	Vista superior de corte de un transformador.	21
5.2	Representación del modelo axisimétrico en un corte de la pierna central del transformador de la figura 5.1.	22
5.3	Modelo de transformador en Maxwell 2D.	23
5.4	Malla de elementos triangulares en el modelo. A la izquierda la malla en las bobinas y en el núcleo, a la derecha la malla a toda el área alrededor de las bobinas.	24
5.5	Ejemplo de la distribución de líneas de flujo que pasan por el transformador, figura izquierda, y la distribución de la densidad de flujo en el modelo analizado en Maxwell, figura derecha.	25
6.1	Conexión delta estrella con los devanados del secundario conectados en	26

---

paralelo.		
6.2	Descripción de las dimensiones de los devanados, en milímetros, del modelo del transformador bajo estudio.	27
6.3	Sección transversal de la bobina de baja (izquierda) y alta tensión (derecha) con sus respectivas dimensiones.	28
6.4	Arreglo de segmentos del transformador para el estudio de fuerzas a corriente nominal y de corto circuito.	29
6.5	Descripción de las bobinas de alta y baja tensión con el número de vueltas y la conexión de una de las fases con punta al centro.	31
7.1	Circuito simplificado de un transformador monofásico en corto circuito.	36
8.1	Geometría del transformador para el estudio de fuerzas a corriente nominal y de corto circuito.	38
8.2	Descripción de las líneas de densidad de flujo magnético al centro y la parte superior del transformador.	40
8.3	Magnitud y sentido de las fuerzas axiales en cada segmento de bobina, resultados obtenidos del programa Maxwell 2D.	42
8.4	Densidad de flujo radial en los segmentos cercanos al centro electromagnético, resultados obtenidos del programa Maxwell.	43
8.5	Sumatoria de fuerzas en las secciones de la bobina de baja y alta tensión, respectivamente, resultados obtenidos del programa Maxwell.	44
8.6	Distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo de las distintas líneas en el transformador.	46
8.7	Localización de las líneas para describir la densidad de flujo axial y radial.	47
8.8	Densidad de flujo axial en el transformador bajo estudio obtenida a diferentes alturas.	48
8.9	Densidad de flujo radial en el transformador bajo estudio obtenida a diferentes alturas.	49
8.10	Mallas y líneas de flujo generadas por los programas FLD5 y Maxwell, respectivamente.	53
8.11	Líneas de flujo generadas por los programas FLD5 y Maxwell, respectivamente.	54

---



---

E1	Diagrama de flujo para crear un modelo en Maxwell 2D.	78
E2	Menú inicial para un nuevo proyecto en Maxwell 2D.	79
E3	Menú de pasos a seguir en la creación del modelo en Maxwell 2D.	79
E4	Menú para seleccionar el tipo de análisis a resolver en Maxwell 2D.	80
E5	Menú para seleccionar el plano en donde se resuelve el sistema en Maxwell 2D.	80
E6	Área de creación de los objetos que componen al transformador en Maxwell 2D.	81
E7	Menú de materiales para asignar a los objetos del transformador en Maxwell 2D.	81
E8	Administrador de fuentes de corriente y condiciones de frontera del transformador en Maxwell.	82
E9	Creación de los objetos, asignación de materiales y condiciones de frontera aceptadas por Maxwell.	82
E10	Selección de análisis adicionales al estudio del transformador.	83
E11	Criterio de solución del modelo magnetostático.	83
E12	Pasos de creación y solución del modelo acreditados por el programa.	84
E13	Tabla de resultados durante el proceso de solución del modelo.	84
E14	Ventana del postprocesador de resultados de Maxwell 2D.	85
E15	Calculadora del postprocesador de resultados de Maxwell 2D.	86

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.®**

**Análisis de fuerzas de corto circuito en un transformador de potencia al comparar programas de elemento finito.**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ENERGÉTICA  
ESPECIALIDAD EN ELÉCTRICA**

**POR:**

**BERNARD MANRÍQUEZ CASTRO**

**MONTERREY, N.L.**

**DICIEMBRE DE 2005**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la presente Tesis del Ing. Bernard Manríquez Castro sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**Maestro en Ciencias en Ingeniería Energética  
Especialidad en Eléctrica**

Comité de Tesis:

---

Dr. Federico Viramontes Brown  
Asesor

---

M. C. Juan Gonzalo Castellanos  
Sinodal

---

M. C. Efraín Gutiérrez Villanueva  
Sinodal

Aprobado:

---

Dr. Federico Viramontes Brown  
Director del Programa de Graduados en Ingeniería  
Diciembre, 2005

Gracias Dios mío por darme la vida y por demostrarme tu Amor día con día.

Gracias a mi familia: Yolanda Castro Leyva y Francisco Víctor Manríquez Arroyo por darme brindarme el Don de la vida, brindar todo de si mismos y por instruirme como persona. Los Amo papás. A mi hermanita, Atzimba Manríquez Castro por su eterna amistad y cariño.

Gracias a mis flaquitas, Cecilia y Alexia, por ser mi inspiración y mi razón para seguir adelante, así como también mi fuente inagotable de alegrías.

Agradezco al Centro de Estudios de Energía por darme la oportunidad de crecer como ingeniero y como persona. Gracias Dr. Llamas y Dr. Viramontes por abrir esta oportunidad de desarrollo.

Gracias Ing. Gonzalo Castellanos por sus acertadas aportaciones y comentarios en el desarrollo de esta tesis.

Gracias Ing. Efraín Gutiérrez por su amistad y compañerismo y por brindarme enormemente sus conocimientos y experiencias durante el desarrollo del presente trabajo.

Gracias a todos mis compañeros de maestría por su apoyo a lo largo de este periodo de aprendizaje.

*“Cualquier cosa que puedas hacer, sueños que puedes hacer, empréndela.  
La audacia posee poder, magia y genialidad.”*

***Johann Wolfgang Von Goethe***

---

---

*El que nada duda, nada sabe.*  
**Proverbio Griego**

## CAPÍTULO 4

**PROGRAMA FLD5**

---

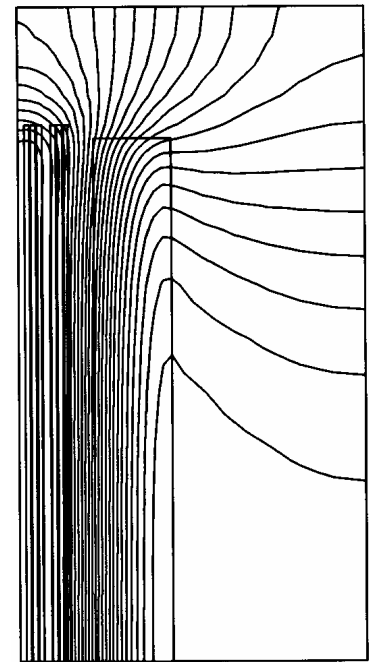
#### 4.0 PROGRAMA FLD5

El programa FLD5, “Transformer Leakage Flux”, es un producto desarrollado por el Dr. O. W. Andersen [1], el cual se aplica para resolver problemas generales de campos electromagnéticos en transformadores eléctricos. El programa está escrito en FORTRAN y está basado en el método de elementos finitos aplicado a transformadores. Se parte del hecho que la ecuación parcial diferencial de Poisson se satisface cuando la energía magnética total es la mínima. Tiene, entre otros, un programa que manipula los datos de entrada y otro que procesa los datos de salida. El programa inicialmente calcula el flujo de dispersión. Además de aplicar la información del campo magnético para calcular reactancias, fuerzas y pérdidas. A la vez genera una gráfica sobre las líneas de flujo.

Un ejemplo de los resultados del programa se muestra en la figura 4.1 en donde se aprecian las líneas de flujo resultantes en un transformador típico con simetría axial. En este caso se puede hacer el análisis en la mitad superior de la bobina aplicando la condición de frontera de flujo perpendicular para eliminar la parte inferior.

El límite izquierdo es la superficie de la pierna del núcleo y el límite inferior es la parte central del transformador. La parte superior puede representar el yugo o condiciones en la periferia del transformador. Los cálculos asumen una geometría axisimétrica. La pared derecha representa el límite con el tanque.

Este programa fue desarrollado aprovechando todas las suposiciones que se pueden hacer en estos casos. La suposición más importante consiste en hacer un análisis de tres dimensiones en uno de dos dimensiones. Por lo regular los métodos analíticos asumen que las líneas de flujo son puramente axiales y cuyos límites son los extremos de las bobinas. [1, 12]



**Figura 4.1:** Bobinas del transformador y líneas de flujo [2]

Las fuerzas de corto circuito son calculadas al multiplicar la densidad de flujo magnético por la corriente que circula por la longitud del conductor. Las fuerzas radiales producen esfuerzos de tensión en la bobina exterior y de compresión en la bobina interior en sentido radial.

#### 4.1 SECUENCIA DEL PROGRAMA FLD5

A continuación se describen los pasos más importantes que se siguen cuando se ejecuta el programa.

Como ejemplo del programa, en la figura 4.2 se muestra un transformador que consta de una bobina de baja y alta tensión. Las bobinas son divididas en segmentos si es necesario. El programa puede manejar hasta 30 bobinas, 6 terminales y 200 segmentos. [12]

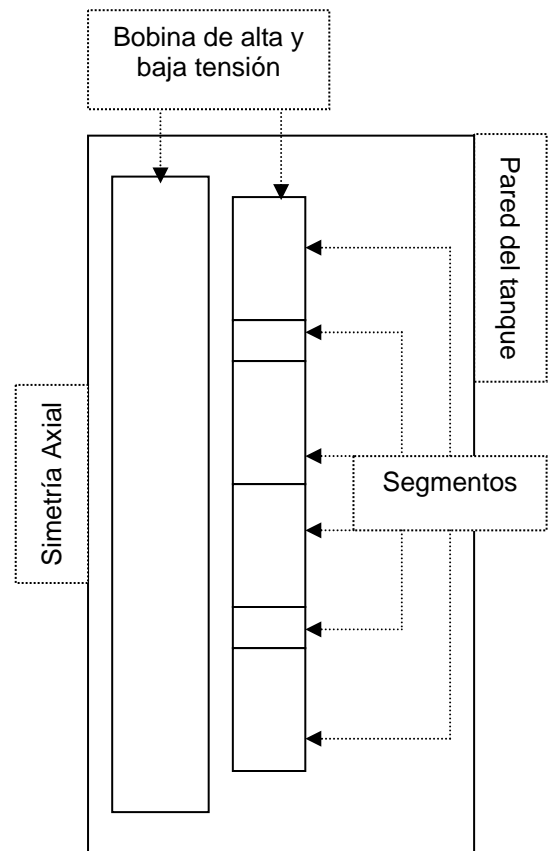
El programa genera automáticamente la malla de elementos finitos con la información de geometría, conexiones y distribución de la corriente.

Primero, el usuario debe de generar un archivo con los datos de entrada por medio de un editor de texto. Como referencia al manual del usuario se crearon los apéndices A y B, que contienen información y explicación del manual del FLD5.

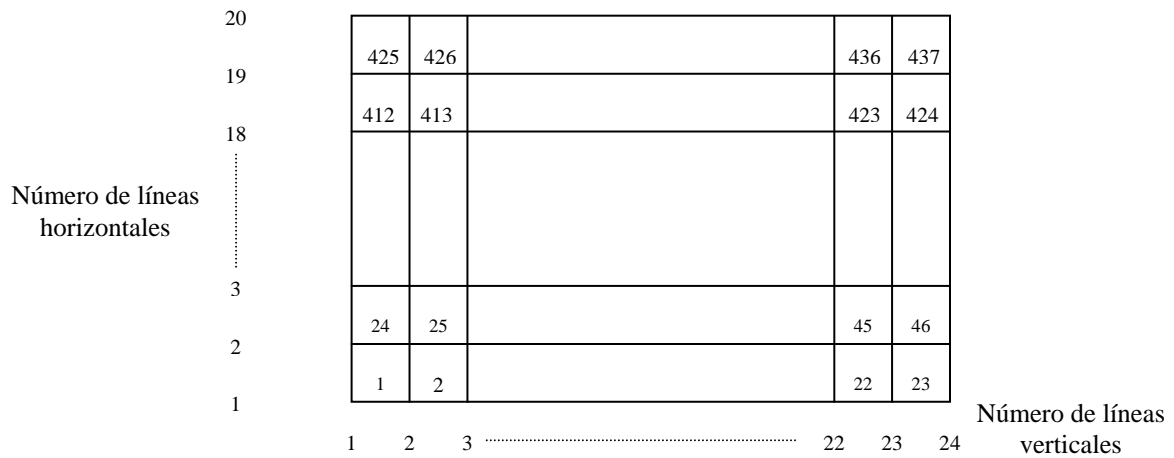
Posteriormente, con los datos que son proporcionados, el programa comienza a generar una malla en dos dimensiones, acoplándose a las secciones y dimensiones de las bobinas y los límites de yugos y tanque. Para evitar cálculos innecesarios, por lo general se simula solo la mitad del transformador. Los segmentos de la bobina son definidos como partes de bobinas, los cuales pueden ser considerados con densidades de corriente y arreglos de conductores uniformes.

Se pueden tener hasta 24 líneas radiales y 20 axiales lo que significa 437 rectángulos; lo anterior debido a que son 23 por 19 líneas, pues una línea horizontal es el límite inferior y una línea vertical es la pared del tanque.

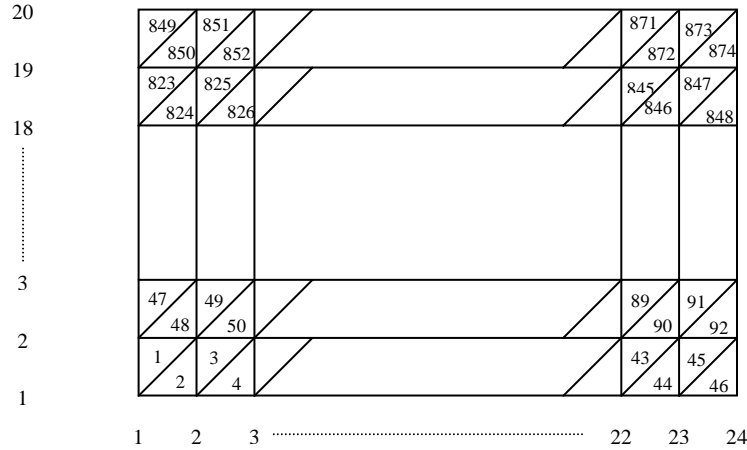
Para explicar lo anterior, en la figura 4.3 se muestra sólo el área rectangular donde se crea el esquema del transformador. En ella se aplica la malla y la metodología de elementos finitos. El recuadro se divide en líneas que son 20 horizontales, contando las líneas de límite inferior y superior, y 24 verticales, junto con las líneas que forman la pared izquierda y derecha.



**Figura 4.2:** Bobinas y segmentos de un transformador ejemplo.



**Figura 4.3:** Primera división del área de análisis del transformador.

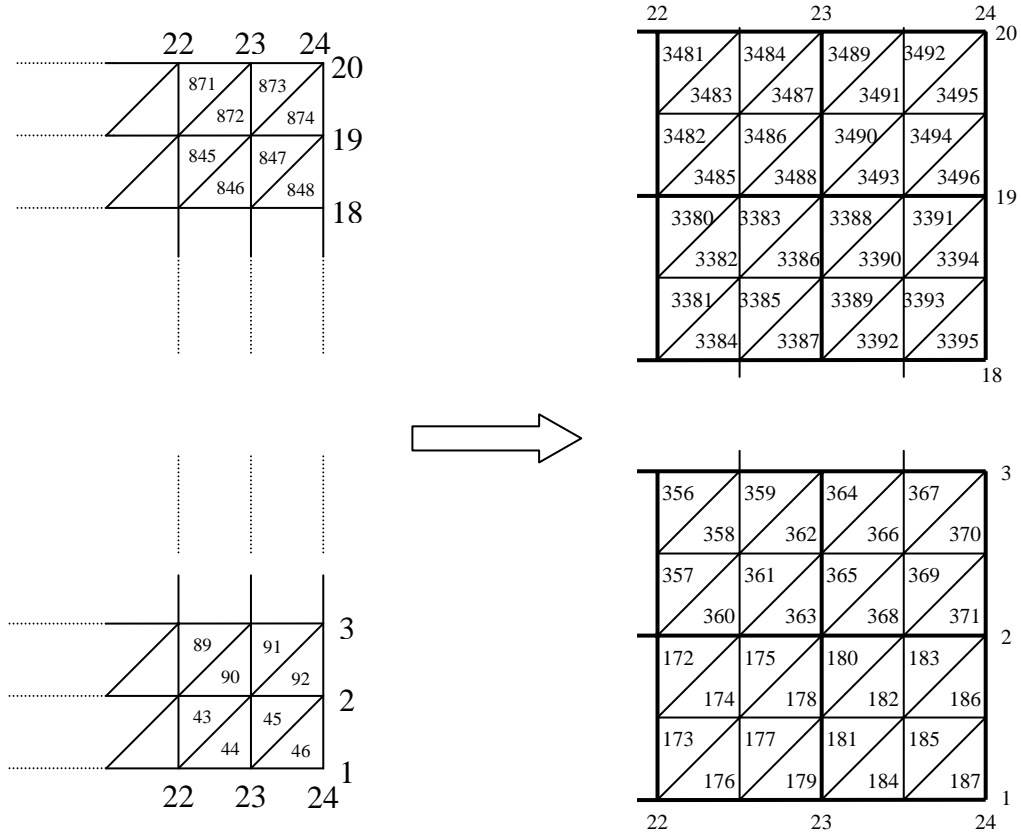


**Figura 4.4:** Segunda división, triangular, del área de análisis del transformador.

Estos recuadros, figura 4.3, a su vez son divididos en triángulos, lo que nos da un total de 874 elementos triangulares, figura 4.4. Observe que son el mismo número de líneas verticales y horizontales en el recuadro. El programa FLD5 obtiene una primera solución con esta malla.



Una vez que el programa encuentra una solución con esta primera malla, cada triángulo se subdivide en 4. De esta forma se tienen un mayor número de elementos para llegar a la solución final con 3496 elementos triangulares. Figura 4.5



**Figura 4.5:** Tercera división, triangular, del área de análisis del transformador para un análisis con mayor número de elementos.

La figura 4.5 sólo muestra las esquinas inferior y superior derecha del rectángulo de la figura 4.4. Estas se dividen en cuatro aumentando de nuevo el número de elementos en la malla. Recuerde que sólo se ejemplifica la generación de la malla, ya que en la aplicación ésta se sujeta a las dimensiones del sistema.

Posteriormente el programa realiza el cálculo de las fuerzas con el valor de la corriente nominal y un segundo análisis en condiciones de corto circuito. El total de las fuerzas radiales generan esfuerzos de tensión en la bobina exterior, y esfuerzos compresión en la bobina interior. La máxima fuerza axial por unidad de volumen ocurre en los extremos de la bobina. El lugar donde se acumulan las máximas fuerzas es en el centro de la bobina, que es en donde se tienen los mayores esfuerzos.

## 4.2 DATOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL PROGRAMA FLD5

El archivo de entrada consta de dos partes, la primera contiene lo siguiente [12]:

- Identificación
- Frecuencia y voltaje por vuelta
- Un código que especifica si el tanque cuenta o no con un blindaje de aluminio.
- Factores de pérdidas en el tanque, las piernas y el yugo basados en pruebas de transformadores similares.
- Especificaciones para generar la gráfica de flujo magnético
- Requerimientos de impresión
- Localización de las líneas de la malla

La segunda parte de los datos de entrada es:

- Localización de los límites de los segmentos de la bobina.
- La potencia (kVA), incluir signo para la dirección de la corriente.
- Material de los conductores, número de ellos y dimensiones.
- Número de conductores activos por unidad (activos / total).

El archivo con los datos de salida contiene lo siguiente para cada segmento de bobina:

- Pérdidas por unidad de volumen y en total.
- Pérdidas por corrientes de remolino debidas al flujo axial y radial.
- Fuerzas en condiciones de corto circuito tanto axial como radial, máximo acumulado axialmente y el máximo por unidad de volumen.

Sección de resultados para todo el transformador:

- Esfuerzos críticos con corrientes de corto circuito.
- Máxima densidad de flujo magnético.
- Reactancia de corto circuito, resistencia, e impedancia por unidad.
- Pérdidas de corriente de remolino en las bobinas, el tanque, piernas, yugo y en total.

Como información adicional se puede revisar un área en particular.

- Coordenadas “r” y ”z”.
- Vector de potenciales
- Densidad de flujo magnético

El archivo de datos de entrada del programa aplicado al caso bajo estudio se encuentra en el apéndice B, los resultados se muestran en los apéndices C y D.

---

*El pesimista se queja del viento; el optimista espera que cambie; el realista ajusta las velas.*

***William George Ward***

## CAPÍTULO 5

### PROGRAMA MAXWELL 2D DE ANSOFT

---

## 5.0 PROGRAMA MAXWELL 2D DE ANSOFT

El simulador Maxwell es un paquete comercial de la compañía ANSOFT, que aplica el método de elementos finitos (FEA) para resolver problemas electromagnéticos. Para analizar el problema deben de ser especificados la geometría, las propiedades de los materiales y las condiciones de frontera para el dispositivo o el sistema. De lo anterior el programa realiza los siguientes pasos:

- Automáticamente crea una malla elemental sobre el arreglo.
- Calcula la solución deseada para un campo eléctrico o magnético y de las cantidades especiales necesarias como fuerzas o momentos. Los tipos específicos de soluciones del campo magnético y las cantidades que pueden ser calculadas dependen de la parte de simulación del paquete (campos eléctricos, magnetismo CD, magnetismo CA).
- Permite que el usuario analice, manipule e interprete la información de las soluciones mediante gráficas y cálculos. [5]

El problema bajo estudio es magnetostático, por lo que el simulador calcula los campos magnéticos que provienen de fuentes como corrientes de CD en los conductores, campos magnéticos estáticos representados por condiciones de frontera y por imanes permanentes. Las cantidades que son resueltas son el campo magnético ( $\mathbf{H}$ ) y la distribución de la densidad de corriente ( $\mathbf{J}$ ); la densidad de flujo magnético ( $\mathbf{B}$ ) es calculada automáticamente de la intensidad de campo magnético. Derivadas de estos cálculos son las fuerzas, pares torsionales, energías e inductancias.

En general estos son los pasos para crear un modelo en Maxwell [5]:

1. Dibuje los objetos del modelo.
  - a. Especifique las unidades del modelo
  - b. Modifique la geometría
2. Determine el tipo de materiales de los objetos y sus propiedades electromagnéticas. Contiene una base de datos de materiales comúnmente utilizados.
3. Indique qué condiciones de frontera se aplican para modelar el comportamiento del campo en las interfaces de los objetos y los límites de la región de la solución.
4. Dar de alta los parámetros de solución
5. Establezca los lineamientos de solución como la malla, el porcentaje de error en el modelo, iteraciones.
6. Inicie la solución del problema.
7. Revise los resultados que permiten graficar las cantidades del análisis y los elementos de la malla.

Para una descripción un poco más a detalle del uso del paquete Maxwell 2D, es necesario consultar el apéndice E y consultar los manuales del usuario de la página de la compañía ANSOFT (<http://www.ansoft.com>).

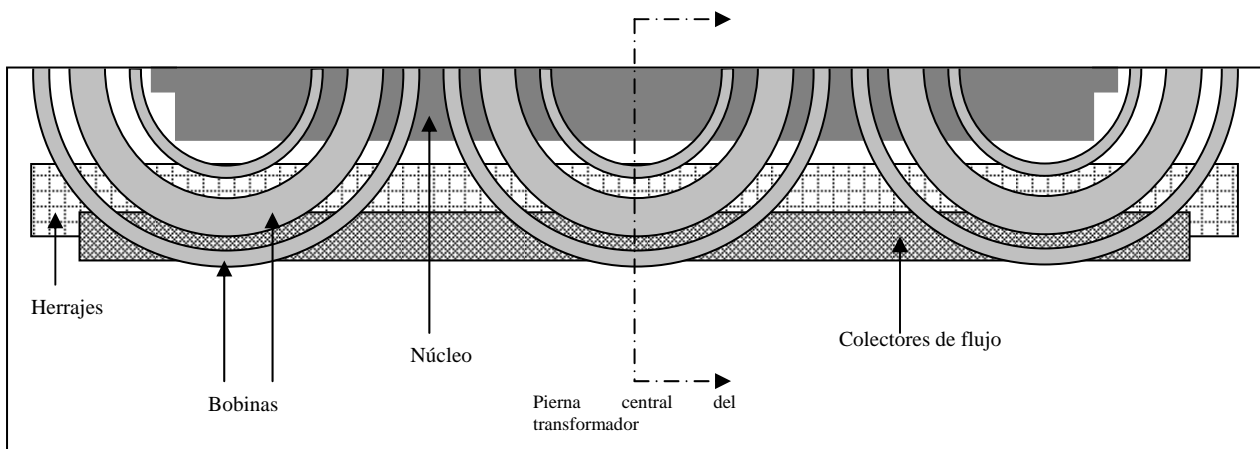
## 5.1 MODELO DEL TRANSFORMADOR EN EL PROGRAMA MAXWELL 2D

El concepto del transformador es sencillo de interpretar en el modelo teórico ideal, pero se complica al momento de tratar de calcular los campos magnéticos, reactancias, distribución de flujo y pérdidas en distintas partes del sistema. Los elementos del transformador se van creando en sus formas esenciales, ya sea en 2 o 3 dimensiones, para su simulación en el programa. Por ejemplo, las bobinas y las piernas del transformador son rectángulos que simulan en dos dimensiones el modelo axisimétrico del transformador obteniendo así una aproximación de su forma física real.

Para ejemplificar la creación del modelo en el programa tenemos primero que el transformador se encuentra en un tanque de acero. Dentro de él también se tienen los recolectores de flujo que controlan el flujo de dispersión que trata de filtrarse a las paredes del tanque. Otros elementos son las bobinas, con distintos tipos de arreglos entre ellas; además del núcleo, aislamiento, espaciadores, fijaciones mecánicas, terminales, entre otros muchos elementos que lo componen.

Todo lo anterior propone un modelo de tres dimensiones, pero se puede crear un modelo axisimétrico de dos dimensiones para su análisis que arroje resultados aceptables de su comportamiento en tres dimensiones.

Se observa que la pierna y la bobina tienen simetría rotacional en el eje axial de la pierna, sin embargo se tienen partes que no tienen simetría rotacional como son los yugos, las paredes del tanque, los recolectores de flujo. De tal modo que afirmamos de nuevo que el modelo de dos dimensiones representa de forma aproximada al transformador real.

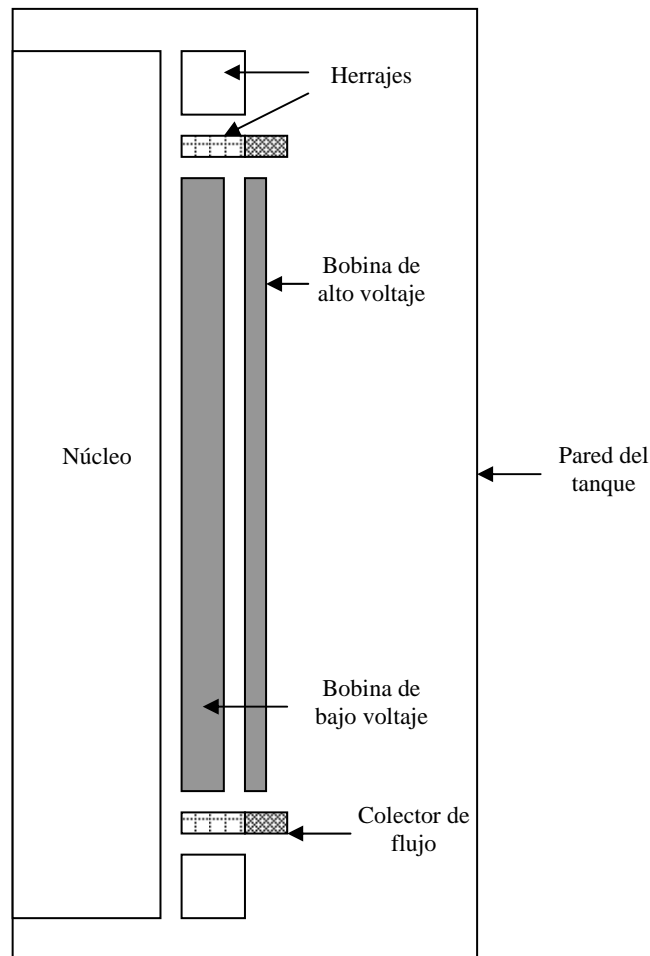


**Figura 5.1:** Vista superior de corte de un transformador

En la figura 5.1 se presenta la vista superior de un transformador y sólo se indican algunos elementos para ser modelados. El modelo axisimétrico en dos dimensiones se presenta en la figura 5.2 que representa el corte en la pierna central del transformador. Se muestra una fase y es una sección vertical de la pierna y la bobina. En este caso el tanque es un cilindro por lo que

debemos de tener presente esto al tiempo de calcular las pérdidas en el tanque. Lo mismo ocurre con los colectores de flujo y los herrajes.

Tanto el tanque como los herrajes están hechos de acero y en los estudios son representados como una impedancia que genera pérdidas dado que existe flujo que penetra las paredes del tanque. El colector de flujo, laminado de la misma forma que los yugos, tiene la función de llevar parte del flujo que genera el núcleo y que de otra manera llegaría hasta las paredes del tanque y los herrajes. Una vez que los colectores atrapan el flujo, las laminaciones llevan el flujo hacia los yugos y lo regresan. Estos y otros detalles no se pueden modelar de manera exacta en el modelo de dos dimensiones. Dado que las laminaciones en el núcleo casi eliminan por completo las corrientes de remolino, el área del colector puede ser modelada como un componente sólido magnético de conductividad cero. El núcleo en sí, y el yugo, puede ser modelado como un material de alta permeabilidad. Las bobinas (alto y bajo voltaje, así como la sección de bobinas en derivación o taps) son representadas como una fuente de corriente uniformemente distribuida en su área.



**Figura 5.2:** Representación del modelo axisimétrico en un corte de la pierna central del transformador de la figura 5.1

## 5.2 MODELO DE ELEMENTO FINITO

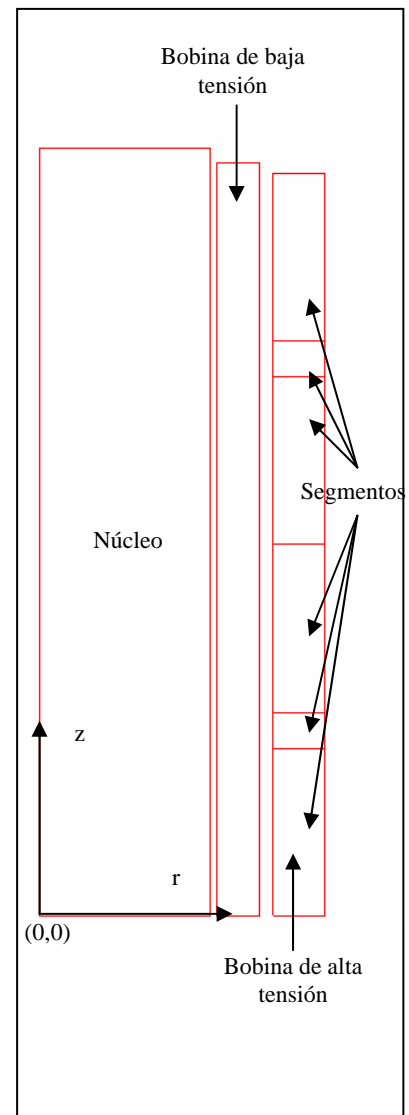
El transformador de simetría en su pierna central de la figura 5.1, se reduce al modelo presentado en la figura 5.3, en donde sólo tenemos las bobinas de baja y de alta tensión, dividida en segmentos.

Se asignaron los tipos de materiales para cada uno de los elementos, estos son:

- Núcleo con una permeabilidad muy alta.
- La bobina de baja es de cobre, al igual que los demás segmentos de la bobina de alta. Las bobinas en derivación (taps) se tomaron con su número de vueltas totales, así como también material de cobre.
- El material que rodea a todo el sistema es vacío, con lo que se tiene una permeabilidad relativa de uno.

Las condiciones de frontera son las siguientes:

- La densidad de corriente que circula por la bobina de baja tensión
- La densidad de corriente que circula por la bobina de alta tensión en sus distintos segmentos o derivaciones de devanados
- El valor negativo de la corriente es para indicar que la corriente circula en sentido contrario a la corriente de la bobina de baja tensión. En el siguiente capítulo se explica con más detalle las características físicas del transformador.
- El modelo es de simetría axial, por lo que se creó en el plano “ $rz$ ”.
- En la pared derecha del modelo se tiene la propiedad de ser tomada como una distancia muy alejada de las bobinas del transformador. Se interpreta como la pared del tanque. El modelo se encuentra aislado de fuentes de corriente o campos magnéticos. Aquí el valor de los potenciales es cero.

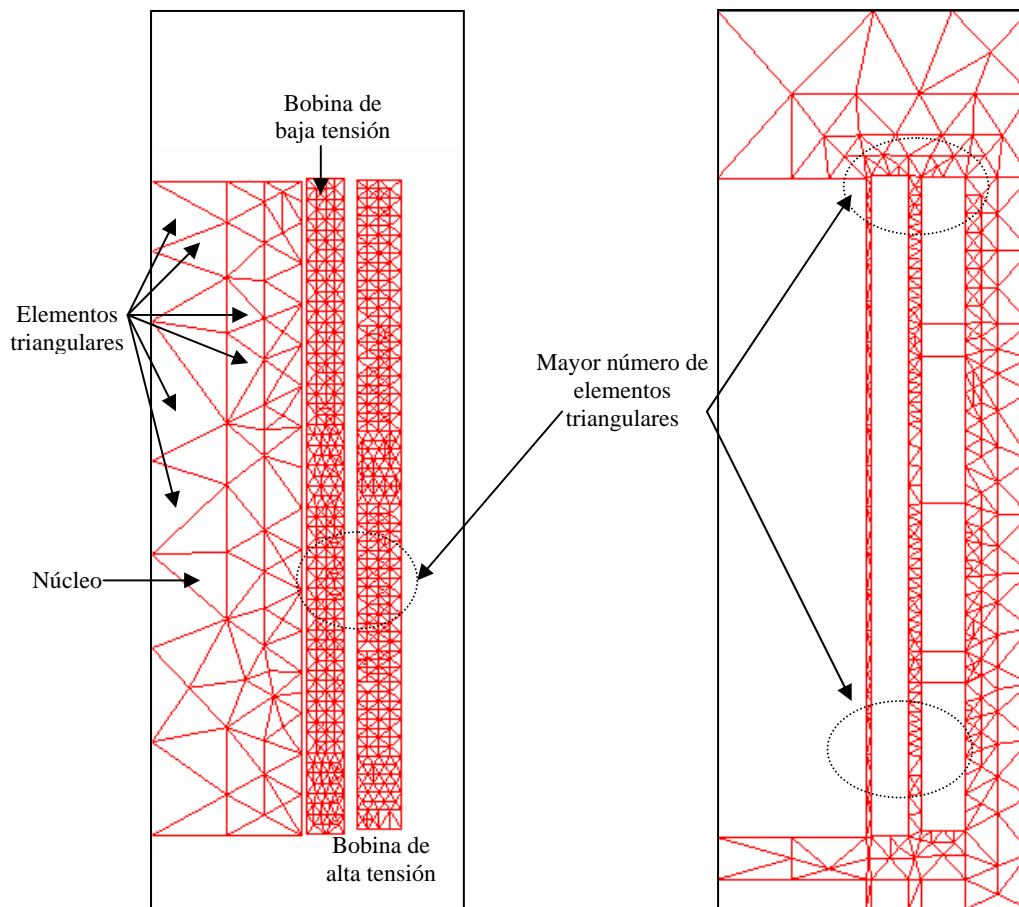


**Figura 5.3:** Modelo de transformador en Maxwell 2D

El programa al buscar la solución del arreglo muestra, en cada iteración, el número de triángulos, la energía total, fuerza y porcentaje de error. Una vez resuelto, con el postprocesador se puede observar la malla generada, líneas de flujo, entre otros cálculos.

### 5.3 MALLA DE ELEMENTO FINITO EN MAXWELL 2D

La generación de la discretización de la malla debe de ser más fina en aquellas partes donde se concentren más líneas de flujo o donde se tengan mayores concentraciones de campo que en el resto del problema. El resultado de número de triángulos necesario para generar la malla puede variar desde algunos cientos hasta miles de ellos con una diferencia de tiempo generación en el programa de algunos segundos. En algunas aplicaciones es necesario introducir características particulares tanto de materiales, condiciones o refinación de la malla.



**Figura 5.4:** Malla de elementos triangulares en el modelo. A la izquierda la malla en las bobinas y en el núcleo, a la derecha la malla a toda el área alrededor de las bobinas.

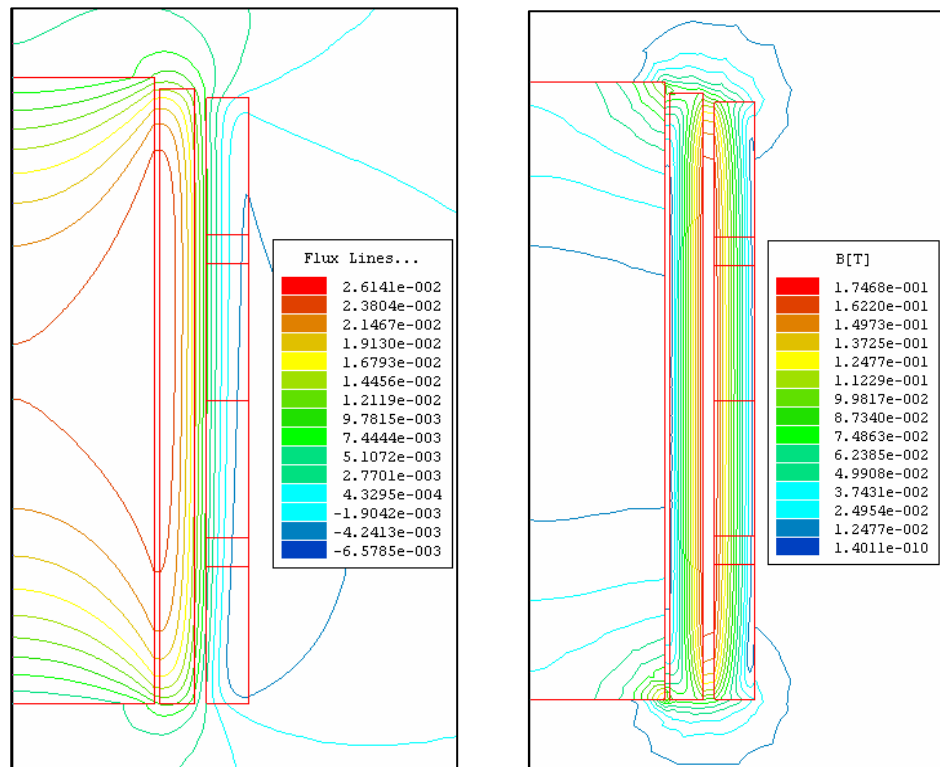
En la figura 5.4 se presentan por separado las mallas en el modelo con el fin de identificar los objetos con sus respectivos elementos triangulares. Observe como los elementos son más grandes conforme nos acercamos a las paredes del modelo.



#### 5.4 POSTPROCESADOR EN MAXWELL 2D

El programa Maxwell 2D cuenta con una herramienta para analizar los resultados del análisis del problema una vez resuelto. La información es, por ejemplo, cantidades de energía, potenciales, densidades, corrientes, entre otras. Además obtenemos de manera gráfica el resultado del análisis para que el usuario lo verifique con su experiencia como diseñador. Lo anterior es con el fin de verificar que las condiciones de frontera y fuentes de excitación son las correctas.

Las gráficas de líneas equipotenciales son los principales medios para tener una idea de la solución del problema. Ayuda en la identificación de las condiciones de frontera de forma correcta o qué características de materiales no son apropiadas en el análisis. En la fase de diseño de los equipos eléctricos la aplicación de estas gráficas es útil para identificar cambios en las geometrías de los diseños.



**Figura 5.5:** Ejemplo de la distribución de líneas de flujo que pasan por el transformador, figura izquierda, y la distribución de la densidad de flujo en el modelo analizado en Maxwell, figura derecha.

La figura 5.5 es una muestra de la capacidad del postprocesador al indicar la distribución de líneas de flujo y densidad con su respectiva escala y valor. Se puede analizar la distribución de la densidad de flujo en la parte central del transformador o en alguna otra coordenada. Al igual que podemos calcular las fuerzas en las bobinas o segmentos de bobinas, energías, corrientes, etc.

---

*Un libro abierto es un cerebro que habla,  
cerrado, un amigo que espera, olvidado, un  
alma que perdona y destruido, un corazón  
que llora.*

***Proverbio hindú***

## CAPÍTULO 6

# CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR BAJO ESTUDIO

---

### 6.0 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR BAJO ESTUDIO

El presente estudio maneja un transformador trifásico cuyas bobinas del lado secundario están conectadas en paralelo. Los transformadores que operan en paralelo tienen la característica de contar con valores nominales de voltajes idénticos, misma impedancia e igual cociente entre las resistencias y reactancias. [3, 7]

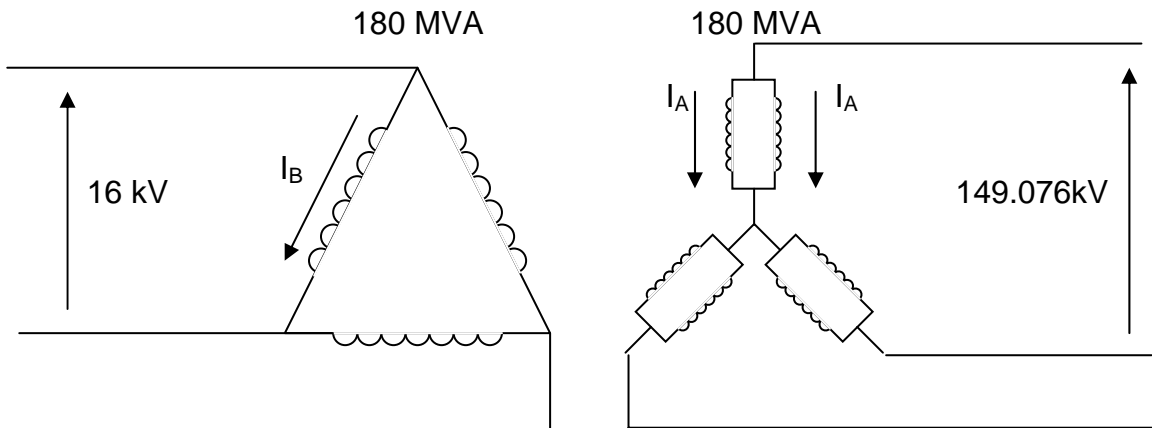
La potencia es transmitida en un sistema de elevación delta estrella. Para un par de bobinas se tiene que los ampere-vueltas del primario y del secundario son iguales y opuestas.

En la tabla 6.1 se presentan las características del transformador.

**Tabla 6.1:** Características del transformador bajo estudio

Potencia	180MVA	Terminal	Primario	Secundario
Número de fases	3	Conexión	Delta	Estrella
Frecuencia	60 Hz	$V_{LL}$	16 kV	149.08 kV
Número de piernas	3	N	58 Vueltas	312 vueltas

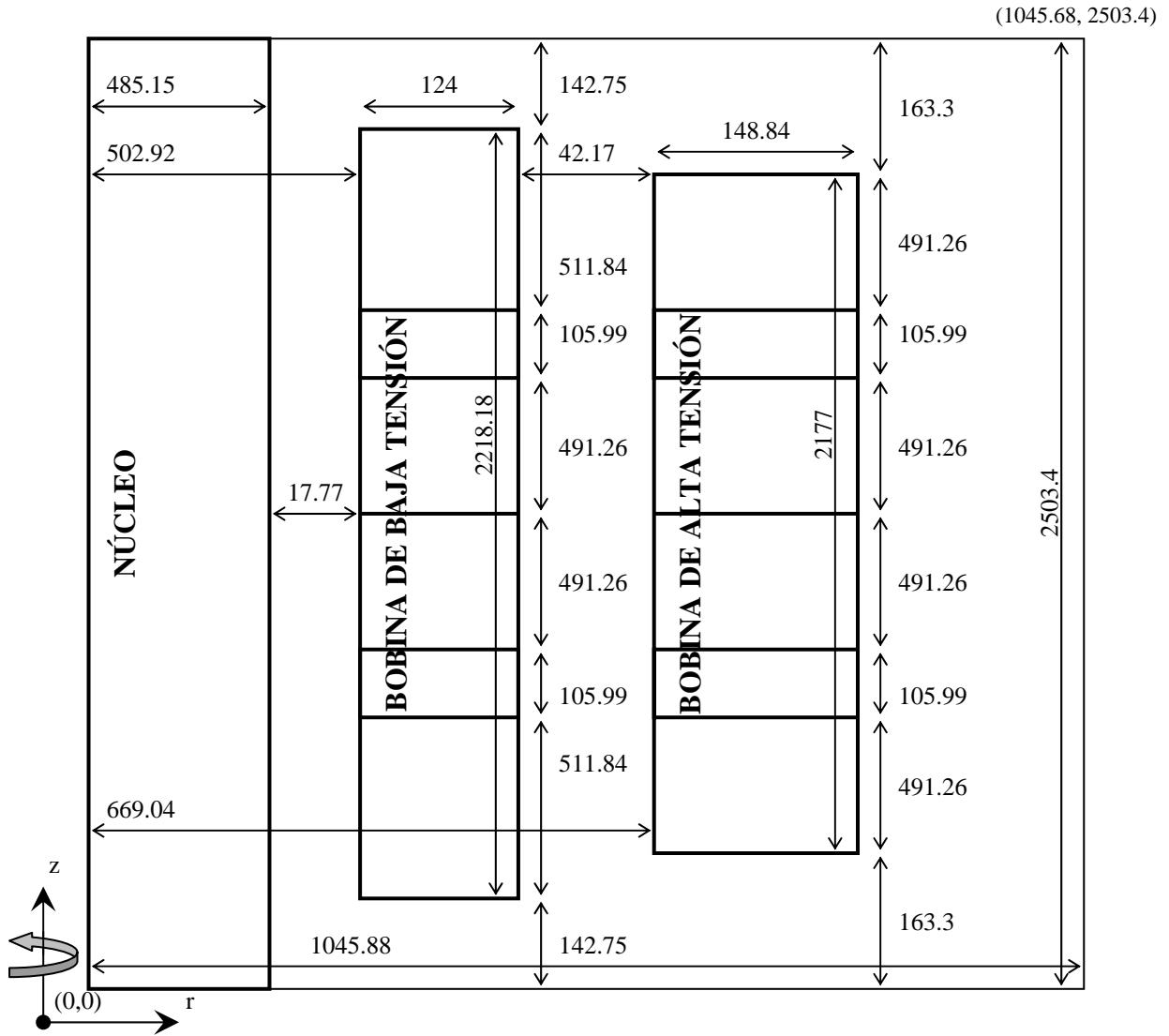
La conexión del transformador se presenta en la figura 6.1 y las dimensiones del mismo, en milímetros, en la figura 6.2. Con la conexión en estrella tenemos voltajes monofásicos de línea a neutro. El punto neutro lo utilizamos para aterrizar el sistema. En esta conexión todas las fases del banco deben de tener los mismos volts-ampere nominales para cargas balanceadas de tres fases. La conexión en el secundario consta de bobinas conectadas en paralelo como se muestra en la figura 6.1.



**Figura 6.1.** Conexión delta estrella con los devanados del secundario conectados en paralelo.

En el análisis se considera que el transformador tiene simetría axial. Esto es que tiene simetría sobre la pierna de su núcleo. Se asume que el material del núcleo consta de una permeabilidad infinita. El espacio ocupado por las bobinas y el material aislante, en su sección transversal, es de forma rectangular. Derivado de la simetría axial se visualiza manejar el análisis en el plano  $r-z$ . Se pueden tener varias bobinas, pero el número total de ampere-vueltas tendrá una sumatoria de cero.

Cada una de las bobinas consiste en un número suficiente de vueltas para permitir que sea modelada con una densidad de corriente uniforme a través de toda la sección transversal de las bobinas. Tanto las bobinas como el material aislante son consideradas como materiales no magnéticos. Dado que la distribución de las bobinas es axisimétrica, la densidad de la corriente por lo tanto se considera que fluye de manera circular en la bobina.



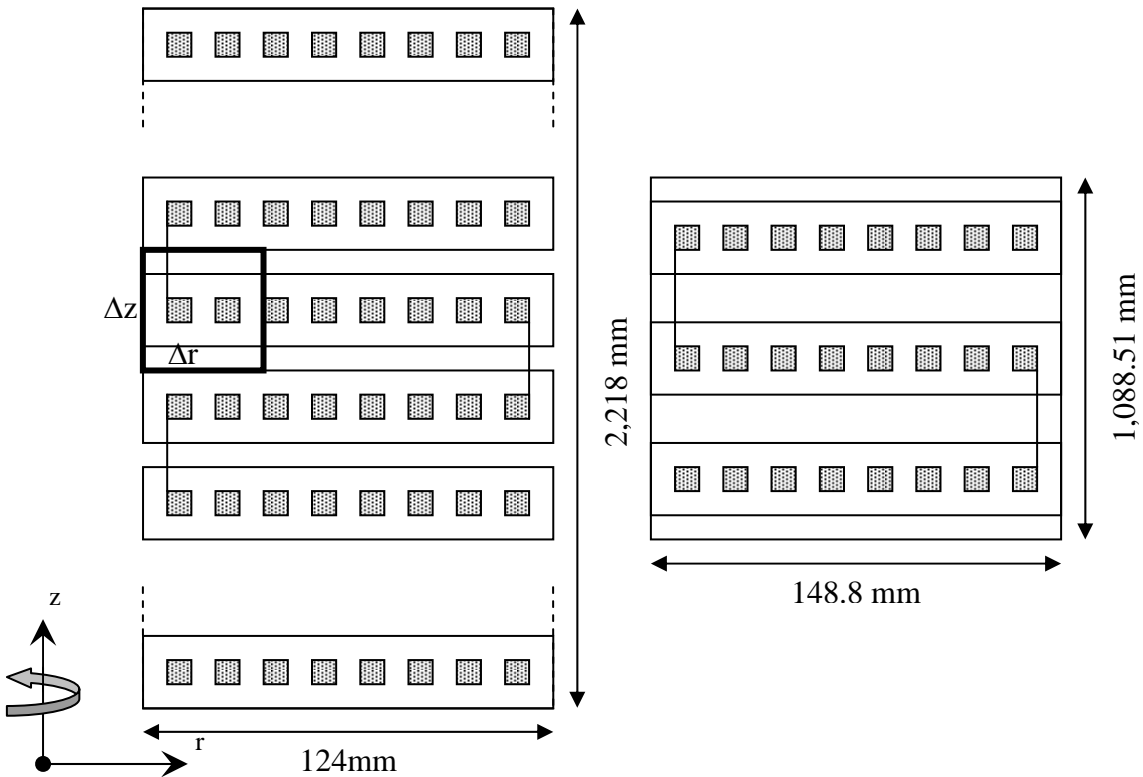
**Figura 6.2.** Descripción de las dimensiones de los devanados, en milímetros, del modelo de transformador bajo estudio

En la figura 6.2 se indican las dimensiones de las bobinas y de la ventana del transformador. Se observa que se cuenta con la misma distancia entre el límite superior e inferior con respecto a los extremos, superior e inferior, de cada bobina. Este mismo esquema se aplicó en ambos programas para poder comparar las capacidades de cálculo de ambas herramientas.

Ahora se presentan los cálculos de corriente y densidad de corriente en la bobina de baja y alta tensión, tabla 6.2. La corriente es  $I$ , número de vueltas de la bobina  $N$  y  $A$  es la sección transversal que abarca la bobina, figura 6.2. La densidad de corriente es denominada como  $J$ . Estas mismas características alimentan ambos programas, FLD5 y Maxwell 2D.

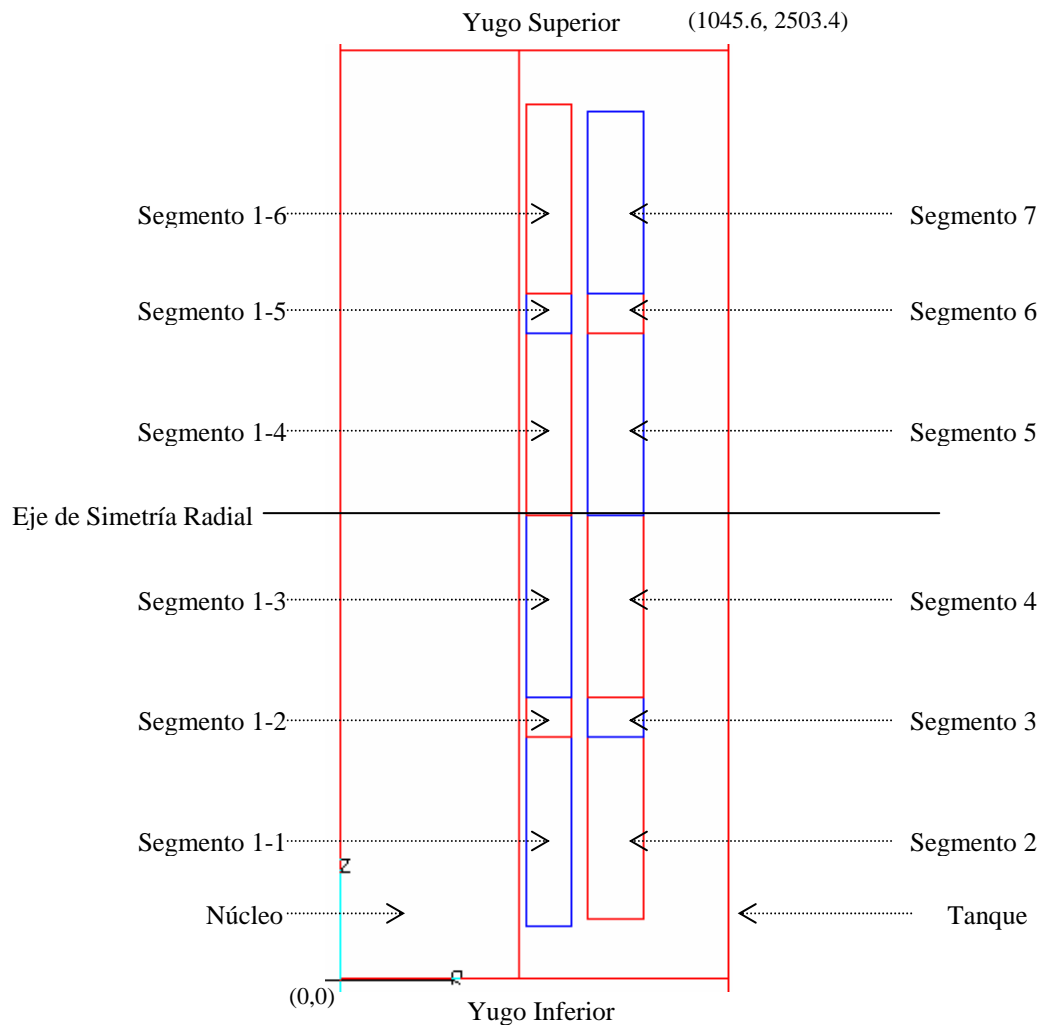
<b>Tabla 6.2.</b> Cálculos de corrientes y densidad de corriente para el transformador bajo estudio	
Bobina de baja tensión	Bobina de alta tensión
$I_B = \frac{\sqrt{2} * 180MVA}{3 * 16kV} = 5,303.3A$	$I_A = \frac{\sqrt{2} * 180MVA}{\sqrt{3} * 149.076kV} * \frac{1}{2} = 492.9A$
$N_B = 58$	$N_A = 312$
Área $A_B = 0.124m * 2.2181m = 0.275m^2$	Área $A_A = 0.1488m * 1.08851m = 0.162m^2$
$J_B = \frac{58 * 5303.3A}{0.275m^2} = 1.118 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$	$J_A = \frac{312 * 492.934A}{0.1619m^2} = 0.949 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$

Dado que en la bobina de alta tensión tenemos bobinas en paralelo, la corriente se divide entre las dos bobinas. En la figura 6.3 se muestra el esquema de dimensiones para la mitad del transformador, no se indican las divisiones de segmentos en la bobina de alta, sólo sus dimensiones.



**Figura 6.3** Sección transversal de la bobina de baja (izquierda) y alta tensión (derecha) con sus respectivas dimensiones.

En la figura 6.4 se muestra el arreglo que se estudió. Se indica donde está localizado el núcleo, la bobina de baja tensión, enmarcada con el segmento uno, y la bobina de alta tensión, dividida en los segmentos 2, 3, 4, 5, 6 y 7. La bobina de baja tensión se dividió en seis subsegmentos para observar las fuerzas a lo largo de la misma, numerados como 1-1, 1-2 hasta 1-6. El número 1, colocado primero, indica que pertenecen a la bobina de baja tensión y el 1, 2, 3, 4, 5 y 6 indica el subsegmento de la bobina de baja tensión. De este modo identificamos de manera más sencilla la bobina la cual se esté tratando. Observe la figura 6.2 para identificar las dimensiones de los segmentos del transformador.



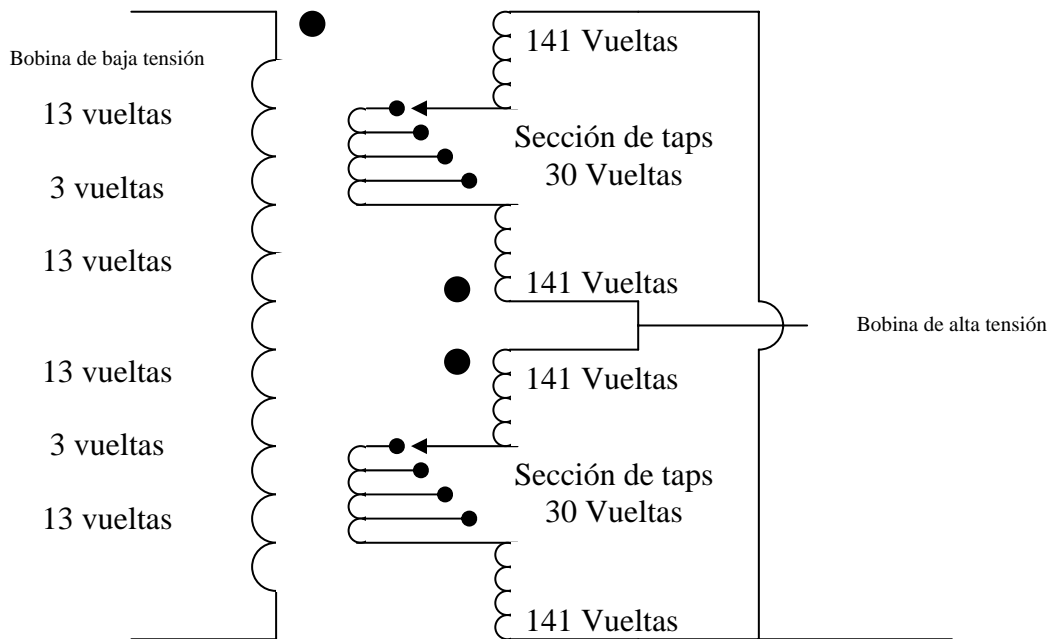
**Figura 6.4:** Arreglo de segmentos del transformador para el estudio de fuerzas a corriente nominal y de corto circuito.

Una vez divididas las bobinas en segmentos realizamos de nuevo los cálculos para el transformador, tabla 6.3 y 6.4

<b>Tabla 6.3</b> Cálculos de los segmentos de la bobina de baja tensión	
Cálculo	Descripción
$I_B = \frac{\sqrt{2} * 180MVA}{3 * 16kV} = 5,303.3A$	Corriente nominal en la bobina de baja tensión
$N_{1-1} = N_{1-3} = N_{1-4} = N_{1-6} = 13$ $N_{1-2} = N_{1-5} = 3$	Número de vueltas en cada segmento de la bobina de baja tensión
Área $A_{1-1} = A_{1-6} = 0.124m * 0.5118m = 0.06347m^2$ Área $A_{1-2} = A_{1-5} = 0.124m * 0.1059m = 0.01314m^2$ Área $A_{1-3} = A_{1-4} = 0.124m * 0.4912m = 0.06091m^2$	Área de los distintos segmentos de la bobina de baja tensión, figura 6.2 y 6.3.
$J_{1-1} = J_{1-6} = \frac{13 * 5,303.3A}{0.06347m^2} = 1.086 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$ $J_{1-2} = J_{1-5} = \frac{3 * 5,303.3A}{0.01314m^2} = 1.210 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$ $J_{1-3} = J_{1-4} = \frac{13 * 5,303.3A}{0.06091m^2} = 1.131 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$	Densidad de corriente para los segmentos de la bobina de baja tensión

<b>Tabla 6.4</b> Cálculos de los segmentos de la bobina de alta tensión	
Cálculo	Descripción
$I_A = \frac{\sqrt{2} * 180MVA}{\sqrt{3} * 149.076kV} * \frac{1}{2} = 492.9A$	Se tienen dos bobinas en paralelo por lo que la corriente también se divide en dos
$N_2 = N_4 = N_5 = N_7 = 141$ $N_3 = N_6 = 30$	La bobina de alta tensión consiste en dos bobinas en paralelo, como se muestra en la figura 6.1.
Área $A_2 = 0.1488m * 0.4912612m = 0.0731m^2$ $A_2 = A_4 = A_5 = A_7$ Área $A_3 = 0.1488m * 0.10599m = 0.0157m^2$ $A_3 = A_6$	Área de los segmentos de la bobina de alta tensión, figura 6.2 y 6.3.
$J_2 = \frac{141 * 492.934A}{0.0731m^2} = 950,803 \frac{A}{m^2}$ $J_2 = J_4 = J_5 = J_7$ $J_3 = \frac{30 * 492.934A}{0.015771m^2} = 937,731 \frac{A}{m^2}$ $J_3 = J_6$	Densidad de corriente para la mitad de la bobina de alta tensión

En la figura 6.5 se ilustra la conexión de las bobinas del transformador. El lado de alta cuenta con una sección de bobinas en derivación, pero en la simulación se toman como un segmento más en la bobina con el respectivo número total de vueltas. Para el cálculo de las corrientes de corto circuito se utilizó un factor de 22.4 veces la corriente nominal.



**Figura 6.5.** Descripción de las bobinas de alta y baja tensión con el número de vueltas y la conexión de una de las fases con punta al centro.



---

*La persona que no fracasa, no triunfará  
verdaderamente.*  
**Thomas A. Edison**

## CAPÍTULO 2

### DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

---

## 2.0 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las bobinas del transformador, junto con todas las partes que las soportan, constituyen un sistema mecánico que está sujeto a desplazamientos y esfuerzos generados por las fuerzas que se producen por la interacción de las corrientes y los flujos de dispersión. Las fuerzas que ejercen las corrientes que circulan por las bobinas de un transformador pueden llegar a ser tan altas que lograrían provocar daños permanentes en las bobinas. Para evitar fallas que afecten la vida del equipo, es muy importante evaluar las fuerzas y diseñar arreglos mecánicos que las soporten.

La máxima fuerza aplicada a las bobinas ocurre en la cresta del primer medio ciclo de la corriente de corto circuito, antes de que el material tenga el tiempo suficiente para calentarse. La mayor parte de las fallas que existen son las fallas de línea a tierra, de línea a línea y fallas trifásicas. A pesar que las fallas trifásicas son las de menor ocurrencia, son las que generan mayores esfuerzos de corto circuito y por lo regular los transformadores son diseñados para soportar este tipo de fallas en sus terminales.

Las fuerzas que aparecen en las bobinas de un transformador eléctrico se pueden calcular con herramientas computacionales como el producto FLD5 Transformer Leakage Flux [1], desarrollado por el Dr. O. W. Andersen en la década de los 70s.

Actualmente se cuenta con productos computacionales que permiten analizar los campos electromagnéticos y fuerzas por medio de modelos de dos o tres dimensiones. Un ejemplo de estas herramientas es el paquete Maxwell de la compañía ANSOFT [5].

El trabajo de esta investigación consiste en evaluar y comparar las fuerzas de corto circuito calculadas por los paquetes FLD5 y Maxwell. Los resultados se verificarán con la experiencia y cálculos analíticos.

El objetivo de esta tesis consiste en identificar las diferencias y mejoras que existen, en el estudio de fuerzas de corto circuito en transformadores de potencia, entre herramientas computacionales de diferente generación como los productos FLD5 y Maxwell.

---

*Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.*  
**Albert Einstein**

## CAPÍTULO 7

### VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

---

## 7.0 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los programas son analizados para interpretar tanto sus diferencias como similitudes y capacidad. Sin embargo, estos resultados deben de ser calculados de forma analítica para tener un cálculo aproximado de las magnitudes de densidades y fuerzas que se presentan en el transformador.

Este capítulo se divide en análisis en condiciones de corriente nominal, corriente de corto circuito para el cálculo de fuerzas electromagnéticas radiales en bobinas concéntricas.

### 7.1 SOLUCIÓN TEÓRICA A CORRIENTE NOMINAL

La serie de pasos a seguir para calcular las fuerzas es obtener la corriente que circula en el conductor con sus respectivas vueltas e integrarla para obtener la intensidad de campo magnético. Suponemos que en la parte central del transformador tenemos una distribución de campo magnético uniforme a lo largo del eje radial. Esta intensidad varía en forma creciente conforme integramos una mayor cantidad de corriente. Al encerrar la corriente del lado secundario del transformador esta intensidad va disminuyendo pues la corriente que ahora se encierra va en sentido contrario al sentido de la corriente del lado primario.

De esta misma forma cambia la magnitud de la fuerza a lo largo del eje radial. Conforme se encierra mayor corriente mayor fuerza se acumula a lo largo del eje radial. [3, 7, 10]

Para calcular la corriente encerrada en una de las bobinas aplicamos la ley de Ampère.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I_{\text{encerrada}} \quad 7-1$$

El diferencial de longitud en el área encerrada:

$$d\mathbf{L} = \Delta r \mathbf{a}_r + \Delta z \mathbf{a}_z - \Delta r \mathbf{a}_r - \Delta z \mathbf{a}_z \quad 7-2$$

Las componentes radiales son perpendiculares por lo que el resultado del producto punto es cero. La única componente es en el eje “z”

$$\mathbf{H} = H \mathbf{a}_z \quad 7-3$$

$$\mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = H \Delta z \quad 7-4$$

$$\text{Área} = \Delta r \Delta z \quad 7-5$$

En bobinas concéntricas, la componente axial del flujo de dispersión genera una fuerza radial que causa que las bobinas se deformen de forma radial.

Tenemos que la densidad de corriente es  $J$  y la ecuación se simplifica a:

$$H_z \Delta z = J_x \Delta r \Delta z \quad 7-6$$

Tenemos los datos de las bobinas en cuanto a densidad de corriente y dimensiones, tabla 6.3 y 6.4.

$$J_{1-1} = 1.086 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$$

$$\Delta r = 0.124m$$

Ya que tenemos toda la densidad de corriente al dar un valor de 0.124m a  $\Delta r$  entonces tenemos un valor máximo de intensidad de campo magnético:

$$H_{1-1(z \max)} = 1.086 \times 10^6 * 0.124 = 134,664 \frac{A}{m}$$

La constante  $\mu_0$  es la permeabilidad en el espacio es:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$$

Por lo que tenemos un máximo de densidad de flujo:

$$B_{1-1(z \max)} = \mu_0 H_z = \left( 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \right) \left( 139,327 \frac{A}{m} \right) \quad 7-7$$

$$B_{1-1(z \max)} = 0.16922T$$

La distribución de la densidad de flujo a lo largo de la bobina es de forma lineal. Con las consideraciones de distribución de corriente uniforme.

La pendiente de la recta:

$$m = \frac{0.16922 - 0}{0.6269 - 0.5029} = 1.36471$$

Por lo que la ecuación de densidad de flujo en dirección radial de la bobina:

$$B_{1-1(z)}(r) = 1.36471(r - 0.5029) = 1.3647r - 0.686312T \quad 7-8$$

Los esfuerzos producidos por los componentes radiales de las fuerzas magnéticas (fuerzas que actúan en ángulos rectos con respecto al eje de la pierna del núcleo) son distintos de aquellos producidos por los componentes paralelos al eje. [6]

La fuerza que se genera en la bobina del transformador en forma radial es:

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B} \quad 7-9$$

$$d\mathbf{F} = dI(d\mathbf{L} \times \mathbf{B}) \quad 7-10$$

El diferencial de corriente y de longitud radial del conductor:

$$dI = J\Delta r\Delta z \quad 7-11$$

$$d\mathbf{L} = r d\theta \quad 7-12$$

Cuando calculamos fuerzas tenemos en cuenta lo siguiente:

- La corriente de magnetización del transformador es despreciable.
- La bobina primaria y secundaria tienen el mismo número de ampere-vueltas.
- Todas las fuerzas son proporcionales al cuadrado de la corriente.

El diferencial de longitud es perpendicular al vector de densidad de flujo. Por lo que un diferencial de fuerza esta compuesta por un diferencial de corriente, un diferencial de longitud y una densidad de flujo magnético.

$$dF_{1-1} = (Jdrdz)(rd\theta)(1.3647r - 0.686312) \quad 7-13$$

$$\int dF_{1-1} = \iiint Jr(1.3647r - 0.686312) dz d\theta dr$$

Para toda la bobina de baja tensión se aplica los límites siguientes:

$$F_{1-1} = J \int_{z=0.1427m}^{z=2.3505m} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{r=0.5029m}^{r=0.6269m} (1.3647r^2 - 0.68631r) dz d\theta dr \quad 7-14$$

$$F_{1-1} = J(0.5118m)(2\pi) \left[ \frac{1.3647r^3}{3} - \frac{0.68631r^2}{2} \right]_{r=0.5029m}^{r=0.6269m}$$

Si el cálculo anterior lo evaluamos dentro de sus límites tenemos que la fuerza total de:

$$F_{1-1} = 21,456.5N$$

Si la ecuación anterior la evaluamos de 0 a 1 metro en el eje “z” tendremos la distribución de la fuerza por unidad de longitud distribuida a lo largo de la bobina, por lo que:

$$F = J(2\pi) \left[ \frac{1.41196r^3}{3} - \frac{0.710075r^2}{2} \right]_{r=0.5029m}^{r=0.6269m} = 41,920.3 \frac{N}{m} \quad 7-15$$

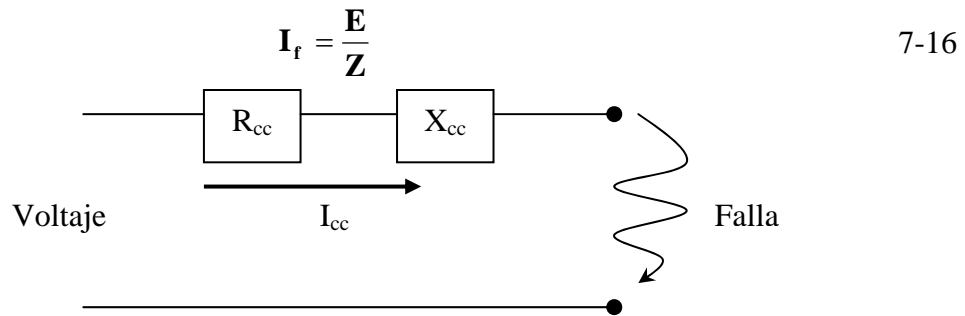
Se realizaron los mismos cálculos para los demás segmentos bobina de baja y de alta tensión, generando la tabla 7.1.

<b>Tabla 7.1:</b> Solución teórica de fuerzas radiales en el transformador para corriente nominal					
<b>Segmento</b>	<b>1-1, 1-6</b>	<b>1-2, 1-5</b>	<b>1-3, 1-4</b>	<b>2, 4, 5, 7</b>	<b>3, 6</b>
$J_x \times 10^6 \frac{A}{m^2}$	1.123	1.210	1.131	0.950	0.937
$\Delta r$ m	0.124	0.124	0.124	0.1488	.1488
$H_{z \max} \frac{A}{m}$	139,327	150,040	140,244	141,479	139,534
$B_{z \max} T$	0.1750	0.1885	0.1762	0.1777	0.1753
m (pendiente)	1.41196	1.5205	1.42126	-1.19401	-1.1776
$B_z(r)$	1.364r-0.686	1.52r-0.764	1.421r-0.714	-1.194r+0.976	-1.177r+0.963
F $\times 10^3 N$	21.456	5.516	22.337	27.914	5.858

## 7.2 SOLUCIÓN TEÓRICA EN CONDICIONES DE CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

La corriente de corto circuito siempre es más elevada y puede provocar grandes averías en el transformador por efectos térmicos y electrodinámicos. Cuando se producen estas corrientes los factores que se oponen a las corrientes son la resistencia y la reactancia de cortocircuito. Los requerimientos de corto circuito para los transformadores de distribución y de potencia están especificados en la sección 7 del estándar Std. C57.12.00-2000 de la IEEE.

El cálculo de la corriente de cortocircuito se calcula como la corriente de falla  $I_f$ , dada por:



**Figura 7.1** Circuito simplificado de un transformador monofásico en corto circuito

En la figura 7.1 se muestra la resistencia y la reactancia de corto circuito para un transformador.

Si suponemos condiciones de corto circuito. Aplicamos una corriente 22.4 veces la nominal. [3, 7, 10]

Si:

$$I_{cc} = 22.4 I_{pico} = 22.4 * 5,303.3A = 118,794A \quad 7-17$$

$$J_{1-1(xcc)} = \frac{13 * 118,794A}{0.06347m^2} = 24.3 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$$

$$H_{1-1(z max cc)} = J_x \Delta r = 3.01 \times 10^6 \frac{A}{m}$$

$$B_{1-1(z max cc)} = 3.78T$$



La pendiente de la recta con dos puntos:

$$m = \frac{3.78 - 0}{0.6269 - 0.5029} = 30.48$$

$$B_{1-1(zcc)}(r) = 30.48r - 15.329 \text{ T}$$

$$F_{1-1(cc)} = (24.3 \times 10^6) (0.51184 \text{ m}) (2\pi) \left[ \frac{30.48r^3}{3} - \frac{15.329r^2}{2} \right]_{r_{\min}}^{r_{\max}}$$

Con los límites de  $r_{\min} = 0.5029$  y  $r_{\max} = 0.6269$  tenemos una fuerza total de:

$$F_{1-1(cc)} = 10.7 \times 10^6 \text{ N}$$

Calculando la fuerza por unidad de longitud tenemos que esta distribuida a lo largo de la bobina de 0 a 1 m en el eje z:

$$F_{1-1(cc)} = 20.94 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Los resultados para los demás segmentos del transformador se presentan en la tabla 7.2 para el cálculo de las fuerzas radiales.

<b>Tabla 7.2:</b> Solución teórica de fuerzas radiales en el transformador en condiciones de corto circuito					
<b>Segmento</b>	<b>1-1, 1-6</b>	<b>1-2, 1-5</b>	<b>1-3, 1-4</b>	<b>2, 4, 5, 7</b>	<b>3, 6</b>
$J_{xcc} \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$	24.3	27.1	25.3	21.3	20.9
$\Delta r \text{ m}$	0.124	0.124	0.124	0.1488	.1488
$H_{z \max} \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$	3.01	3.36	3.14	3.17	3.14
$B_{z \max} \text{ T}$	3.78	4.22	3.95	3.98	3.92
<b>m (pendiente)</b>	30.48	34.0	31.85	-26.77	-26.37
$B_z(r)$	30.48r-15.32	34.03r-21.3	31.85r-19.94	-26.77r+21.89	-26.37r+21.57
$F_{cc} \times 10^6 \text{ N}$	10.7	2.52	10.28	14.01	2.93

---

*Es difícil aprenderlo, pero es más duro ignorarlo.*  
**C. Stevens**

## CAPÍTULO 3

## MARCO TEÓRICO

---

### 3.0 MARCO TEÓRICO

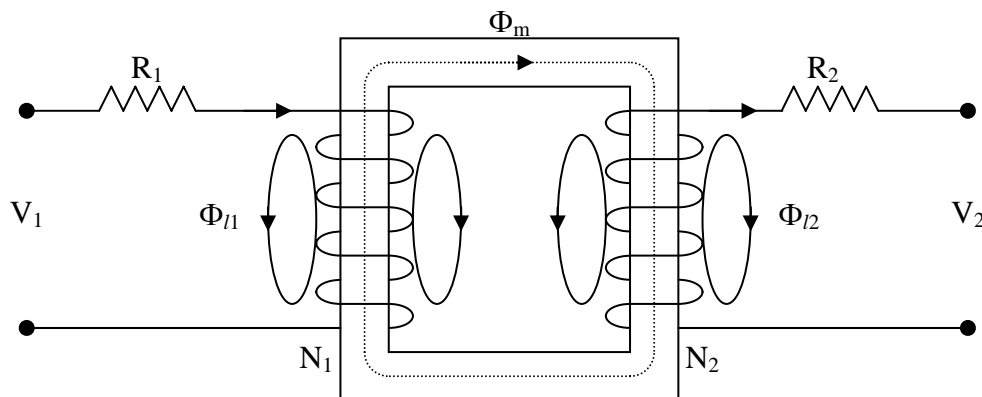
Los transformadores son comúnmente clasificados como transformadores de potencia o transformadores de distribución según a la aplicación en las estaciones y subestaciones generadoras de potencia, o en las redes de distribución de energía. Los transformadores de distribución tienen una potencia de hasta 500 kVA. Los grandes transformadores tienen valores arriba de los 500 kVA. [3]

Para el diseño de transformadores es necesario emprender una documentación de sus aplicaciones y especificaciones por lo que tenemos que tomar en cuenta lo siguiente:

- Los valores nominales de kilovolt-amperes o megavolt-amperes.
- Número de fases
- Frecuencia
- Valores nominales de voltaje
- Derivaciones de voltaje
- Tipo de conexión de sus bobinas, delta o estrella.
- Impedancia (valor base)
- Nivel básico de aislamiento de impulso (Basic impulse insulation level BIL)
- Elevación de temperatura

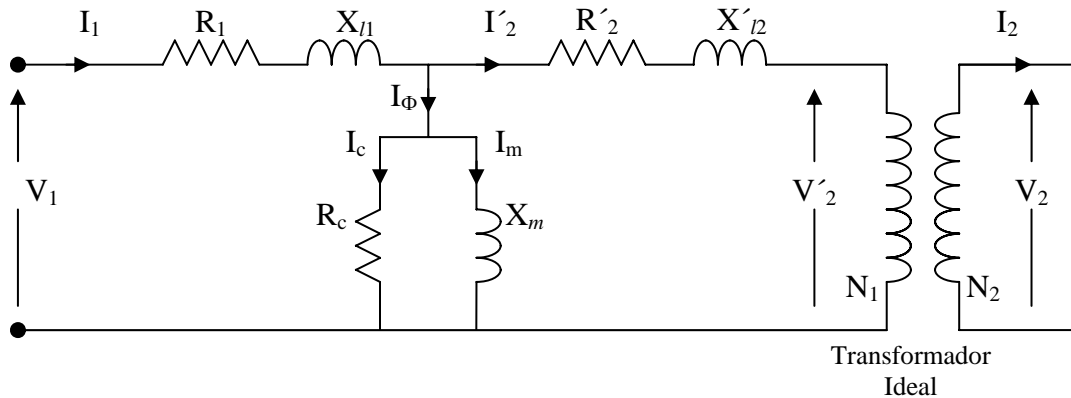
En la práctica las bobinas del transformador tienen resistencia, no enlazan la misma cantidad de flujo magnético, la permeabilidad del material ferromagnético es finita y existen pérdidas en el núcleo. Es por ello que en el estudio de transformadores estas características deben de ser consideradas. [3, 13]

Los conductores del transformador tienen resistencia y se muestran como un elemento en serie con la bobina,  $R_1$  y  $R_2$ , figura 3.1. Cuando las corrientes circulan en ambas bobinas del transformador se establece, como resultado de ambas corrientes, un flujo mutuo o común que se concentra principalmente en el núcleo,  $\Phi_m$ . Sin embargo, existe una cantidad de flujo conocido como flujo de dispersión el cual sólo enlaza una de las bobinas,  $\Phi_{l1}$  y  $\Phi_{l2}$ . El medio de permeabilidad del flujo de dispersión es el aire y los efectos son modelados por una inductancia de flujo de dispersión,  $X_{l1}$  y  $X'_{l2}$ . [4]



**Figura 3.1:** Elementos resistivos, flujo de dispersión y mutuo en un transformador monofásico

El núcleo magnético tiene una permeabilidad finita y se requiere de una corriente de magnetización para establecer flujo magnético en el núcleo,  $I_m$ , figura 3.2. Las pérdidas que se generan en el material son representadas por una resistencia,  $R_c$ . Si tomamos en cuenta todos estos valores resistivos e inductivos junto con un transformador ideal, se tiene un modelo práctico equivalente que representa el comportamiento de un transformador real. Los valores de  $R'_2$ ,  $X'_{l2}$ ,  $I'_2$  y  $V'_2$  son los valores del transformador del lado secundario referidos al lado primario.



**Figura 3.2:** Modelo de un transformador monofásico con los elementos resistivos, inductivos y valores de voltaje referidos al lado primario

Los elementos a sobresalir en este modelo son las inductancias, ya que son los que almacenan la energía en forma campo magnético. El flujo magnético pasa a través de las bobinas y, dado que circula una corriente en los conductores, se generan fuerzas axiales y radiales en las bobinas. Las fuerzas provocan esfuerzos en los conductores, soportes y demás elementos del transformador.

Estas fuerzas que existen en el transformador durante la operación del transformador en estado estable y en condiciones de corto circuito pueden ser tan altas que podrían provocar daños permanentes en el transformador. Cabe señalar que la densidad de campo magnético es un vector que tiene distintas direcciones a lo largo del núcleo, consecuencia es que las fuerzas generadas sean compuestas por vectores radiales y axiales. [3]

La teoría desarrollada al estudio de fuerzas radiales y axiales en el transformador se presenta en la literatura de forma separada ya que estas dos componentes generan esfuerzos de distintos tipos. [6]

### 3.1 DESCRIPCION DEL FLUJO DE DISPERSION

Los principios fundamentales de la teoría de transformadores se basan en los voltajes de alterna instantáneos aplicados a sus terminales, las corrientes, las resistencias efectivas y los encadenamientos de flujo; así como los voltajes inducidos por la variación de los encadenamientos de flujo. El funcionamiento del transformador depende de la variación en el tiempo del flujo magnético. Su característica principal es el aislamiento galvánico entre dos circuitos eléctricos al mismo tiempo que mantiene la continuidad en el flujo de corriente en ambos. [3]

El flujo magnético mutuo es producido por la acción combinada del flujo de la corriente primaria y secundaria en los conductores. En un análisis simplificado de un transformador de dos bobinas con núcleo de hierro se asume que el flujo mutuo se encuentra confinado en el núcleo. También existe un flujo que no se encuentra confinado totalmente en el núcleo, llamado flujo de dispersión, el cual no cierra el circuito magnético dentro de todos los conductores de corriente y recorrer sólo una parte del núcleo. Lo que indica que en algunas partes del material ferromagnético entran y salen líneas de flujo provocando un aumento o disminución en la densidad de flujo. Esto se puede observar con la línea de flujo 1 y 3 de la figura 3.3, en donde no encierran todas las vueltas de la bobina.

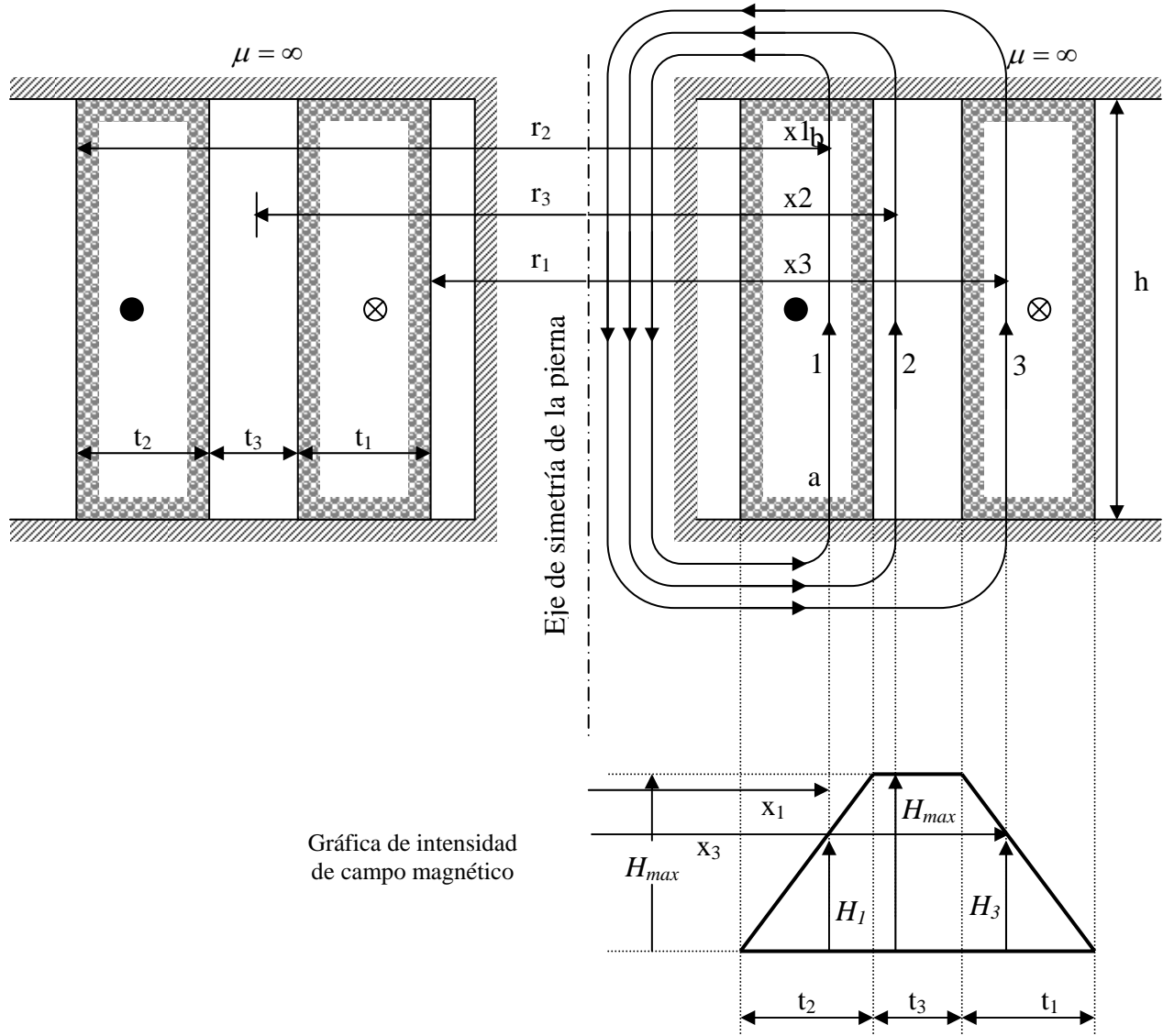
De lo anterior se observa que no todas las líneas de flujo magnético se aprovechan para la producción de una fuerza electromotriz, ya que algunas líneas se cierran sin cortar las espiras de las bobinas. Es por ello que se considera una reactancia inductiva que produzca una caída de tensión equivalente a la de voltaje que ocasiona la dispersión magnética.

A pesar del efecto de estas cargas inductivas, la reactancia equivalente en el transformador tiene el efecto de limitar las corrientes que resultan de corto circuito en los sistemas de potencia que son las que generan las fuerzas electromagnéticas en las bobinas dañando así los transformadores. [7,8]

En la figura 3.1 se muestra de forma sencilla el flujo magnético mutuo,  $\Phi_m$ , y el flujo de dispersión  $\Phi_{l1}$  y  $\Phi_{l2}$ . En la figura 3.3 se indica, de forma más descriptiva, la sección transversal de las bobinas de un transformador con bobinas primaria y secundaria concéntricas. Observe el flujo de dispersión entre ellas producidos por los ampere-vueltas, línea de flujo 2.

Dado que la permeabilidad del aire es constante ( $\mu_r = 1$ ), la fuerza magnetomotriz entre las bobinas es constante, a lo largo de la línea  $ab$ . La intensidad de campo magnético crece linealmente desde cero, en el radio interior de la bobina, hasta un valor máximo en el radio exterior [7]. El espacio de aislamiento dentro de las bobinas recorre la línea de flujo 2, la cual envuelve una de las bobinas. En esta región la intensidad de campo es constante e independiente de la distancia radial pues no se encierra más corriente.

En el espacio ocupado por las vueltas del secundario la intensidad de campo magnético disminuye de manera uniforme hasta envolver totalmente la corriente y disminuir la intensidad de campo a un valor mínimo.



**Figura 3.3:** Sección transversal de un transformador con bobina primaria y secundaria.

En la figura 3.3 se ilustran las líneas de flujo 1, 2 y 3; así como también la gráfica de intensidad de campo magnético,  $H$ , a lo largo de las bobinas. Observe como crece de forma lineal hasta llegar un valor máximo, para luego mantenerse constante en el espacio entre las bobinas y decrece de forma lineal hasta los conductores mas alejados del núcleo.

### 3.2 FUERZAS PRODUCIDAS POR CAMPOS MAGNÉTICOS

Los campos eléctricos y magnéticos son fundamentalmente campos que se originan a partir de cargas eléctricas. Si un campo se llama eléctrico, magnético o electromagnético, se debe al estado de movimiento de las cargas eléctricas con relación al punto en que se hacen las observaciones del campo. Las cargas eléctricas en reposo, con respecto a un punto en observación, dan lugar a un campo electrostático (independiente del tiempo). El movimiento relativo de las cargas proporciona un campo de fuerzas adicional llamado magnético. Este campo agregado es el magnetostático, si las fuerzas se mueven a velocidades constantes con relación al punto de observación. Por otro lado, se les llama campos electromagnéticos a los movimientos acelerados que producen campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo. [9, 10]

La relación de los campos eléctricos y magnéticos con su carga y fuentes de corriente la proporciona un conjunto de relaciones, conocidas como ecuaciones de Maxwell, las cuales se atribuyen al estudio de muchos científicos y estudiosos de su tiempo, pero en las que él trabajó arduamente.

### 3.3 TEORÍA PARA EL ANÁLISIS MAGNETOSTÁTICO

En la aplicación de la teoría electromagnética el investigador se encuentra con el estudio de la magnitud y distribución de la densidad de flujo magnético,  $\mathbf{B}$ , junto con las cantidades relacionadas como la intensidad de campo magnético,  $\mathbf{H}$ , y los encadenamientos de flujo,  $\phi$ . Un enfoque para determinar los campos magnéticos estáticos es utilizar un campo de potencial auxiliar. En la mayoría de los métodos computacionales son resueltos en términos de potenciales, que en la mayoría de los casos son cantidades escalares. [10, 11]

Los potenciales utilizados por lo regular son:

1. Potenciales escalares magnéticos,  $\Omega$ : Este potencial es expresado en términos de ampere-vueltas y puede ser mejor reconocido como fuerza magnetomotriz. Es una cantidad escalar y su analogía eléctrica es el voltaje
2. Potenciales vectoriales magnéticos,  $\mathbf{A}$ : El potencial tiene dimensiones  $Wb/m$  de longitud en la dirección del vector de potencial considerado, y la componente de corriente que la produce. Es una medición de flujo. En tres dimensiones es una cantidad vectorial que convenientemente se reduce a escalar en dos dimensiones

### Escalar de potencial magnético, $\Omega$

La región de interés no contiene conductores de corriente, la fuerza magnetomotriz,  $\mathbf{H}$ , es relacionado con el potencial magnético,  $\Omega$ , esto es:

$$\mathbf{H} = -\text{grad } \Omega \quad 3-1$$

El gradiente de un escalar es un vector y el símbolo negativo indica una analogía de potencial eléctrico.

Al considerar las variaciones de  $\mathbf{H}$  y  $\mathbf{B}$  en las direcciones  $x$  y  $y$  tenemos:

$$\begin{aligned} H_x &= -\frac{\partial \Omega}{\partial x}, & B_x &= -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \Omega}{\partial x} \\ H_y &= -\frac{\partial \Omega}{\partial y}, & B_y &= -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \Omega}{\partial y} \end{aligned} \quad 3-2$$

Para un campo magnético que no varía en el tiempo, el rotacional de  $\mathbf{H}$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \mathbf{a}_x + \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \mathbf{a}_y + \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \mathbf{a}_z = \mathbf{J} \quad 3-3$$

Por lo tanto, dado que no tenemos conductores de corriente encerrados:

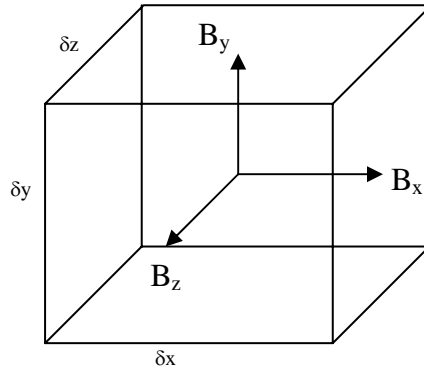
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \nabla \times (-\nabla \Omega) \quad 3-4$$

Lo que significa que el rotacional del gradiente de cualquier escalar es igual a cero.

Por lo tanto, si  $\mathbf{H}$  está definido como el gradiente de un potencial escalar magnético, entonces la densidad de corriente a través de la región definida por el potencial es cero. En otras palabras, dado que muchos problemas magnéticos relacionan geometrías en donde los conductores de corriente ocupan una pequeña región en comparación con el total, entonces es evidente utilizar un potencial magnético escalar. [1, 3, 9, 10, 11]



Si tenemos que el flujo magnético es continuo, esto es que no existe una pérdida o ganancia neta en un bloque elemental de dimensiones  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$ ; por lo que la divergencia de  $\mathbf{B}$  es cero, figura 3.4. Por lo tanto:



**Figura 3.4:** Bloque elemental por donde pasa un flujo magnético continuo.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad 3-5$$

$$\mu_0 \nabla \cdot (-\Omega) = 0$$

Substituyendo la ecuación 3-2 de variación de  $\mathbf{H}$  y de  $\mathbf{B}$  tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_0 \mu_r \frac{\partial \Omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \mu_r \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \mu_r \frac{\partial \Omega}{\partial z} \right) = 0 \quad 3-6$$

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} = 0$$

$$\nabla^2 \Omega = 0 \quad (\mathbf{J} = 0) \quad 3-7$$

En donde  $\mu_r$  es una constante, esta ecuación es llamada ecuación de Laplace.

### Vector de potencial magnético, $\mathbf{A}$

Es aplicado en regiones en donde la densidad de corriente tiene un valor o no de cero. Una corriente en la dirección de  $z$  produce solamente el componente  $A_z$ , y las componentes  $x$  y  $y$  de  $\mathbf{B}$ . Por lo tanto es la componente del flujo circulante en el plano  $xy$ , por unidad de longitud en la dirección  $z$ ; sus unidades son webers por metro de longitud. Al seleccionar un vector de potencial magnético se indica que:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 3-8$$

Se indica que la identidad vectorial

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0$$

Que es la divergencia del rotacional de cualquier campo vectorial es cero. Por lo tanto seleccionamos que la densidad de flujo está dada por:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad 3-9$$

Satisfacemos así la condición que indica a la densidad de flujo con divergencia cero. La intensidad de campo magnético es por lo tanto:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \quad 3-10$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{\mu_0} [\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}]$$

Dado que la operación del rotacional implica una diferenciación con respecto a la longitud, las dimensiones de  $\mathbf{A}$  son  $Wb/m$ . De manera más general,  $\mathbf{B} = \text{curl} \mathbf{A}$  (dado que la divergencia de  $\mathbf{B}$  es cero), por lo que:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ B_y &= \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ B_z &= \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad 3-11$$

En donde el curl  $\mathbf{H}=\mathbf{J}$ , esto es:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= J_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= J_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= J_z\end{aligned}\tag{3-12}$$

Utilizando  $\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H}$  y sustituyendo en las ecuaciones anteriores tenemos que:

$$\text{curl}\left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\text{curl}\mathbf{A}\right) = \mathbf{J}\tag{3-13}$$

El valor del vector de potencial magnético en tres dimensiones en casos magnetostáticos es algo limitado, en parte porque las tres componentes de  $\mathbf{A}$  tienen que ser evaluadas y se complica al tener que aplicar las condiciones de frontera.

Sin embargo, los vectores de potencial magnético son muy bien aplicados en dos dimensiones al manejar áreas que contienen las corrientes. Con la densidad de corriente  $J_z$ , por lo tanto  $A_z$  solamente, sin la variación de estas cantidades en la dirección de  $z$ .

$$\begin{aligned}B_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y}, & B_y &= \frac{-\partial A_z}{\partial x}\end{aligned}\tag{3-14}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -J_z$$

Para un valor fijo de  $\mu_r$ :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu_0\mu_r J_z\tag{3-15}$$

Que es la ecuación de Poisson. Observe que los componentes del vector de densidad de flujo,  $\mathbf{B}$ , dependen sólo de las componentes de los gradientes del vector de potencial,  $\mathbf{A}$ , y no directamente de la magnitud de  $\mathbf{A}$ . [1, 3, 9, 10, 11]

### 3.4 CONDICIONES DE FRONTERA Y DE CONTINUIDAD

Los problemas necesitan tener una región de solución en la cual se especifican las condiciones del campo magnético en la frontera de las superficies que limitan tal región. Para el escalar y el vector de potencial magnético tenemos las siguientes condiciones.

Escalar de potencial magnético:

1. Superficie de permeabilidad infinita: No se tiene variación del potencial sobre la superficie y por lo tanto puede ser definido con un escalar magnético equipotencial.
2. Flujo paralelo a la superficie: Si la superficie tiene solo flujo en paralelo (problemas simétricos) entonces los equipotenciales intersectan la superficie en ángulos rectos, esto es que  $\partial\Omega/\partial n = 0$  en la superficie. [11]

Vector de potencial magnético:

1. Superficie de permeabilidad infinita: Las líneas de flujo entran en la superficie permeable en ángulos rectos (la superficie es un escalar de potencial magnético). Las líneas de potencial vectorial magnético constante son líneas de flujo,  $\partial A/\partial n = 0$  en la superficie.
2. Líneas de flujo paralelo a la superficie: Si se tiene una superficie con sólo esta característica, la superficie tendrá un vector constante de potencial magnético. [11]

### 3.5 DESCRIPCIÓN DE FUERZAS EN EL TRANSFORMADOR

En el estudio de los fenómenos eléctricos tenemos que las cargas estacionarias producen un campo eléctrico. Si estas cargas están en movimiento con una cierta velocidad, el fenómeno del magnetismo se presenta. Por lo tanto, un campo magnético es asociado con las cargas en movimiento, y las fuentes de campo magnético son las corrientes variables en el tiempo que circulan en las bobinas del transformador.

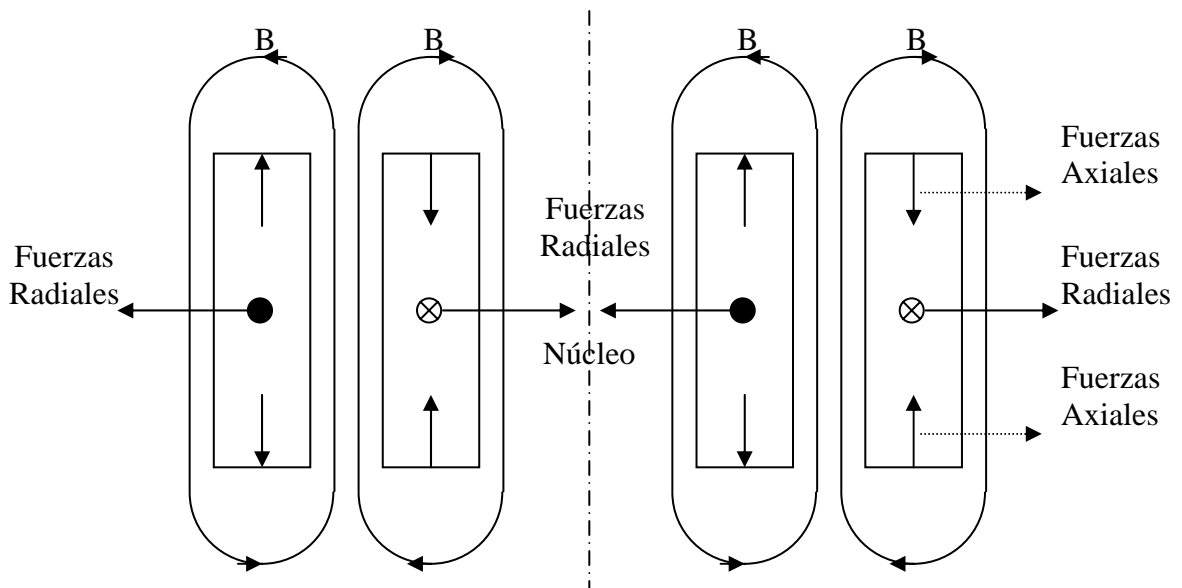
Si despreciamos las caídas de voltaje en el transformador, la fuerza electromotriz ( $Fem$ ) es igual al voltaje aplicado en las terminales. Bajo estas condiciones si un voltaje sinusoidal se aplica a la bobina, un flujo sinusoidal también es aplicado en el núcleo. El flujo generado que pasa entre las bobinas y las corrientes circulantes a través de ellas, producen fuerzas que tienden a separarlas entre sí, de este modo se genera una presión en dirección radial hacia fuera de la bobina exterior y una presión hacia el eje axial en la bobina interior. Si las bobinas están posicionadas de tal forma que sus centros electromagnéticos coinciden las bobinas están sujetas a fuerzas balanceadas que no generan desplazamiento neto en dirección axial. [4, 6]

Se tiene varias configuraciones de fuerzas de repulsión derivadas de:

- Centros electromagnéticos coincidentes.
- Centros electromagnéticos no coincidentes.

Los esfuerzos producidos por los componentes radiales de las fuerzas magnéticas (fuerzas que actúan en ángulos rectos con respecto al eje del núcleo) son distintos de aquellos producidos por los componentes paralelos al eje.[6]

Las fuerzas electromagnéticas radiales son producidas por el flujo axial. Se generan esfuerzos de tensión en la bobina exterior y de compresión en la bobina interior. Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Bobinas concéntricas con centros magnéticos alineados. En ellos se indica de manera general la dirección de las fuerzas.

### Fuerzas Radiales

Por lo regular se resuelven las fuerzas de corto circuito en componentes de fuerza radial generadas por la densidad de flujo axial y, de forma separada, resolver las fuerzas axiales derivadas de la densidad radial y por desplazamientos entre los centros electromagnéticos.

Las componentes radiales de las fuerzas en un transformador con bobinas concéntricas, a lo largo de todo el eje axial, tienen una distribución de intensidad de campo magnético como en la gráfica de la intensidad de campo magnético de la figura 3.3. Las fuerzas radiales son menores en los extremos de las bobinas que en el centro, lo anterior por la curvatura que sufre el flujo magnético, pero la distribución de fuerza por unidad de longitud es aproximadamente uniforme en toda la bobina debido a que el flujo axial es también uniforme a lo largo de las bobinas. [3]

---

*El arte de fijarse metas a largo plazo sin  
sentirse cansado  
Napoleón*

## CAPÍTULO 8

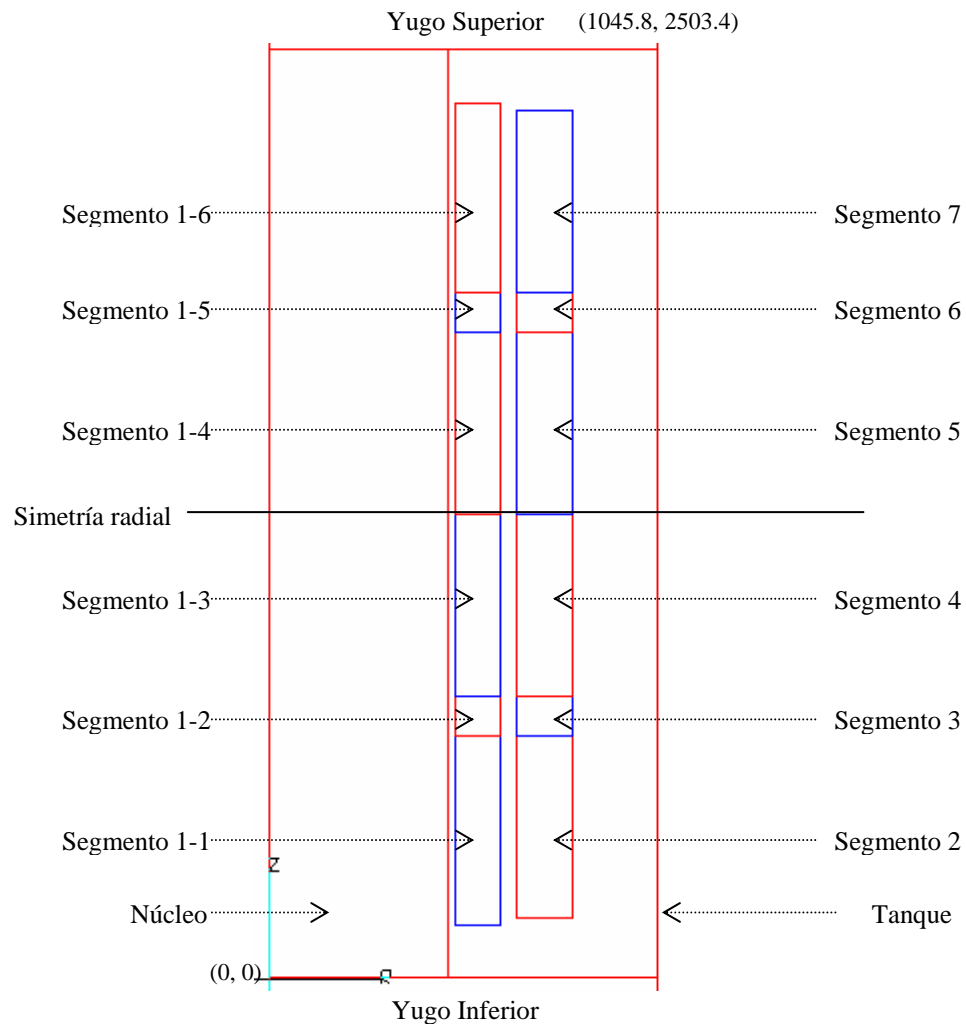
### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

### 8.0 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron y compararon los resultados que se obtienen en el cálculo de las fuerzas que experimentan los devanados de un transformador típico, tanto a corriente nominal como de corto circuito, utilizando herramientas computacionales de diferente generación. Las herramientas computacionales son: FLD5 y Maxwell 2D. El ejemplo que se tomó fue el proporcionado por una compañía que se dedica a fabricar transformadores y las características del aparato están descritas en la sección 6.0.

En la figura 8.1 se muestra el arreglo que se estudió. Se indica donde está localizado el núcleo, la bobina de baja tensión, enmarcada con el segmento uno, y la bobina de alta tensión, dividida en los segmentos 2, 3, 4, 5, 6 y 7. La bobina de baja tensión se dividió en seis subsegmentos para observar las fuerzas a lo largo de la misma, numerados como 1-1, 1-2 hasta 1-6. El primer número de esta nomenclatura indica que pertenecen a la bobina de baja tensión y el segundo número indica el subsegmento de la bobina de baja tensión. La razón de dividirla



**Figura 8.1:** Geometría del transformador para el estudio de fuerzas a corriente nominal y de corto circuito

de esta forma es tener el mismo número de resultados que el lado de alta. Las alturas axiales de los subsegmentos 1-2, 1-3, 1-4 y 1-5 son iguales a las de los segmentos 3, 4, 5 y 6 del lado de alta tensión, respectivamente. Los segmentos 1-1 y 1-6 tienen de límite inferior y superior los valores extremos de sus dimensiones originales, tal como se encuentran en la figura 6.2. La bobina de alta tensión está diseñada con la punta de alta tensión al centro.

Para facilitar la comparación de las fuerzas se decidió utilizar la misma geometría y condiciones de corriente en ambos programas. Se simuló el caso de geometría axial con el eje “z” como referencia. En la figura 8.1 se indica la simetría del modelo, por lo que los centros electromagnéticos de las bobinas no tienen un desfaseamiento. Esta misma geometría se utilizó en los estudios que se comentan en el capítulo 7.

Como referencia de resultados, se aplicó la teoría electromagnética, descrita en el capítulo 7, para calcular sólo las fuerzas radiales. Las fuerzas axiales no se calcularon analíticamente debido a la complejidad de evaluar las componentes radiales de la densidad de flujo magnético.

Se realizaron dos tipos de simulaciones:

Simulación A) Primera simulación a corriente nominal en el transformador con distancias iguales al tanque y sin desfaseamiento entre los centros electromagnéticos de las bobinas.

Simulación B) Segunda simulación en condiciones de corto circuito con distancias iguales al tanque y sin desfaseamiento entre los centros electromagnéticos de las bobinas.

## 8.1 SIMULACION A CORRIENTE NOMINAL

En la tabla 8.1 se presentan los resultados del análisis de fuerzas radiales al aplicar corriente nominal a la bobina de baja tensión con seis segmentos y los correspondientes a los de alta tensión, como se muestra en el modelo de la figura 8.1. Los resultados de las simulaciones de los programas FLD5 y Maxwell 2D son la sumatoria de fuerzas en cada segmento. En la primera columna se muestra los segmentos de cada parte de la bobina. En la segunda columna se lista el dato de entrada de la densidad de corriente aplicada a cada segmento en el modelo. Las columnas 3, 4 y 5 indican la fuerza radial total que aparece en cada segmento dependiendo de la herramienta con la que se calcula.

Los resultados de fuerzas radiales obtenidas por medio de las herramientas computacionales, son similares a las fuerzas obtenidas analíticamente, capítulo 7, en la región del centro electromagnético de las bobinas, ya que la distribución de la densidad de flujo de dispersión tiene una dirección prácticamente axial. Cabe destacar la variación que existe en los resultados

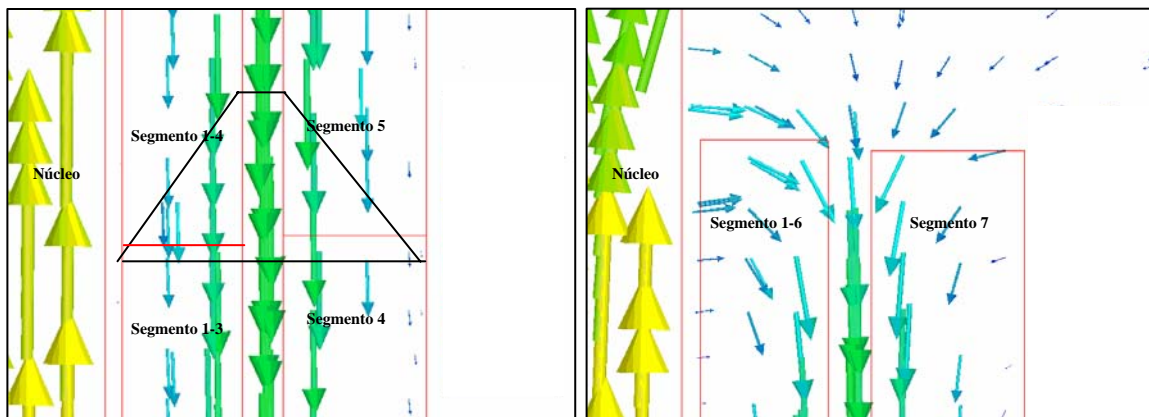


de las fuerzas radiales, obtenidos con los productos FLD5 y Maxwell 2D, en los extremos de las bobinas con respecto a la teoría. Al alejarse del centro magnético, la diferencia se hace mayor porque se tiene que el flujo de dispersión se dirige hacia el núcleo y en este caso es difícil evaluar analíticamente la magnitud axial del flujo. Tabla 8.1, 8.2 y figura 8.2.

**Tabla 8.1:** Sumatoria de fuerzas radiales a corriente nominal del transformador

Segmento	Densidad de corriente $\frac{A}{mm^2}$	Fuerza radial FLD5 $\times 10^3 \text{ Newton}$	Fuerza radial Programa Maxwell 2D $\times 10^3 \text{ Newton}$	Fuerza radial Teoría $\times 10^3 \text{ Newton}$
1-1	-1.087	-19.5	-19.4	-21.4
1-2	-1.211	-5.1	-5.1	-5.5
1-3	-1.132	-22.4	-22.4	-22.3
1-4	-1.132	-22.4	-22.4	-22.3
1-5	-1.211	-5.1	-5.1	-5.5
1-6	-1.087	-19.4	-19.4	-21.4
2	0.950	23.7	23.7	27.9
3	0.937	5.8	5.8	5.8
4	0.950	27.6	27.6	27.9
5	0.950	27.6	27.6	27.9
6	0.937	5.8	5.7	5.8
7	0.950	23.7	23.7	27.9

Los signos negativos en las columnas 3, 4 y 5 de la tabla 8.1 indican el sentido de las fuerzas radiales. Un signo negativo muestra una fuerza que está orientada hacia el eje “z” y un signo positivo muestra una fuerza que se aleja del mismo eje. El modelo teórico es el más conservador, por lo que es el de mayor magnitud de los tres métodos, ya que el cálculo teórico supone que la bobina es infinita en los extremos como una primera aproximación. En los segmentos 1-3, 1-4, 4 y 5, los cálculos obtenidos por los diferentes procedimientos son prácticamente iguales. Tabla 8.1 y 8.2.



**Figura 8.2:** Descripción de las líneas de densidad de flujo magnético al centro y en la parte superior de las bobinas.

La tabla 8.2 describe la variación, en porcentaje, entre los resultados de fuerzas radiales a corriente nominal, obtenidos por los programas. En la primer columna se indica el segmento que se utiliza para hacer la comparación. En la segunda y tercer columna se compara los resultados obtenidos por el producto Maxwell y FLD5 contra los resultados analíticos. La cuarta columna muestra la variación entre el programa Maxwell y FLD5. Como se esperaba, la variación con respecto a la teoría disminuye conforme nos acercamos al centro magnético debido a la uniformidad de densidad de flujo magnético. La figura 8.2 muestra que en el centro electromagnético la densidad es radial y en la parte superior e inferior de las bobinas el flujo se dirige hacia el material ferromagnético de núcleo. La comparación entre los resultados de los programas y el cálculo analítico en los segmentos cercanos al centro electromagnético nos indican que son valores confiables.

**Tabla 8.2:** Variación porcentual de fuerzas radiales a corriente nominal en las bobinas del transformador

Segmento	FLD5 vs Teoría %	Maxwell vs Teoría %	Maxwell vs FLD5 %
1-1	-9.29	-9.61	-0.35
1-2	-7.10	-6.88	0.24
1-3	0.42	0.32	-0.09
1-4	0.41	0.32	-0.08
1-5	-6.92	-6.89	0.04
1-6	-9.85	-9.64	0.24
2	-15.22	-14.94	0.33
3	-1.29	-0.99	0.30
4	-1.09	-1.08	0.01
5	-1.07	-1.08	-0.01
6	-1.32	-0.87	0.46
7	-14.82	-14.95	-0.16

Una vez presentados los resultados de las fuerzas radiales, a continuación se muestran las fuerzas axiales en los distintos segmentos de las bobinas del transformador.

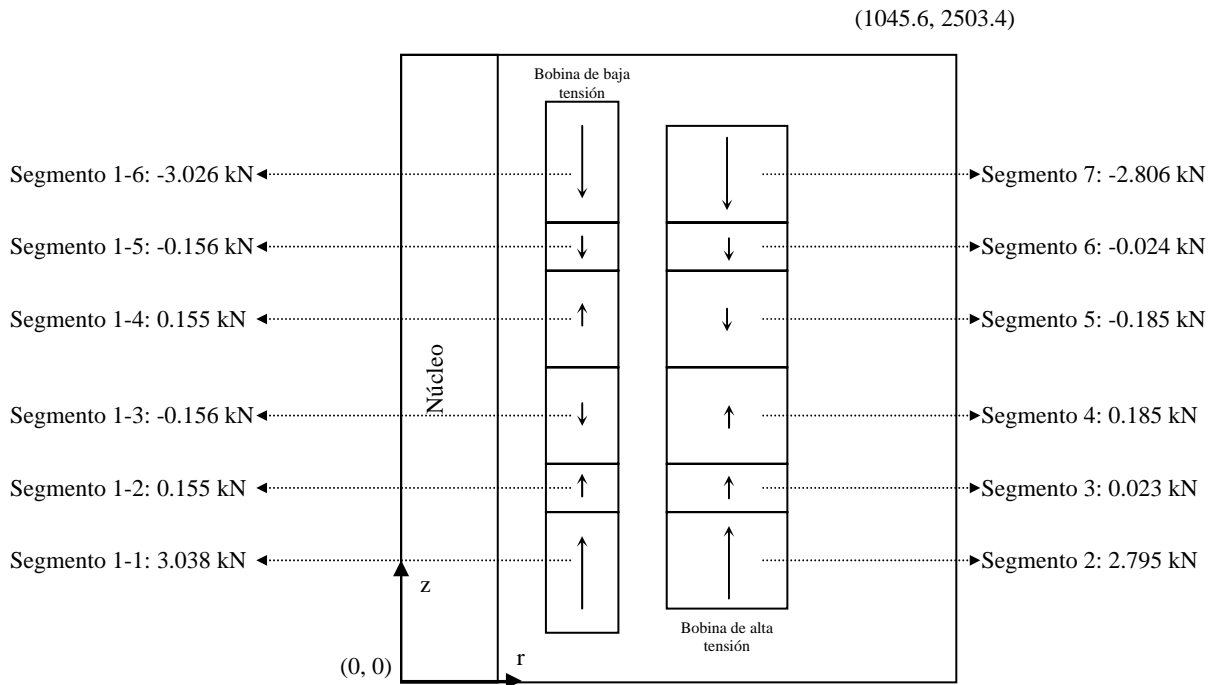
En la tabla 8.3 se presentan los resultados del análisis de fuerzas axiales, a corriente nominal, obtenido en cada segmento de las bobinas, tal como se presenta en la figura 8.1. La segunda columna de la tabla 8.3 se indica la densidad de corriente en los segmentos, la tercer y cuarta columna se indican los resultados de los paquetes FLD5 y Maxwell, respectivamente. La quinta columna compara los resultados entre el Maxwell y el FLD5. Observe que las fuerzas deben de tener signo contrario en los segmentos extremos de las bobinas del transformador; recuerde que la fuerza es un vector derivado del producto cruz entre una longitud y la densidad de flujo magnético. Tienen la misma densidad de corriente pero el flujo magnético radial tiene sentido opuesto.

Al final de los segmentos, tanto de la bobina de baja tensión como los de alta tensión, se presenta la sumatoria de las fuerzas axiales

**Tabla 8.3:** Fuerzas axiales a corriente nominal en las bobinas del transformador

Segmento	Densidad de corriente	Fuerza axial		
	$\frac{A}{mm^2}$	FLD5 $\times 10^3 \text{ Newton}$	Maxwell $\times 10^3 \text{ Newton}$	Maxwell vs FLD5 %
1-1	-1.087	3.013	3.038	0.82
1-2	-1.211	0.140	0.155	11.23
1-3	-1.132	-0.150	-0.156	3.89
1-4	-1.132	0.146	0.155	5.87
1-5	-1.211	-0.149	-0.156	4.85
1-6	-1.087	-3.001	-3.026	0.85
$\Sigma$	-	0.00	0.01	-
2	0.950	2.810	2.795	-0.52
3	0.937	0.030	0.023	-22.95
4	0.950	0.190	0.185	-2.43
5	0.950	-0.179	-0.185	3.50
6	0.937	-0.030	-0.024	-21.11
7	0.950	-2.825	-2.806	-0.68
$\Sigma$	-	0.00	-0.01	-

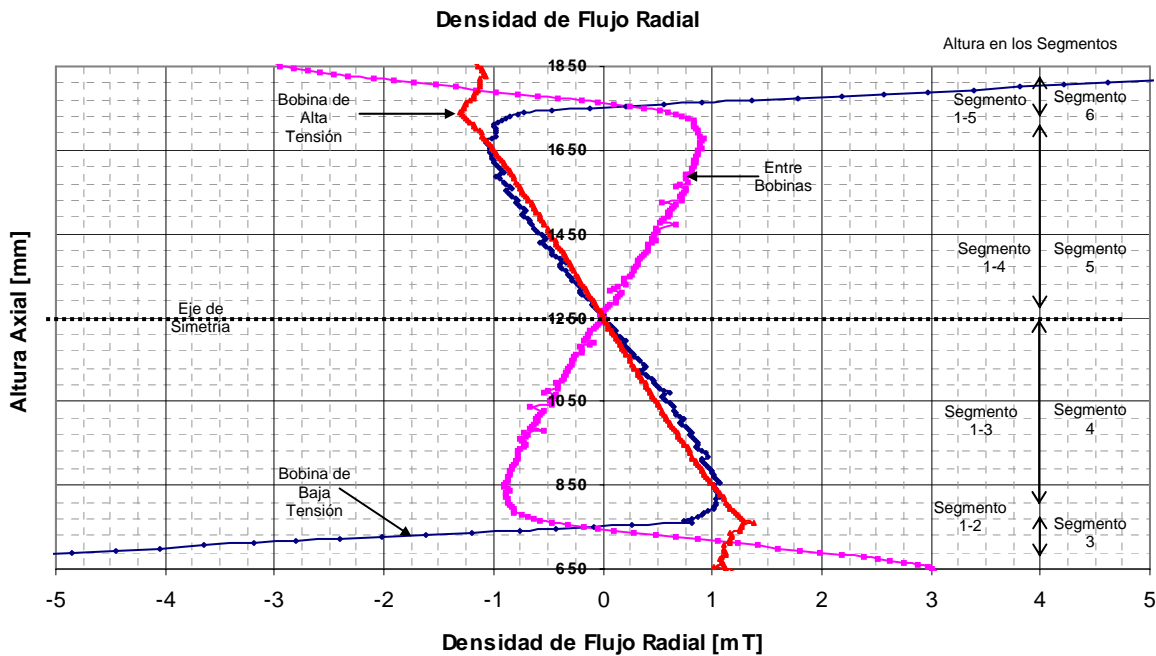
Ambos programas tienen magnitudes similares en los extremos de las bobinas de alta tensión y baja tensión, segmentos 1-1 y 1-6, y entre el segmento 2 y 7, figura 8.1. Los valores de los segmentos 4 y 5 deben de ser muy cercanos a cero ya que casi no se tiene flujo radial en el área cercana al centro electromagnético. La figura 8.3 muestra el valor de las fuerzas generadas por el Maxwell.



**Figura 8.3:** Magnitud y sentido de las fuerzas axiales en cada segmento de bobina, resultados obtenidos del programa Maxwell

La diferencia porcentual, de la tabla 8.3, que se observa en los segmentos cercanos al centro electromagnético entre los dos paquetes computacionales es debido a la diferencia en el cálculo de los vectores de potencial de cada paquete y al número de elementos triangulares con los que se cuenta en cada segmento. Los sentidos de las fuerzas axiales en las bobinas los genera la interacción del flujo radial y la dirección de la corriente. En la figura 8.3 se puede observar que los sentidos de las fuerzas en los segmentos 1-3 y 1-4 tienen los sentidos opuestos. Cabe destacar que estas secciones de bobinas se encuentran muy cercanas al centro electromagnético y que, por lo tanto, el flujo radial que se genera es mínimo comparado con los el resto de las bobinas.

En la figura 8.4 se tiene un mayor detalle de lo que pasa en la parte central del transformador. Se ilustran tres líneas que recorren el aparato axialmente. Una de ellas recorre la bobina de baja tensión, la segunda recorre el espacio que se encuentra entre las dos bobinas y la tercera recorre la bobina de alta tensión. En la figura se muestra la altura axial del segmento al que pertenecen, eje vertical, y el valor de la densidad de flujo radial, eje horizontal. Observe que en la bobina de baja tensión ocurre una transición de valores de densidad positivos a valores negativos antes de llegar al eje de simetría y es por ello que ocurre el cambio de sentido de las fuerzas en estas dos secciones del transformador. Lo anterior no ocurre con la bobina de alta tensión ya que no cambia de signo el valor de la magnitud sino hasta cruzar el eje de simetría.

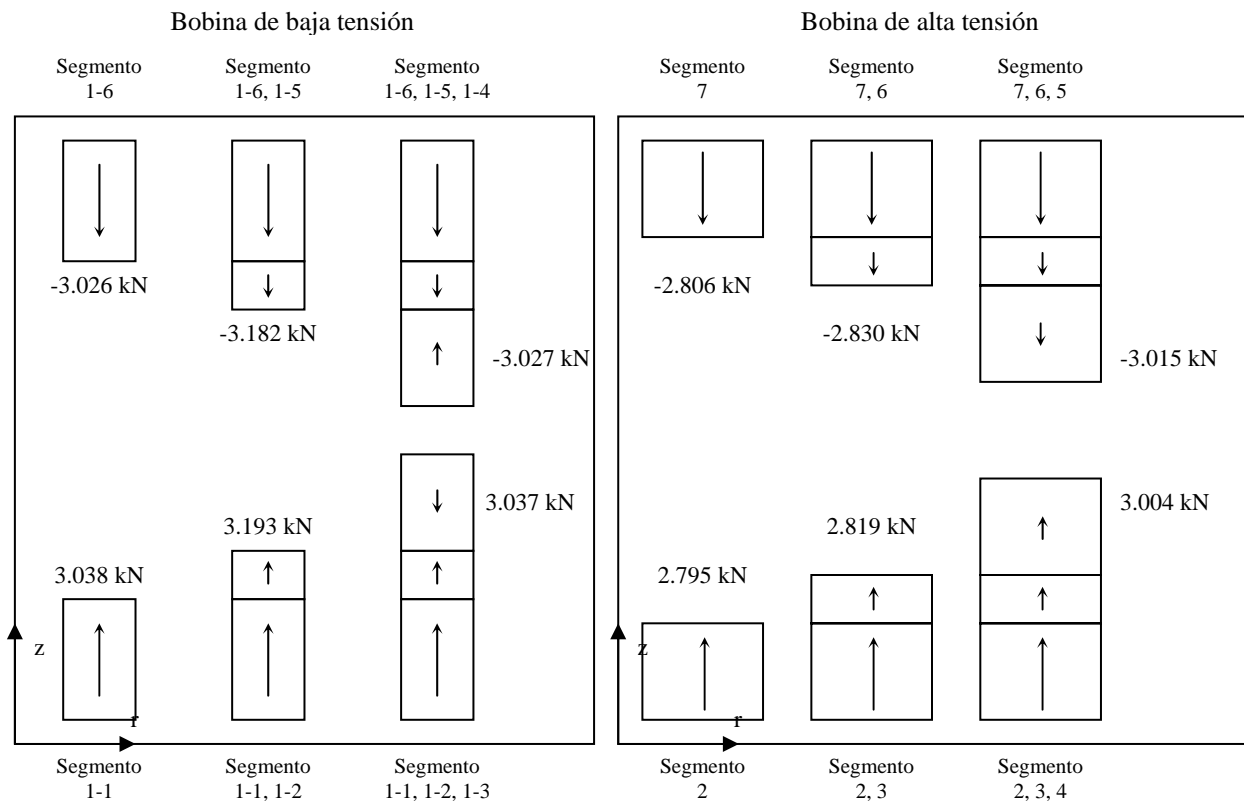


**Figura 8.4:** Densidad de flujo radial en los segmentos cercanos al centro electromagnético, resultados obtenidos del programa Maxwell.

Esto ocurre debido a que la bobina de baja tensión se encuentra más cercana a la pierna central del núcleo, que es la que concentra el flujo magnético del aparato. Además, que la magnitud de estos valores de densidad de flujo genera una fuerza pequeña en comparación con las bobinas a los extremos, ver tabla 8.3.

Los valores de fuerzas axiales por vuelta en los centros electromagnéticos son menores que en los extremos. Estas fuerzas son menores en proporciones de 15 a 50 veces con respecto a las fuerzas en los extremos de las bobinas. El diseño mecánico que soportarán esas fuerzas se realizará todavía con un margen de seguridad del material. Por lo que podemos decir que las fuerzas por vuelta en el centro no se comparan con las fuerzas en los extremos de las bobinas. En el eje de simetría de cada bobina se tiene la suma de las fuerzas que se van acumulando a lo largo del sentido axial de la bobina. Esto se aprecia en la figura 8.5 en donde se separa cada una de las secciones con el fin de observar como la fuerza se va acumulando hasta llegar al eje de simetría radial electromagnético.

Observe que la variación es pequeña en los extremos de las bobinas y que los valores de fuerza en los centros de las bobinas están por debajo de los 0.2 kN por ello es que las variaciones porcentuales en las fuerzas axiales entre los paquetes FLD5 y Maxwell 2D no son representativas. En este caso, donde las bobinas están acomodadas respetando el eje de simetría, las fuerzas que aparecen debido a la corriente de corto circuito, sobre los anillos de apriete son despreciables.



**Figura 8.5:** Sumatoria de fuerzas en las secciones de la bobina de baja y alta tensión, respectivamente, resultados obtenidos del programa Maxwell.

Para complementar los resultados que se obtuvieron, en las tablas 8.4, 8.5 y 8.6 se presentan las densidades de flujo magnético máximas. En las tablas 8.4 y 8.5 se indica la densidad de flujo máxima obtenida con el FLD5 y de forma teórica. La tabla 8.6 muestra los resultados del programa Maxwell 2D, que además del valor máximo de densidad de flujo la posición donde ocurre ésta. Las posiciones de estos puntos son en un plano “rz”. La hoja de resultados del FLD5 no indica la posición de densidad máxima, utilizando como referencia el punto (0,0) mostrado en la figura 8.1.

**Tabla 8.4:** Densidad de flujo máxima en dirección radial y axial obtenidas por el simulador FLD5

Segmento	Radial BR-Máx. mT	Axial BZ-Máx. mT
1-1	63.1	165.1
1-2	2.79	166.6
1-3	-1.24	168.2
1-4	0.99	168.2
1-5	-3.53	169.5
1-6	-62.93	166.4
2	-44.22	166.3
3	-1.44	167.6
4	-1.59	170.9
5	1.90	170.9
6	0.97	167.8
7	44.37	167.2

**Tabla 8.5:** Densidad de flujo máxima en dirección axial obtenida analíticamente

Segmento	Axial BZ-Máx. mT
1-1	175.0
1-2	188.5
1-3	176.2
1-4	176.2
1-5	188.5
1-6	175.0
2	177.7
3	175.3
4	177.7
5	177.7
6	175.3
7	177.7

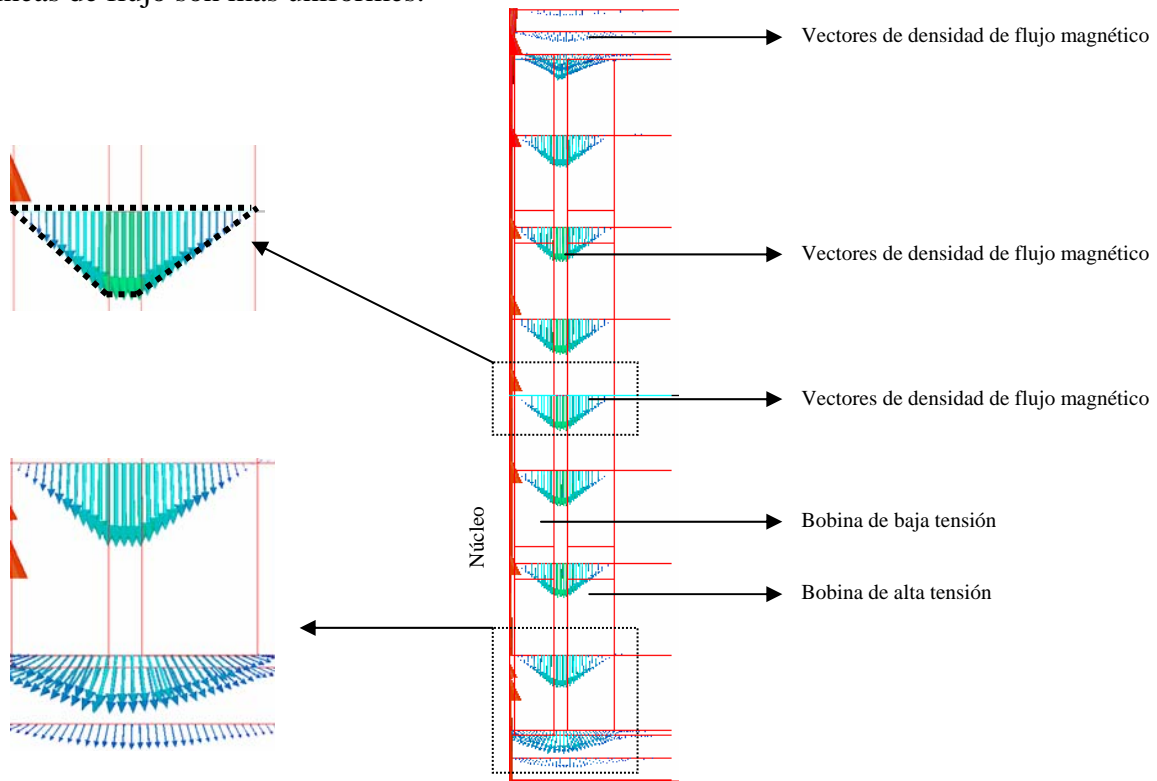
Las densidades no deben de presentar mucha variación con el valor teórico en el área cercana al centro electromagnético, debido a la uniformidad de densidad de flujo magnético, figura 8.2. Sin embargo, las secciones 1-3, 1-4, 4 y 5 se observa una diferencia en los valores máximos debido a que en el modelo teórico todo el flujo magnético es axial y estos valores sólo son una parte del segmento de bobina. La información presentada es la que se puede obtener de los paquetes y el detalle de obtener el punto de máxima densidad, tabla 8.6, es un indicio de concentración de líneas de flujo. Las mayores densidades ocurren en las regiones cercanas al espacio que existe entre las bobinas, esto es, los conductores exteriores en la bobina de baja y los conductores interiores en la bobina de alta.

El producto Maxwell permite calcular la densidad de flujo en cualquier punto del modelo evaluado. En la tabla 8.6 se presenta la densidad máxima radial y axial calculadas por el programa en las posiciones indicadas.

**Tabla 8.6:** Densidad de flujo máximas en dirección axial y radial y ubicación de estas. Resultados obtenidos por el programa Maxwell

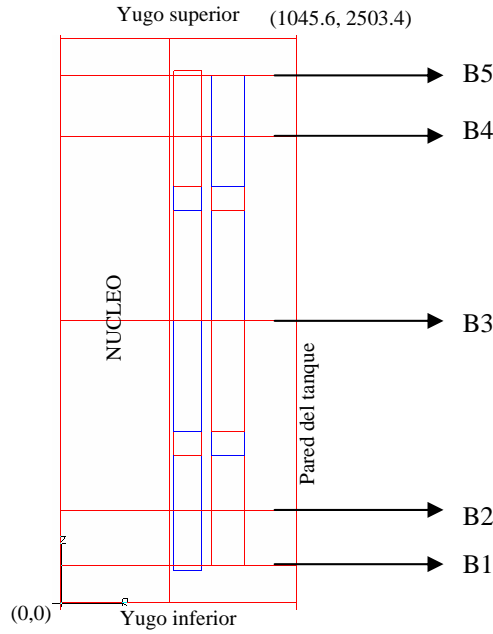
Segmento	Radial BR-Máx. mT	Posición R	Posición Z	Axial BZ-Máx. mT	Posición R	Posición Z
1-1	66.17	518.4	142.7	175	626.8	654.3
1-2	8.18	533.9	654.3	177.7	626.8	733.8
1-3	-1.61	580.4	760.3	177.3	626.8	760.3
1-4	1.60	580.4	1,742.8	177.3	626.8	1,742.8
1-5	-8.19	533.9	1,848.8	177.7	626.8	1,769.3
1-6	-66.10	518.4	1,360.7	175	626.8	2,848.8
2	-50.77	762	163	174.7	669	654.3
3	2.12	669	654.3	176.6	669	760.3
4	-1.34	799.3	760.3	177	669	1,159.4
5	1.35	799.3	1,742.8	177	669	1,343.7
6	-2.13	669	1,848.8	176.6	669	1,742.8
7	50.86	762	2,340.1	174.7	669	1,848.8

Para ilustrar la dirección de los vectores de densidad de flujo magnético a distintas alturas axiales del transformador se presenta la figura 8.6. Las líneas fueron colocadas en los extremos y en los centros de cada segmento. Observe que en el centro electromagnético las líneas de flujo son más uniformes.



**Figura 8.6:** Distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo de distintas líneas en el transformador

Para describir el flujo axial y radial se exportó la información de las densidades en las distintas líneas que recorren radialmente el modelo del transformador bajo estudio. La figura 8.7 señala las líneas que describen el flujo, estas son: B1, B2, B3, B4 y B5; se aplica la inicial “r” para indicar que se trata del flujo radial o la inicial “z” para indicar el flujo axial. La tabla 8.7 muestra la localización absoluta de los dos puntos que generan cada línea recta (R1,Z1) y (R2,Z2). Los valores de los puntos R1 y Z1 representan el primer punto y R2 y Z2 el segundo punto.



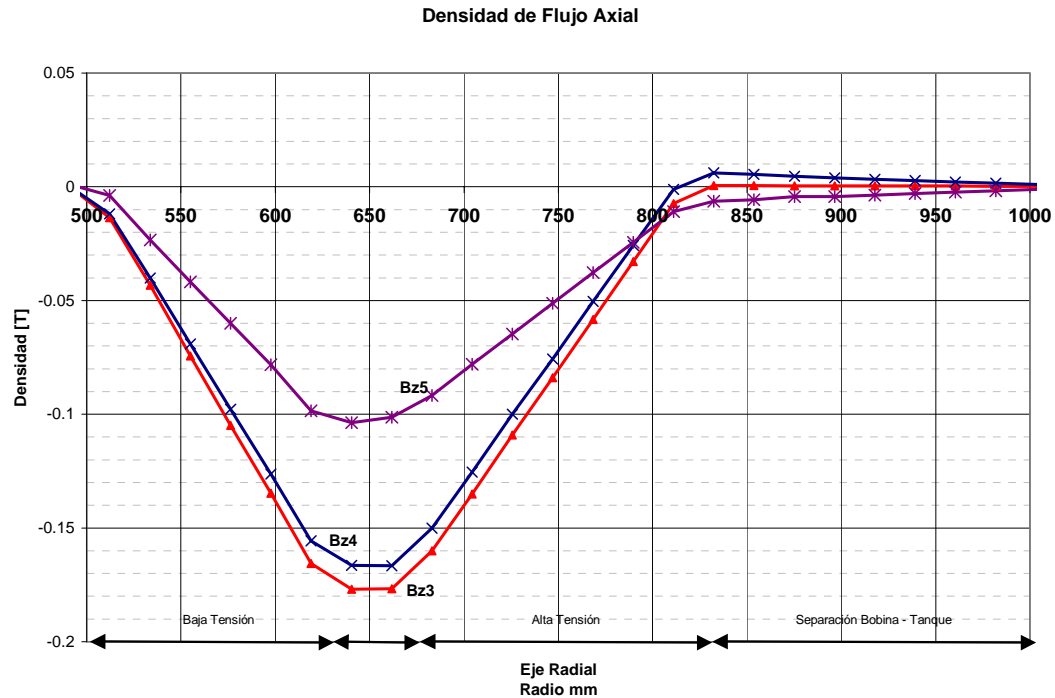
**Figura 8.7:** Localización de líneas para describir la densidad de flujo axial y radial.

De estas líneas se obtiene la información de los vectores de densidad de flujo magnético cuyas componentes son descompuestas y exportadas en las figuras 8.8 y 8.9.

<b>Tabla 8.7:</b> Posición de los dos puntos que generan las líneas de las figuras 8.8 y 8.9				
Línea	R1	Z1	R2	Z2
B1	0	163	1045.8	163
B2	0	408	1045.8	408
B3	0	1046	1045.8	1046
B4	0	2068	1045.8	2068
B5	0	2340	1045.8	2340



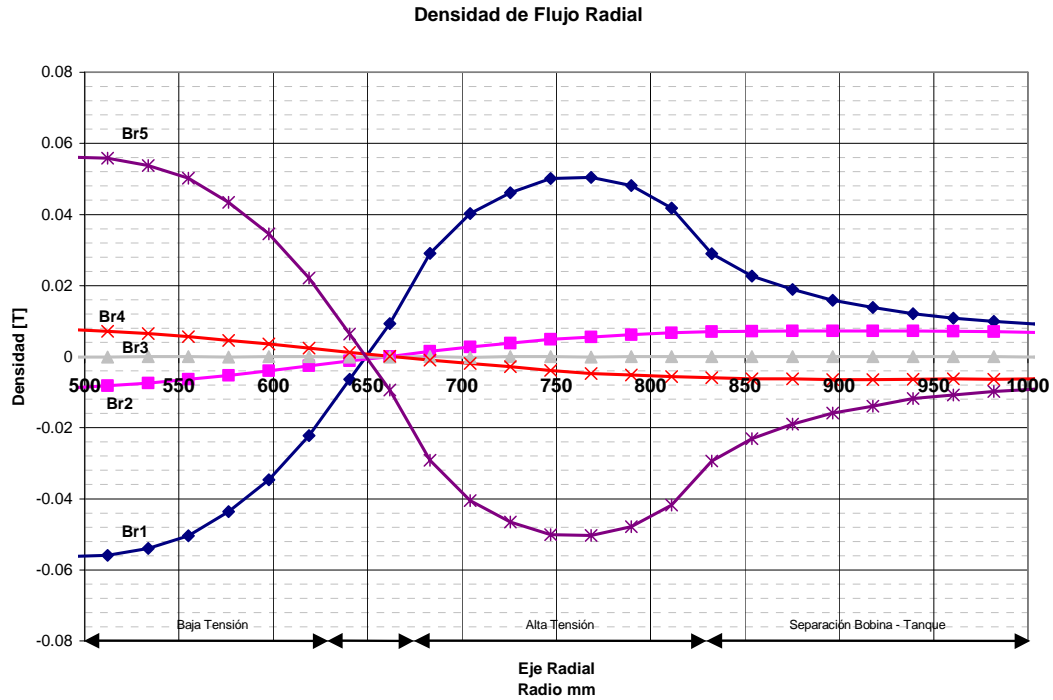
Finalmente, en la figura 8.8 se muestra la variación, a lo largo del eje radial, de la densidad de flujo magnético axial obtenida con el producto Maxwell. La figura 8.9 ilustra como varía la densidad del flujo radial en el transformador, el cambio de signo corresponde al sentido del flujo correspondiente.



**Figura 8.8:** Densidad de flujo axial en el transformador bajo estudio obtenida a diferentes alturas

En la figura 8.8 se indica la componente axial del vector de densidad de flujo magnético en las distintas líneas, indicadas en la figura 8.7. El eje radial recorre desde la pared exterior del núcleo hasta la pared derecha del tanque. La densidad de flujo magnético axial crece linealmente y va disminuyendo conforme recorremos radialmente las bobinas. La línea Bz3 es la de mayor magnitud dado que se encuentra en el centro magnético. La línea Bz4 está cercana al extremo de la bobina pero el comportamiento es lineal. La línea Bz5 se encuentra fuera de la bobina de alta tensión y no aplicamos la suposición teórica de una densidad de flujo que crece linealmente debido a la curvatura que va tomando el flujo magnético en los extremos, figura 8.2. En esta línea la densidad de flujo busca el camino de retorno en el transformador que puede ser el núcleo, el yugo, la pared del tanque y el espacio ocupado por aire o aceite. No se graficaron las líneas Bz1 y Bz2 por ser similares a Bz5 y Bz4, respectivamente.

La densidad de flujo en la línea central nos arroja un resultado que apoya la primera suposición teórica sobre la distribución de flujo a lo largo de las bobinas del transformador. El valor negativo solo nos indica el sentido del vector de densidad de flujo magnético.



**Figura 8.9:** Densidad de flujo radial en el transformador bajo estudio obtenida a diferentes alturas

En la figura 8.9 se indica la componente radial del vector de densidad de flujo magnético a distintas alturas del transformador. El eje radial recorre desde la pared exterior del núcleo hasta la pared del tanque. Las líneas Br1 y Br2 están colocadas en los extremos de las bobinas. La línea Br2 y Br4 están colocadas a la mitad del segmento 2 y 7, respectivamente, del lado de alta, figura 8.7.

El cambio de signo de los valores indica el cambio en el sentido del vector. Las de mayor magnitud son las líneas Br1 y Br5 por estar colocadas a los extremos de las bobinas. El flujo magnético tiene una dirección principalmente axial en el centro de las bobinas lo que deriva en magnitudes bajas de densidad de flujo magnético en las líneas Br2, Br3 y Br4. Figura 8.9.

## 8.2 SIMULACIÓN CON CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

El ejercicio se repitió manejando corriente de corto circuito. Los valores de densidades de corrientes aplicadas al programa Maxwell son derivados de un factor de asimetría transitoria de 1.97, dato proporcionado por el usuario en el FLD5. Las tablas 8.8, 8.9 y 8.10 que se presentan a continuación contienen los resultados que se obtuvieron.

En la tabla 8.8 se presentan los resultados del análisis de fuerzas radiales al aplicar corriente de corto circuito. En la primera columna se muestra los segmentos de cada parte de la bobina. En la segunda columna se lista el dato de entrada de la densidad de corriente aplicada a cada segmento en el modelo. Las columnas 3, 4 y 5 indican la fuerza radial total que aparece en cada segmento dependiendo de la herramienta con la que se calcula. Los resultados teóricos que se obtuvieron son los valores de fuerzas radiales calculados en el capítulo 7.2, cuyos valores de corriente de corto circuito son de 22.4 veces el valor nominal, tabla 7.2.

<b>Tabla 8.8:</b> Sumatoria de fuerzas radiales a corriente de corto circuito del transformador				
Segmento	Densidad de corriente $\frac{A}{mm^2}$	Fuerza radial FLD5 $\times 10^3 \text{ Newton}$	Fuerza radial Programa Maxwell 2D $\times 10^3 \text{ Newton}$	Fuerza radial Teoría $\times 10^3 \text{ Newton}$
1-1	- 24.356	-9,766	-9,734	-10,700
1-2	- 27.128	-2,571	-2,577	-2,520
1-3	- 25.363	-11,255	-11,242	-10,280
1-4	- 25.363	-11,255	-11,242	-10,280
1-5	- 27.128	-2,576	-2,577	-2,520
1-6	- 24.343	-9,705	-9,730	-10,700
2	21.294	11,874	11,917	14,010
3	20.999	2,902	2,909	2,930
4	21.294	13,853	13,845	14,010
5	21.293	13,855	13,844	14,010
6	20.999	2,897	2,909	2,930
7	21.294	11,929	11,915	14,010

En la tabla 8.9 tenemos los siguientes porcentajes de variación entre los resultados de los programas y la teoría para condiciones de corto circuito. Al alejarse del centro magnético, la diferencia se hace mayor porque se tiene que el flujo de dispersión se dirige hacia el núcleo y este caso es difícil de evaluar analíticamente la magnitud axial del flujo.

La fuerza máxima radial es prácticamente la misma para ambos programas. Esta fuerza se presenta en los segmentos 1-3, 1-4, 4 y 5. La variación, como se indica en la siguiente tabla, es menor al 1%. Tabla 8.9.

**Tabla 8.9:** Variación porcentual de fuerzas radiales en el transformador en corto circuito

Segmento	FLD5 vs Teoría %	Programa Maxwell vs Teoría %	Programa Maxwell vs FLD5 %
1-1	-8.7	-9.03	-0.33
1-2	2.0	2.28	0.23
1-3	9.5	9.36	-0.12
1-4	9.5	9.36	-0.11
1-5	2.2	2.27	0.03
1-6	-9.3	-9.06	0.26
2	-15.2	-14.94	0.37
3	-0.9	-0.69	0.27
4	-1.1	-1.18	-0.06
5	-1.1	-1.18	-0.08
6	-1.1	-0.71	0.43
7	-14.8	-14.95	-0.12

Para el cálculo de la fuerza radial teórica se tiene que la corriente de corto circuito es 22.4 veces la nominal. Observe que la variación entre los paquetes es muy pequeña, al igual que en condiciones nominales, por lo que los resultados son correctos para ambos programas.

Ahora en la tabla 8.10 se indican las fuerzas axiales de corto circuito calculado por ambos programas. La fuerza máxima en el flujo radial se encuentra en los segmentos más alejados del eje de simetría. Los resultados más importantes son los segmentos 1-1, 1-6, 2 y 7, cuyo valor máximo es de 1500 kN. Observe como la diferencia ente el programa Maxwell y el FLD5 no es mayor de 2%.

**Tabla 8.10:** Fuerzas axiales a corriente de corto circuito del transformador

Segmento	Densidad de corriente	Fuerza axial		
	$\frac{A}{mm^2}$	FLD5 $\times 10^3 \text{ Newton}$	Programa Maxwell $\times 10^3 \text{ Newton}$	Maxwell vs FLD5 %
1-1	- 24.3	1,511	1,538	1.74
1-2	- 27.1	70	81	16.10
1-3	- 25.3	-75	-70	-6.47
1-4	- 25.3	73	69	-5.80
1-5	- 27.1	-74	-82	9.66
1-6	- 24.3	-1,505	-1,532	1.80
$\Sigma$	-	-0.18	3.59	-
2	21.3	1,410	1,384	-1.80
3	21.0	15.00	8	-47.41
4	21.2	95.00	83	-12.39
5	21.2	-89.00	-83	-7.92
6	21.0	-14.00	-8	-47.10
7	21.3	-1,417	-1,389	-2.00
$\Sigma$	-	-1.99	-3.78	-

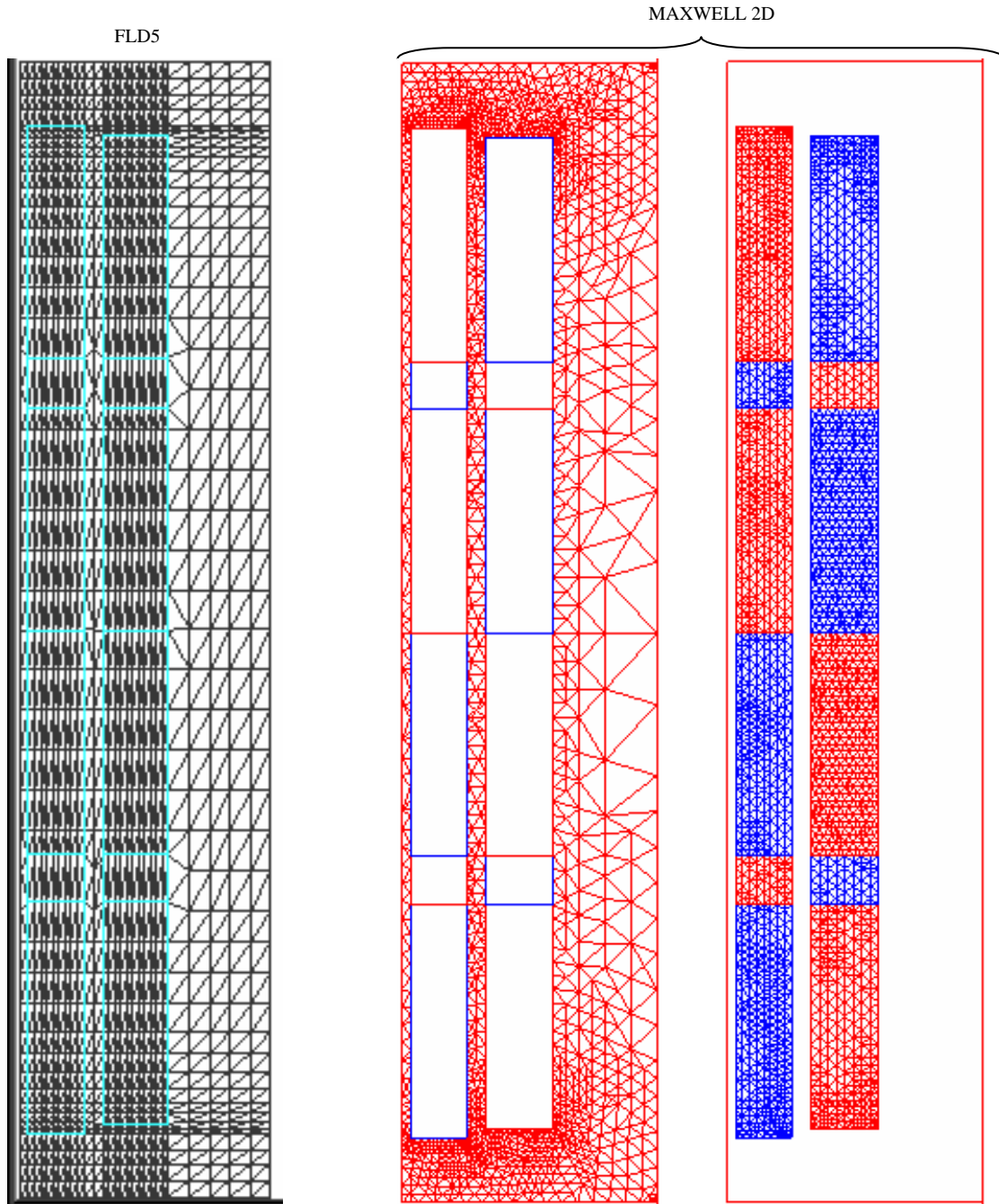
Al igual que en condiciones de corriente nominal, se presentan variaciones en los extremos de las bobinas al calcular las fuerzas axiales. Recordamos que los componentes que soportaran los mayores esfuerzos axiales acumulados son las secciones que se encuentran cercanas al centro electromagnético de las bobinas. Es por ello que, aunque los valores de las fuerzas en las bobinas cercanas al centro magnético no se comparan con los valores a los extremos, la acumulación de fuerzas va incrementándose conforme avanzamos de un extremo de la bobina hacia el centro electromagnético. Esto lo observamos en la tabla 8.11 en donde se va acumulando la fuerza axial de los segmentos 1-1, 1-2 y 1-3; también los de 1-6, 1-5 y 1-4 y así sucesivamente para las demás secciones, tal como se mostró en la figura 8.5. Los valores acumulados en el eje de simetría radial son muy próximos entre sí, por lo que las variaciones porcentuales muy altas de algunos segmentos, cuyas densidades radiales son bajas, no incrementan de forma significativa la fuerza axial acumulada.

**Tabla 8.11:** Fuerzas axiales acumuladas, tabla 8.10, con corriente de corto circuito del transformador

Segmento	Densidad de corriente	Fuerza Axial Acumulada	
	$\frac{A}{mm^2}$	FLD5 $\times 10^3 \text{ Newton}$	Programa Maxwell $\times 10^3 \text{ Newton}$
1-1	- 24.3	1,512	1,538
1-2	- 27.1	1,582	1,619
1-3	- 25.3	1,507	1,549
1-4	- 25.3	-1,507	-1,546
1-5	- 27.1	-1,580	-1,615
1-6	- 24.3	-1,505	-1,533
2	21.3	1,410	1,385
3	21.0	1,425	1,392
4	21.2	1,520	1,476
5	21.2	-1,522	-1,479
6	21.0	-1,432	-1,397
7	21.3	-1,417	-1,389

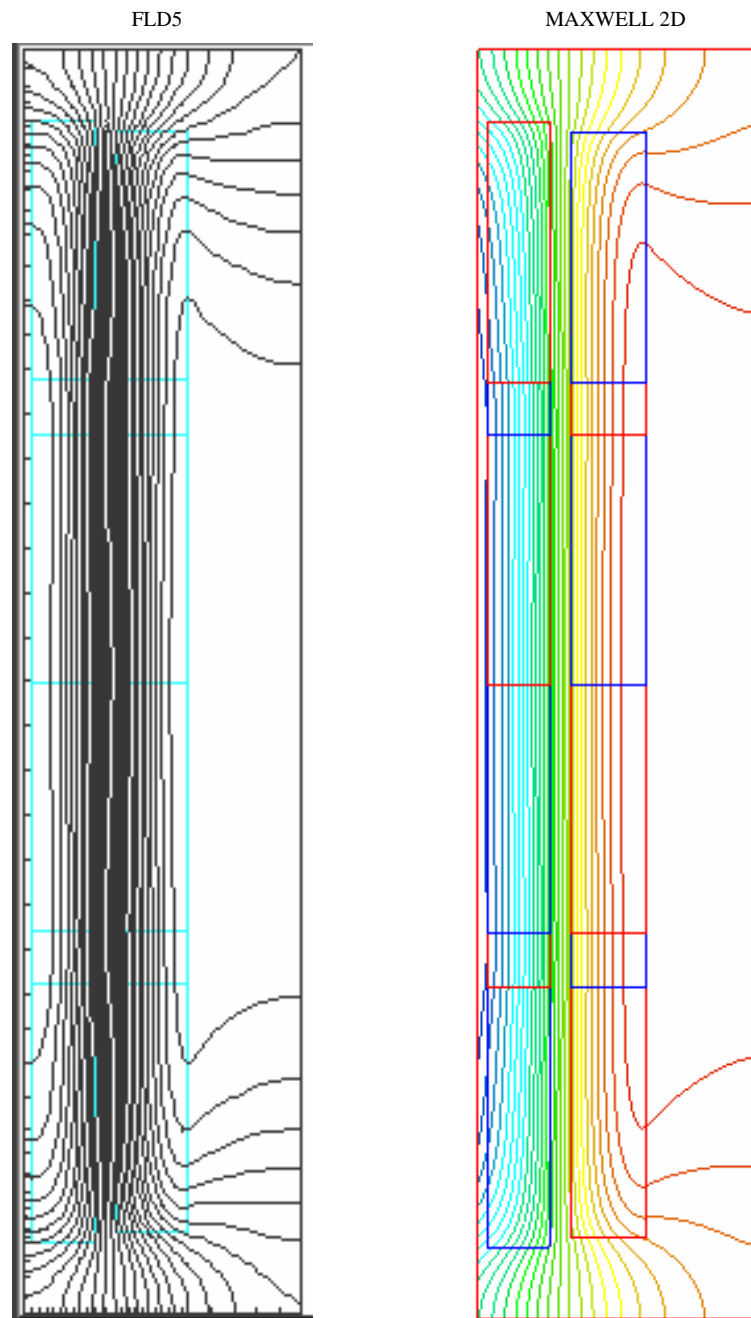
La fuerza acumulada tanto en la bobina de alta tensión como en la de baja tensión varía a lo más en un 2%. Con lo anterior se verifica que, aunque la variación es muy alta en los segmentos cercanos al centro electromagnético esta no es significativa en la fuerza acumulada.

Cada uno de los programas tiene la capacidad de generar una figura de la malla aplicada al transformador y las líneas de flujo magnético en el mismo. A continuación se presentan las figuras de las mallas obtenidas y las líneas de flujo obtenidas con el programa FLD5 y Maxwell 2D. Observe que el programa Maxwell genera una malla más fina donde hay mayor variación de flujo.



**Figura 8.10:** Mallas y líneas de flujo generadas por los programas FLD5 y Maxwell, respectivamente

La figura 8.10 muestra las mallas generadas en cada uno de los programas. La malla del programa Maxwell 2D se dividió en dos para facilitar observar los segmentos de las bobinas. Se observa la diferencia de número de elementos entre los programas y la distribución de los mismos principalmente a los extremos de las bobinas. Las dimensiones de las bobinas, espacios y distancias al tanque y yugos son las mismas en ambos programas.



**Figura 8.11:** Líneas de flujo generadas por los programas FLD5 y Maxwell, respectivamente

La distribución de líneas de flujo en cada programa nos ilustra las direcciones de la densidad de flujo en el transformador, figura 8.11. El producto FLD5 supone que el tanque se encuentra muy alejado de las bobinas, mientras que el producto Maxwell toma en cuenta la distancia y el material del tanque. Aun así ambos programas generan líneas de flujo bastantes similares.

### 8.3 CONCLUSIONES

En este proyecto se usaron dos programas que permiten obtener las fuerzas que se generan en las bobinas de un aparato electromagnético. El producto FLD5 fue desarrollado en la década de los 70s utilizando la técnica de elementos finitos. El producto Maxwell es de reciente creación y se mantiene actualizado, también utiliza la técnica de elemento finito.

Debido a lo anterior, el producto Maxwell tiene muchas opciones que no tiene el software FLD5. Entre las opciones están:

- a) El control del sistema de generación de mallas
- b) Puede manejar directamente modelos trifásicos en tres dimensiones
- c) Tiene una capacidad más desarrollada para crear y manejar objetos de dos y tres dimensiones
- d) El uso y aplicación de materiales no lineales
- e) Facilidad de realizar modificaciones en los modelos
- f) Cuenta con una calculadora que permite obtener fuerzas, flujos, energía total, pérdidas producidas por los flujos de dispersión

Durante las simulaciones que se realizaron con bobinas sin desfase entre los centros electromagnéticos, los resultados obtenidos con los dos programas son similares, tanto para el cálculo de las fuerzas radiales como de las axiales. Las fuerzas axiales no balanceadas son despreciables porque los centros magnéticos están alineados.

Se observan pequeñas diferencias en las fuerzas axiales calculadas con ambos programas. Sus principales diferencias son el número de elementos triangulares aplicados al método de elementos finitos y la forma de obtener los vectores de potencial aplicados a la malla generada. El programa Maxwell aplica un simulador de campo magnetostático y el FLD5 aplica relaciones lineales de potencial entre los elementos de la malla. La parte medular de los cálculos en ambos programas radica en esta parte de las herramientas dado que de ellas se calcula la densidad de flujo magnético y la intensidad del campo magnético. Estas secciones de los programas son claves para el estudio de los problemas de equipo electromagnético y no se explican a detalle en ninguno de los programas, ya que es su metodología en el cálculo de los vectores de potencial lo que los hace resolver los problemas correctamente y sean aceptados por la industria.

Para poder validar los resultados de las fuerzas radiales se procedió a calcularlas analíticamente en el centro de las bobinas. El cálculo analítico resultó ser muy similar a las fuerzas obtenidas con los productos Maxwell y FLD5. Esta validación nos permite suponer que todos los resultados obtenidos son correctos.

Con respecto al cálculo de las fuerzas axiales, producidas por las corrientes de las bobinas, se obtuvo que son máximas en las secciones extremas y que están orientadas al centro de la bobina. Esto se debe a la manera como se distribuye el flujo de dispersión. El diseñador debe de cuidar la concentración de estas fuerzas en el centro de la bobina.



Al calcular la fuerza radial se encuentra que en las bobinas de alta tensión la fuerza está en dirección radial tensionando el material. Por el contrario en las bobinas de baja tensión se tienen fuerza radiales negativas que comprimen a los conductores.

El producto Maxwell tiene muchas ventajas sobre el producto FLD5. Cuando los recursos se utilizan adecuadamente, hace esperar que los resultados sean mejores. Para arreglos más complicados en dimensiones elementos y materiales se cuenta con una mejor herramienta de simulación con el Maxwell 2D.

---

*Queda prohibido no buscar la felicidad,  
no vivir tu vida con una actitud positiva,  
no pensar en que podemos ser mejores,  
no sentir que sin ti este mundo no seria  
igual.*

***Pablo Neruda***

## CAPÍTULO 10

## BIBLIOGRAFÍA

---

---

**10.0 BIBLIOGRAFÍA**

- [1] O. W. Andersen; “**Transformer Leakage Flux Program Based on the Finite Element Method**”, IEEE Trans. PAS, vol. 92, pp. 682-689, Mar./Apr. 1973
- [2] O. W. Andersen; “**Advanced Calculations of Magnetic Leakage Fields in Transformers**”; Norwegian Inst. of Technology. International Conference on Electrical Machines ICEM98, Istanbul.
- [3] Massachusetts Institute Of Technology, Dept Of Electrical Engineering; “**Magnetic Circuits and Transformers**”. Ed. Cambridge, Mass. : MIT Press, c1965.
- [4] Glover, J. Duncan; Mulukutla, Sarma; “**Power Analysis & Design**”. Ed. PWS, 5 ed. Boston 1994.
- [5] ANSOFT Corporation, “**Electrical Engineering Simulation Software**”, Versión 9. Pittsburg, PA. <http://www.ansoft.com>
- [6] Waters, M.; “**The Short Circuit Strength of Power Transformers**”, MacDonald, London, 1966.
- [7] L. F. Blume, “**Transformer engineering**”, Ed. Wiley, New York 1954
- [8] McLyman, Colonel William T.; “**Transformer and Inductor Design Handbook**”, Marcel Dekker, inc. 1988.
- [9] John, Carls T.A., “**Teoría Electromagnética: Principios y Aplicaciones**”, Ed. Limusa, México 1999.
- [10] Hayt, William Hart; Buck John A., “**Engineering Electromagnetics**”, Ed. McGraw-Hill, 6<sup>th</sup> ed., 2001.
- [11] Reece, A. B. J., “**Finite Element Methods in Electrical Power Engineering**”, Ed. Oxford University Press, New York, 2000.
- [12] O. W. Andersen; “**User’s Manual, FLD5 Transformer Leakage Flux**”, <http://www.elkraft.ntnu.no/~andersen/>

---

*Lo que hemos estudiado no justifica lo  
haremos en nuestras vidas, sólo hay que  
pensar en cómo queremos vivirla.*  
**Rolando Pérez G.**

## APÉNDICE “A”

### DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA DEL FLD5

---

**APÉNDICE “A”**  
**DESCRIPCION DE LOS DATOS DE ENTRADA DEL FLD5**

En este apéndice se describe brevemente el procedimiento que sigue el programa FLD5 al ejecutarse y el contenido del archivo de entrada al programa. Se presentan en dos tablas la información de entrada colocadas en celdas e indicadas como renglón y columna claramente indicadas. La tabla A1 es la información de cada parámetro de entrada. La tabla A2 es una información más general de las celdas relacionadas entre sí. El manual completo del FLD5 se encuentra en la siguiente página: <http://home.c2i.net/owand/>

El programa se ejecuta desde DOS y sólo se debe de colocar en el directorio activo del fld5. Esto es que:

C:\FLD5\

Se ejecuta con el comando RUN, seguido con el nombre del archivo con los datos de entrada.

C:\FLD5\run 06\_19\_00.pqlab

El programa sigue, en general, las siguientes instrucciones.

1. Correr una subrutina que manipula los datos de entrada y se cambia a la carpeta de FLD11
2. Genera una malla con la información de dimensiones del transformador.
3. Ejecuta un programa que aplica las condiciones de frontera, genera los vectores de potencial y calcula la densidad de flujo
4. Aplica una rutina de salida con la información anterior para calcular densidades, fuerzas además de otras cantidades. Tanto el FLD11 como el FLD5 tienen un archivo de salida llamado output con la información a corriente nominal y a corriente de corto circuito, respectivamente
5. Genera una gráfica con las líneas de flujo del sistema.

A continuación se muestran las tablas A1 y A2.

Tabla A1: Descripción de la tabla de datos de entrada del FLD5								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Título menor a 80 caracteres							
2	Dimensión en mm o in	No. Fases	Frecuencia	No. de piernas	Fracción de ventana	Lím. inferior "z"	Lím. Superior "z"	Diámetro del núcleo
3	Dist. Bobina-tanque	Blindaje Al/Cu	Impedancia de C.C.	Impedancia Unitaria	Factor de pico	No. de Terminales	No. de bobinas	
4	Dist-Elong	Cantidad Dist-Elong	Factor de pérdidas (Eddy)	Pérdidas	Pérdidas	Escala gráfica	Número de líneas de flujo	
5	Número de terminal	Tipo de Conexión	MVA	Kvolts				
6	Número de terminal	Tipo de Conexión	MVA	Kvolts				
7	Número de Bobina	Último segmento de bobina	Radio interno	Longitud radial				
8	Número de terminal	Número de grupos de paralelo	Dirección de corriente	Al/Cu	Número de bloques espaciadores	Espacio entre bloques		
9	Número de Bobina	Último segmento de bobina	Radio interno	Longitud radial				
10	Número de terminal	Número de grupos de paralelo	Dirección de corriente	Al/Cu	Número de bloques espaciadores	Espacio entre bloques		
11	Número de segmento	Z-min	Z-max	Número de vueltas	Número de vueltas activas			
12	Número de hilos por vuelta	Número de hilos (rad.) por vuelta	Dimensión radial del conductor	Dimensión axial del conductor				
13	Num-Seg	Z-min	Z-max	Vueltas-tot	Vueltas-act			
14	Num-hilos/vuelta	Hilos-Radiales	Dim-rad	Dim-axi				

<b>Tabla A2:</b> Descripción de la tabla de datos de entrada del FLD5								
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	Título que consiste en 80 caracteres. Aparece en la hoja de salida (cualquier combinación de letras)							
<b>2</b>	Características generales y coordenadas en "z". La línea de centros corresponde a la mitad de la altura de la ventana o al total de la pantalla.							
<b>3</b>	La distancia bobina-tanque es la distancia radial desde el radio exterior de la última capa. En la mayoría de los casos, más de la distancia verdadera debe de ser computada, para aproximar las condiciones alrededor del perímetro. Sin embargo, no es recomendable una distancia mayor que la mitad de la profundidad de las bobinas. El valor no es muy crítico.							
<b>4</b>	Si en la primer columna el número es 1 todas las capas con una corriente negativa son desplazadas en la dirección de "z" por la cantidad en la columna 11. Si es un número 2 todas las capas con corriente negativa son alargadas por la cantidad en la columna 11. Z-Mínima se mantiene sin cambios y todos los segmentos y espacios abiertos que pertenecen a la capa son alargados por la misma razón de cambio. Un desplazamiento negativo o elongación puede también ser capturada							
<b>5</b>	Las terminales deben de ser numeradas de forma consecutiva, por lo regular iniciar con el 1 para la capa 1. "I" es la conexión para una sola fase.							
<b>6</b>	Para unidades de 3 fases, el valor de MVA es por las tres fases y los KV de línea. Los valores deben de corresponder a los calculados en condiciones de carga y en la posición del TAP. Además de que debe de haber un balance de ampere-vueltas. Los MVA pueden ser cero, pero los kV no.							
<b>7</b>	LAYER DATA: Las capas por lo regular son concéntricas, pero también pueden ser una sobre otra y pertenecer a distintas terminales. Si es así entonces inicie con la capa inferior.							
<b>8</b>	Capas concéntricas no necesitan ser separadas radialmente, pero normalmente lo están. Si la bobina tiene uno o dos conductos de enfriamiento, este puede ser especificado con dos o tres capas.							
<b>9</b>	Número de Bobina	Último segmento de bobina	Radio interno	Longitud radial				
<b>10</b>	Número de terminal	Número de grupos de paralelo	Dirección de corriente	Al/Cu	Número de bloques espaciadores	Espacio entre bloques		
<b>11</b>	SEGMENT DATA: Un segmento está definido como parte de la capa en la cual se puede considerar una uniformidad en los arreglos de los conductores y en las densidades de corriente. El número de segmentos especificados en los datos de entrada debe de mantenerse al mínimo; los discos individuales como segmentos deben de evitarse							
<b>12</b>	Si el segmento consiste en toda la capa con dos grupos en paralelo, el número de vueltas en el segmento se especifica como la suma de los dos grupos. Cuando la simetría en la mitad de la ventana se calcula, los datos de los segmentos se refieren a sólo la mitad.							
<b>13</b>	Num-Seg	Z-min	Z-max	Vueltas-tot	Vueltas-act			
<b>14</b>	N-hilos/vuelta	Hilos-Radiales	Dim-rad	Dim-axi				

---

*Aprender es ser un árbol en otoño que  
espera la primavera para nutrirse de hojas.*  
**Mauricio Min**

## APÉNDICE “B”

### DATOS DE ENTRADA DEL FLD5

---



**APÉNDICE “B”  
DATOS DE ENTRADA DEL PROGRAMA FLD5**

A continuación se presenta el archivo de entrada del programa FLD5 que se aplicó en la presente tesis.

El programa calcula reactancias, pérdidas, fuerzas de corto circuito y esfuerzos mecánicos en transformadores. Las celdas de la tabla B1 corresponden a las de la tabla A1.

**Tabla B1:** Tabla de Datos de entrada del FLD5 para el caso de estudio

	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1</b>	Tesis – Centros electromagnéticos alineados							
<b>2</b>	2	3	60	3	1	0	98.56	38.2
<b>3</b>	8.9763	0	0	0	1.97	2	2	
<b>4</b>	2	0	0	0	0	0.35	30	
<b>5</b>	1	2	180	16				
<b>6</b>	2	1	180	149.076				
<b>7</b>	1	6	19.8	4.88				
<b>8</b>	1	1	-1	1	28	1.5		
<b>9</b>	2	12	26.34	5.86				
<b>10</b>	2	2	1	1	28	1.5		
<b>11</b>	1	5.62	25.761	13	13			
<b>12</b>	372	90	0.043	0.278				
<b>13</b>	2	25.761	29.934	3	3			
<b>14</b>	372	90	0.043	0.278				
<b>15</b>	3	29.934	49.275	13	13			
<b>16</b>	372	90	0.043	0.278				
<b>17</b>	4	49.275	68.616	13	13			
<b>18</b>	372	90	0.043	0.278				
<b>19</b>	5	68.616	72.789	3	3			
<b>20</b>	372	90	0.043	0.278				
<b>21</b>	6	72.789	92.94	13	13			
<b>22</b>	372	90	0.043	0.278				
<b>23</b>	7	6.42	25.761	141	141			
<b>24</b>	31	90	0.051	0.309				
<b>25</b>	8	25.761	29.761	141	141			
<b>26</b>	31	90	0.051	0.309				
<b>27</b>	9	29.934	49.275	141	141			
<b>28</b>	31	90	0.051	0.309				
<b>29</b>	10	49.275	68.616	141	141			
<b>30</b>	31	90	0.051	0.309				
<b>31</b>	11	68.616	72.789	30	30			
<b>32</b>	31	90	0.051	0.309				
<b>33</b>	12	72.789	92.13	141	141			
<b>34</b>	31	90	0.051	0.309				

---

*Libre, y para mi sagrado, es el derecho de pensar. La educación es fundamental para la felicidad social; es el principio en el que descansan la libertad y el engrandecimiento de los pueblos.*  
**Benito Juárez**

## APÉNDICE “C”

### DATOS DE SALIDA DEL FLD11

---

**APÉNDICE “C”**  
**DATOS DE SALIDA DEL PROGRAMA FLD11**

A continuación se muestran los resultados, archivo output, obtenidos por el programa FLD11. Observe las partes de los resultados que son:

1. Posiciones de los puntos que conforman la malla.
2. Corriente, conductividad y las coordenadas de los segmentos de bobina y elementos del transformador bajo estudio.
3. Para los distintos conductores se indica la posición, la densidad de corriente, pérdidas, fuerzas generadas en los conductores en condiciones nominales y densidad máxima.
4. La corriente para todo el sistema y la energía magnética.

PROGRAM FLD11            POISSONIAN MAGNETIC FIELDS

Tesis - Centros electromagneticos alineados

AXI-SYMMETRIC FIELD  
MINIMUM RADIUS 485.1  
SCALE, INPUT DRAWING 1.000

POSITIONS, VERTICAL GRID LINES

1-10	485.1	502.9	516.7	530.5	544.2	558.0	571.8	585.6	599.3	613.1
11-20	626.9	648.0	669.0	682.6	696.1	709.6	723.2	736.7	750.2	763.8
21-29	777.3	790.8	804.3	817.9	863.5	909.1	954.7	1000.3	1045.9	

POSITIONS, HORIZONTAL GRID LINES

1-10	0.0	35.7	71.4	107.1	142.8	153.8	164.9	187.1	209.3	242.6
11-20	275.8	320.2	364.5	431.1	497.6	564.2	630.7	719.4	808.1	896.8
21-30	985.6	1074.3	1163.0	1251.7	1340.4	1429.1	1517.9	1606.6	1695.3	1784.0
31-40	1872.7	1939.3	2005.8	2072.3	2138.9	2183.2	2227.6	2260.9	2294.1	2316.3
41-47	2338.5	2349.6	2360.7	2396.4	2432.1	2467.7	2503.4			

SCALE, FLUX PLOT 0.350  
NUMBER OF FLUX LINES 45.0

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
VERTICALLY 1.00000

CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 27.100

TOTAL CURRENT -68942.9

CODE 0.0

R	Z
502.92	142.75
626.87	142.75
626.87	654.33
502.92	654.33
502.92	142.75

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 30.184  
 TOTAL CURRENT -15909.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 502.92    654.33  
 626.87    654.33  
 626.87    760.32  
 502.92    760.32  
 502.92    654.33

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 28.221  
 TOTAL CURRENT -68942.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 502.92    760.32  
 626.87    760.32  
 626.87    1251.58  
 502.92    1251.58  
 502.92    760.32

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 28.221  
 TOTAL CURRENT -68942.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 502.92    1251.58  
 626.87    1251.58  
 626.87    1742.85  
 502.92    1742.85  
 502.92    1251.58

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 30.184  
 TOTAL CURRENT -15909.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 502.92    1742.85  
 626.87    1742.85  
 626.87    1848.84  
 502.92    1848.84  
 502.92    1742.85

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 27.087  
 TOTAL CURRENT -68942.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 502.92 1848.84  
 626.87 1848.84  
 626.87 2360.68  
 502.92 2360.68  
 502.92 1848.84

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 28.229  
 TOTAL CURRENT 69503.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 669.04 163.07  
 817.88 163.07  
 817.88 654.33  
 669.04 654.33  
 669.04 163.07

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 27.838  
 TOTAL CURRENT 14788.1  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 669.04 654.33  
 817.88 654.33  
 817.88 760.32  
 669.04 760.32  
 669.04 654.33

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000  
 CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 28.229  
 TOTAL CURRENT 69503.9  
 CODE 0.0  
     R        Z  
 669.04 760.32  
 817.88 760.32  
 817.88 1251.58  
 669.04 1251.58  
 669.04 760.32

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000

CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 28.229

TOTAL CURRENT 69503.9

CODE 0.0

R	Z
669.04	1251.58
817.88	1251.58
817.88	1742.85
669.04	1742.85
669.04	1251.58

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000

CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 27.838

TOTAL CURRENT 14788.1

CODE 0.0

R	Z
669.04	1742.85
817.88	1742.85
817.88	1848.84
669.04	1848.84
669.04	1742.85

RELATIVE PERMEABILITY, HORIZONTALLY 1.00000  
 VERTICALLY 1.00000

CONDUCTIVITY, M/OHM\*SQ.MM 28.229

TOTAL CURRENT 69503.9

CODE 0.0

R	Z
669.04	1848.84
817.88	1848.84
817.88	2340.10
669.04	2340.10
669.04	1848.84

VECTOR POTENTIAL 0.000E+00

CODE 2.0

R	Z
1045.88	1251.71

FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX
502.92	626.87	142.75	654.33

CURRENT DENSITY -1.087

RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.065E-06

LOSS, KW/CIRCLE 9.817E+00

FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R -1.946E+04

F-Z 3.013E+03

SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 7.137E-05

SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 1.917E-03

BR-MAX 6.310E-02

BZ-MAX 1.651E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
502.92 626.87 654.33 760.32  
CURRENT DENSITY -1.211  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 8.951E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 2.266E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R -5.124E+03  
F-Z 1.398E+02  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 2.903E-07  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 5.046E-04  
BR-MAX 2.796E-03  
BZ-MAX 1.666E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
502.92 626.87 760.32 1251.58  
CURRENT DENSITY -1.132  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.065E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 9.817E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R -2.243E+04  
F-Z -1.497E+02  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 1.042E-07  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 2.369E-03  
BR-MAX -1.248E-03  
BZ-MAX 1.682E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
502.92 626.87 1251.58 1742.85  
CURRENT DENSITY -1.132  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.065E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 9.817E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R -2.243E+04  
F-Z 1.461E+02  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 9.928E-08  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 2.369E-03  
BR-MAX 9.987E-04  
BZ-MAX 1.682E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
502.92 626.87 1742.85 1848.84  
CURRENT DENSITY -1.211  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 8.951E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 2.266E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R -5.134E+03  
F-Z -1.490E+02  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 3.456E-07  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 5.064E-04  
BR-MAX -3.539E-03  
BZ-MAX 1.695E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
502.92 626.87 1848.84 2360.68  
CURRENT DENSITY -1.087  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.065E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 9.817E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R -1.934E+04  
F-Z -3.001E+03  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 7.120E-05  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 1.902E-03  
BR-MAX -6.293E-02  
BZ-MAX 1.664E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
669.04 817.88 163.07 654.33  
CURRENT DENSITY 0.951  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.263E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 1.093E+01  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R 2.366E+04  
F-Z 2.810E+03  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 6.371E-05  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 2.603E-03  
BR-MAX -4.422E-02  
BZ-MAX 1.663E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
669.04 817.88 654.33 760.32  
CURRENT DENSITY 0.937  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 1.064E-05  
LOSS, KW/CIRCLE 2.326E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R 5.783E+03  
F-Z 3.027E+01  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 4.525E-08  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 7.050E-04  
BR-MAX -1.442E-03  
BZ-MAX 1.676E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
669.04 817.88 760.32 1251.58  
CURRENT DENSITY 0.951  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.263E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 1.093E+01  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R 2.761E+04  
F-Z 1.896E+02  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 1.609E-07  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 3.357E-03  
BR-MAX -1.159E-03  
BZ-MAX 1.709E-01



## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
669.04 817.88 1251.58 1742.85  
CURRENT DENSITY 0.951  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.263E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 1.093E+01  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R 2.761E+04  
F-Z -1.789E+02  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 1.608E-07  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 3.356E-03  
BR-MAX 1.907E-03  
BZ-MAX 1.709E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
669.04 817.88 1742.85 1848.84  
CURRENT DENSITY 0.937  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 1.064E-05  
LOSS, KW/CIRCLE 2.326E+00  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R 5.773E+03  
F-Z -2.984E+01  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 2.475E-08  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 7.041E-04  
BR-MAX 9.762E-04  
BZ-MAX 1.678E-01

## FOR CONDUCTOR BETWEEN

R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
669.04 817.88 1848.84 2340.10  
CURRENT DENSITY 0.951  
RESISTANCE, OHM/CIRCLE 2.263E-06  
LOSS, KW/CIRCLE 1.093E+01  
FORCE, NEWTON/CIRCLE, F-R 2.377E+04  
F-Z -2.825E+03  
SUM BR-SQUARED TIMES CUB.M 6.396E-05  
SUM BZ-SQUARED TIMES CUB.M 2.619E-03  
BR-MAX 4.437E-02  
BZ-MAX 1.672E-01

## FOR THE WHOLE PROBLEM:

TOTAL CURRENT 0.40  
LOSS, KW/CIRCLE 9.218E+01  
MAGNETIC ENERGY, WS/CIRCLE 1.399581E+04

---

*Después de escalar una montaña muy alta,  
descubrimos que hay muchas otras  
montañas por escalar*  
**Nelson Mandela**

## CAPÍTULO 9

# RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJO

---

## 9.0 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

La aplicación de la metodología de elementos finitos ha contribuido a la solución de muchos casos en la ingeniería. La comparación entre los programas FLD5 y Maxwell 2D, demuestran los avances en la metodología y en la capacidad de computo desde los años 70s

La lectura de los capítulos anteriores de la presente tesis puede sugerir otras lecturas así como también preguntas y comentarios. Para análisis posteriores, el investigador puede aplicarse en comparar los algoritmos de generación de malla de los programas. Lo anterior debido a que una malla generada correctamente arrojará resultados cercanos a la realidad al colocar un número y dimensiones adecuados de elementos triangulares, además de que con ello se tiene un mejor uso de los recursos computacionales.

Otro punto interesante a investigar es el de incluir el análisis de mecánica de materiales en los componentes del transformador. En Maxwell pueden crearse secuencias sencillas de instrucciones para obtener la información de fuerzas para luego combinarlas con una hoja de cálculo que aplique un estudio estructuras de elementos como vigas y columnas que simulen componentes mecánicos del transformador. El programa FLD5 cuenta ya con instrucciones que arrojan resultados sobre esfuerzos y deformaciones y es por ello que un punto importante para algún investigador es el validar la teoría aplicada al programa, las ecuaciones y las características de materiales que se ejecutan.

La suposición de tener las bobinas en forma de rectángulos y no como un conjunto de muchos elementos conductores puede ser un punto importante a investigar. Con ello se podría tener información más puntual de la localización de intensidades de campo o de los esfuerzos en cada uno de los conductores.

Una parte importante de cualquier investigación es la de verificar, por medio de un experimento en laboratorio, los resultados de fuerzas y esfuerzos en distintos puntos del transformador. Estos resultados brindarían una base más sólida sobre la validez de un programa sobre otro o de los valores base con el cual se contraponen los resultados tanto teóricos como de cualquier programa.

Se recomienda también realizar simulaciones con bobinas que tienen desfaseamiento entre los centros de las bobinas. Este estudio es muy importante porque en estos casos se tienen fuerzas axiales con pares torsionales que tienden a deformar las bobinas. Se recomienda comparar los resultados obtenidos con cada uno de los simuladores. Con el desfaseamiento entre los centros de las bobinas se viene a producir fuerzas que son difíciles de validar. Para este caso se recomienda desarrollar un procedimiento que permita verificar las fuerzas analíticas.

Se sugiere también diseñar e implementar un método que permita validar experimentalmente las fuerzas que se tienen en las diferentes secciones de una bobina.

Pueden surgir otras dudas o comentarios por parte del lector y todas ellas son válidas como punto de partida para una investigación, todo depende de la disponibilidad de tiempo, recursos, disciplina y entusiasmo por parte de las personas involucradas.

---

*La escuela ha de enseñar a manipular las  
fuerzas con que se ha de luchar en la vida.*  
**José Martí**

## APÉNDICE “D”

### DATOS DE SALIDA DEL FLD5

---

**APÉNDICE “D”  
DATOS DE SALIDA DEL PROGRAMA FLD5**

A continuación se muestran los resultados, archivo output, obtenidos por el programa FLD5. Observe las partes de los resultados que son:

1. Los datos del transformador que son los datos de entrada
2. Dimensión de la bobina de alta y baja tensión
3. Dimensiones de cada uno de los segmentos de bobina y de sus conductores
4. Posición de las líneas verticales y horizontales de la malla
5. Cálculo de los esfuerzos mecánicos en las bobinas
6. Información de cada segmento de pérdidas y esfuerzos mecánicos en corto circuito
7. Esfuerzos críticos radiales y axiales en condiciones de corto circuito
8. Reactancia, resistencia e impedancia en el transformador.
9. Información de dimensiones y fuerzas de cada bobina

PROGRAM FLD5                      TRANSFORMER LEAKAGE FLUX

Tesis - Centros electromagneticos alineados

NUMBER OF PHASES 3.0	SYSTEM SHORT CIRCUIT GVA .000
FREQUENCY 60.00	OPTIONAL PU IMPEDANCE .0000
NUMBER OF WOUND LIMBS 3.0	PEAK FACTOR 1.970
FRACTION OF WINDOW HEIGHT CALC. 1.0	LOSS FACTORS
Z - LOWER BOUNDARY .0	TANK .00
Z - UPPER BOUNDARY 2503.4	LEG .00
CORE DIAMETER 970.3	YOKE .00
DISTANCE WINDING-TANK 228.0	SCALE, FLUX PLOT .350
AL/CU SHIELD .0	NO. OF FLUX LINES 45.0

TERMINAL NUMBER	1.0	2.0
CONNECTION	D	Y
MVA	180.000	180.000
KV	16.000	149.076

LAYER NO.	LAST SEGM.	INNER RAD.	RADIAL WIDTH	TERM. NO.	PAR. GROUPS	DIR. CUR.	CU/AL NUMBER	SPACER WIDTH	BLOCKS
1.0	6.0	502.9	124.0	1.0	1.0	-1.0	CU	28.0	38.1
2.0	12.0	669.0	148.8	2.0	2.0	1.0	CU	28.0	38.1

SEGM. NO.	LAYER NO.	Z-COORDINATE MIN.	Z-COORDINATE MAX.	NO. OF TURNS TOTAL	NO. OF TURNS ACTIVE	NUMBER OF STRANDS PER TURN	STRANDS RADIALLY	STRAND DIMENS. RAD.	STRAND DIMENS. AXIALLY
1.0	1.0	142.7	654.3	13.0	13.0	372.0	90.0	1.09	7.06
2.0	1.0	654.3	760.3	3.0	3.0	372.0	90.0	1.09	7.06
3.0	1.0	760.3	1251.6	13.0	13.0	372.0	90.0	1.09	7.06
4.0	1.0	1251.6	1742.8	13.0	13.0	372.0	90.0	1.09	7.06
5.0	1.0	1742.8	1848.8	3.0	3.0	372.0	90.0	1.09	7.06
6.0	1.0	1848.8	2360.7	13.0	13.0	372.0	90.0	1.09	7.06
7.0	2.0	163.1	654.3	141.0	141.0	31.0	90.0	1.30	7.85
8.0	2.0	654.3	760.3	30.0	30.0	31.0	90.0	1.30	7.85
9.0	2.0	760.3	1251.6	141.0	141.0	31.0	90.0	1.30	7.85
10.0	2.0	1251.6	1742.8	141.0	141.0	31.0	90.0	1.30	7.85
11.0	2.0	1742.8	1848.8	30.0	30.0	31.0	90.0	1.30	7.85
12.0	2.0	1848.8	2340.1	141.0	141.0	31.0	90.0	1.30	7.85

RADIAL POSITIONS, VERTICAL GRID LINES

1-10	485.1	502.9	516.7	530.5	544.2	558.0	571.8	585.6	599.3	613.1
11-20	626.9	648.0	669.0	682.6	696.1	709.6	723.2	736.7	750.2	763.8
21-29	777.3	790.8	804.3	817.9	863.5	909.1	954.7	1000.3	1045.9	

AXIAL POSITIONS, HORIZONTAL GRID LINES

1-10	.0	35.7	71.4	107.1	142.8	153.8	164.9	187.1	209.3	242.6
11-20	275.8	320.2	364.5	431.1	497.6	564.2	630.7	719.4	808.1	896.8
21-30	985.6	1074.3	1163.0	1251.7	1340.4	1429.1	1517.9	1606.6	1695.3	1784.0
31-40	1872.7	1939.3	2005.8	2072.3	2138.9	2183.2	2227.6	2260.9	2294.1	2316.3
41-47	2338.5	2349.6	2360.7	2396.4	2432.1	2467.7	2503.4			

'MIN. NUMBER OF SPACER BARS' IS TWICE THE THEORETICAL MINIMUM CALCULATED FROM TIMOSHENKO'S BUCKLING FORMULA FOR COLUMNS WITH BUILT-IN ENDS, EQUATION 146. THIS IS THE RECOMMENDED MINIMUM NUMBER.

THE COMPRESSIVE STRESS IN THE SPACER BLOCKS IS CALCULATED DUE TO ACCUMULATED AXIAL FORCES WITHIN AND OUTSIDE OF THE WINDING SEGMENT. IF THERE ARE NO SPACERS, THE COMPRESSIVE STRESS IN THE INSULATION IS CALCULATED IN THE SAME WAY. IN BOTH CASES, THE PROGRAM ASSUMES A RADIAL LENGTH OF CONTACT EQUAL TO THE SUM OF THE RADIAL STRAND DIMENSIONS.

STRESSES DUE TO COMBINED FORCES ARE BENDING STRESSES DUE TO 'MAX. N/CUB.DM, AXIALLY' COMBINED WITH TENSION OR COMPRESSION DUE TO 'MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY'. BENDING STRESS IS CALCULATED FOR A BUILT-IN BEAM WITH A LENGTH EQUAL TO THE AVERAGE SPACER PITCH MINUS HALF THE SPACER WIDTH.

SEGMENT NUMBER	1.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT			
KVA	-13448.28	TOTAL RADIALLY, NEWTON	-9766105.0		
DC LOSS		TOTAL AXIALLY, NEWTON	1511990.0		
KW/CUB.DM GROSS VOLUME	.0218	MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY	-11759.9		
KW TOTAL	4.909	MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY	-21572.2		
EDDY CURRENT LOSS		MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON	1511990.0		
KW DUE TO AXIAL FLUX	.367	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY	34.43		
KW DUE TO RADIAL FLUX	.571	DUE TO RADIAL FORCES			
KW TOTAL	.938	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION	-47.09		
PER UNIT, AVERAGE	.1911	MIN. NUMBER OF SPACER BARS	68.9		
PER UNIT, MAXIMUM	1.4631	DUE TO AXIAL FORCES			
OCCURS BETWEEN		N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS	14.42		
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES	
516.7	530.5	142.8	153.8	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR.	73.76

SEGMENT NUMBER	2.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT			
KVA	-3103.45	TOTAL RADIALLY, NEWTON	-2571437.0		
DC LOSS		TOTAL AXIALLY, NEWTON	70148.6		
KW/CUB.DM GROSS VOLUME	.0243	MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY	-24261.1		
KW TOTAL	1.133	MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY	-24261.1		
EDDY CURRENT LOSS		MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON	70148.6		
KW DUE TO AXIAL FLUX	.108	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY	1.70		
KW DUE TO RADIAL FLUX	.003	DUE TO RADIAL FORCES			
KW TOTAL	.110	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION	-47.55		
PER UNIT, AVERAGE	.0973	MIN. NUMBER OF SPACER BARS	69.2		
PER UNIT, MAXIMUM	.2449	DUE TO AXIAL FORCES			
OCCURS BETWEEN		N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS	15.09		
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES	
613.1	626.9	654.3	760.3	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR.	49.68

SEGMENT NUMBER 3.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA -13448.28	TOTAL RADially, NEWTON -11255630.0
DC LOSS	TOTAL AXIALLY, NEWTON -75118.4
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0227	MIN. N/AXIAL MM, RADially -22836.6
KW TOTAL 4.909	MAX. N/AXIAL MM, RADially -22931.2
EDDY CURRENT LOSS	MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON -76204.8
KW DUE TO AXIAL FLUX .472	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY -.71
KW DUE TO RADIAL FLUX .001	DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .473	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION -48.07
PER UNIT, AVERAGE .0964	MIN. NUMBER OF SPACER BARS 69.6
PER UNIT, MAXIMUM .2489	DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN	N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 15.10
R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
613.1 626.9 760.3 808.1	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 48.82
SEGMENT NUMBER 4.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA -13448.28	TOTAL RADially, NEWTON -11254450.0
DC LOSS	TOTAL AXIALLY, NEWTON 73323.0
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0227	MIN. N/AXIAL MM, RADially -22859.7
KW TOTAL 4.909	MAX. N/AXIAL MM, RADially -22950.0
EDDY CURRENT LOSS	MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON 73651.7
KW DUE TO AXIAL FLUX .472	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY .57
KW DUE TO RADIAL FLUX .001	DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .473	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION -48.11
PER UNIT, AVERAGE .0964	MIN. NUMBER OF SPACER BARS 69.6
PER UNIT, MAXIMUM .2482	DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN	N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 15.08
R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
613.1 626.9 1251.6 1340.4	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 48.68
SEGMENT NUMBER 5.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA -3103.45	TOTAL RADially, NEWTON -2576397.0
DC LOSS	TOTAL AXIALLY, NEWTON -74782.3
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0243	MIN. N/AXIAL MM, RADially -24307.9
KW TOTAL 1.133	MAX. N/AXIAL MM, RADially -24307.9
EDDY CURRENT LOSS	MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON -74782.3
KW DUE TO AXIAL FLUX .108	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY -2.15
KW DUE TO RADIAL FLUX .003	DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .111	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION -47.64
PER UNIT, AVERAGE .0980	MIN. NUMBER OF SPACER BARS 69.3
PER UNIT, MAXIMUM .2527	DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN	N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 15.07
R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
613.1 626.9 1742.9 1848.8	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 50.34
SEGMENT NUMBER 6.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA -13448.28	TOTAL RADially, NEWTON -9705852.0
DC LOSS	TOTAL AXIALLY, NEWTON -1505738.0
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0218	MIN. N/AXIAL MM, RADially -11568.4
KW TOTAL 4.909	MAX. N/AXIAL MM, RADially -21458.5
EDDY CURRENT LOSS	MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON -1505738.0
KW DUE TO AXIAL FLUX .364	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY -34.32
KW DUE TO RADIAL FLUX .569	DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .933	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION -46.87
PER UNIT, AVERAGE .1901	MIN. NUMBER OF SPACER BARS 68.7
PER UNIT, MAXIMUM 1.4552	DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN	N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 14.36

R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
516.7	530.5	2349.6	2360.7	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 73.23
SEGMENT NUMBER 7.0				FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA 13557.69				TOTAL RADIALLY, NEWTON 11873960.0
DC LOSS				TOTAL AXIALLY, NEWTON 1410083.0
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0160				MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY 17770.7
KW TOTAL 5.466				MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY 27148.9
EDDY CURRENT LOSS				MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON 1410083.0
KW DUE TO AXIAL FLUX .730				MAX. N/CUB.CM, AXIALLY 21.09
KW DUE TO RADIAL FLUX .656				DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL 1.386				N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION 47.76
PER UNIT, AVERAGE .2536				MIN. NUMBER OF SPACER BARS .0
PER UNIT, MAXIMUM 1.2946				DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN				N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 11.35
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
750.2	763.8	163.1	187.1	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 79.55
SEGMENT NUMBER 8.0				FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA 2884.62				TOTAL RADIALLY, NEWTON 2901779.0
DC LOSS				TOTAL AXIALLY, NEWTON 15192.1
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0158				MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY 27377.8
KW TOTAL 1.163				MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY 27377.8
EDDY CURRENT LOSS				MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON 19042.4
KW DUE TO AXIAL FLUX .195				MAX. N/CUB.CM, AXIALLY .68
KW DUE TO RADIAL FLUX .000				DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .195				N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION 48.85
PER UNIT, AVERAGE .1681				MIN. NUMBER OF SPACER BARS .0
PER UNIT, MAXIMUM .4934				DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN				N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 11.48
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
669.0	682.6	654.3	760.3	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 50.42
SEGMENT NUMBER 9.0				FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA 13557.69				TOTAL RADIALLY, NEWTON 13853300.0
DC LOSS				TOTAL AXIALLY, NEWTON 95125.9
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0160				MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY 28072.1
KW TOTAL 5.466				MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY 28265.3
EDDY CURRENT LOSS				MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON 96954.1
KW DUE TO AXIAL FLUX .942				MAX. N/CUB.CM, AXIALLY .55
KW DUE TO RADIAL FLUX .002				DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .943				N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION 49.73
PER UNIT, AVERAGE .1726				MIN. NUMBER OF SPACER BARS .0
PER UNIT, MAXIMUM .5124				DUE TO AXIAL FORCES
OCCURS BETWEEN				N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS 12.26
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX	DUE TO COMBINED FORCES
669.0	682.6	1163.0	1251.6	N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR. 50.65
SEGMENT NUMBER 10.0				FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT
KVA 13557.69				TOTAL RADIALLY, NEWTON 13855760.0
DC LOSS				TOTAL AXIALLY, NEWTON -89767.5
KW/CUB.DM GROSS VOLUME .0160				MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY 27989.3
KW TOTAL 5.466				MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY 28252.9
EDDY CURRENT LOSS				MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON -89767.5
KW DUE TO AXIAL FLUX .941				MAX. N/CUB.CM, AXIALLY -.91
KW DUE TO RADIAL FLUX .002				DUE TO RADIAL FORCES
KW TOTAL .943				N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION 49.71



PER UNIT, AVERAGE	.1725	MIN. NUMBER OF SPACER BARS	.0
PER UNIT, MAXIMUM	.5129	DUE TO AXIAL FORCES	
OCCURS BETWEEN		N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS	12.24
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX
669.0	682.6	1517.9	1606.6
		DUE TO COMBINED FORCES	
		N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR.	51.33
SEGMENT NUMBER	11.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT	
KVA	2884.62	TOTAL RADIALLY, NEWTON	2896803.0
DC LOSS		TOTAL AXIALLY, NEWTON	-14976.7
KW/CUB.DM GROSS VOLUME	.0158	MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY	27330.9
KW TOTAL	1.163	MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY	27330.9
EDDY CURRENT LOSS		MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON	-15906.1
KW DUE TO AXIAL FLUX	.195	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY	-.46
KW DUE TO RADIAL FLUX	.000	DUE TO RADIAL FORCES	
KW TOTAL	.195	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION	48.76
PER UNIT, AVERAGE	.1677	MIN. NUMBER OF SPACER BARS	.0
PER UNIT, MAXIMUM	.4935	DUE TO AXIAL FORCES	
OCCURS BETWEEN		N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS	11.53
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX
669.0	682.6	1742.9	1848.8
		DUE TO COMBINED FORCES	
		N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR.	49.83
SEGMENT NUMBER	12.0	FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT	
KVA	13557.69	TOTAL RADIALLY, NEWTON	11929660.0
DC LOSS		TOTAL AXIALLY, NEWTON	-1417642.0
KW/CUB.DM GROSS VOLUME	.0160	MIN. N/AXIAL MM, RADIALLY	17957.4
KW TOTAL	5.466	MAX. N/AXIAL MM, RADIALLY	27256.7
EDDY CURRENT LOSS		MAX. ACCUM. AXIALLY, NEWTON	-1424381.0
KW DUE TO AXIAL FLUX	.735	MAX. N/CUB.CM, AXIALLY	-21.16
KW DUE TO RADIAL FLUX	.659	DUE TO RADIAL FORCES	
KW TOTAL	1.393	N/SQ.MM TENSION/COMPRESSION	47.95
PER UNIT, AVERAGE	.2549	MIN. NUMBER OF SPACER BARS	.0
PER UNIT, MAXIMUM	1.3056	DUE TO AXIAL FORCES	
OCCURS BETWEEN		N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS	11.45
R-MIN	R-MAX	Z-MIN	Z-MAX
750.2	763.8	2316.3	2340.1
		DUE TO COMBINED FORCES	
		N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR.	80.04
CRITICAL STRESSES ETC. AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT:			
DUE TO RADIAL FORCES		SEGMENT NO.	
N/SQ.MM TENSION	49.73		9.0
N/SQ.MM COMPRESSION	-48.11		4.0
MIN. NUMBER OF SPACER BARS	69.6		4.0
DUE TO AXIAL FORCES			
N/SQ.MM IN SPACER BLOCKS OR INSULATION	15.10		3.0
DUE TO COMBINED FORCES			
N/SQ.MM BENDING+TENS./COMPR.	80.04		12.0

---

VOLTS PER TURN 275.862  
MAX. RADIAL FLUX DENSITY AT CORE LEG .0592  
MAX. RADIAL FLUX DENSITY AT TANK .0094  
BASED ON MAGNETIC ENERGY AND TOTAL LOSSES, WITH BASE MVA 180.000  
PU TRANSFORMER SHORT CIRCUIT REACTANCE .0879373  
RESISTANCE .0009  
IMPEDANCE .0879  
PU SYSTEM IMPEDANCE .0000  
PU TOTAL IMPEDANCE .0879  
PU IMPEDANCE USED IN CALCULATIONS OF FORCES AND STRESSES .0879  
FOR THE WHOLE TRANSFORMER  
EDDY CURRENT LOSS  
KW WINDINGS 24.286  
KW TANK .000  
KW LEG .000  
KW YOKE .000  
KW TOTAL 24.286  
PER UNIT, TOTAL .1756  
DC LOSS, KW TOTAL 138.272  
LOSSES REFERRED TO LAYERS ARE FOR ONE LIMB, REFERRED TO TERMINALS FOR THE  
WHOLE TRANSFORMER.

LAYER NUMBER 1  
DC LOSS, KW 21.900  
EDDY CURRENT LOSS  
KW DUE TO AXIAL FLUX 1.891  
KW DUE TO RADIAL FLUX 1.148  
KW TOTAL 3.039  
PER UNIT, AVERAGE .1388  
PER UNIT, MAXIMUM 1.4631  
OCCURS BETWEEN  
R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
516.7 530.5 142.8 153.8  
FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT, NEWTON  
MAX. ACCUMULATED AXIALLY 1583403.0  
OCCURS IN SEGMENT NO. 3  
ON UPPER SUPPORT .0  
ON LOWER SUPPORT 177.9  
FLUX LINKAGE, REFERRED TO ONE TURN -.11407080

TERMINAL NUMBER 1  
DC LOSS, KW 65.700  
EDDY CURRENT LOSS, KW 9.116  
PER UNIT .1388  
PERCENT DEVIATION, VOLTS/TURN .000

LAYER NUMBER 2  
DC LOSS, KW 24.190  
EDDY CURRENT LOSS  
KW DUE TO AXIAL FLUX 3.738  
KW DUE TO RADIAL FLUX 1.319  
KW TOTAL 5.057  
PER UNIT, AVERAGE .2090  
PER UNIT, MAXIMUM 1.3056  
OCCURS BETWEEN  
R-MIN R-MAX Z-MIN Z-MAX  
750.2 763.8 2316.3 2340.1

---

FORCES AT PEAK SHORT CIRCUIT CURRENT, NEWTON  
MAX. ACCUMULATED AXIALLY 1524215.0  
OCCURS IN SEGMENT NO. 9  
ON UPPER SUPPORT .0  
ON LOWER SUPPORT 1985.2  
FLUX LINKAGE, REFERRED TO ONE TURN -.02315484

TERMINAL NUMBER 2  
DC LOSS, KW 72.571  
EDDY CURRENT LOSS, KW 15.170  
PER UNIT .2090  
PERCENT DEVIATION, VOLTS/TURN .000

TOTAL SHORT CIRCUIT FORCE FROM ALL THE LAYERS, UPPER SUPPORT .0  
LOWER SUPPORT 2163.2

---

*La lectura es una conversación con los  
hombres más ilustres de los siglos pasados.  
Descartes*

## APÉNDICE “E”

### PASOS PARA CREAR EL MODELO DEL TRANSFORMADOR BAJO ESTUDIO EN MAXWELL 2D DE ANSOFT

---

---

## APÉNDICE “E” CREACIÓN DEL MODELO EN MAXWELL 2D

En este apéndice se explica, de forma general, la serie de pasos a seguir para crear el modelo en Maxwell 2D versión 9.0, que es un paquete que analiza campos electromagnéticos. Aplica el análisis de elemento finito (FEA) para resolver problemas electromagnéticos en dos o tres dimensiones. Ejemplos con mayor explicación y detalle se pueden encontrar en la página de la compañía ANSOFT (<http://www.ansoft.com/>)

Para analizar el problema, se debe de especificar apropiadamente la geometría, las propiedades de materiales y los dispositivos de excitación o fuentes. El programa Maxwell realiza lo siguiente:

- Automáticamente crea una malla de elementos finitos
- Calcula de forma iterativa el campo magnetostático y las cantidades de interés, incluyendo fuerzas, pares torsionales, capacitancia y pérdidas
- Tiene la capacidad para analizar, manipular y desplegar las soluciones del campo.

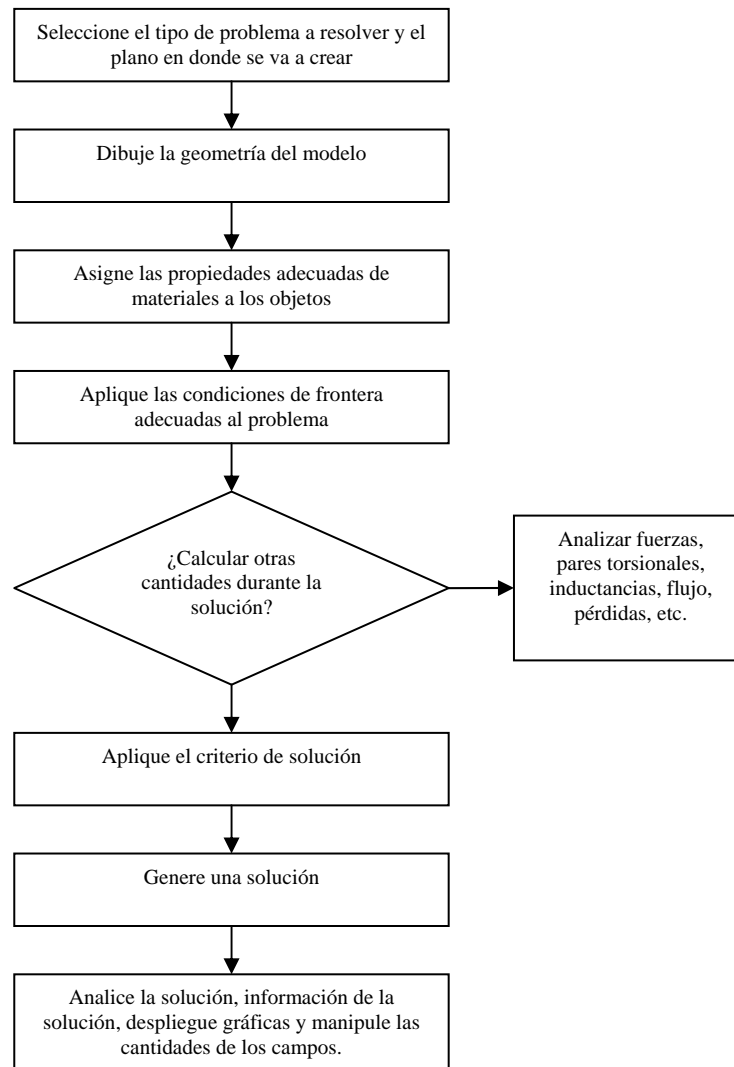
Pasos para crear el modelo

El procedimiento general para crear un problema en Maxwell 2D es el siguiente

1. Utilice el comando *Solver* para especificar cual de las siguientes cantidades de campo magnético o eléctrico se va a resolver:
  - a. Electrostático
  - b. Magnetostático
  - c. Corrientes de Eddy
  - d. Conducción en CD
  - e. Conducción en CA
  - f. Eddy Axial
2. Utilice el comando *Drawing* para seleccionar uno de los siguientes planos del modelo
  - a. Plano XY: Modelo cartesiano que corta perpendicularmente la sección transversal
  - b. Plano RZ: Modelo axisimétrico que gira alrededor de un eje de simetría en la sección transversal
3. Utilice los comandos de *Define Model* para crear la geometría del modelo. Cuando el usuario utiliza este comando aparece un nuevo menú el cual contiene:
  - a. *Draw Model*: Permite acceder al modelador 2D y construir los objetos que crean la geometría del modelo
  - b. *Group Objects*: Permite agrupar objetos que eléctricamente son los mismos.
4. Utilice el comando *Setup Materials* para asignar materiales a todos los objetos en la geometría del modelo.
5. Utilice el comando *Setup Boundaries/Sources* para definir las condiciones de frontera y las fuentes aplicadas al problema. Esto determina el comportamiento del campo del modelo.
6. Utilice el comando *Setup Executive Parameters* para indicar al simulador de calcular una o varias de las siguientes cantidades durante el proceso de solución:

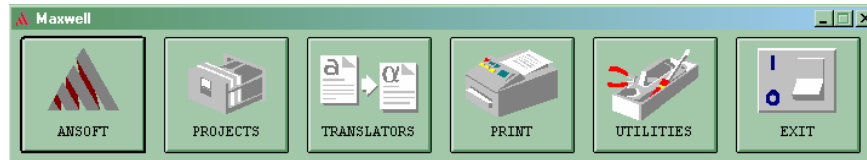
- a. Fuerza
  - b. Par Torsional
  - c. Líneas de flujo
  - d. Macros postprocesador
  - e. Pérdidas de núcleo
  - f. Flujo de corriente
  - g. Matriz (capacitancia, inductancia, admitancia, impedancia)
7. Utilice el comando *Setup Solution Options* para dar de alta los parámetros que afectan la solución calculada
  8. Utilice el comando *Solve* para resolver el sistema
  9. Utilice el comando *Post Process* para analizar la solución

Estos comandos son aplicados en la secuencia que aparecen. El usuario debe primero crear la geometría del modelo utilizando el comando *Define Model* antes de especificar las características del material con el comando *Setup Materials*. En cada paso que se da en crear el modelo se genera una marca indicando que ese paso ha sido completado.



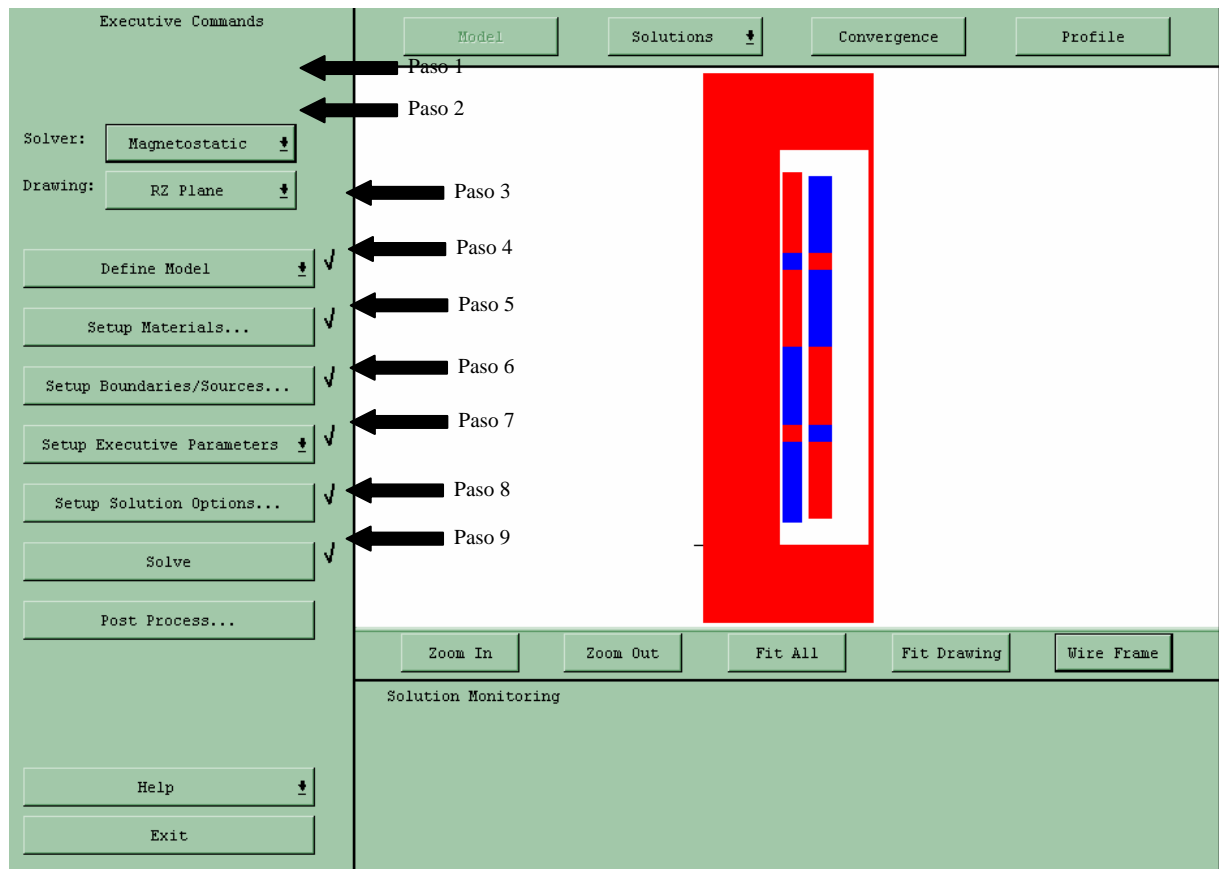
**Figura E1:** Diagrama de flujo para crear un modelo en Maxwell 2D

Al iniciar el programa de Maxwell, aparece el siguiente menú. Seleccionamos el botón de proyectos para iniciar un nuevo análisis. Figura E2.



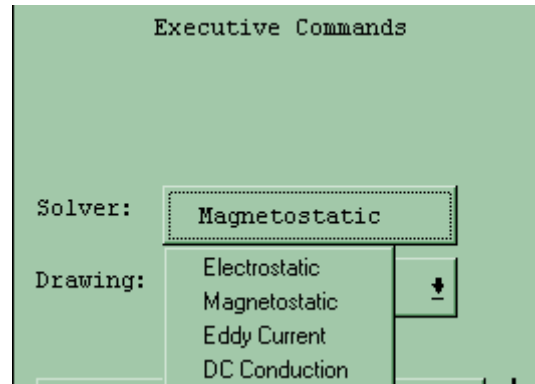
**Figura E2:** Menú inicial para un nuevo proyecto en Maxwell 2D

Una vez iniciado un nuevo proyecto aparece la ventana que se muestra en la figura E3. En ella se muestran los distintos pasos para seguir en el proceso de análisis. En la figura se indica que se puede observar el modelo y que los distintos pasos ya han sido dados de alta. Lo anterior se indica con una paloma indicadora a la derecha de cada comando.



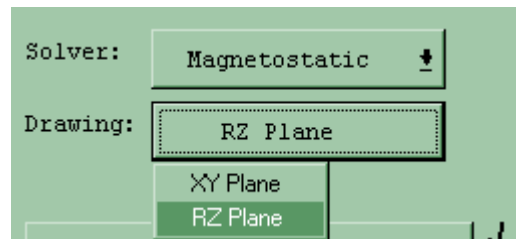
**Figura E3:** Menú de pasos a seguir en la creación del modelo en Maxwell 2D

El primer paso es el de seleccionar el tipo de análisis. En esta tesis se aplicó el análisis magnetostático. Observe las otras opciones de análisis con la que cuenta el Maxwell 2D. Figura E4.



**Figura E4:** Menú para seleccionar el tipo de análisis a resolver en Maxwell 2D

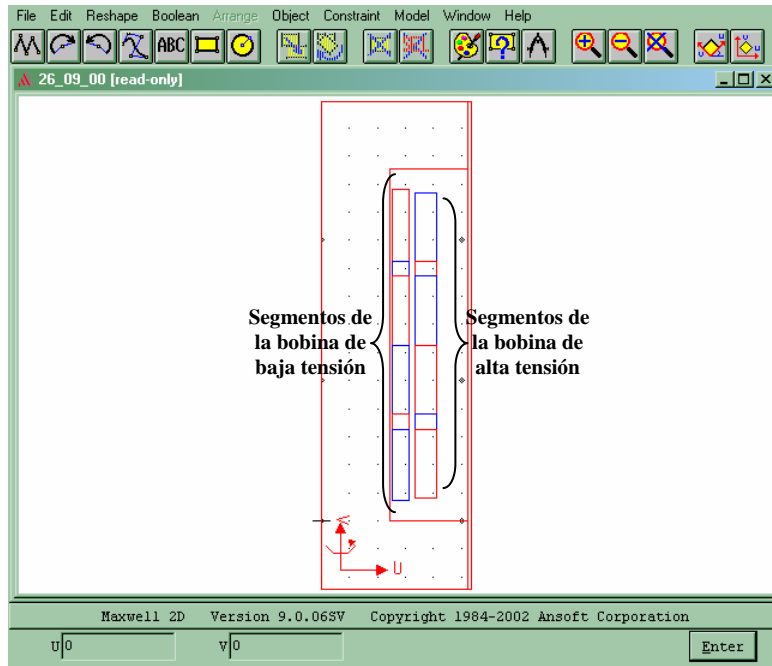
Ahora seleccionamos el plano en donde se va a resolver el sistema. Tenemos las opciones de un plano XY o el axisimétrico, plano RZ. Figura E5



**Figura E5:** Menú para seleccionar el plano en donde se resuelve el sistema en Maxwell 2D

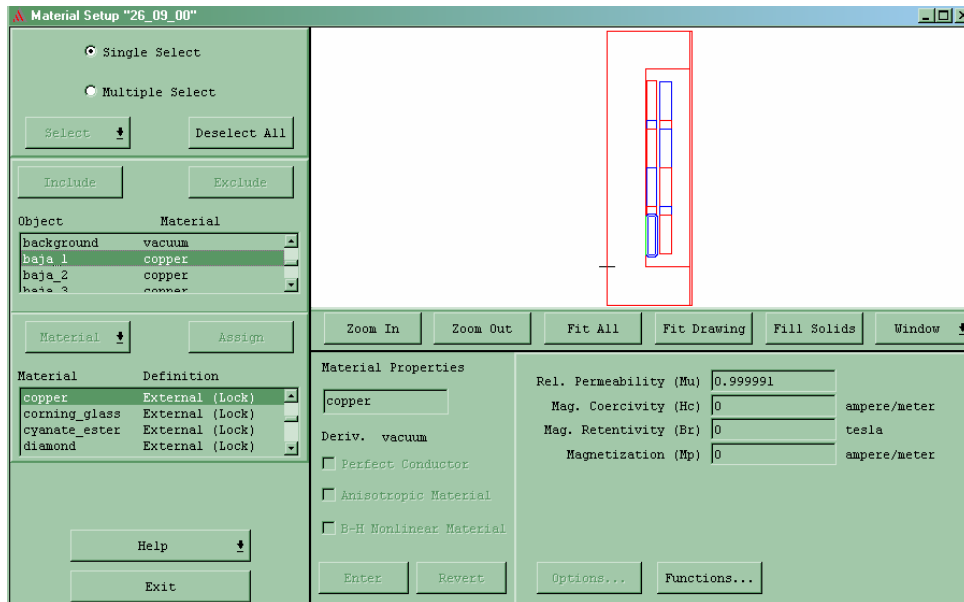
Ahora aplicamos el paso 3 para dibujar los objetos de los cuales se compone el transformador. Al accionar el comando aparece una nueva ventana, figura E6, en la cual aparece un área en la que se crean los objetos, con un menú de opciones de elementos predefinidos como son cuadrados, círculos y secuencias de puntos. Contiene otras opciones como colocar restricciones de dimensiones o incluso hacer del objeto un esquema paramétrico y poder modificar las dimensiones al cambiar la magnitud de una variable del diseño que puede ser altura, espesor, espacio, etc.





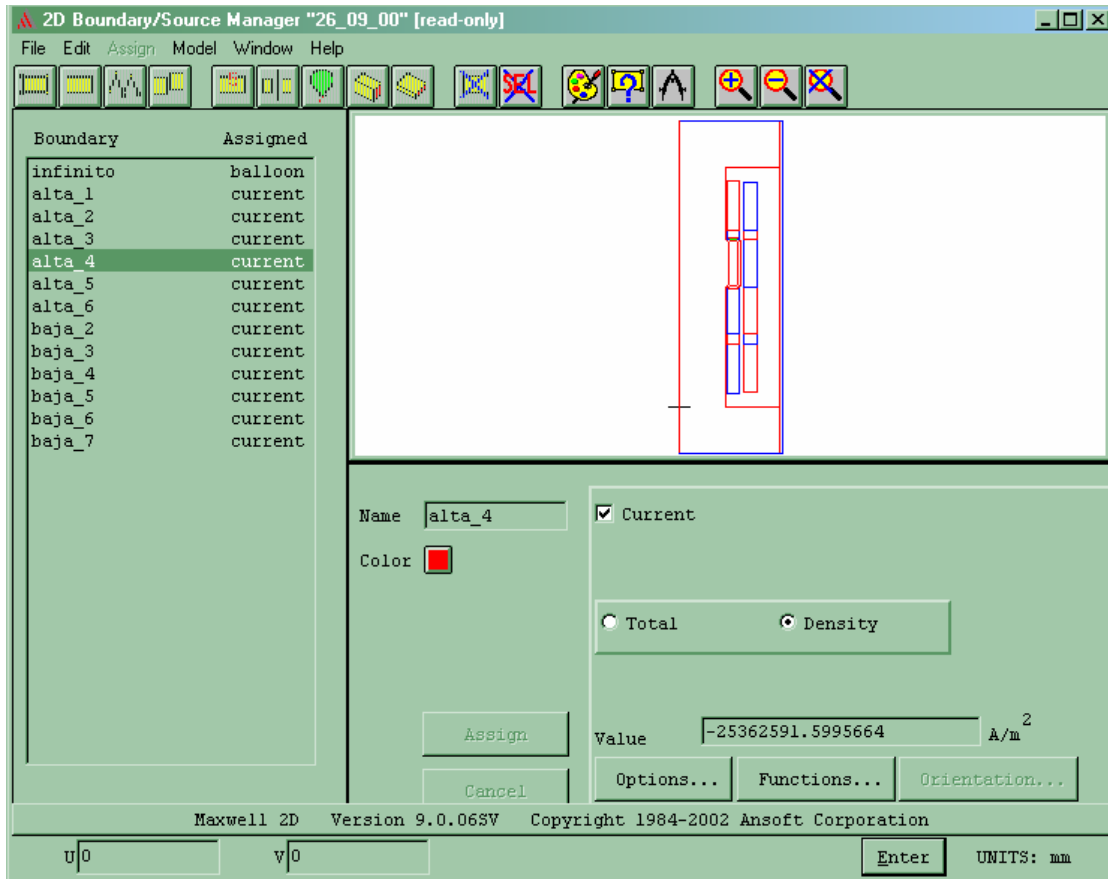
**Figura E6:** Área de creación de los objetos que componen al transformador en Maxwell 2D

El paso tres de la creación del modelo consiste en asignar los materiales correspondientes a cada uno de los objetos del transformador. Se cuenta con una lista predefinida por el paquete y se tiene la opción de crear un nuevo material con las propiedades necesarias. Figura E7.



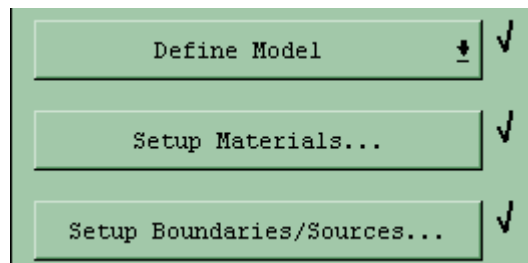
**Figura E7:** Menú de materiales para asignar a los objetos del transformador en Maxwell 2D

Después de aplicar los materiales a cada objeto, es necesario dar de alta las condiciones de operación del transformador. Este cuarto paso consiste en asignar los valores de densidad de corriente a cada segmento de bobina, tanto en alta como en baja tensión. Esto lo observamos en la figura E8.



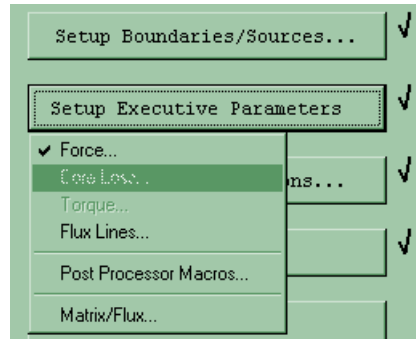
**Figura E8:** Administrador de fuentes de corriente y condiciones de frontera del transformador en Maxwell

Una vez que hemos dado de alta la geometría de los objetos, sus materiales y las condiciones de frontera tenemos que en el menú principal la serie de pasos que hemos cubierto son el dos, tres y cuatro. En el menú aparecen esos pasos como ejecutados al colocarles una marca de aprobación. Figura E9



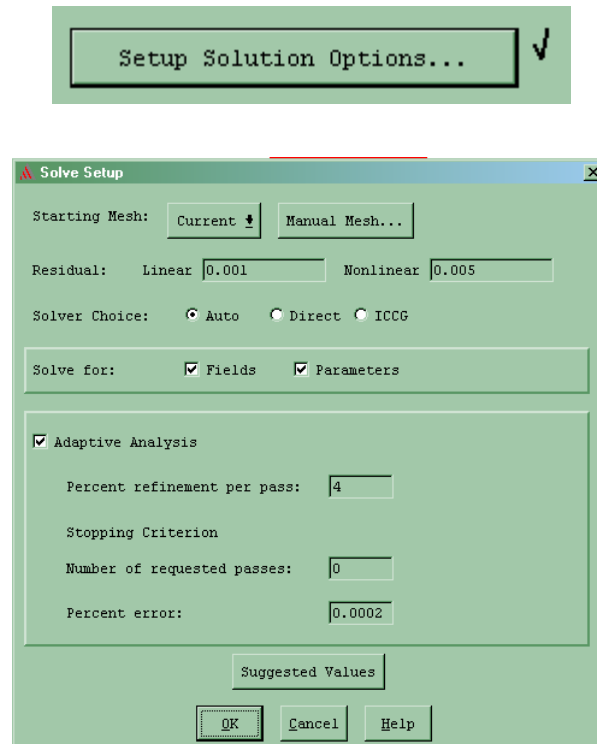
**Figura E9:** Creación de los objetos, asignación de materiales y condiciones de frontera aceptadas por Maxwell

Una vez dados de alta las condiciones de frontera, procedemos a seleccionar opciones de análisis que se realizarán conforme el programa calcula la solución. Estas opciones son fuerzas en los objetos, pares torsionales, pérdidas, líneas de flujo. Esta opción aparece en la figura E10.



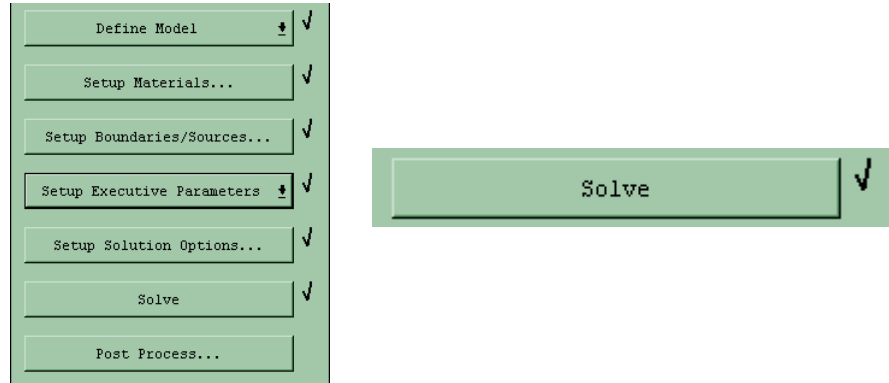
**Figura E10:** Selección de análisis adicionales al estudio del transformador

Después de haber seleccionado alguna opción de análisis adicional procedemos a especificar el criterio de solución. Aparece entonces la siguiente ventana. Figura E11.



**Figura E11:** Criterio de solución del modelo magnetostático

Ahora que hemos creado el modelo, asignado materiales, condiciones de frontera y criterios de solución se procede a resolver el problema y ejecutamos el comando *Solve*. Figura E12.



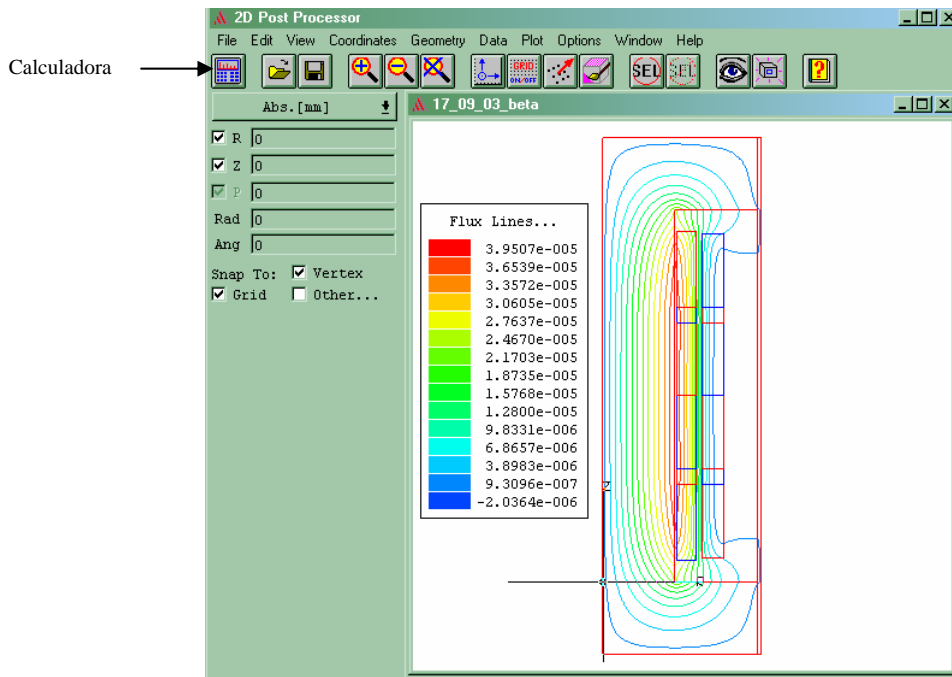
**Figura E12:** Pasos de creación y solución del modelo acreditados por el programa

Al mismo tiempo que resuelve el caso bajo estudio, despliega el número de elementos triangulares utilizados, el total de energía, la magnitud de la fuerza y el porcentaje de error. Figura E13.

Model		Solutions		Convergence		Profile	
CONVERGENCE DATA							
Number of passes:	Pass	Triangles	Total Energy(J)	Energy Error(%)	Mag Force(N)		
Completed	1	7793	1.40206E+004	0.0002	1.07386E+001		
Remaining	0						
Convergence criteria:							
Target Error: 0.0002%							
Energy Error: 0.000206%							
Delta Energy:							

**Figura E13:** Tabla de resultados durante el proceso de solución del modelo

Accesamos al postprocesador de resultados del problema magnetostático y aparece la ventana de la figura E14. Se tiene la opción de realizar cálculos con parámetros como densidad de flujo, corrientes, áreas y operaciones como producto cruz, producto punto y cálculos integrales. Se pueden generar gráficas sobre las densidades de flujo y corriente.



**Figura E14:** Ventana del postprocesador de resultados de Maxwell 2D

Para calcular las fuerzas generadas en cada uno de los segmentos de bobina del transformador utilizamos la herramienta de calculadora en el postprocesador. Figura E14. La calculadora aparece en una nueva ventana, tal como se muestra en la figura E15. Los siguientes pasos se deben de seguir para calcular las fuerzas tanto en dirección radial como axial

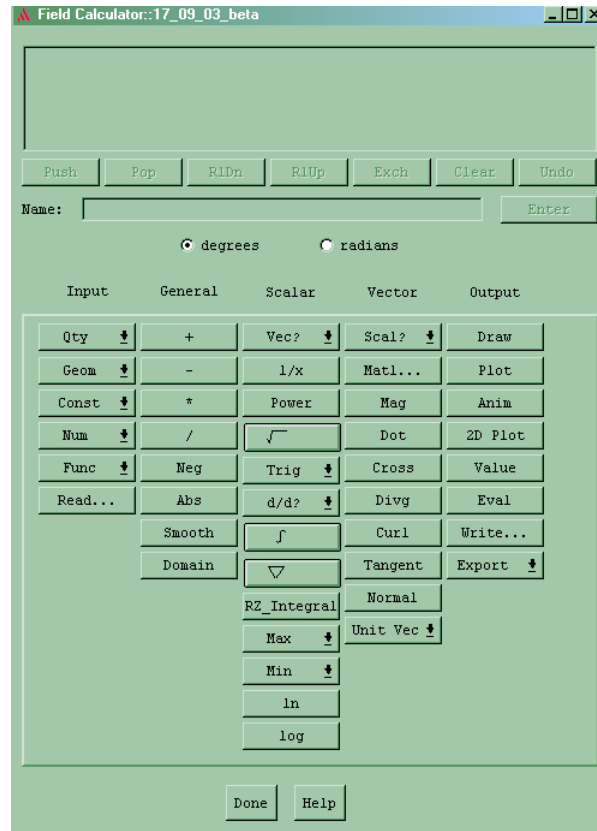
#### Fuerzas Radiales

- **Qty** – **J** <Curl **H**>
- **Qty** – **B**
- **Cross** <Producto cruz entre las dos cantidades superiores>
- **Scalar** – **Scalar\_R** <Obtener la componente radial del producto cruz>
- **Geom** – **Volume** <Especificar el volumen de interés> **OK**
- $\int$
- **Eval**

#### Fuerzas Axiales

- **Qty** – **J** <Curl **H**>
- **Qty** – **B**
- **Cross** <Producto cruz entre las dos cantidades superiores>

- **Scalar – Scalar\_Z** <Obtener la componente axial del producto cruz>
- **Geom – Volume** <Especificar el volumen de interés> **OK**
- $\int$
- **Eval**



**Figura E15:** Calculadora del postprocesador de resultados de Maxwell 2D

Densidad de flujo máxima

- **Qty – B**
- **Scalar – Scalar\_R** <Obtener la componente radial del producto cruz>
- **Geom – Surface** <Especificar el área de interés> **OK**
- **Maximum**
- **Eval**

Con los pasos anteriores y con el uso de la calculadora se obtuvo el modelo completo, gráficas y las cantidades de fuerzas con el uso del programa Maxwell 2D.