

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**“EL ELEMENTO FINITO EN EL CONTROL DE LA SATURACIÓN
MAGNÉTICA DE UN NÚCLEO TOROIDAL UTILIZANDO
ENTREHIERRO VIRTUAL”**

Para obtener el Título de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Presenta:

SALVADOR MAGDALENO ADAME

Asesor:

Dr. Carlos Pérez Rojas

Morelia, Mich., Enero del 2008

Agradecimientos

A mis queridos padres:

Salvador Magdaleno Jiménez y María Teresa Adame López

Por brindarme siempre su apoyo incondicional y enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr los objetivos que me proponga.

A mi hermano:

Luis Eduardo Magdaleno Adame

Por brindarme siempre un apoyo incondicional.

Al Dr. Francisco de León Gómez Maqueo

Por brindarme siempre la oportunidad de recurrir a su capacidad y gran experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la realización de este trabajo. Muchas gracias por darme la oportunidad de aprender cosas interesantes a lo largo de la carrera y en la vida. Gracias por todo su apoyo incondicional y gracias por darme la oportunidad de seguir creciendo en mi carrera profesional.

Al Dr. Carlos Pérez Rojas

Por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción y finalización de este trabajo.

A la familia Galván Adame y a mi tío el Lic. Raúl Magdaleno Jiménez

Por brindarme siempre su apoyo y acompañarme en todos los momentos importantes.

A todos mis amigos y colegas

Por ayudarme y enseñarme a superar todos los retos que me he propuesto a lo largo de la carrera y en la vida.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es controlar las características de la curva de magnetización de un núcleo toroidal mediante el uso de un entrehierro virtual. Se utilizó el método del elemento finito ya que existe una compleja distribución del campo magnético y se emplea un material no lineal en el núcleo toroidal. Para realizar las simulaciones de elemento finito se propuso y se usó el programa comercial de elementos finitos ANSYS como herramienta para el estudio. Para analizar el comportamiento magnético del entrehierro virtual dentro del núcleo magnético toroidal se realizó un estudio magnetostático no lineal en dos dimensiones y se utilizó el método de Newton Raphson para resolver el problema. Mediante el uso de un entrehierro virtual se logró el control de las características de la curva de magnetización de un núcleo magnético toroidal realizando simulaciones de elemento finito variando la corriente de CD en los devanados de los agujeros para cada punto de la curva de magnetización; esto prueba que verdaderamente se crea un espacio de aire virtual por saturación magnética dentro del núcleo magnético toroidal, por lo tanto, se obtiene el mismo efecto con un entrehierro virtual que con un entrehierro físico. Se comprobó que un entrehierro virtual funciona igual que un entrehierro físico dentro de un núcleo toroidal. Se calculó la longitud del entrehierro físico que equivale a un entrehierro virtual creado por una cierta corriente de CD en los devanados de los agujeros dentro de un núcleo magnético toroidal y se hizo la simulación de elementos finitos del núcleo toroidal con su entrehierro físico equivalente y se comprobó que efectivamente funciona igual que un entrehierro virtual dentro del mismo núcleo. También se comprueba que se puede controlar el grado de saturación del entrehierro virtual mediante la intensidad de CD en los devanados de los agujeros. Además mediante algunas simulaciones de elemento finito se demostró que el tamaño del entrehierro virtual depende de la intensidad de CD en los devanados de los agujeros. Con los resultados obtenidos se concluye que al usar un entrehierro virtual se aprovechan todas las ventajas de los núcleos magnéticos con y sin entrehierros físicos. Los resultados aquí obtenidos abren la posibilidad de realizar varios trabajos en un futuro.

Contenido

Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	xi
Lista de símbolos	xii

Capítulo 1 Introducción

1.1	Antecedentes.....	3
1.2	Objetivo	3
1.3	Justificación	3
1.4	Metodología.....	4
1.5	Contenido de la tesis.....	5

Capítulo 2 Transformadores

2.1	Principios básicos de transformadores	7
2.2	Historia del transformador.....	11
2.3	Tipos de construcción de transformadores	19
2.3.1	Núcleo acorazado	19
2.3.2	Tipo núcleo	20
2.3.3	Tipo toroidal	20
2.4	Los entrehierros físicos.....	21
2.4.1	Aplicaciones de los entrehierros físicos	24
2.5	Ecuaciones de Maxwell.....	24
2.5.1	Métodos de solución.....	27
2.5.2	Soluciones analíticas o métodos analíticos.....	28

2.5.3	Métodos numéricos	29
2.5.3.1	Método de diferencias finitas	29
2.5.3.2	Método del elemento finito.....	30
2.5.3.3	Método de simulación de carga	31
2.5.3.4	Método de ecuaciones integrales	32
2.6	Programas comerciales de elemento finito para resolver campos electromagnéticos	33
2.7	Descripción breve del programa ANSYS.....	34
2.8	Transformadores toroidales	35
2.9	Partes de un transformador toroidal comercial.....	37
2.10	Construcción de los transformadores toroidales.....	38
2.11	Características de los transformadores toroidales	40
2.12	Ventajas y desventajas de los transformadores toroidales.....	42
2.13	Aplicaciones de los transformadores toroidales	43

Capítulo 3 Entrehierro virtual

3.1	El entrehierro virtual.....	45
3.2	Funcionamiento del entrehierro virtual	48
3.3	Comparación entre el entrehierro físico y el entrehierro virtual	58
3.4	Entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal	59
3.5	Aplicaciones del entrehierro virtual	67

Capítulo 4 Controlando las características de la curva de magnetización de un núcleo toroidal

4.1	Simulaciones con el elemento finito.....	68
4.2	Características del modelo.....	68
4.3	Malla de elementos finitos del modelo.....	75
4.4	Cargas del modelo o densidades de corriente.....	78
4.5	Condiciones de frontera.....	79

4.6	Características de la solución del modelo.....	80
4.7	Propósitos de las simulaciones de elemento finito	80
4.7.1	Estudio de un entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal	81
4.7.2	Cálculo del entrehierro físico equivalente	93
4.7.3	Control de las características de la curva de magnetización	106
4.7.4	Control del grado de saturación del entrehierro virtual.....	115
4.7.5	Control del tamaño del entrehierro virtual	119
4.8	Posibles aplicaciones	121
 Capítulo 5 Conclusiones		
5.1	Conclusiones.....	122
5.2	Trabajos futuros.....	124
Referencias		125

Lista de figuras

Figura 2.1	Transformador ideal	9
Figura 2.2	Transformador ideal con una carga conectada.....	10
Figura 2.3	Transformador de Michael Faraday	12
Figura 2.4	Modelo de bobina de Rühmkorff	13
Figura 2.5	Generador Secundario de Gaulard y Gibbs.....	14
Figura 2.6	Unión de generadores secundarios.....	15
Figura 2.7	Transformador de la compañía húngara Ganz	16
Figura 2.8	Bobinas de inducción de Stanley	17
Figura 2.9	Transformador diseñado por Stanley	18
Figura 2.10	Entrehierro físico en la construcción de un transformador	19
Figura 2.11	Transformador monofásico tipo acorazado.....	19
Figura 2.12	Transformador monofásico tipo núcleo	20
Figura 2.13	Transformador monofásico tipo toroidal	21
Figura 2.14	Núcleo magnético toroidal con su entrehierro físico	22
Figura 2.15	Efecto de un entrehierro físico en la curva de magnetización	23
Figura 2.16	Efecto de un entrehierro físico en la curva de histéresis.....	23
Figura 2.17	Geometría de un núcleo magnético toroidal	36
Figura 2.18	Curva de histéresis de un núcleo magnético toroidal.....	36
Figura 2.19	Curva típica de magnetización.....	37
Figura 2.20	Partes de un transformador toroidal comercial	37
Figura 2.21	Núcleo magnético toroidal	38
Figura 2.22	Máquina para enrollar lámina continua	39
Figura 2.23	Devanado colocado en un núcleo magnético toroidal	39
Figura 2.24	Máquina para devanar en núcleos toroidales	40
Figura 3.1	Distancias para dos pares de agujeros.....	46
Figura 3.2	Dirección de las corrientes de CD en los agujeros.....	46
Figura 3.3	Entrehierro virtual	47

Figura 3.4	Colocación de devanados de los agujeros	47
Figura 3.5	Curva de magnetización simplificada	48
Figura 3.6	Núcleo magnético	49
Figura 3.7	Dirección de I_a en devanados de los agujeros del modelo de explicación	49
Figura 3.8	Flujos magnéticos rotacionales en zona de agujeros.....	50
Figura 3.9	Intensidad de campo magnético en el núcleo.....	51
Figura 3.10	Permeabilidad incremental.....	52
Figura 3.11	Flujo magnético en el núcleo	53
Figura 3.12	Interacción de todos los flujos magnéticos en zona de agujeros.....	54
Figura 3.13	Circuito magnético	55
Figura 3.14	Efecto de entrehierro virtual en curva de magnetización.....	57
Figura 3.15	Núcleo magnético toroidal	59
Figura 3.16	Colocación de dos pares de agujeros	60
Figura 3.17	Idea del entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal	62
Figura 3.18	Cálculo de localización de los agujeros	62
Figura 3.19	Distancias para calcular el ángulo β	63
Figura 3.20	Idea de localización de agujeros	64
Figura 3.21	Localización del agujero A_1	64
Figura 3.22	Localización de agujero A_3	65
Figura 3.23	Localización final de agujeros	66
Figura 4.1	Geometría del núcleo magnético toroidal del modelo	69
Figura 4.2	Vistas de las diferentes regiones de la curva de magnetización del modelo	70
Figura 4.3	Localización de los cuatro agujeros en el modelo	72
Figura 4.4	Colocación final de agujeros en el modelo	73
Figura 4.5	Geometría para los cuatro agujeros del modelo.....	73
Figura 4.6	Devanado principal del modelo	73
Figura 4.7	Círculo concéntrico de aire que encierra al modelo.....	74
Figura 4.8	Propiedades magnéticas del modelo	75
Figura 4.9	Elemento finito PLANE53	75

Figura 4.10	Malla de elementos finitos del modelo	78
Figura 4.11	Frontera de Dirichlet del modelo	80
Figura 4.12	Punto de operación en la curva de magnetización	81
Figura 4.13	Trayectoria de la longitud media geométrica en el modelo	82
Figura 4.14	Direcciones de las densidades de corriente en el devanado principal.....	83
Figura 4.15	Entrehierro virtual inactivo ($I_p=30.84A$, $I_a=0A$)	84
Figura 4.16	Flujo magnético rodeando los agujeros	85
Figura 4.17	Nodo donde se realizan las respectivas mediciones.....	85
Figura 4.18	Puntos de operación antes y después de la simulación de elementos finitos.....	86
Figura 4.19	Dirección de las densidades de corriente de todos los devanados	87
Figura 4.20	Entrehierro virtual activo ($I_p=30.84A$, $I_a=100A$)	88
Figura 4.21	Punto de operación dentro del entrehierro virtual.....	89
Figura 4.22	Vistas del nuevo punto de operación producido por el entrehierro virtual	90
Figura 4.23	Resultados sobre la curva de magnetización.....	91
Figura 4.24	Entrehierro físico en modelo magnético	93
Figura 4.25	Circuito magnético del modelo magnético	95
Figura 4.26	Modelo con el entrehierro físico	99
Figura 4.27	Malla de elementos finitos del modelo completo	100
Figura 4.28	Elementos y nodos dentro del entrehierro físico en la longitud media geométrica	100
Figura 4.29	Distribución del flujo magnético y de la densidad de flujo magnético en el núcleo toroidal con su entrehierro físico	102
Figura 4.30	Efecto de contorno magnético.....	102
Figura 4.31	Nodo de medición del núcleo toroidal en el caso del entrehierro físico ..	103
Figura 4.32	Resultados del control de las características de la curva de magnetización.....	109
Figura 4.33	Densidad de flujo para $I_a=10A$ y $100A$ con diferentes intensidades de I_p	112
Figura 4.34	Control de la densidad de flujo fuera del entrehierro virtual	113

Figura 4.35	Dirección de las densidades de corriente para las pruebas de saturación.....	115
Figura 4.36	Distribución vectorial de la densidad de flujo y de la intensidad de campo dentro del entrehierro virtual para diferentes intensidades de corriente aplicadas a los devanados de los agujeros	116
Figura 4.37	Control de los valores máximos de la densidad de flujo y de la intensidad de campo dentro del entrehierro virtual mediante diferentes intensidades de corriente en los devanados de los agujeros	117
Figura 4.38	Control de la permeabilidad promedio dentro del entrehierro virtual mediante diferentes intensidades de corriente en los devanados de los agujeros	118
Figura 4.39	Tamaño del entrehierro virtual con diferentes intensidades de corriente en los devanados de los agujeros.....	120

Lista de tablas

Tabla 2.1	Ecuaciones de Maxwell.....	25
Tabla 2.2	Ecuaciones de Maxwell para campos electromagnéticos estáticos.....	25
Tabla 2.3	Programas comerciales de elemento finito.....	33
Tabla 4.1	Datos de la curva de magnetización de núcleo magnético toroidal.....	71
Tabla 4.2	Permeabilidades relativas aplicadas al modelo	74
Tabla 4.3	Número de elementos finitos de cada parte del modelo.....	76
Tabla 4.4	Valores de las áreas de sección transversal de todos los devanados del modelo	79
Tabla 4.5	Resultados de las simulaciones de elemento finito para cada uno de los puntos en la curva de magnetización	91
Tabla 4.6	Número de elementos finitos de cada parte del modelo con el entrehierro físico.....	99
Tabla 4.7	Valores de las áreas de sección transversal del devanado principal.....	101
Tabla 4.8	Resultados obtenidos para el núcleo toroidal con el entrehierro físico de forma analítica y con la simulación de elemento finito	104
Tabla 4.9	Resultados comparativos obtenidos de las simulaciones de elemento finito.....	105
Tabla 4.10	Valores de las corrientes de magnetización aplicadas al devanado principal.....	106
Tabla 4.11	Valores de las densidades de corriente aplicadas al devanado principal.....	107
Tabla 4.12	Valores de las densidades de corriente aplicadas a los devanados de los agujeros	107

Lista de símbolos

a	Relación del número de vueltas
A	Potencial vectorial magnético
A_z	Potencial vectorial magnético del eje z
A	Área de sección transversal de un núcleo magnético
A_c	Área de sección transversal de un devanado
B	Densidad de flujo magnético
B_{ev}	Nueva densidad de flujo magnético fuera del entrehierro virtual
B_g	Densidad de flujo magnético en el entrehierro físico
B_{sat}	Densidad de flujo magnético dentro del entrehierro virtual
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
D	Densidad de campo eléctrico
E	Intensidad de campo eléctrico
$\mathcal{E}$	Fuerza electromotriz
$\mathcal{F}$	Fuerza magnetomotriz
f	Frecuencia
H	Intensidad de campo magnético
H_{ev}	Nueva intensidad de campo magnético fuera del entrehierro virtual
H_g	Intensidad de campo magnético en el entrehierro físico
H_{sat}	Intensidad de campo magnético dentro del entrehierro virtual

I_1	Corriente de excitación en el devanado número uno
I_{m1}	Corriente de magnetización en el devanado número uno
I_2	Corriente instantánea en el devanado número dos
I_a	Corriente de CD en los devanados de los agujeros
I_p	Corriente de magnetización de CD en el devanado principal
J	Densidad de corriente
J_z	Densidad de corriente en el eje z
J_{za}	Densidad de corriente en el eje z aplicada a los devanados de los agujeros
J_{zp}	Densidad de corriente en el eje z aplicada al devanado principal
k	Factor de apilamiento
L	Inductancia dada por un entrehierro físico
l	Longitud media geométrica
l_{ev}	Longitud del entrehierro virtual
l_g	Longitud del entrehierro físico
N	Número de vueltas del devanado
N_p	Número de vueltas del devanado principal
N_1	Número de vueltas del devanado número uno
N_2	Número de vueltas del devanado número dos
N_a	Número de vueltas de los devanados de los agujeros
P_1	Potencia instantánea del devanado número uno
P_2	Potencia instantánea del devanado número dos
R	Radio de un solo agujero
S_1	Potencia aparente del devanado número uno
S_2	Potencia aparente del devanado número dos

V	Voltaje inducido
V_1	Voltaje inducido en el devanado número uno
V_2	Voltaje inducido en el devanado número dos
w	Ancho del núcleo magnético
ΔB	Incremento de la densidad de flujo magnético
ΔH	Incremento de la intensidad de campo magnético
λ	Enlace de flujo magnético
λ_1	Enlace de flujo magnético del devanado número uno
λ_2	Enlace de flujo magnético del devanado número dos
μ_0	Permeabilidad del vacío= $4 \pi 10^{-7}$ H/m
μ	Permeabilidad
μ_r	Permeabilidad relativa
ξ	Espesor de la parte exterior e interior del devanado principal
ρ_v	Densidad de carga de volumen
Φ	Flujo magnético
Φ_a	Flujo magnético rotacional de CD provocado por la corriente I_a
Φ_{ca}	Flujo magnético de CA
A	Ampere
A•v	Ampere vueltas
A•v/m ²	Ampere vueltas sobre metro cuadrado
A•v/m	Ampere vueltas sobre metro
A/Wb	Ampere sobre weber
H/m	Henry sobre metro

kV	kilo Volt
kVA	kilo Volt Ampere
MVA	Mega Volt Ampere
m	metro
m ²	metro cuadrado
mm	milímetros
rad	radianes
T	Tesla
v	vueltas
V	Volt
W	Watt
VA	Volt Ampere
Wb	Weber
Ω	Ohm
°	Grado

Capítulo 1

Introducción

En la construcción de los núcleos magnéticos se utilizan materiales ferromagnéticos altamente no lineales. En la actualidad, los núcleos magnéticos están hechos de lámina de acero al silicio de grano orientado y son empleados en el diseño y construcción de transformadores, inductores, motores, etc. Los núcleos magnéticos permiten tener altos valores de densidad de flujo magnético y además minimizan el costo y tamaño de los equipos. Por ejemplo, al usar los núcleos magnéticos en inductores se pueden obtener altos valores de inductancia en núcleos pequeños.

En la actualidad se diseñan y se construyen núcleos magnéticos con entrehierros físicos, éstos son espacios de aire que se hacen en los núcleos magnéticos, son creados a propósito mediante el corte del material del núcleo. La alta reluctancia y la pequeña permeabilidad que presentan los espacios de aire sirven para modificar las características de magnetización o de saturación del núcleo magnético donde se encuentran localizados. Además los entrehierros físicos son usados para modificar el ciclo de histéresis de un núcleo magnético.

Actualmente se diseñan y se construyen inductores mediante el uso de entrehierros físicos. En estos inductores el valor de la inductancia es por lo general fijo y está definido por la longitud del espacio de aire. También los reactores utilizan los entrehierros físicos para modificar la reactancia inductiva.

Existen entrehierros físicos que no realizan ninguna clase de trabajo útil, éstos espacios de aire no son hechos a propósito. Durante la construcción de los núcleos magnéticos de los transformadores tipo núcleo y tipo acorazado se presentan pequeños espacios de aire en las uniones entre los yugos y las columnas. En estos pequeños espacios de aire se presentan flujos

magnéticos dispersos que provocan pérdidas principalmente por efecto Joule en las diferentes partes del transformador, como en el tanque, en los herrajes, etc.

Pero existe actualmente una nueva tecnología que nos permite reemplazar los entrehierros físicos, se le llama tecnología del entrehierro virtual. Ésta aprovecha el fenómeno de la saturación magnética para producir un espacio de aire dentro de un núcleo magnético, sin la necesidad de realizar ningún tipo de corte al material del núcleo. Cuando un material magnético se satura magnéticamente su permeabilidad disminuye a tal grado de comportarse como aire.

La tecnología del entrehierro virtual consiste básicamente en hacer pasar corrientes de CD a través de los devanados de unos agujeros hechos dentro de un núcleo magnético, de esta manera se provoca una región de saturación magnética en la zona donde están localizados los agujeros y con ello un cambio en la permeabilidad de dicha zona. De esta manera se aprovecha el fenómeno de la saturación magnética para crear un espacio de aire virtual dentro de un núcleo magnético.

El uso de la tecnología del entrehierro virtual busca aprovechar todas las ventajas de los núcleos magnéticos con y sin entrehierros físicos, quiere decir que un entrehierro virtual funciona igual o mejor que un entrehierro físico.

Para construir un entrehierro virtual solamente se necesita hacer unos agujeros dentro de un núcleo magnético, mientras que para construir un entrehierro físico se necesita cortar un pedazo del núcleo magnético. Por esta razón la construcción de un entrehierro virtual es más barata que la de un entrehierro físico. Además en un entrehierro virtual no existen fuerzas magnéticas de atracción considerables como las que se pueden presentar con un entrehierro físico.

En el diseño de máquinas eléctricas se necesitan resolver problemas donde intervienen los campos electromagnéticos, éstos son gobernados por las ecuaciones de Maxwell y actualmente con el avance tecnológico de las computadoras digitales se pueden estudiar utilizando algún método numérico. Un método numérico ideal para el estudio de los campos magnéticos provocados por un entrehierro virtual dentro de un núcleo magnético es el método del elemento finito, éste resuelve las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial en función del potencial vectorial magnético. El método del elemento finito discretiza el modelo en una serie de pequeños elementos llamados elementos finitos. El propósito general del método es

resolver la ecuación de Poisson en función del potencial vectorial magnético. Con el método del elemento finito se calcula el valor de este potencial en cada uno de los nodos de cada uno de los elementos finitos, de esta forma se puede conocer la distribución y comportamiento del campo magnético en todo el modelo que se está estudiando. Existen muchos programas comerciales de elementos finitos que sirven para estudiar los campos electromagnéticos en máquinas eléctricas, actualmente uno de los más confiables es el programa ANSYS.

1.1 Antecedentes

La tecnología del entrehierro virtual es un tema de investigación actual, se han hecho pocos trabajos sobre este tema. Esta tecnología ha sido aplicada en el control y reducción de las corrientes de avalancha o corrientes *inrush* en transformadores monofásicos tipo núcleo [Molcrette et al. 1998] y para construir un nuevo prototipo de máquina de soldar de CA que solde con calidad de CD [Napieralska y Lecointe 2002]. También se ha desarrollado un método para calcular la longitud del entrehierro virtual en un transformador monofásico tipo núcleo sin entrehierros físicos [Konrad y Brudny 2005].

1.2 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es controlar las características de la curva de magnetización de un núcleo toroidal mediante el uso de un entrehierro virtual. Se busca estudiar el funcionamiento y comportamiento magnético de un entrehierro virtual dentro de un núcleo toroidal. También se busca demostrar con simulaciones no lineales de elemento finito, que el entrehierro virtual puede aplicarse para controlar la característica de magnetización o de saturación de los núcleos toroidales. Además se busca comprobar que un entrehierro virtual funciona igual o mejor que un entrehierro físico dentro de un núcleo toroidal.

1.3 Justificación

En este trabajo se busca reemplazar un entrehierro físico por un entrehierro virtual dentro de un núcleo magnético toroidal. Además se busca comprobar que un entrehierro virtual funciona igual o mejor que un entrehierro físico.

Mediante el uso de un entrehierro virtual se espera controlar la saturación magnética o las características de la curva de magnetización de un núcleo toroidal.

1.4 Metodología

La metodología que se utilizará consiste en hacer dos pares de agujeros dentro de un núcleo magnético toroidal. Posteriormente se introduce un devanado en cada uno de los dos pares de agujeros; después se enrolla un devanado alrededor de los 360° del núcleo toroidal.

Para realizar un estudio de un entrehierro virtual dentro de un núcleo toroidal se aplicará una intensidad de CD al devanado enrollado alrededor del núcleo toroidal, dejando sin corriente los devanados de los agujeros y se analizará el comportamiento del campo magnético estático mediante la simulación de elemento finito utilizando el programa comercial de elementos finitos ANSYS. Posteriormente se aplicará una intensidad de CD en los devanados de los agujeros para crear el entrehierro virtual, dejando fija la intensidad de CD en el devanado enrollado en el núcleo toroidal. De esta manera se analizará el comportamiento que tiene el entrehierro virtual en las características de la curva de magnetización del núcleo toroidal mediante la simulación de elemento finito con el programa ANSYS.

Para comprobar que el entrehierro virtual de la prueba anterior funciona igual que un entrehierro físico se realizará un modelo del núcleo magnético toroidal con su entrehierro físico equivalente. Se propondrá un cálculo de la longitud del entrehierro físico equivalente a partir de los resultados de la prueba anterior. Después se dibujará el mismo núcleo toroidal y su entrehierro físico equivalente, después se enrollará un devanado alrededor del núcleo toroidal, excepto en la parte del entrehierro físico y se aplicará al devanado la misma intensidad de CD aplicada en la prueba anterior. Después se realizará la simulación de elemento finito con el programa ANSYS para verificar que el entrehierro virtual funciona igual que el entrehierro físico equivalente, ambos dentro del núcleo toroidal.

Después se harán variaciones de la intensidad de CD en los devanados de los agujeros dejando fija la intensidad de CD en el devanado enrollado alrededor del núcleo toroidal para cada punto no saturado de la curva de magnetización del núcleo toroidal. De esta manera se podrá ver como se tiene el control de las características de la curva de magnetización del núcleo toroidal.

Después solo se aplicarán diferentes intensidades de CD a los devanados de los agujeros para comprobar que se puede tener el control de la saturación magnética en la zona de los agujeros mediante la intensidad de CD. Con esta misma prueba se podrá comprobar que el tamaño del entrehierro virtual dependerá de la intensidad de CD aplicada a los devanados de los agujeros.

1.5 Contenido de la tesis

En el capítulo 1 se da una breve introducción y se describen los antecedentes de la tecnología del entrehierro virtual. Después se describe el objetivo, la justificación y la metodología usada en este trabajo.

En el capítulo 2 se da una breve introducción general de los transformadores. También se presenta una discusión general sobre los entrehierros físicos. Se muestran las ecuaciones de Maxwell y algunos de los métodos para resolverlas. También se da una breve introducción del programa comercial ANSYS el cual resuelve las ecuaciones de Maxwell por medio del elemento finito. Y finalmente se explica en forma general los transformadores toroidales.

En el capítulo 3 se da una explicación del entrehierro virtual (su construcción y su funcionamiento) dentro de un núcleo magnético tipo núcleo sin entrehierros físicos. También se muestra la idea de cómo colocar un entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal. Después se da una breve comparación entre un entrehierro físico y un entrehierro virtual. Al final se muestran algunas de las aplicaciones que ha tenido el entrehierro virtual.

En el capítulo 4 se muestran las características y resultados de las simulaciones de elemento finito que se hicieron a un núcleo magnético toroidal equipado con un entrehierro virtual, realizadas con el programa comercial de elementos finitos ANSYS. Con simulaciones de elemento finito se demuestra como funciona el entrehierro virtual dentro de un núcleo magnético toroidal y que se puede obtener el mismo resultado que con un entrehierro físico. Se comprueba por medio de simulaciones que un entrehierro virtual puede controlar las características de la curva de magnetización de un núcleo magnético toroidal. Después se muestra como se obtiene el control del grado de saturación del entrehierro virtual mediante la intensidad de CD en los devanados de los agujeros. Al final se indica que se puede controlar el tamaño del entrehierro virtual por medio de la intensidad de CD en los devanados de los

agujeros. Finalmente se exponen las posibles aplicaciones del entrehierro virtual dado los resultados obtenidos en este trabajo.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

Capítulo 2

Transformadores

2.1 Principios básicos de transformadores

Un transformador es un equipo estático que transfiere energía eléctrica, de un circuito operando a una tensión a otro operando a una tensión diferente, por inducción electromagnética [Kulkarni y Khaparde 2004].

Al componente principal del circuito magnético de un transformador se le conoce comúnmente como núcleo magnético o núcleo ferromagnético. Este núcleo magnético se encuentra formado por láminas de acero al silicio de grano orientado de bajas pérdidas y con una alta permeabilidad. Este acero es un material no lineal que se caracteriza por tener una curva de magnetización con una rodilla y es utilizado en la fabricación de transformadores, motores, inductores, etc. El acero es tratado térmicamente para disminuir las pérdidas por histéresis, además el acero es laminado y aislado para reducir las pérdidas por corrientes de *eddy* [Pérez 2001].

Los aceros viejos que se usaban para la fabricación de transformadores tenían pérdidas magnéticas significativas y un ciclo de histéresis ancho, por lo que se necesitaba una corriente de magnetización muy alta para magnetizar el núcleo de los transformadores. A partir de 1900 las pérdidas magnéticas y el ciclo de histéresis del acero se volvieron un factor importante y limitante en el diseño de los transformadores [Pérez 2001]. Los aceros modernos permiten tener pérdidas magnéticas pequeñas y un ciclo de histéresis angosto y rectangular con bajos valores de corriente de magnetización.

Los aceros al silicio de grano orientado aumentan el flujo magnético y minimizan el tamaño y costo de los equipos. Todas las láminas de acero al silicio de grano orientado están aisladas en ambas caras por medio de un aislante inorgánico llamado *carlite* que consiste en

una capa especial aislante aplicada en el proceso final de planchado y recocido [Pérez 2001].

El transformador también tiene un circuito eléctrico, los devanados o bobinas son la parte que componen los circuitos eléctricos del transformador. Los devanados se fabrican en diferentes tipos dependiendo de las necesidades del diseño, y los materiales que se utilizan, como el cobre y el aluminio.

La función de los devanados es crear un flujo magnético para inducir en otros devanados una fuerza electromotriz y transferir potencia eléctrica de un devanado a otro mediante el principio de inducción electromagnética [Pérez 2001]. Este proceso de inducción se desarrolla con una pérdida de energía muy pequeña (pérdidas magnéticas y eléctricas).

El principio de funcionamiento de un transformador está dado por el fenómeno de la inducción electromagnética [Sadiku 1998]. La ley que rige este fenómeno de inducción electromagnética es la Ley de Faraday:

$$\mathcal{E} = V = -\frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{V} \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) indica que un campo magnético con variación en el tiempo produce un voltaje inducido (llamado fuerza electromotriz). Un circuito cerrado da lugar a una circulación de corriente. El voltaje inducido en cualquier circuito cerrado es igual a la rapidez o razón de cambio en el tiempo del enlace de flujo que ocurre en el circuito. El signo negativo de la fórmula indica que el voltaje inducido actúa en forma tal que es opuesto al flujo magnético que lo produce (Ley de Lenz) [Sadiku 1998].

Para entender el funcionamiento de un transformador real se utiliza un transformador ideal [Slemon 1992]. En un transformador ideal se ignora la resistencia de los devanados, la permeabilidad del núcleo se supone como infinita ($\mu=\infty$), el flujo magnético Φ está confinado en el interior del núcleo (no hay flujos de dispersión) y se ignoran las pérdidas por histéresis, por corrientes de *eddy* que se manifiestan en forma de calor generado en el núcleo magnético y las pérdidas por efecto Joule en los devanados.

En la Figura 2.1 se muestra un transformador ideal de dos devanados enrollados en un núcleo magnético cerrado sin entrehierros físicos y en vacío.

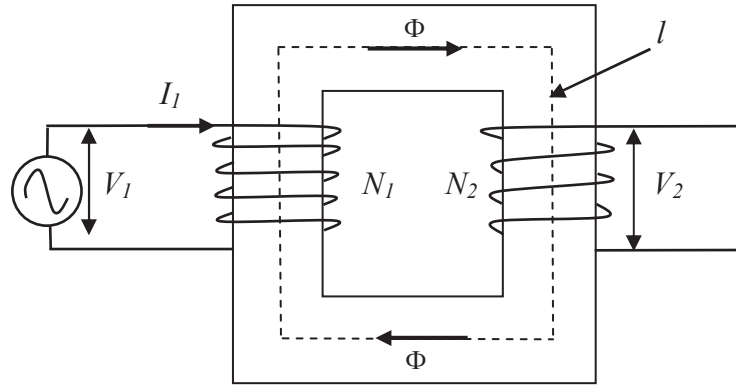


Figura 2.1 Transformador ideal

Si un voltaje V_1 de CA a una cierta frecuencia f constante es aplicado a las terminales del devanado con N_1 vueltas una corriente de excitación I_1 debe circular por el devanado, cuando no hay ninguna corriente circulando en el devanado de N_2 vueltas. Se considera que la corriente I_1 tiene una componente de magnetización, llamada corriente de magnetización I_{m1} la cual produce un flujo magnético Φ en el núcleo y un enlace de flujo λ_1 en el devanado. La otra componente de I_1 llamada corriente de pérdidas de núcleo no existe ya que se ignoran las pérdidas en el núcleo. Por lo tanto para este caso la corriente de magnetización es igual a la corriente de excitación $I_{m1}=I_1$.

La razón de cambio en el tiempo del enlace de flujo λ_1 da como resultado una fuerza electromotriz $\mathcal{E}_1$, que debe ser igual al voltaje aplicado por la fuente de V_1 . Por lo tanto, el voltaje inducido V_1 en el devanado de N_1 vueltas es:

$$\mathcal{E}_1 = V_1 = -\frac{d\lambda_1}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{V} \quad (2.2)$$

El flujo Φ que circula por el núcleo magnético encadena las vueltas del devanado de N_2 vueltas, produciendo un enlace de flujo λ_2 . La razón de cambio en el tiempo del enlace de flujo λ_2 produce una fuerza electromotriz $\mathcal{E}_2$ que es igual al voltaje inducido V_2 en terminales del devanado de N_2 vueltas:

$$\mathcal{E}_2 = V_2 = -\frac{d\lambda_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{V} \quad (2.3)$$

Despejando $d\Phi/dt$ de (2.2) y (2.3) se tiene:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \quad (2.4)$$

La relación de vueltas a para un transformador ideal queda definido como:

$$a = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.5)$$

Por lo tanto, la relación de voltajes en un transformador ideal es igual a la relación de vueltas:

$$a = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.6)$$

Ahora si se conecta una carga a las terminales del devanado de N_2 vueltas se provoca que circule una corriente instantánea I_2 en el devanado, como se muestra en la Figura 2.2.

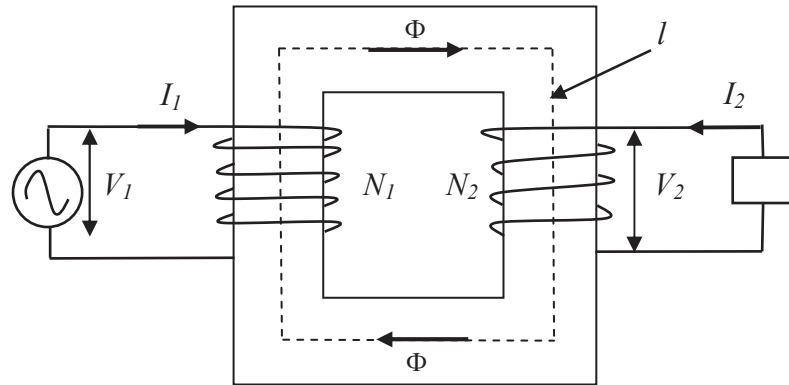


Figura 2.2 Transformador ideal con una carga conectada

Considerando la trayectoria cerrada del flujo magnético Φ en la longitud media geométrica l del núcleo se obtiene por Ley de Ampere [Kulkarni y Khaparde 2004]:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_l \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu} \right) \cdot d\mathbf{l} = (I_1)(N_1) - (I_2)(N_2) \quad \text{A}\cdot\text{v} \quad (2.7)$$

La integral de línea alrededor de la trayectoria cerrada en la longitud media geométrica l del núcleo es igual a cero ya que se trata de un transformador ideal cuya permeabilidad se supone como infinita ($\mu = \infty$). De esta manera se obtiene la siguiente relación:

$$0 = (I_1)(N_1) - (I_2)(N_2) \quad (2.8)$$

Por lo tanto:

$$(I_1)(N_1) = (I_2)(N_2) \quad (2.9)$$

La relación de corriente de un transformador ideal es el inverso de la relación de vueltas:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.10)$$

Combinando (2.6) y (2.10) se obtiene la potencia instantánea P para un transformador ideal:

$$P_1 = (V_1)(I_1) = P_2 = (V_2)(I_2) \quad \text{W} \quad (2.11)$$

La potencia instantánea de entrada P_1 es igual a la potencia instantánea de salida P_2 en un transformador ideal.

El transformador real utiliza el fenómeno de inducción electromagnética para transformar potencia aparente S de un circuito a otro mediante el uso de un flujo magnético común Φ . Por lo tanto, si se calcula la potencia aparente S para cada uno de los dos devanados y se supone que se trata de un transformador real se obtiene:

$$S_1 = (V_1)(I_1^*) \approx S_2 = (V_2)(I_2^*) \quad \text{VA} \quad (2.12)$$

La potencia aparente de entrada S_1 es aproximadamente igual a la potencia aparente de salida S_2 en un transformador real. Se puede concluir que la función de un transformador real es la de transformar potencia aparente de un circuito a otro con diferente nivel de tensión.

2.2 Historia del transformador

Hans Christian Oersted un científico danés demostró en 1820 que cuando una corriente eléctrica fluía por un conductor se generaba un campo magnético alrededor del conductor. En estos tiempos se consideraba a la electricidad y el magnetismo como fuerzas separadas y no

existía ninguna relación entre ambas. Al descubrir que la electricidad era capaz de generar un campo magnético dio pie a pensar que el magnetismo era capaz de generar electricidad [Galván et al. 2006].

En 1831 Michael Faraday un científico inglés construyó el primer transformador por medio de un núcleo toroidal de hierro de sección transversal redonda en el cual enrolló dos bobinas, Figura 2.3. Mediante diferentes experimentos con este transformador toroidal, al que llamó anillo de inducción, descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética.

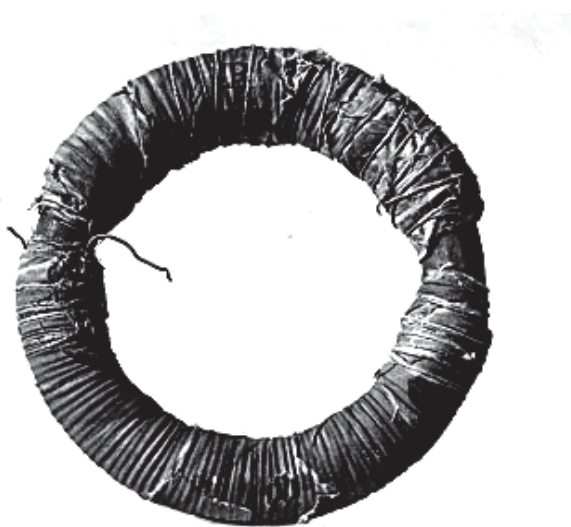


Figura 2.3 Transformador de Michael Faraday [IEEEVM 2006]

En 1851 el científico e inventor Heinrich Daniel Ruhmkorff construyó y patentó un aparato capaz de transformar la energía generada por una pila a elevadas fuerzas electromotrices. Estos aparatos eran conocidos como inductores de chispas, Figura 2.4, y estaban constituidos por un núcleo de hierro rectilíneo y común a dos bobinas aisladas eléctricamente entre sí.

Se hacía circular una corriente por una de las bobinas de pocas vueltas y de sección transversal gruesa, interrumpiéndola y conectándola intermitentemente y de forma regular originando un campo magnético que produce un voltaje en la bobina construida por un hilo de pequeña sección transversal y muchas vueltas. Lo más importante de este inductor de chispas es que las corrientes y voltajes de las bobinas dependen proporcionalmente del número de vueltas que las forman.

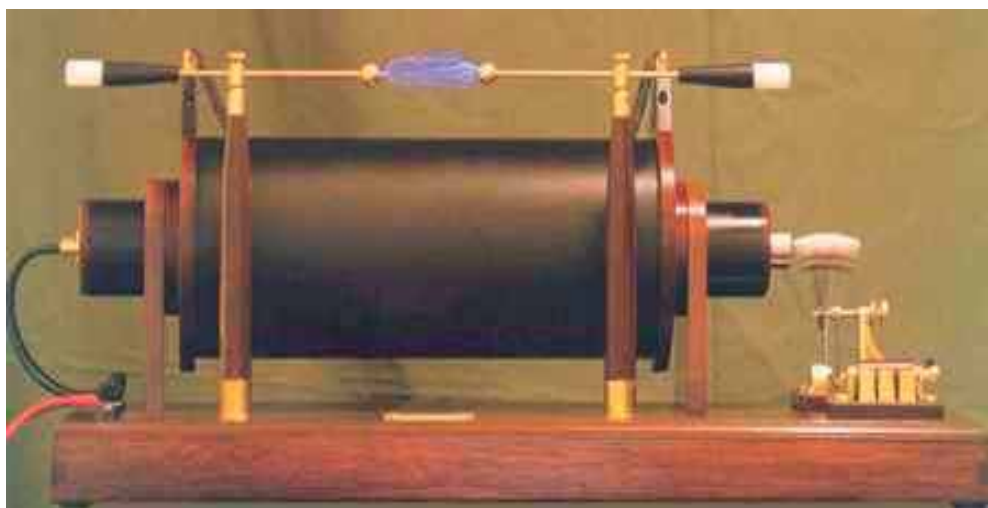


Figura 2.4 Modelo de bobina de Rühmkorff [Galván et al. 2006]

En 1874 se presenta por el científico Zénobe Théophile Gramme en la Academia de Ciencias de París un aparato que consiste básicamente en un anillo formado por una serie de bobinas de gran sección transversal y de un conjunto de bobinas de hilo fino enrolladas delante de los dos polos de un electroimán. Tal aparato se caracteriza por ser capaz de modificar los valores relativos de la intensidad de corriente y de la fuerza electromotriz.

En el año de 1876 el científico ruso Pavel Nikolayevich Yablochkoff presenta un transformador de doble devanado. La finalidad de su aparato era de alimentar con corrientes de alta tensión una serie de lámparas de iluminación eléctrica. Este aparato funcionaba con corriente alterna en régimen permanente más que con variaciones en la conexión y desconexión de corriente continua.

Fue hasta 1878, cuando el científico ruso construyó la primera planta comercial para la alimentación de un nuevo tipo de lámparas eléctricas inventadas por él conocidas como bujías Yablochkov. Para esta nueva central de energía, Yablochkov creó en cooperación con los talleres *Gramme Engineering Works* de Francia un generador síncrono y para mejorar el trabajo de la instalación, fabricó un transformador que tenía un circuito magnético abierto. Aunque fue impugnada la originalidad de este invento, las patentes concedidas a Yablochkov en 1876 y 1877 aunadas a la evidencia del relato sobre la iluminación en la exposición mundial de París y el informe publicado por la Compañía Francesa de Iluminación Eléctrica, no deja lugar a dudas de que Yablochkov fue el primero que utilizó un transformador en una planta industrial comercial.

Después Lucien H. Gaulard, inventor francés y John Dixon Gibbs, ingeniero inglés, obtuvieron en 1882 una patente para un dispositivo que llamaron generador secundario. Era un aparato verdaderamente útil para la transmisión de la energía eléctrica a través de grandes distancias por medio de la corriente alterna con la combinación de dos parámetros tales como la corriente y voltaje. Este aparato fue nombrado en la patente como nuevo sistema de distribución de electricidad para la producción de luz y fuerza motriz, mas ya había sido bautizado anteriormente como generador secundario, Figura 2.5. El generador secundario fue una versión poco práctica de lo que actualmente se llama transformador.

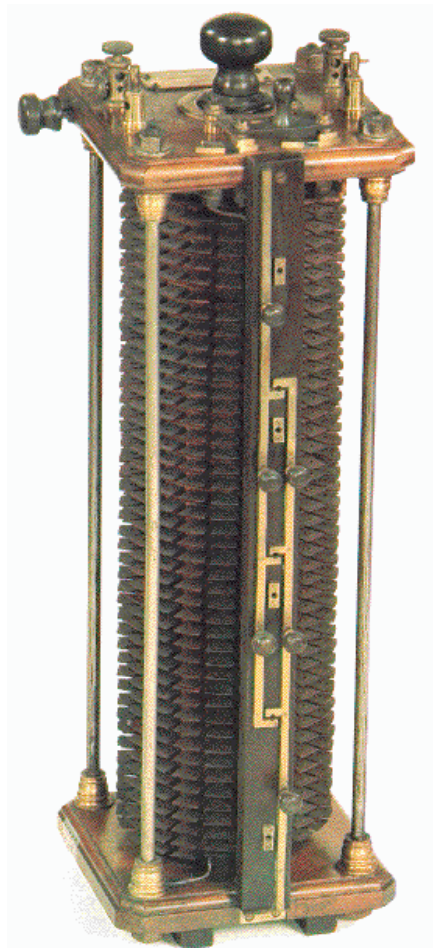


Figura 2.5 Generador Secundario de Gaulard y Gibbs [Galván et al. 2006]

La diferencia principal entre el generador secundario y el transformador que se conoce hoy en día consiste en el acoplamiento de los dispositivos, el cual se realizaba en serie al igual que las cargas.

Después se unieron dos generadores secundarios, Figura 2.6, mediante un material magnético para formar un circuito magnético cerrado. Esta unión de dos generadores secundarios dio lugar a la idea actual del transformador. Demostraron su sistema en diferentes exposiciones en Inglaterra en 1883 y en Italia en 1884.

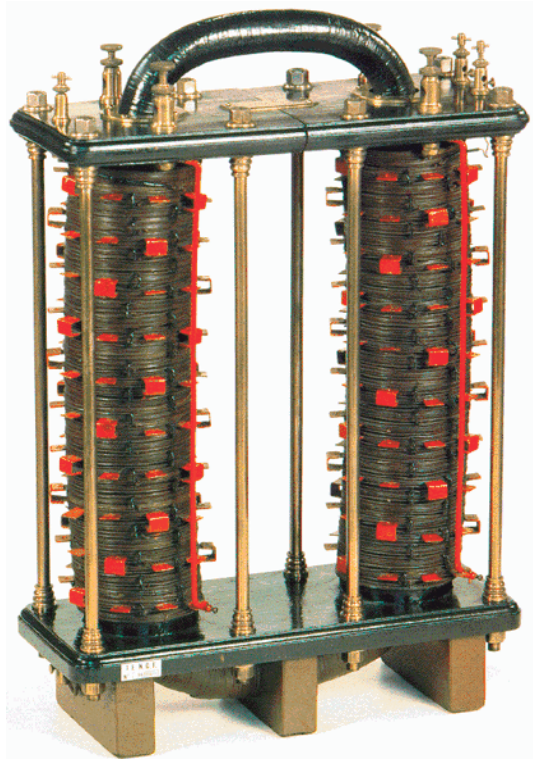


Figura 2.6 Unión de generadores secundarios [Galván et al. 2006]

Entre los visitantes a las exposiciones estuvieron tres húngaros: Otto Titusz Bláthy, Max Déri y Kart Zipernowski. Estos ingenieros húngaros trabajaban para la compañía húngara Ganz en Budapest Hungría. En 1885 perfeccionaron el generador secundario y presentaron un transformador el cual consistía de un circuito magnético cerrado. El circuito magnético estaba formado por un núcleo toroidal de hierro dulce sobre el que se enrollaron dos bobinas, alternándolas entre sí, Figura 2.7. Más tarde se cambió el toroide por un manojo de alambres también de hierro dulce, que arrollaba el circuito primario y el secundario. Al seccionar el núcleo magnético del transformador, se redujeron considerablemente las corrientes parásitas, aumentando la eficiencia del transformador. La construcción de este tipo de transformadores era muy laboriosa y cara.



Figura 2.7 Transformador de la compañía húngara Ganz [Galván et al. 2006]

La diferencia del transformador de los húngaros al generador secundario consistió primordialmente en el circuito magnético cerrado y la puesta en servicio en paralelo de los transformadores y las cargas. El transformador de los húngaros era un transformador bien construido, cuando estaba sin carga el voltaje en las terminales del secundario era igual a la fuerza electromotriz inducida en el secundario. El valor del voltaje disminuía muy lentamente al aplicar una carga, y cuando ésta era máxima, la fuerza electromotriz no varía más que un mínimo porcentaje. Esta característica hacía que este aparato fuera muy preciso para la distribución a voltaje constante.

George Westinghouse un industrial norteamericano presenció la demostración de Gaulard y Gibbs en Italia. En 1884 Westinghouse contrató a William Stanley un joven ingeniero electricista quien ya tenía algunas ideas para resolver el problema con transformadores. Cuando Stanley escuchó sobre el trabajo de Gaulard y Gibbs, animó a Westinghouse a tomar una opción en las patentes del transformador. Stanley estaba convencido de la superioridad de la conexión en paralelo; para principios del verano de 1885, había diseñado algunos transformadores de núcleo cerrado. Este tipo de transformadores con núcleo cerrado fueron llamados bobinas de inducción, Figura 2.8.

(No Model.)

W. STANLEY, Jr.

INDUCTION COIL.

No. 349,611.

Patented Sept. 21, 1886.

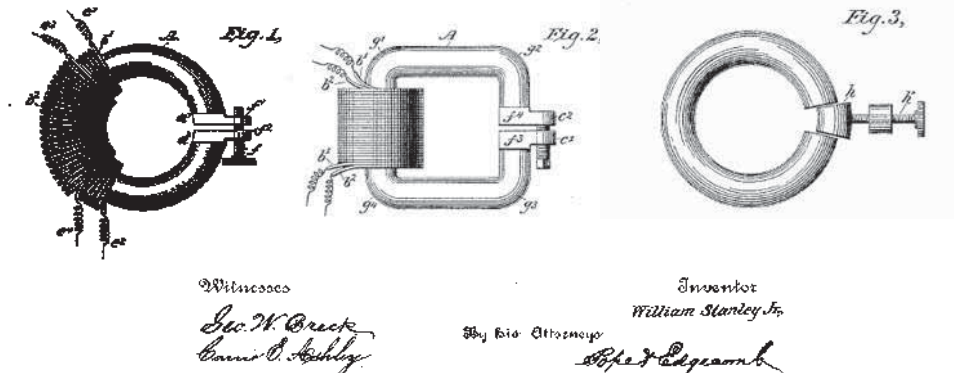


Figura 2.8 Bobinas de inducción de Stanley [EIA 2006]

En tanto, Westinghouse, quien no estaba completamente convencido de la idea de la conexión en paralelo, exploró varias combinaciones de los generadores secundarios de Gaulard y Gibbs con otro pionero de la ingeniería eléctrica, Oliver B. Shallenberger.

Stanley utilizó en su laboratorio conexiones paralelas a un transformador primario con razones de vueltas diferentes para que el secundario pudiera proporcionar cualquier voltaje que él necesitara. Parte importante del desarrollo que logró Stanley fue la estabilidad en la línea de voltaje. Los diseños de Gaulard, Gibbs y de los húngaros presentaban bastante variabilidad en este aspecto. Para distribución, Stanley comenzó utilizando un voltaje de 1kV. Poco tardó en concluir que se requerían voltajes mayores para poder hacer la transmisión más eficiente. Trabajó con una línea de transmisión de 15kV, encontrando un funcionamiento adecuado aún en los fríos inviernos. Para diciembre de 1885, Westinghouse se dispuso a modificar el transformador de Stanley para que (al contrario del toroidal húngaro), pudiera ser fabricado fácil y económicamente, en esta modificación participó Stanley con la ayuda de Shallenberger y otro ingeniero brillante, Albert Schmid. Parte fundamental del nuevo diseño era que contara con el mínimo número de partes móviles. El núcleo estaba hecho de láminas delgadas de hierro, cortadas en la forma de la letra “H”. Se enrollaron devanados de cable de cobre aislado alrededor de la barra horizontal de la “H”, y los extremos de la “H” fueron cerrados con tiras separadas de hierro. Stanley sugirió hacer las láminas de hierro en la forma

de una “E” de modo que las barras del centro pudieran deslizarse dentro de una bobina pre enrollada. Las láminas en forma de “E” eran insertadas en direcciones alternadas, y piezas rígidas de acero fueron puestas a través de las puntas de los brazos para completar el circuito magnético, Figura 2.9.

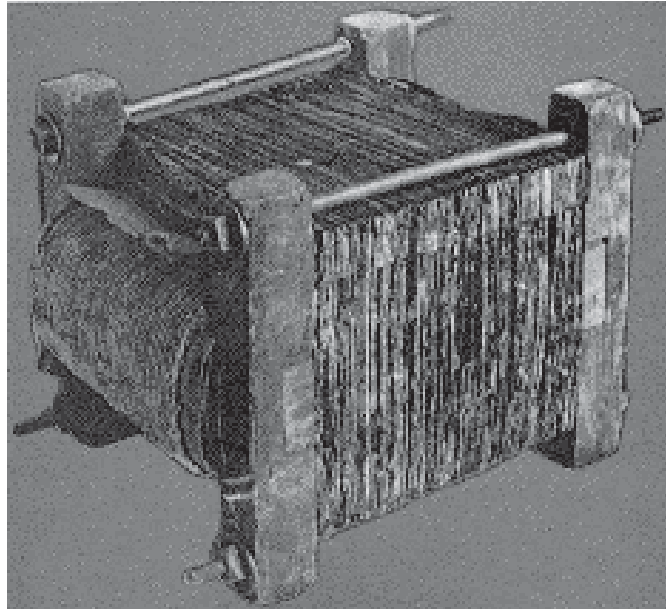


Figura 2.9 Transformador diseñado por Stanley [Galván et al. 2006]

Esta construcción de transformadores aún es común hoy en día. Para 1886 Westinghouse y sus asociados patentaron el proceso para insertar laminaciones apiladas de hierro a bobinas pre enrolladas, las provisiones para enfriar y aislar el transformador por inmersión en aceite, y el empaquetado del armado en un contenedor herméticamente sellado.

En 1889 el ingeniero ruso M. O. Dolivo Dobrovolsky inventó el primer transformador trifásico.

Para 1891 el ingeniero Baun director de los talleres Oerlikon de Suiza construyó el primer transformador de 30kV sumergido en aceite; este valor de tensión era elevadísimo en aquel tiempo desde entonces, los transformadores utilizan aceite como aislante.

Alrededor de 1900, Nikola Tesla un ingeniero electricista serbio ideó un transformador llamado el transformador de tesla para trabajar a altas frecuencias. Lo diseñó con el propósito de obtener una alta tensión a partir de potencias muy pequeñas. El equipo en sí constaba de un par de transformadores inmersos en aceite mineral.

2.3 Tipos de construcción de transformadores

Los transformadores pueden clasificarse de acuerdo al tipo de construcción del núcleo magnético. Los tipos de construcción del núcleo magnético pueden ser de:

- Núcleo acorazado.
- Tipo núcleo.
- Tipo toroidal.

En la construcción de los núcleos magnéticos tipo acorazado y tipo núcleo se presentan pequeños entrehierros físicos o espacios de aire en algunas uniones entre columnas y yugos, Figura 2.10.

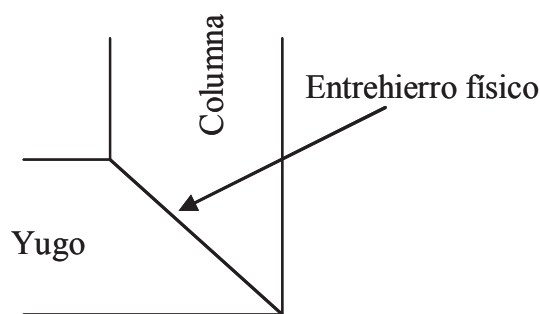


Figura 2.10 Entrehierro físico en la construcción de un transformador

En el transformador toroidal no existen entrehierros físicos por el tipo de construcción del núcleo magnético de lámina continua.

2.3.1 Núcleo acorazado

Está construido por un conjunto de láminas de acero al silicio de grano orientado en forma de “E” y de “I” que se unen para formar el núcleo magnético. Además el núcleo magnético envuelve los devanados del transformador y tiene varias trayectorias para el flujo magnético, Figura 2.11. Con este tipo de núcleos magnéticos se pueden construir transformadores comerciales tanto monofásicos como trifásicos.

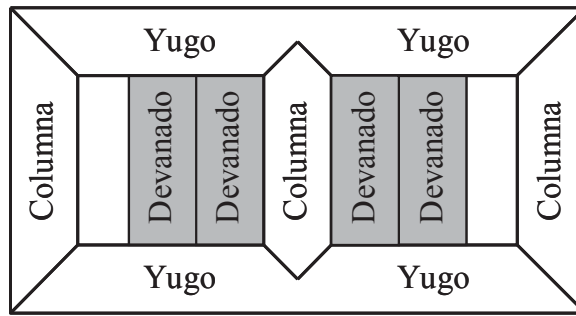


Figura 2.11 Transformador monofásico tipo acorazado

2.3.2 Tipo núcleo

Está construido por un conjunto de láminas de acero al silicio de grano orientado en forma de “U” y de “I” que se unen para formar el núcleo magnético. Además los devanados del transformador envuelven el núcleo magnético y tiene una sola trayectoria para el flujo magnético, Figura 2.12. Con este tipo de núcleo magnético se pueden construir transformadores comerciales tanto monofásicos como trifásicos.

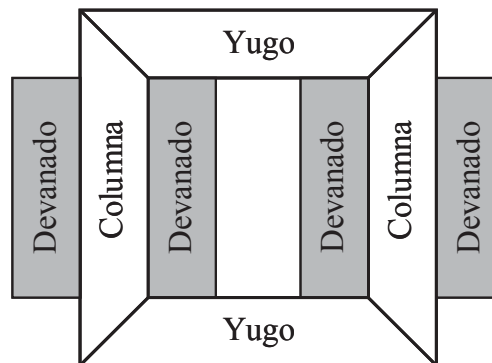


Figura 2.12 Transformador monofásico tipo núcleo

2.3.3 Tipo toroidal

El núcleo magnético tiene forma de anillo o dona y está formado por lámina continua de acero al silicio de grano orientado, los devanados van enrollados y distribuidos uniformemente alrededor del núcleo magnético toroidal, Figura 2.13. No tienen entrehierros físicos y tienen una sola trayectoria para el flujo magnético. En la actualidad no existen y no se han podido construir transformadores toroidales trifásicos comerciales, solamente monofásicos.

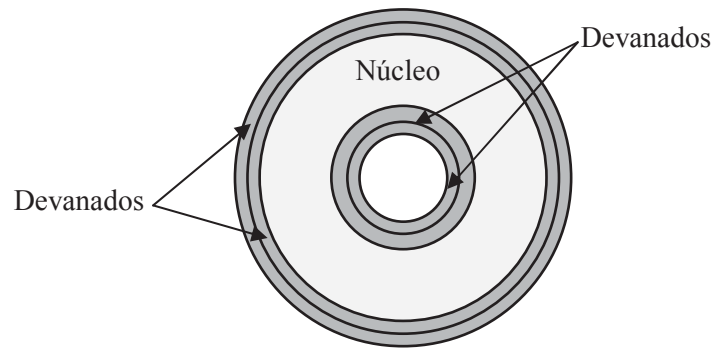


Figura 2.13 Transformador monofásico tipo toroidal

2.4 Los entrehierros físicos

Existen dos tipos de entrehierros físicos. Los entrehierros físicos que se presentan en la construcción de los núcleos magnéticos de los transformadores, Figura 2.10, porque además de aumentar la corriente de excitación y pérdidas en el núcleo generan altos flujos dispersos que provocan pérdidas en las diferentes partes del transformador ya sea en el tanque, en los herrajes, etc. Los diseñadores de transformadores buscan nuevas técnicas para reducir los entrehierros físicos que ocurren naturalmente durante la construcción del transformador por la necesidad de insertar devanados en el núcleo magnético. El otro tipo de entrehierros físicos son los que se usan para el diseño de inductores, reactores, etc [Matsch 1990] y [McLyman 1978].

Los entrehierros físicos son espacios de aire, dígame de construir un núcleo magnético al que le falta un pedazo de acero y tiene aire, introducidos en estructuras magnéticas, tales estructuras por lo general son los núcleos magnéticos. Los entrehierros físicos también pueden diseñarse para incluirse en equipos magnéticos para modificar las características de saturación o de magnetización de los núcleos magnéticos.

El control mecánico, la longitud del entrehierro físico, es un proceso de manufactura complicado y costoso, además el tratamiento y proceso de corte agrega un gran esfuerzo al material magnético. También en los núcleos magnéticos con un entrehierro físico existen fuerzas magnéticas de atracción que pueden producir deformaciones y por tanto cambio de valor de la inductancia. Por lo general un núcleo magnético con un entrehierro físico solo puede tener un valor de inductancia fijo. En la Figura 2.14 se muestra un núcleo magnético toroidal con un entrehierro físico.

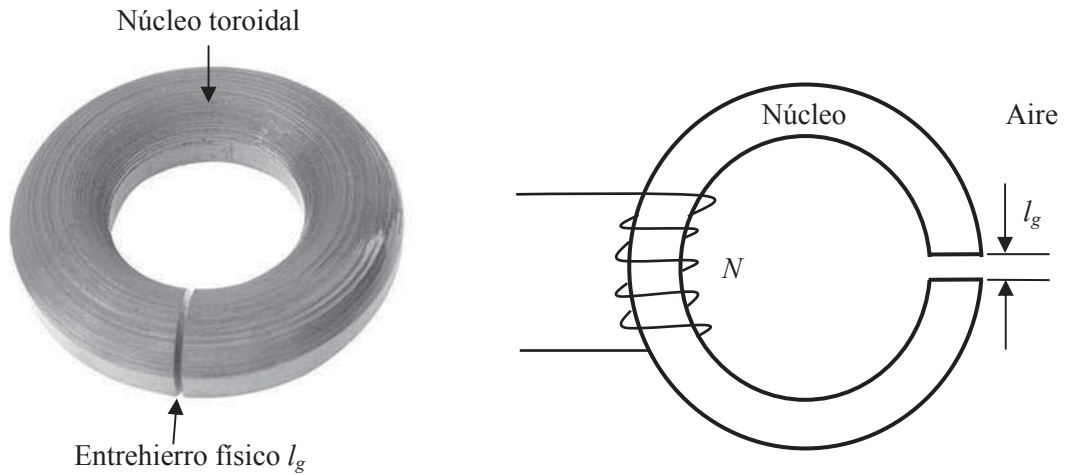


Figura 2.14 Núcleo magnético toroidal con su entrehierro físico [Nicore Electrical 2006]

La fórmula para el cálculo de inductancia L de un núcleo magnético con un entrehierro físico es [McLyman 1978]:

$$L = \frac{(\mu_0)(N^2)(A)}{l_g} \quad \text{H} \quad (2.13)$$

Se llega a esta conclusión ya que el entrehierro físico presenta una permeabilidad relativa $\mu_r=1$ ya que es aire por lo tanto su permeabilidad μ es igual a la del vacío μ_0 , una permeabilidad muy pequeña. Mientras que el material del núcleo presenta una permeabilidad mayor, ya que está hecho de un material ferromagnético. Finalmente la reluctancia que presenta el entrehierro físico es mucho mayor que la reluctancia del núcleo toroidal, es por esto que predomina el valor de la inductancia del entrehierro físico y por lo tanto para el cálculo de la inductancia de este modelo magnético predomina el valor de la inductancia del entrehierro físico. De tal forma que para este modelo la inductancia total es prácticamente igual a la inductancia dada por el entrehierro físico. Esto desprecia completamente la inductancia dada por el núcleo toroidal.

Los espacios de aire sirven para controlar el valor de inductancia L mediante pequeñas variaciones de su longitud l_g como se demuestra en (2.13). Por lo tanto, también se puede variar la reactancia inductiva X_L por medio de un entrehierro físico.

$$X_L = (2\pi f)(L) \quad \Omega \quad (2.14)$$

Esto es muy utilizado en el diseño de reactores, los cuales tienen núcleos magnéticos interrumpidos por uno o más entrehierros físicos [Matsch 1990].

La curva de magnetización de un núcleo interrumpido por un entrehierro físico tiende a ser lineal, con altos valores de intensidad de campo H para altos valores de densidad de flujo B [Slemon 1992], Figura 2.15.

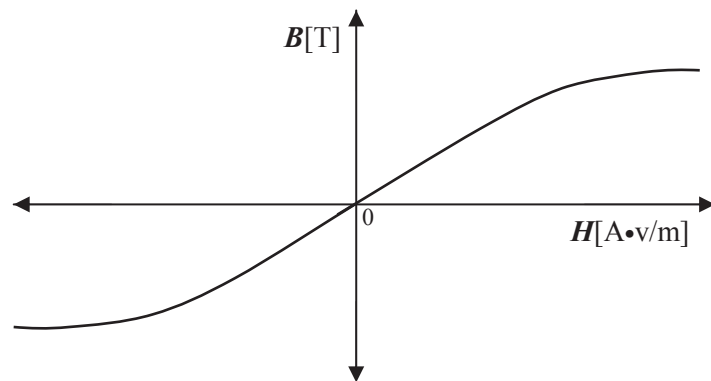


Figura 2.15 Efecto de un entrehierro físico en la curva de magnetización

De igual manera, el ciclo de histéresis de un núcleo magnético con un entrehierro físico tiende a ser lineal al igual que su curva de magnetización [McLyman 1978]. En la Figura 2.16 se puede observar como es afectada una curva de histéresis por un entrehierro físico.

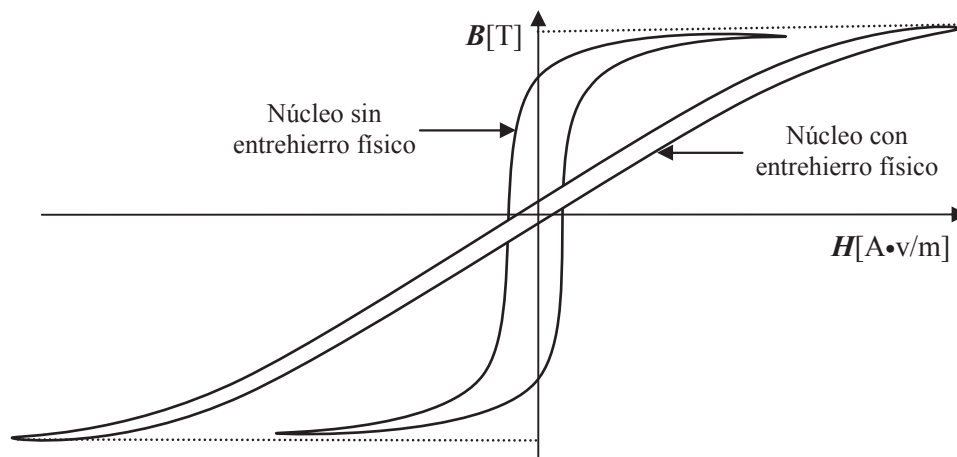


Figura 2.16 Efecto de un entrehierro físico en la curva de histéresis

Al introducir un entrehierro físico en un núcleo magnético se necesita una mayor corriente

de magnetización. Las altas corrientes de magnetización son necesarias para vencer la reluctancia del espacio de aire ya que la permeabilidad del aire es muy pequeña comparada con la permeabilidad del material del núcleo magnético.

2.4.1 Aplicaciones de los entrehierros físicos

Algunas de las aplicaciones de los entrehierros físicos son [Matsch 1990] y [McLyman 1978]:

- Para limitar las corrientes de avalancha o corrientes *inrush* en los transformadores.
- Construcción de electroimanes.
- Construcción de máquinas eléctricas rotatorias.
- Instrumentos de medición.
- Aparatos polarizados (utilizados en bocinas, grabadores de fonógrafo y relevadores).
- Inductores con un cierto valor de inductancia.
- Construcción de reactores con un cierto valor de reactancia inductiva utilizados para suprimir la distorsión del flujo de corriente alterna en circuitos rectificadores y limitar las corrientes de arranque en motores, hornos de arco y soldadura de arco.

2.5 Ecuaciones de Maxwell

Los problemas electromagnéticos se analizan mediante las ecuaciones de Maxwell sujetas a ciertas condiciones de frontera [Hayt 1991], [Jin 1993], [Sadiku 1998] y [Sadiku 2001]. Las ecuaciones de Maxwell son ecuaciones fundamentales que gobiernan todos los fenómenos electromagnéticos macroscópicos. Las ecuaciones de Maxwell establecen la interdependencia de la electricidad y el magnetismo.

En general, son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales o integrales, éstas se pueden resolver directamente para campos o utilizando la teoría de potenciales. La forma integral de las ecuaciones de Maxwell representan las leyes físicas que sirven de fundamento, mientras que la forma diferencial se emplea con más frecuencia en la resolución de problemas. Tales ecuaciones se pueden escribir en forma integral, aplicando para ello los teoremas de Stokes y de la divergencia.

En la Tabla 2.1 se muestran las cuatro ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial e integral.

Tabla 2.1 Ecuaciones de Maxwell

Ecuación	Forma diferencial parcial	Forma integral
(1) Ley de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho_v dv$
(2) Ley de Gauss (campo magnético)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
(3) Ley de Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
(4) Ley de Ampere	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{A_c} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A}_c + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$

Las cuatro ecuaciones de Maxwell para los campos electromagnéticos estáticos se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ecuaciones de Maxwell para campos electromagnéticos estáticos

Ecuación	Forma diferencial parcial	Forma integral
(1) Ley de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho_v dv$
(2) Ley de Gauss (campo magnético)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
(3) Ley de Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$
(4) Ley de Ampere	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{A_c} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A}_c$

A continuación se define de forma breve cada una de las cuatro leyes de Maxwell [Sadiku 1998].

1. Ley de Gauss: Establece que el flujo eléctrico total que pasa por cualquier superficie cerrada es igual a la carga total que encierra esa superficie.

2. Ley de Gauss (campo magnético): A esta ecuación también se le conoce como ley de conservación del flujo magnético. Indica que las líneas de los campos magnéticos son siempre cerradas, indica que no existen monopolos magnéticos.
3. Ley de Faraday: Establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera.
4. Ley de Ampere: Establece que la integral de línea de un campo magnético en torno a una trayectoria cerrada es igual a la corriente neta encerrada por la trayectoria.

Los campos magnéticos se rigen por la Ley de Gauss para el campo magnético, Tabla 2.1, la cual es una de las ecuaciones de Maxwell [Rojas 1990].

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.15)$$

La ecuación (2.15) indica que la divergencia de la densidad de flujo $\mathbf{B}$ es cero en cualquier parte, por lo tanto, la densidad de flujo $\mathbf{B}$ puede expresarse como el rotacional de alguna otra función vectorial. Esta otra función está dada por medio del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.16)$$

Como el potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$ es una función potencial que también es un vector se cumple que:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (2.17)$$

La densidad de flujo $\mathbf{B}$ en un determinado punto producido por una distribución de densidad de corriente $\mathbf{J}$ está dada por la Ley de Ampere en su forma diferencial como:

$$\nabla \times \mathbf{B} = (\mu)(\mathbf{J}) \quad (2.18)$$

Se puede simplificar (2.18) analíticamente si se representa por medio del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$. Si se sustituye (2.16) en (2.18) se obtiene:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = (\mu)(\mathbf{J}) \quad (2.19)$$

Si se aplica a (2.19) la identidad vectorial para el rotacional de un vector se obtiene:

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - (\nabla^2 \mathbf{A}) = (\mu)(\mathbf{J}) \quad (2.20)$$

Si se introduce la igualdad de (2.17) en (2.20) se obtiene:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -(\mu)(\mathbf{J}) \quad (2.21)$$

Esta relación es conocida como la ecuación de Poisson, y es una ecuación diferencial parcial no homogénea de segundo orden que se aplica a un punto en el que se quiera conocer el valor del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$. Al conocer el valor del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$ se puede conocer el valor de la densidad de flujo $\mathbf{B}$ en dicho punto. Para un problema magnetostático en dos dimensiones en el plano cartesiano, (2.21) puede escribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (2.22)$$

En este trabajo se realiza un estudio magnetostático no lineal de un modelo en dos dimensiones, por lo tanto, lo que se busca es resolver (2.22) para calcular la distribución de campo magnético en el modelo de estudio.

Para un modelo no lineal el valor de la permeabilidad μ en (2.22) dependerá de la relación no lineal entre los valores de la densidad de flujo $\mathbf{B}$ y de la intensidad de campo $\mathbf{H}$ dados por la curva de magnetización del material magnético del núcleo. De esta manera (2.22) es más difícil de resolver ya que es una ecuación diferencial parcial no homogénea de segundo orden no lineal.

Un método numérico usado para resolver (2.22) para problemas de campo magnético con muchos puntos es el método del elemento finito, el cual nos permite conocer el valor del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$ en todos los nodos del dominio entero que se está estudiando.

2.5.1 Métodos de solución

Existen diversos métodos para obtener algún tipo de solución para las ecuaciones de Maxwell para un cierto problema [Balanis 1989], [Hayt 1991], [Sadiku 1998] y [Sadiku 2001]. Los tipos de solución pueden ser: exactas o aproximadas. Los métodos para resolver las ecuaciones de Maxwell se pueden clasificar en:

- Soluciones analíticas o métodos analíticos con los que se obtiene una solución exacta para un problema simplificado.
- Métodos numéricos con los que se obtiene una solución aproximada a un problema menos simplificado.

Los métodos analíticos se usaban antes de que aparecieran las computadoras digitales. Al aparecer las computadoras digitales se empezaron a desarrollar los métodos numéricos los cuales se aplican para resolver problemas más grandes y complejos.

En la actualidad los métodos numéricos son muy usados y son comprobados con las soluciones exactas obtenidas mediante los métodos analíticos o experimentalmente.

2.5.2 Soluciones analíticas o métodos analíticos

Antes de que aparecieran las computadoras digitales, las ecuaciones de Maxwell eran resueltas analíticamente.

La solución matemática más satisfactoria para un problema de campo es la exacta. Por esta razón las ecuaciones de Maxwell al ser resueltas de forma analítica nos proporcionan una solución exacta al problema que se quiere resolver [Balanis 1989], [Hayt 1991], [Sadiku 1998] y [Sadiku 2001]. Esta solución puede compararse con una solución aproximada calculada con alguno de los métodos numéricos.

Las ventajas de las soluciones analíticas se describen a continuación: se obtiene el significado físico de la solución en una forma más intuitiva; se puede utilizar la solución analítica como base de comparación para aproximaciones numéricas; generalmente se obtienen soluciones eficientes.

Las desventajas de las soluciones analíticas son: están limitadas a geometrías simples; en muchos casos se necesita de funciones especiales que requieren ser evaluadas en forma numérica y pueden resultar en simulaciones lentas, en regiones donde las series convergen lentamente.

Como consecuencia, los métodos analíticos se aplican para resolver problemas con geometrías simples: rectangulares, cilíndricas o esféricas.

Si un caso particular no se puede aproximar de esa manera es necesario recurrir a un método numérico.

2.5.3 Métodos numéricos

En la actualidad con el avance de las computadoras digitales los métodos numéricos son los más usados para encontrar soluciones aproximadas a problemas de campo en los cuales intervienen las ecuaciones de Maxwell. Tales ecuaciones pueden ser resueltas mediante la aplicación de algún método numérico [Arango 2005], [Hayt 1991], [Jin 1993], [Sadiku 1998] y [Sadiku 2001]. Cuando se aplica un método numérico a las ecuaciones de Maxwell, éstas pasan a ser ecuaciones algebraicas que son más fáciles de resolver. Algunos de los métodos numéricos pueden ser:

- Método de diferencias finitas.
- Método del elemento finito.
- Método de simulación de carga.
- Método de ecuaciones integrales.

Todos estos métodos pueden implementarse en una computadora digital para su solución.

2.5.3.1 Método de diferencias finitas

El método de las diferencias finitas es una técnica numérica simple que se emplea para resolver ecuaciones diferenciales parciales [Sadiku 1998]. En este método las ecuaciones diferenciales parciales pasan a ser ecuaciones algebraicas.

El método consiste en una aproximación de derivadas parciales por expresiones algebraicas envolviendo los valores de la variable dependiente en un número limitado de puntos seleccionados. Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas escritas en términos de los valores de la variable dependiente en puntos seleccionados. Las ecuaciones son lineales si las ecuaciones diferenciales parciales son también lineales, o pueden ser no lineales.

Los valores de los puntos seleccionados se convierten en las incógnitas, en vez de la distribución espacial continua de la variable dependiente. El sistema de ecuaciones algebraicas debe ser resuelto y puede envolver un gran número de operaciones aritméticas.

Antiguamente todos estos cálculos eran realizados manualmente, o por el uso de dispositivos mecánicos.

En la actualidad, con el avance de las computadoras digitales las operaciones son ejecutadas por medio de un programa de cómputo.

Por lo general el método de las diferencias finitas es usado en regiones de solución que tienen una geometría muy simple. Los pasos básicos del método de diferencias finitas son:

1. Se realiza una aproximación a la ecuación diferencial y a las condiciones en la frontera por medio de un grupo de ecuaciones algebraicas, llamadas ecuaciones de diferencias, en los nodos de la cuadrícula situada dentro de la región de la solución.
2. Se resuelve el grupo de ecuaciones algebraicas.

La región de la solución se divide en mallas con nodos. A un nodo de la frontera de la región en la que se especifica el potencial se le llama nodo fijo, y a los puntos dentro de la región se les llama nodos libres, libres en cuanto a que se desconoce el valor en dicho nodo. Para resolver los grupos de ecuaciones algebraicas se utilizan diversos métodos.

Las principales ventajas de este método son: su facilidad de implementarse en una computadora para los casos de una y dos dimensiones; se pueden resolver problemas muy grandes ya que requiere de poca memoria; se pueden considerar materiales no lineales.

Las desventajas son: está limitado a geometrías relativamente simples, presenta problemas con huecos redondos, por ejemplo, se tiene que desarrollar un programa diferente para cada problema; el cálculo de las derivadas se hace con poca exactitud ya que se usan aproximaciones lineales; se debe considerar todo el espacio; las condiciones de frontera deben especificarse explícitamente. Se requiere un gran tiempo de cómputo y de memoria para resolver problemas grandes que contienen muchos nodos.

2.5.3.2 Método del elemento finito

El método del elemento finito es una técnica numérica para obtener soluciones aproximadas a problemas de valor de frontera [Jin 1993], [Rojas 1990] y [Sadiku 1998]. Es un método de discretización, quiere decir, que las ecuaciones que describen el fenómeno pasan de ser ecuaciones diferenciales a ecuaciones algebraicas. El fenómeno que se estudia puede tener

un número infinito de grados de libertad, pero la idea del método es convertir este número infinito de grados de libertad en un número finito de grados de libertad.

El principio del método es remplazar un dominio entero continuo, el modelo de estudio, por un número finito de subdominios, los cuales son llamados elementos finitos, en donde la función desconocida es representada por funciones simples de interpolación con coeficientes desconocidos. Para formar el sistema de ecuaciones algebraicas se pueden aplicar algunos métodos muy conocidos como son el método variacional de Ritz y el método de residuos ponderados de Galerkin. Finalmente se obtiene la solución al problema de valor de frontera cuando se resuelve el sistema de ecuaciones. Las etapas básicas del método son:

1. Discretización o subdivisión del dominio.
2. Selección de las funciones de interpolación, por lo general es un polinomio.
3. Formulación del sistema de ecuaciones.
4. Solución del sistema de ecuaciones, puede ser un sistema lineal o no lineal.

Las ventajas de este método son: es independiente de la geometría específica ya que se construye en base a elementos genéricos; no hay problema con la representación de curvas, por ejemplo huecos redondos; se utilizan aproximaciones de alto orden, que aceptan derivadas; algunas condiciones frontera como las de Neumann no necesitan ser especificadas; se pueden considerar materiales no lineales; el *software* o programa que se desarrolla es de aplicación general.

Las desventajas son: la formulación y la programación son relativamente complejas; se necesita de pre y pos proceso de las soluciones; como se usa geometría abierta se debe considerar todo el espacio. Se requiere grandes tiempos de cómputo y de memoria para resolver modelos con muchos elementos finitos acompañados con propiedades no lineales.

2.5.3.3 Método de simulación de carga

Este método está diseñado para dominios con límites abiertos [Arango 2005]. El método de simulación de carga no tiene ninguna restricción dentro de la geometría del modelo, éste se prefiere generalmente para geometrías con superficies curvas que tienen cierto grado de simetría. Para este método el objeto de estudio es modelado por un sistema discreto con un

cierto número de cargas internas cuyas posiciones y tipo son predeterminadas, pero cuya magnitud es desconocida. Las condiciones de frontera o valores de potencial eléctrico conocidos en algún punto del modelo, o puntos de contorno se asignan en un sistema de puntos elegidos arbitrariamente y con anterioridad. El número de puntos de contorno es igual al número de cargas desconocidas en la simulación.

Para obtener resultados aceptables se debe utilizar una gran cantidad de cargas de simulación para determinar con bastante exactitud el campo eléctrico de modelos con geometría muy simple. Al aumentar el número de cargas de simulación se aumenta los requerimientos de memoria y de tiempo de cómputo ya que puede degradar la capacidad de la técnica para dar una solución útil.

El método calcula la magnitud de cada una de las cargas de simulación del modelo en base a la información dada con anterioridad. Después de encontrar la magnitud de cada una de las cargas de simulación se calcula el campo eléctrico de cada una de ellas.

Las ventajas son: como es un método físico las soluciones se pueden prever intuitivamente; puede resultar computacionalmente muy eficiente; existe experiencia considerable en la localización y número de cargas para geometrías estándar.

Las desventajas de este método son: no existe una forma sistemática de decidir el número y localización de las cargas; se pueden obtener curvas equipotenciales que no representen la realidad física si no se considera un número adecuado de cargas; las soluciones pueden resultar ineficientes computacionalmente; se pueden presentar problemas con el cálculo de derivadas. Si el número de cargas de simulación es grande, se requerirá un mayor tiempo de cómputo y altos requerimientos de memoria.

2.5.3.4 Método de ecuaciones integrales

Este método tiene la ventaja de ser conceptualmente sencillo. Se usa comúnmente en la resolución de ecuaciones integrales [Balanis 1989]. Las ecuaciones integrales son aquellas ecuaciones donde la incógnita aparece dentro de un signo de integral. Ellas solo se pueden evaluar en forma numérica y se aplican únicamente a medios lineales. Existen dos formas de ecuaciones integrales:

- Ecuaciones integrales de volumen.
- Ecuaciones integrales de frontera.

2.6 Programas comerciales de elemento finito para resolver campos electromagnéticos

Las computadoras digitales han tenido un gran avance tecnológico, se han hecho cada vez más poderosas. Las computadoras de hoy en día pueden resolver muchísimas operaciones numéricas en poco tiempo, lo cual se aprovecha para resolver sistemas numéricos grandes. Los métodos numéricos pueden implementarse en una computadora digital para ser resueltos.

Uno de los métodos numéricos más usados hoy en día para resolver problemas de campo electromagnético es el método del elemento finito, el cual resuelve las ecuaciones de Maxwell utilizando la teoría de potenciales.

Existen en el mercado muchos programas comerciales que resuelven las ecuaciones de Maxwell por medio del elemento finito. En la Tabla 2.3 se muestran algunos de estos programas.

Tabla 2.3 Programas comerciales de elemento finito

Compañía	Programa comercial
AnSoft	Maxwell 2D Maxwell 3D Ansoft HFSS
ANSYS	ANSYS
COMSOL	COMSOL Multiphysics (FEMLAB)
Structural Research & Analysis Corporation	COSMOS/EMS
ESI Group	PAM-CEM
Field Precision	Amaze TriComp
Infolityca Corporation	MagNet ElecNet FullWave
MagneForce Software Systems	MagneForce Software Systems
Magsoft Corporation	FLUX2D FLUX3D
The Japan Research Institute,Ltd	JMAG-Studio
Tera analysis	Quickfield
Vector Fields Inc	OPERA-2d OPERA-3d
Weidinger Associates Inc	EMFlex

Todos estos programas tienen sus ventajas y desventajas unos con otros pero básicamente depende del problema que se quiere resolver para hacer uso de uno de ellos.

2.7 Descripción breve del programa ANSYS

En este trabajo se utilizó el programa comercial de elementos finitos ANSYS. El programa ANSYS resuelve modelos de campo electromagnético (ecuaciones de Maxwell), por medio del método del elemento finito. Con este programa se pueden resolver modelos en una, dos y tres dimensiones. El programa ANSYS cuenta con las etapas típicas de todo programa de elementos finitos, las cuales son:

1. Preproceso: En esta etapa se construye el modelo completo, incluyendo la malla de elementos finitos.
2. Solución: En esta etapa se aplican las cargas y las condiciones de frontera al modelo. Aquí se obtienen los resultados finales de la simulación.
3. Postproceso: En esta etapa se visualizan los resultados finales de la simulación.

Cuenta con diversos tipos de elemento finito para diferentes tipos de problemas y para diferentes dimensiones. Los elementos finitos cuentan con muchos nodos lo cual proporciona una solución muy precisa. Los nodos de algunos elementos finitos tienen varios grados de libertad.

El programa ANSYS puede manejar materiales lineales y no lineales, combinados.

Además cuenta con un generador de mallas muy poderoso el cual hace mallas muy complicadas de forma automática y de forma sencilla.

La colocación de las cargas y de las condiciones de frontera en los modelos es muy sencilla, las fronteras de Neumann no necesitan especificarse pero las fronteras de Dirichlet sí.

Puede realizar análisis lineales y no lineales del tipo:

- Estático.
- Armónico.
- Transitorio.

Utiliza varios métodos para resolver los sistemas de ecuaciones algebraicos:

- Solución frontal.
- Solución del gradiente conjugado de Jacobi.
- Solución incompleta del gradiente conjugado de Cholesky.
- Solución del gradiente conjugado preacondicionada.
- Solución iterativa automática.

El método más escogido en problemas electromagnéticos es la solución frontal. Para problemas que contienen propiedades no lineales, se puede utilizar el método iterativo de Newton Raphson para resolver el sistema de ecuaciones no lineales. Para los problemas no lineales el usuario tiene la opción de especificar el valor de la tolerancia y el valor máximo de iteraciones para el método.

Los resultados que proporciona el programa ANSYS con un modelo bien hecho son muy buenos, los porcentajes de error con los resultados reales son muy pequeños. Por lo tanto el programa ANSYS es una herramienta muy poderosa y confiable. Es uno de los mejores programas comerciales de elemento finito que existen hoy en día en el mercado.

El programa ANSYS presenta los resultados en forma gráfica y numérica, ambos los presenta de una manera muy agradable y precisa.

2.8 Transformadores toroidales

El transformador toroidal es un equipo estático que transfiere energía eléctrica, de un circuito operando a una tensión a otro operando a una tensión diferente, por inducción electromagnética como cualquier otro transformador.

El núcleo magnético toroidal tiene la forma geométrica de un anillo o de una dona y está formado por lámina continua de acero al silicio de grano orientado. Por su tipo de construcción no tiene entrehierros físicos o espacios de aire.

La geometría del núcleo magnético toroidal está determinada por un diámetro interior ID , un diámetro exterior OD y una altura HT . En la Figura 2.17 se muestra la geometría de un núcleo magnético toroidal de sección transversal cuadrada.

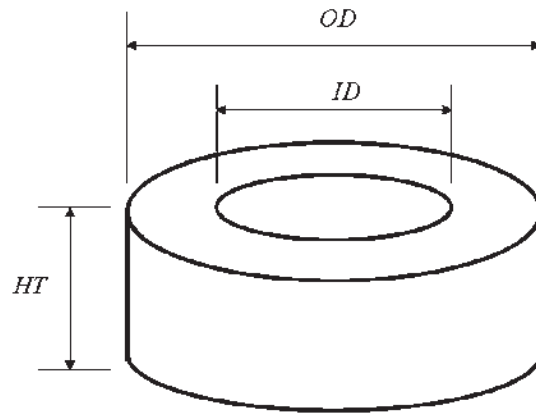


Figura 2.17 Geometría de un núcleo magnético toroidal

Debido a la geometría cerrada y al tipo de material de los núcleos magnéticos toroidales éstos se comportan como núcleos sin entrehierros físicos los cuales suelen tener una curva de histéresis rectangular con bajos valores de intensidad de campo H y altos valores de densidad de flujo B como se muestra en la Figura 2.18 [McLyman 1978]. Estos núcleos se pueden operar a un flujo magnético mayor por lo que su costo y tamaño disminuyen.

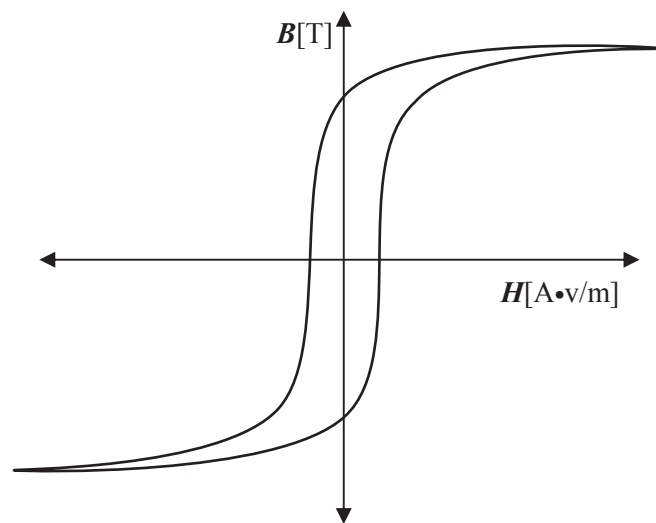


Figura 2.18 Curva de histéresis de un núcleo magnético toroidal

La característica del material del núcleo magnético permite diseños con menores pérdidas magnéticas y eléctricas para mejorar la eficiencia del transformador toroidal. La Figura 2.19 muestra una curva típica de magnetización.

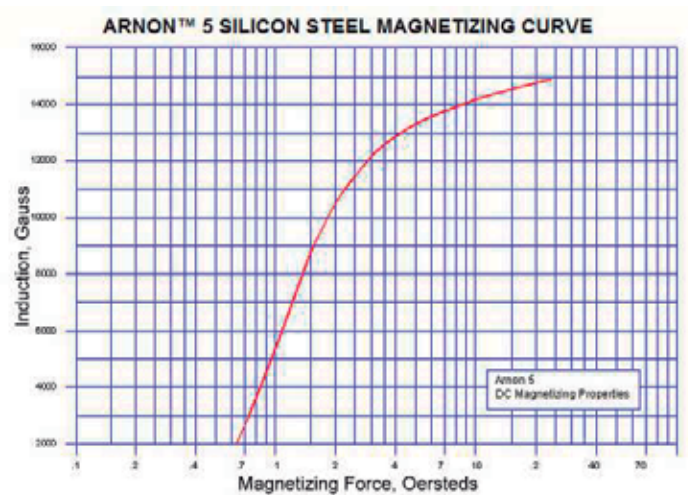


Figura 2.19 Curva típica de magnetización [Arnold 2006]

2.9 Partes de un transformador toroidal comercial

Los transformadores toroidales se fabrican con ciertas características según su aplicación. En la Figura 2.20 se muestra algunas de las partes de un transformador toroidal comercial.

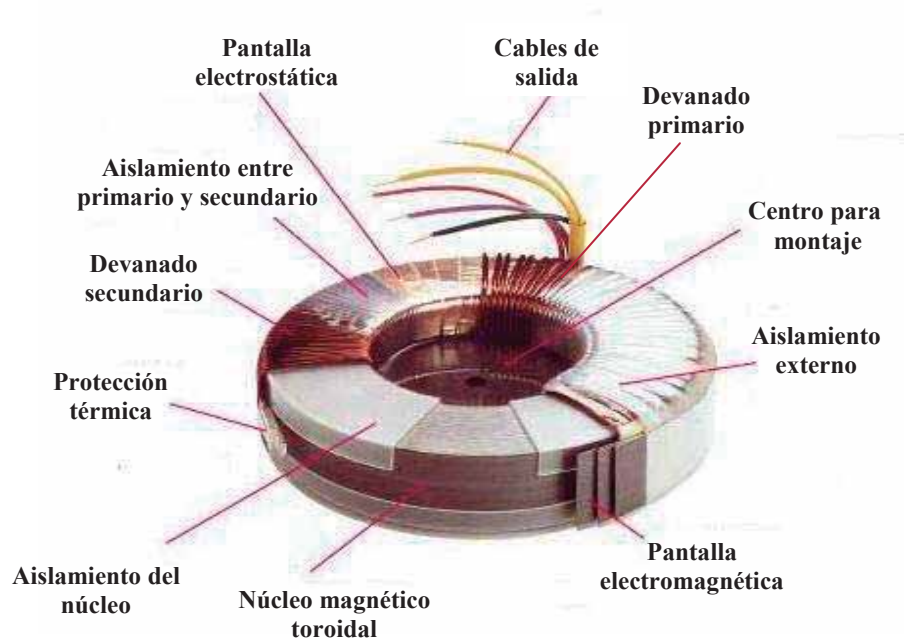


Figura 2.20 Partes de un transformador toroidal comercial [Powertronix 2006]

Las partes principales de un transformador toroidal comercial son las siguientes [Plitron 2007], [Powertronix 2006] y [Torivac 2006]:

1. Núcleo magnético toroidal: Está formado por lámina continua de acero al silicio de grano orientado cuya función es amplificar la densidad de flujo B , Figura 2.20. No tiene entrehierros físicos.
2. Aislamiento del núcleo: Está formado por cápsulas de poliamida – 6 con 30% de fibra de vidrio, Figura 2.20.
3. Devanados: Están formados por alambre magneto que son los encargados de conducir la corriente eléctrica de CA en el transformador, Figura 2.20.
4. Pantalla electrostática: Está formada por un devanado de lámina de cobre, aislado por poliéster y situado entre los devanados del transformador y tiene la función de prevenir el cortocircuito entre los devanados, Figura 2.20. Las pantallas electrostáticas son indispensables en equipo médico porque se necesita evitar que se apliquen altos voltajes a las personas.
5. Pantalla electromagnética: Está hecha de las mismas laminaciones del transformador, consta de múltiples capas de acero al silicio de grano orientado enrolladas alrededor de la circunferencia del transformador, Figura 2.20. Las pantallas electromagnéticas sirven para disminuir las pérdidas por flujo disperso. En ellas se producen pérdidas, pero en general son mucho menores que las pérdidas en los componentes que cubren.

2.10 Construcción de los transformadores toroidales

La construcción de un transformador toroidal se empieza por el núcleo magnético toroidal, este núcleo magnético está formado por lámina continua de acero al silicio de grano orientado, Figura 2.21.

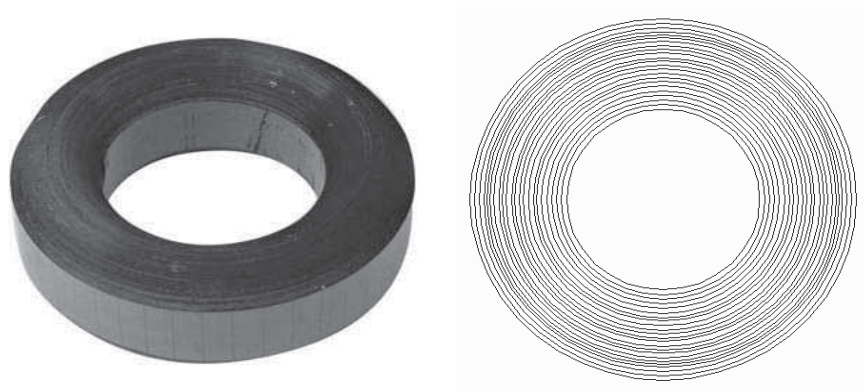


Figura 2.21 Núcleo magnético toroidal [Nicore Electrical 2007]

Por lo general la lámina continua se enrolla por medio de máquinas poderosas las cuales la enrollan con mucha fuerza, velocidad y precisión como se ve en la Figura 2.22 esto permite tener un alto factor de apilamiento en el núcleo magnético. Al enrollar la lámina ésta debe quedar lo más apretada posible para evitar los entrehierros físicos. Todos los núcleos van soldados al inicio y final del enrollado de la lámina para evitar posibles vibraciones causadas por entrehierros físicos y posteriormente son aislados [Torivac 2006].



Figura 2.22 Máquina para enrollar lámina continua [Cortech Machines 2006]

Los devanados se enrollan alrededor de los 360° del núcleo magnético toroidal para tener bajos valores de flujo de dispersión. En otras palabras, los devanados enrollados alrededor del núcleo magnético toroidal forman un blindaje que no permiten que se presenten los flujos de dispersión, como se ve en la Figura 2.23.

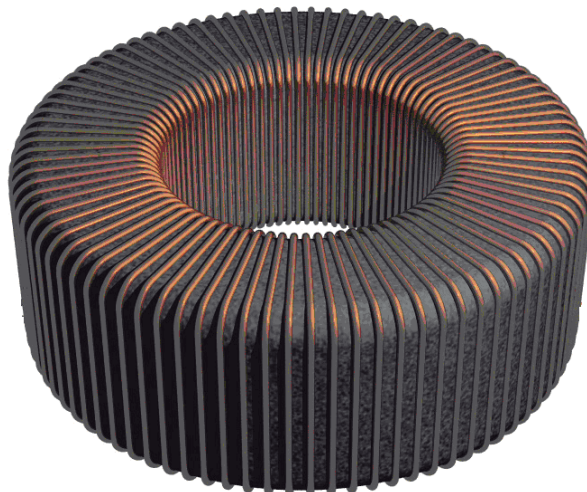


Figura 2.23 Devanado colocado en un núcleo magnético toroidal [Wikimedia 2006]

Por lo general existen máquinas para devanar que pueden colocar los devanados con mucha precisión y fuerza, como se ve en la Figura 2.24. Con los devanados bien distribuidos desaparece prácticamente el ruido provocado por la magnetostricción y favorece la disipación del calor.

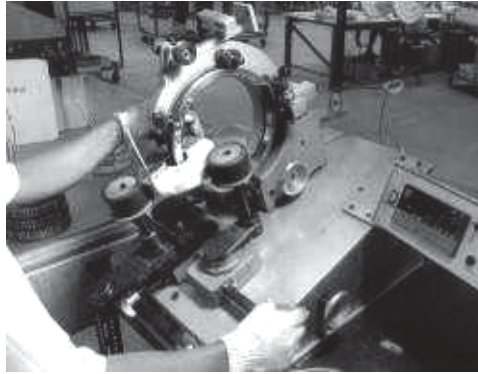


Figura 2.24 Máquina para devanar en núcleos toroidales [Plitron 2006]

En el transformador toroidal el flujo magnético tiene una sola trayectoria y se distribuye de acuerdo con la permeabilidad del núcleo magnético, esto permite aprovechar mejor el flujo magnético para producir el fenómeno de inducción electromagnética entre los devanados enrollados alrededor del núcleo magnético toroidal. Con un tratamiento térmico adecuado se puede elevar la permeabilidad del núcleo y se pueden disminuir las pérdidas por histéresis.

2.11 Características de los transformadores toroidales

Las características más importantes de los transformadores toroidales son [Plitron 2005] y [Torivac 2006]:

1. Alta eficiencia: La clave de todo transformador toroidal es la eficiencia y la base para obtener dicha eficiencia es el núcleo magnético sin entrehierros físicos. Los núcleos magnéticos toroidales operan con densidades de flujo magnético B de 1.6T a 1.8T. Típicamente los transformadores toroidales pequeños tienen de 95% a 96% de eficiencia a potencia nominal y son mucho más eficientes que los transformadores convencionales (85% – 90%). La eficiencia de un transformador es la relación entre las

potencias de salida y de entrada y es variable en función del tamaño del transformador y de las condiciones de trabajo. El rendimiento de un transformador toroidal está condicionado básicamente por las pérdidas resistivas en los devanados y por las pérdidas en el núcleo. Las pérdidas por efecto Joule o pérdidas resistivas en los devanados se pueden disminuir dimensionando los devanados adecuadamente. Las pérdidas en el núcleo son provocadas por corrientes de *eddy* y por histéresis, éstas se pueden disminuir usando un buen acero al silicio de grano orientado y mediante un tratamiento térmico adecuado.

2. Poco ruido acústico: Los transformadores toroidales son más silenciosos que los transformadores convencionales. La ausencia de un entrehierro físico típicamente proporciona una reducción del ruido acústico. Comparado a los transformadores convencionales los transformadores toroidales son más silenciosos.
3. Fácil de montar o colocar: Los transformadores toroidales son muy fáciles de montar o de colocar. Un solo centro sirve para montar un transformador toroidal, esto reduce considerablemente el tiempo de ensamblaje del mismo.
4. Tamaño y peso: Los transformadores toroidales tienen cerca de la mitad del tamaño y peso de los transformadores estándar. Los transformadores toroidales se construyen actualmente en serie solo en tamaños pequeños que van desde unos pocos VA hasta 25kVA o 30kVA. Las embobinadoras de los transformadores toroidales son capaces de embobinar núcleos de gran tamaño, por ejemplo para transformadores de varios cientos de kVA o inclusive unos pocos MVA. Sin embargo, existe un límite práctico debido al gran peso del núcleo para 100kVA. Esto está determinado por el máximo peso que dos personas pueden cargar para montar el núcleo toroidal en las embobinadoras. En el futuro se espera que se desarrolle maquinaria para montar núcleos toroidales de gran peso y tamaño.
5. La regulación es muy buena: La regulación de un transformador viene determinada por la relación entre el voltaje del secundario en vacío y el voltaje del mismo con carga nominal. La regulación varía con el tamaño del transformador. A mayores potencias suelen corresponder menores resistencias de los alambres utilizados en los devanados y se pueden conseguir mejores características de regulación. El factor de regulación es inversamente proporcional a la eficiencia y al tamaño físico del transformador y

proporcional al incremento de temperatura, todos estos factores deben considerarse para el cálculo de la regulación del transformador.

6. Poco flujo de dispersión: Los transformadores toroidales irradian cerca de 1/10 del campo magnético en comparación con los transformadores convencionales. Por la forma en que se sitúan los devanados alrededor del núcleo forman un blindaje. El campo magnético se concentra en el núcleo magnético toroidal para transformar la energía de un devanado a otro. La ausencia de entrehierros físicos en la construcción del núcleo magnético, el tratamiento térmico, el diseño cuidadoso y las meticulosas técnicas de devanado permiten conseguir una dispersión magnética muy baja comparada con la que generan los transformadores convencionales. Cuando se precisa eliminar totalmente el flujo disperso se pueden incorporar pantallas o blindajes electromagnéticos. La aplicación de transformadores toroidales en etapas de alimentación y potencia es ideal porque permiten obtener una buena relación señal/ruido.
7. Dimensiones flexibles: Este tipo de transformadores permiten, como ningún otro, conseguir perfiles bajos y ajustarse a las dimensiones exigidas para cada aplicación, ajustando los diámetros y las alturas de los núcleos magnéticos, debido a la facilidad de modificar las dimensiones de los mismos. Principalmente los transformadores toroidales pueden usarse para equipamiento de pequeña altura donde los transformadores convencionales no pueden.
8. Altas corrientes de avalancha o corrientes *inrush*: Los transformadores toroidales suelen tener mayores corrientes avalancha o corrientes *inrush* que los transformadores convencionales. Esto es debido a la ausencia de entrehierros físicos en el núcleo magnético toroidal y a un alto flujo remanente.

2.12 Ventajas y desventajas de los transformadores toroidales

Las ventajas más importantes de los transformadores toroidales son [Petra 2007], [Plitron 2005] y [Torivac 2006]:

1. Alta eficiencia.
2. No tiene entrehierros físicos.

3. Tiene un núcleo magnético hecho con lámina continúa de grano orientado de acero al silicio.
4. Mejores propiedades magnéticas: pequeñas pérdidas y pequeñas corrientes de magnetización.
5. Altos valores de densidad de flujo B .
6. Altos valores de flujo magnético Φ .
7. Bajo flujo de dispersión.
8. Peso y tamaño reducidos.
9. Facilidad de montaje.
10. Bajo ruido acústico.
11. Buena regulación.
12. Temperatura de operación baja.

Las desventajas más importantes de los transformadores toroidales son:

1. Su construcción es difícil por la necesidad de devanar los arrollamientos directamente en el núcleo. Se necesitan máquinas embobinadoras especiales.
2. Limitados a tamaños pequeños.
3. Altas corrientes de avalancha o corrientes *inrush*.
4. Aún no se ha podido construir en un solo núcleo toroidal un transformador trifásico, solamente monofásico. Pero actualmente se construyen transformadores trifásicos usando por separado tres transformadores toroidales monofásicos.

2.13 Aplicaciones de los transformadores toroidales

Las aplicaciones del transformador toroidal son muy diversas y entre ellas destacan las siguientes [Keenocean 2007], [Petra 2007] y [Torivac 2006]:

- Electrónica de consumo.
- Electrónica de potencia.
- Electromedicina.

- Convertidores.
- Sistemas de alimentación.
- Sistemas de audio.
- Seguridad.
- Computadoras.
- Controles industriales.
- Telecomunicaciones.
- Iluminación de baja tensión.
- Cualquier equipo que requiera un rendimiento óptimo como aviación y espacio.

Capítulo 3

Entrehierro virtual

3.1 El entrehierro virtual

Por naturaleza los materiales magnéticos tienen altos valores de permeabilidad, pero cuando un material magnético se satura sufre un cambio en el valor de permeabilidad. La saturación provoca que el material magnético tenga una permeabilidad comparada a la del aire. Este fenómeno físico del cambio en la permeabilidad por medio de saturación que se da en los materiales magnéticos es aprovechado para crear el entrehierro virtual.

La idea del entrehierro virtual fue propuesta por [Molcrette et al. 1998]. Se trata de hacer pasar corrientes de CD a través de unos agujeros hechos en un núcleo magnético para producir una región de saturación y por lo tanto un cambio en el valor de la permeabilidad en la zona del núcleo donde están los agujeros.

Se puede decir que un entrehierro virtual es un espacio de aire virtual creado por medio de saturación en un núcleo.

Un entrehierro virtual se crea cuando se hacen agujeros dentro de un núcleo, a través de los agujeros se introduce un devanado de N_a vueltas por el cual se hace circular una corriente I_a de CD. La corriente I_a a través de los devanados de los agujeros produce flujos magnéticos rotacionales Φ_a alrededor de cada agujero, los cuales producen una región de saturación y un cambio en el valor de la permeabilidad en la zona donde se encuentran localizados. De esta manera se crea un entrehierro virtual.

Para crear un entrehierro virtual, se empieza por hacer dos pares de agujeros en alguna zona del núcleo magnético con sección transversal $A=(w)(HT)$ donde los agujeros van localizados a ciertas distancias $w_1=w_3=(w_2/2)$ [Molcrette et al. 1998]. En la Figura 3.1 se muestran las distancias para dos pares de agujeros dentro de una zona de un núcleo.

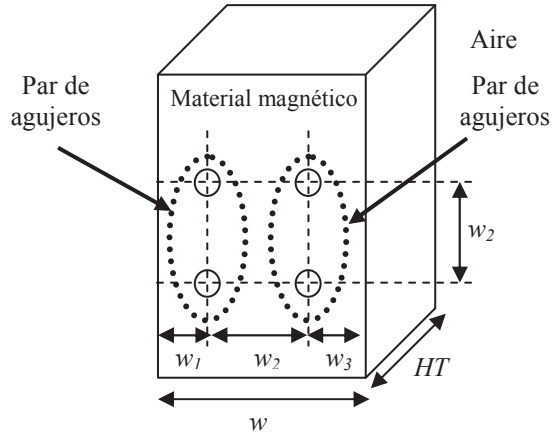


Figura 3.1 Distancias para dos pares de agujeros

Después se introduce en cada uno de los pares de agujeros un devanado de N_a vueltas por el cual se hace circular una corriente I_a de CD creando alrededor de cada agujero un flujo magnético Φ_a que produce en la zona de los agujeros una región de saturación o un entrehierro virtual. Los dos pares de agujeros tienen la misma fuerza magnetomotriz $\mathcal{F}_a$ pero en sentido contrario, Figura 3.2.

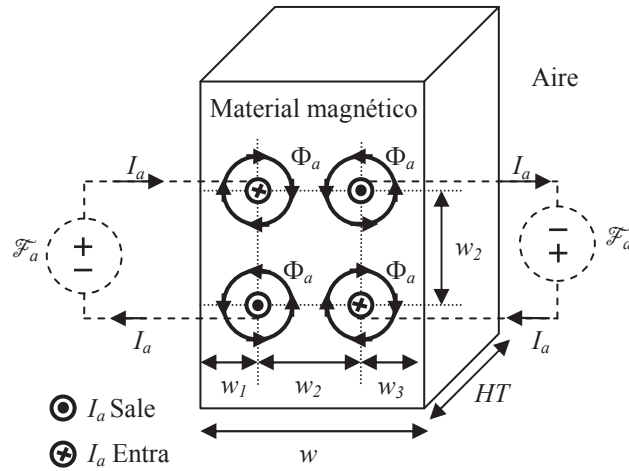


Figura 3.2 Dirección de las corrientes de CD en los agujeros

Si se usara un solo par de agujeros se crearía un flujo rotacional Φ_a adicional de CD en el núcleo, para contrarrestar este flujo se coloca otro par de agujeros con su respectivo devanado de N_a vueltas, por el cual también se hace circular la misma corriente I_a pero en sentido contrario al primer par para crear un contra efecto [Molcrette et al. 1998]. Esta es la razón de usar dos pares de agujeros para crear el entrehierro virtual.

En la Figura 3.3 se puede ver la creación completa de un entrehierro virtual. Se ve que existe una distribución rotacional de flujo Φ_a en la zona de los agujeros que lleva a crear una región saturada lo que provoca un cambio en el valor de la permeabilidad promedio en la zona de los agujeros, la región de saturación se produce alrededor y en las cercanías de los agujeros. Al crear la región de saturación en la zona de los agujeros se crea un entrehierro virtual.

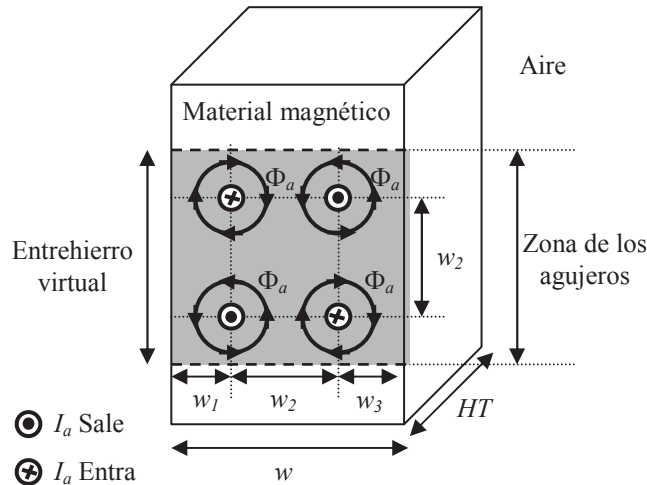


Figura 3.3 Entrehierro virtual

En este trabajo solo se trabaja con corrientes de CD las cuales producen campos magnéticos estáticos, que no varían en el tiempo, pero se debe mencionar que existe una óptima manera de colocar cada uno de los devanados de los agujeros de N_a vueltas cuando en el núcleo circula un flujo magnético de CA Φ_{ca} como se muestra en la Figura 3.4. Si los devanados se colocan en forma perpendicular (líneas punteadas) al flujo Φ_{ca} se inducirá un voltaje en los devanados, lo cual no es conveniente, ya que se inducirían corrientes de CA en los devanados de los agujeros. Si los devanados se colocan en forma paralela (líneas gruesas) al flujo Φ_{ca} no se inducirá ningún voltaje en dichos devanados. Ya que el flujo Φ_{ca} no corta vueltas del devanado de los agujeros.

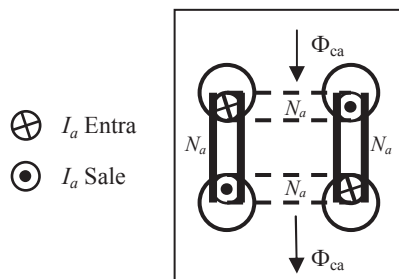


Figura 3.4 Colocación de devanados de los agujeros

La mejor manera de colocar los devanados de los agujeros es en forma paralela al flujo magnético que circula por la estructura del núcleo. En este trabajo se colocaran siempre los devanados de los agujeros en paralelo al flujo que circula por el núcleo aun cuando no se trabaje con flujos de CA.

3.2 Funcionamiento del entrehierro virtual

Para explicar el funcionamiento del entrehierro virtual se usa un núcleo magnético tipo núcleo sin entrehierros físicos el cual tiene una curva de magnetización que tiene dos líneas: una representa la región no saturada y la otra la región saturada. Por ejemplo el punto P_1 está en la región no saturada de la curva y el punto P_2 está en la región saturada de la curva de magnetización. En la Figura 3.5 se muestra la curva de magnetización simplificada.

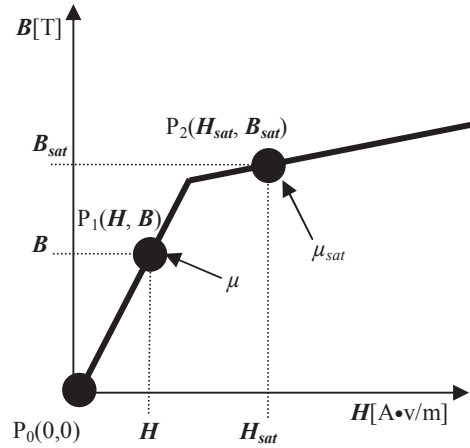


Figura 3.5 Curva de magnetización simplificada

En una de las columnas (la izquierda) del núcleo se enrolla un devanado principal de N_p vueltas y en uno de los yugos (el superior) se hacen dos pares de agujeros, Figura 3.6.

Después se introduce un devanado de N_a vueltas a través de cada uno de los dos pares de agujeros. Los devanados de los agujeros son colocados en forma paralela al flujo magnético que circulará por el núcleo, la dirección del flujo magnético se puede anticipar aplicando la regla de la mano derecha al devanado principal. A través de cada uno de los devanados de los agujeros se inyecta una corriente I_a de CD cuya dirección se puede ver en la Figura 3.7.

Alrededor de cada uno de los agujeros se produce un flujo magnético rotacional Φ_a , estos flujos producen una región de saturación o un entrehierro virtual en la zona de los agujeros. La

zona de los agujeros es muy pequeña en tamaño comparada con la longitud total del núcleo, por lo que los flujos Φ_a al tener zonas muy pequeñas para circular saturan fácilmente dichas zonas.

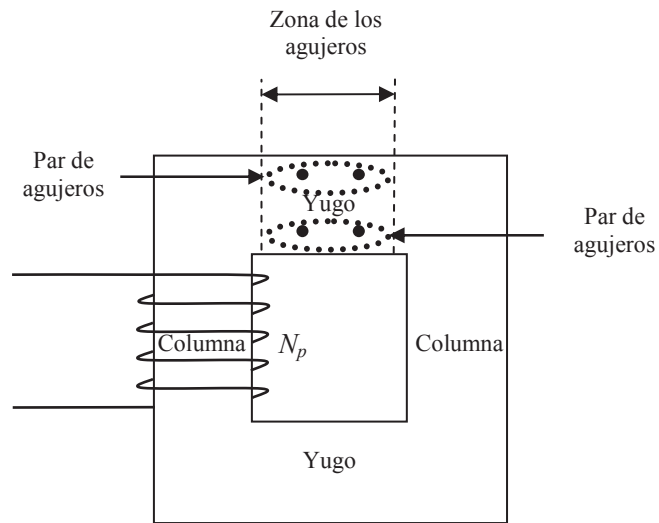


Figura 3.6 Núcleo magnético

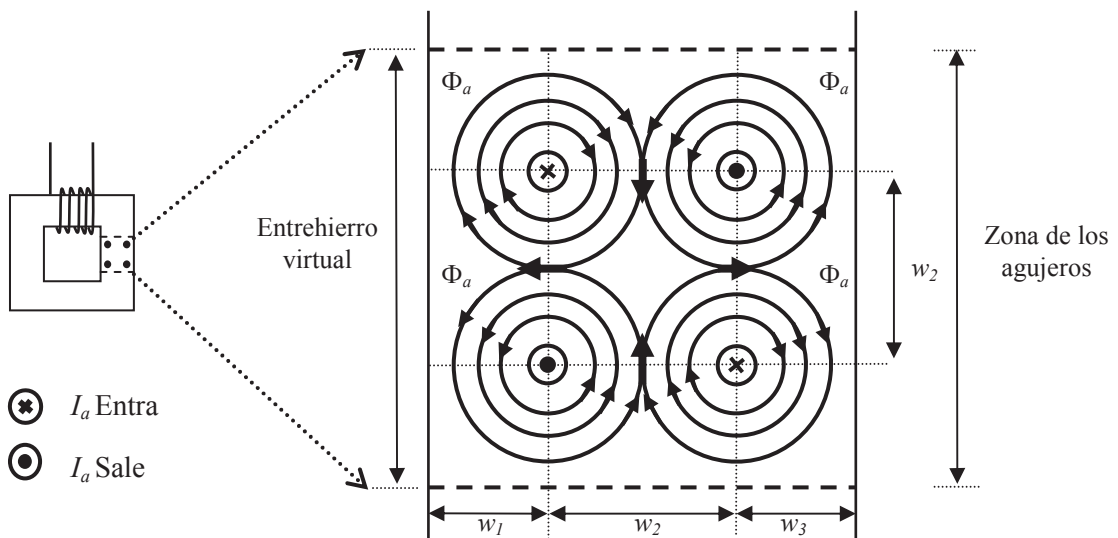


Figura 3.7 Dirección de I_a en devanados de los agujeros del modelo de explicación

En las zonas donde los flujos Φ_a de cada agujero se suman, la saturación es más alta que las otras zonas donde simplemente se distribuye cada uno de los flujos Φ_a . Además por la distribución rotacional de los flujos Φ_a , existe una alta saturación alrededor de cada uno de los agujeros. En la Figura 3.8 se pueden ver las zonas saturadas por los flujos Φ_a .

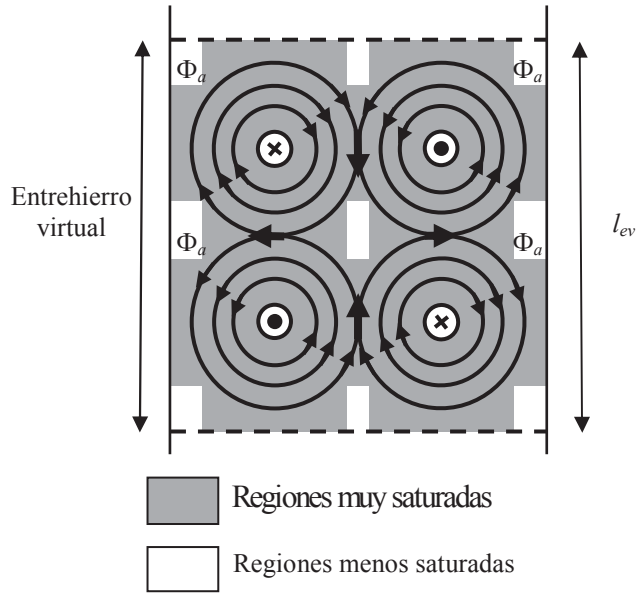


Figura 3.8 Flujos magnéticos rotacionales en zona de agujeros

En la Figura 3.8 se puede ver que el tamaño del entrehierro virtual l_{ev} dependerá de la intensidad de I_a en los devanados de los agujeros. Al aumentar la intensidad de I_a el flujo Φ_a es más intenso y alcanza algunas de las zonas más alejadas alrededor de cada uno de los agujeros de tal manera que l_{ev} crece. Si la intensidad de I_a disminuye entonces el flujo Φ_a es menos intenso y solamente alcanza a saturar las zonas más cercanas a los agujeros.

En la región de saturación aparece una intensidad de campo H_{sat} y una densidad de flujo B_{sat} (punto P₂), sus valores dependen de la intensidad de I_a . Los valores de H_{sat} y B_{sat} producirán un cierto valor de permeabilidad promedio μ_{sat} (punto P₂) en la zona de los agujeros que dará lugar a la creación de un entrehierro virtual. El valor de μ_{sat} depende de los valores de H_{sat} y B_{sat} , si éstos valores son altos, el valor de μ_{sat} será muy pequeño y muy cercano a μ_0 con lo que se formará un entrehierro virtual en la zona de los agujeros. Si los valores de H_{sat} y B_{sat} no son tan altos, el valor de μ_{sat} no será tan pequeño y por lo tanto no será tan cercano a μ_0 . El valor de μ_{sat} en el entrehierro virtual se puede calcular con los valores máximos de H_{sat} y B_{sat} producidos en el entrehierro virtual por la intensidad de I_a .

$$\mu_{sat} = \frac{B_{sat}}{H_{sat}} \quad \text{H/m} \quad (3.1)$$

La relación constitutiva entre H_{sat} y B_{sat} en el entrehierro virtual se obtiene de (3.1).

$$B_{sat} = (\mu_{sat})(H_{sat}) \quad \text{T} \quad (3.2)$$

La idea principal del entrehierro virtual es que $\mu_{sat} \rightarrow \mu_0$ para que verdaderamente exista un espacio de aire virtual en la zona de los agujeros.

Prácticamente la creación del entrehierro virtual depende de la intensidad de I_a de CD. Cuando la intensidad de I_a es pequeña aparecerán valores de $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ (punto P₁) en el entrehierro virtual que podrían ser menores a los valores de $\mathbf{H}_{sat}$ y $\mathbf{B}_{sat}$, pero si la intensidad de I_a es alta entonces si se producirán valores altos de $\mathbf{H}_{sat}$ y $\mathbf{B}_{sat}$. Por lo general se requiere que la intensidad de I_a sea lo más alta posible para poder tener altos valores de $\mathbf{H}_{sat}$ y $\mathbf{B}_{sat}$ en el entrehierro virtual para que se cumpla que $\mu_{sat} \rightarrow \mu_0$.

Después se necesita magnetizar el núcleo donde se encuentra el entrehierro virtual. Para magnetizar el núcleo se introduce una cierta intensidad de I_p de magnetización de CD en el devanado principal de N_p vueltas, con lo cual se producirá una intensidad de campo $\mathbf{H}$ (punto P₁) en el núcleo. El valor de $\mathbf{H}$ en la longitud media geométrica del núcleo l se calcula mediante la Ley de Ampere.

$$\mathcal{F}_p = \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = (N_p)(I_p) \quad \text{A} \cdot \text{v} \quad (3.3)$$

El valor de $\mathbf{H}$ en la longitud media geométrica l del núcleo se obtiene de (3.3).

$$\mathbf{H} = \frac{(N_p)(I_p)}{l} \quad \text{A} \cdot \text{v/m} \quad (3.4)$$

En la Figura 3.9 se muestra la trayectoria de $\mathbf{H}$ en el núcleo y en la longitud media geométrica l . La dirección de $\mathbf{H}$ cumple la regla de la mano derecha.

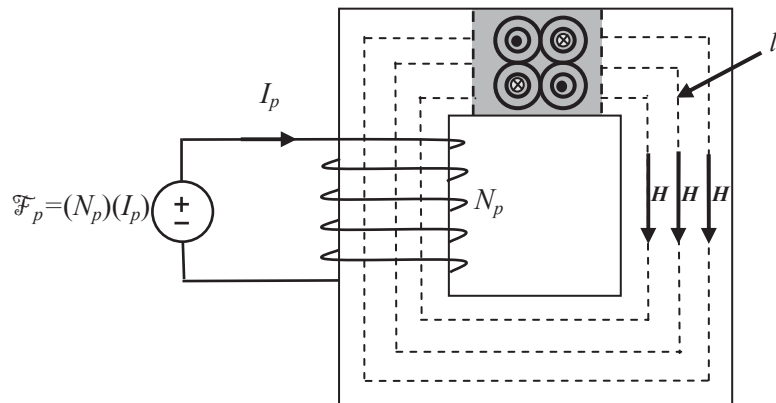


Figura 3.9 Intensidad de campo magnético en el núcleo

Al producir una intensidad de campo $\mathbf{H}$ se producirá también una densidad de flujo $\mathbf{B}$ en el núcleo. La relación constitutiva dentro del núcleo entre $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ en P_1 está dada por:

$$\mathbf{B} = (\mu)(\mathbf{H}) \quad \text{T} \quad (3.5)$$

El valor de la permeabilidad μ del núcleo se obtiene de (3.5). El valor de μ corresponde al punto P_1 de la curva de magnetización, Figura 3.5.

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad \text{H/m} \quad (3.6)$$

De igual manera existe una permeabilidad incremental μ_i en el núcleo del punto P_0 al punto P_1 se define básicamente como la pendiente del punto P_0 al punto P_1 , Figura 3.10:

$$\mu_i = \frac{\Delta \mathbf{B}}{\Delta \mathbf{H}} = \frac{\mathbf{B} - 0}{\mathbf{H} - 0} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad \text{H/m} \quad (3.7)$$

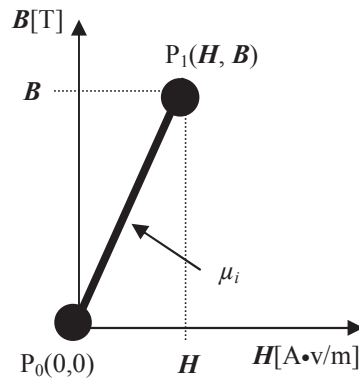


Figura 3.10 Permeabilidad incremental

Se puede ver en la Figura 3.9 que los valores de $\mathbf{H}_{sat}$ y de $\mathbf{B}_{sat}$ dentro del entrehierro virtual también dependerán de la intensidad de I_p . Los valores de $\mathbf{H}$ y de $\mathbf{B}$ (punto P_1) producidos por la intensidad de I_p en el núcleo contribuyen en la saturación de la zona de los agujeros. En otras palabras contribuyen a aumentar o disminuir el valor de $\mathbf{H}_{sat}$ y de $\mathbf{B}_{sat}$ en la zona de los agujeros cuando el entrehierro virtual está activo. Cuando la intensidad de I_p es pequeña, los valores de $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ en todo el núcleo son pequeños y por lo tanto los valores de $\mathbf{H}_{sat}$ y $\mathbf{B}_{sat}$ no serán tan altos, por lo tanto se tiene una μ alta en el núcleo y una μ_{sat} no tan cercana a μ_0 en el entrehierro virtual. Y cuando la intensidad de I_p es alta, los valores de $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ son altos en todo

el núcleo, por lo tanto se tiene una μ pequeña en el núcleo, se tiene entonces que $H \rightarrow H_{sat}$ y $B \rightarrow B_{sat}$, lo que implica tener una permeabilidad $\mu_{sat} \rightarrow \mu_0$ (Punto P₂) en el entrehierro virtual.

También se puede ver que si la intensidad de I_p es muy alta se pueden producir valores altos de H_{sat} y B_{sat} en todo el núcleo, por lo tanto, el núcleo tendría una permeabilidad μ_{sat} . Esto quiere decir que si I_a produce μ_{sat} (Punto P₂) en la zona de los agujeros e I_p también produce μ_{sat} (Punto P₂) en el núcleo entonces el efecto del entrehierro virtual desaparece ya que todo el núcleo tendría la misma permeabilidad $\mu_{sat} \rightarrow \mu_0$.

Al tener una densidad de flujo B también se tiene un flujo magnético Φ en el núcleo. El valor del flujo total Φ en el núcleo está dado por la siguiente relación:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad \text{Wb} \quad (3.8)$$

En la Figura 3.11 se muestra la trayectoria del flujo Φ en el núcleo magnético.

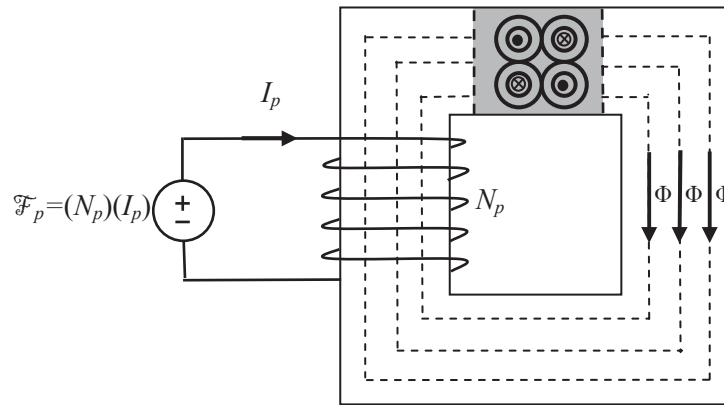


Figura 3.11 Flujo magnético en el núcleo

El flujo Φ circula principalmente por la estructura del núcleo, ya que éste tiene una permeabilidad μ alta. El flujo magnético Φ no pasa a través (por dentro o por el interior) de los agujeros solamente los rodea, ya que los agujeros están llenos de aire y cobre, y por lo tanto su permeabilidad es pequeña (permeabilidad del aire y del cobre $= \mu_0$).

Cuando el entrehierro virtual se activa (se produce la región de saturación) y se magnetiza el núcleo, se produce una interacción entre el flujo Φ y los flujos Φ_a en la zona de los agujeros. El flujo Φ se suma en algunas partes de la zona de los agujeros con los flujos Φ_a y después regresa por el núcleo. En las zonas donde se suman los flujos Φ_a y el flujo Φ existe un

cierto aumento de la densidad B_{sat} (punto P₂) lo cual provoca una mayor saturación y por lo tanto $\mu_{sat} \rightarrow \mu_0$ en la zona de los agujeros, creando así un entrehierro virtual en dicha zona. En la Figura 3.12 se muestra como el flujo Φ interacciona con los flujos Φ_a de cada agujero.

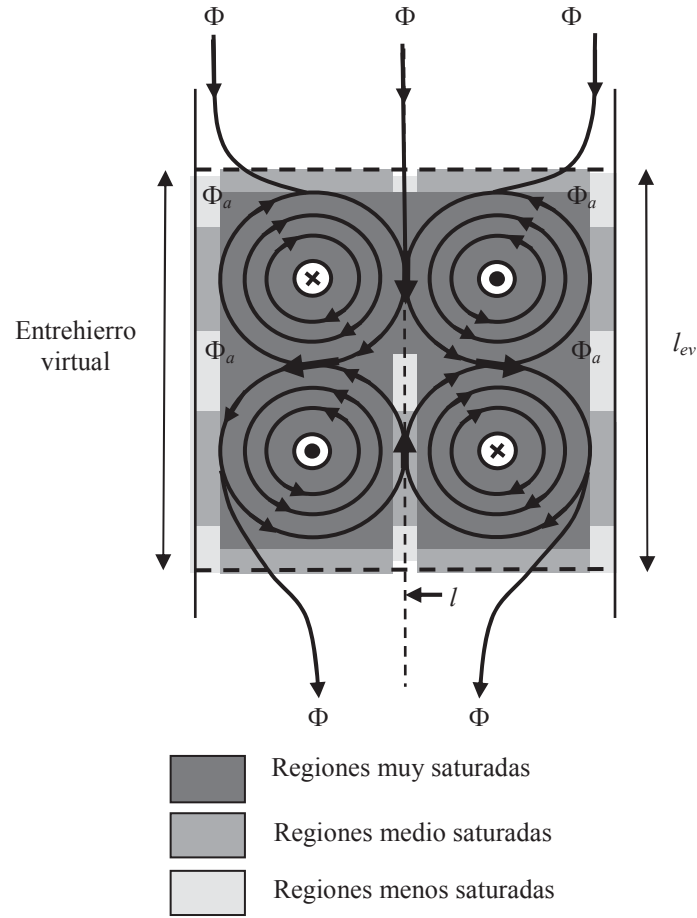


Figura 3.12 Interacción de todos los flujos magnéticos en zona de agujeros

De la Figura 3.12 se puede ver que la interacción entre el flujo Φ y Φ_a contribuye al aumento o disminución del tamaño del entrehierro virtual l_{ev} . Pero aún así el valor de l_{ev} depende principalmente de la intensidad de I_a .

Para explicar el comportamiento del flujo magnético Φ en el núcleo, fuera del entrehierro virtual, se representa la zona de los agujeros donde se forma el entrehierro virtual como una reluctancia variable – saturable R_2 , Figura 3.13(a), la cual está en función de la fuerza magnetomotriz $\mathcal{F}_a$ de cada uno de los devanados de los agujeros y de la fuerza magnetomotriz $\mathcal{F}_p$ del devanado principal, Figura 3.13(b).

El núcleo fuera de la zona de los agujeros se representa con una reluctancia R_1 , Figura 3.13(a), en serie con la fuerza magnetomotriz $\mathcal{F}_p$ que representa al devanado principal, Figura 3.13(b). En la misma Figura 3.13(b) se muestra el circuito magnético reducido el cual representa el núcleo y la zona de los agujeros.

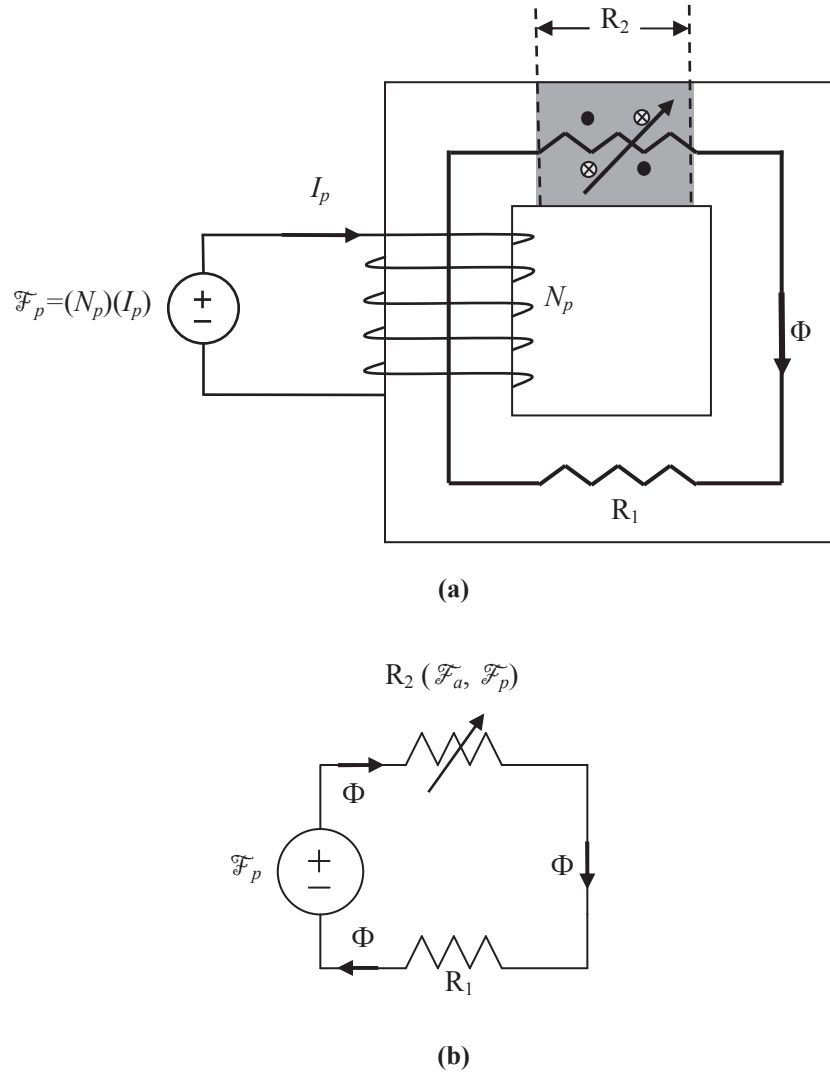


Figura 3.13 Circuito magnético

Las fuerzas magnetomotrices $\mathcal{F}_a$ de los devanados de los agujeros no fueron incluidas en el circuito magnético ya que ambas tienen las mismas N_a vueltas y la misma intensidad I_a pero en sentido contrario por lo que se anulan y la única fuerza magnetomotriz que permanece es $\mathcal{F}_p$. Debe tenerse en cuenta que las fuerzas magnetomotrices $\mathcal{F}_a$ no desaparecen ya que siguen provocando el entrehierro virtual en la zona de los agujeros.

Se puede observar que R_2 puede ser mucho más grande que R_1 porque la permeabilidad μ_{sat} del entrehierro virtual es mucho más pequeña que la permeabilidad μ del núcleo, quiere decir que $\mu_{sat} \rightarrow \mu_0$ y que la intensidad de I_a es alta. Del circuito magnético de la Figura 3.13(b) se obtiene el valor del flujo Φ :

$$\Phi = \frac{(N_p)(I_p)}{(R_1 + R_2)} \quad \text{Wb} \quad (3.9)$$

De (3.9) se observa que si R_2 es mayor que R_1 entonces el valor del flujo Φ disminuye en el núcleo, fuera del entrehierro virtual.

Al disminuir el flujo Φ también disminuye la densidad $\mathbf{B}$ fuera del entrehierro virtual activo, por lo que se produce una nueva densidad de flujo $\mathbf{B}_{ev}$, para una nueva intensidad de campo $\mathbf{H}_{ev}$, Figura 3.14. Este nuevo punto P_{ev} tiene una nueva permeabilidad μ_{ev} en el núcleo, fuera del entrehierro virtual y queda definida como:

$$\mu_{ev} = \frac{\mathbf{B}_{ev}}{\mathbf{H}_{ev}} \quad \text{H/m} \quad (3.10)$$

Al producirse un cambio de μ en el punto P_1 a una nueva μ_{ev} en el punto P_{ev} en el núcleo, fuera del entrehierro virtual, aparece también una nueva permeabilidad incremental μ_{iev} del punto P_0 al punto P_{ev} , y se define como la pendiente del punto P_0 al punto P_{ev} , Figura 3.14.

$$\mu_{iev} = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{\mathbf{B}_{ev} - 0}{\mathbf{H}_{ev} - 0} = \frac{\mathbf{B}_{ev}}{\mathbf{H}_{ev}} \quad \text{H/m} \quad (3.11)$$

Quiere decir que se puede modificar la permeabilidad en el núcleo, fuera del entrehierro virtual activo. El valor de μ_{ev} depende del valor de $\mathbf{H}_{sat}$ y de $\mathbf{B}_{sat}$ los cuales a su vez dependen de la intensidad I_a .

Además se produce un cambio de densidad de flujo magnético $\Delta \mathbf{B}$ del punto P_1 (donde el entrehierro virtual está inactivo) al nuevo punto P_{ev} (donde el entrehierro virtual está activo) y un cambio de intensidad de campo magnético $\Delta \mathbf{H}$ del punto P_1 al nuevo punto P_{ev} .

El cambio $\Delta \mathbf{B}$ representa la diferencia entre la densidad de flujo $\mathbf{B}$ (en el punto P_1) y la nueva densidad de flujo $\mathbf{B}_{ev}$ (en el nuevo punto P_{ev}) y el cambio $\Delta \mathbf{H}$ representa la diferencia entre la intensidad de campo $\mathbf{H}$ (en el punto P_1) y la nueva intensidad de campo $\mathbf{H}_{ev}$ (en el

nuevo punto P_{ev}). En la Figura 3.14 se observan los dos cambios que ocurren cuando el entrehierro virtual está activo dentro del núcleo.

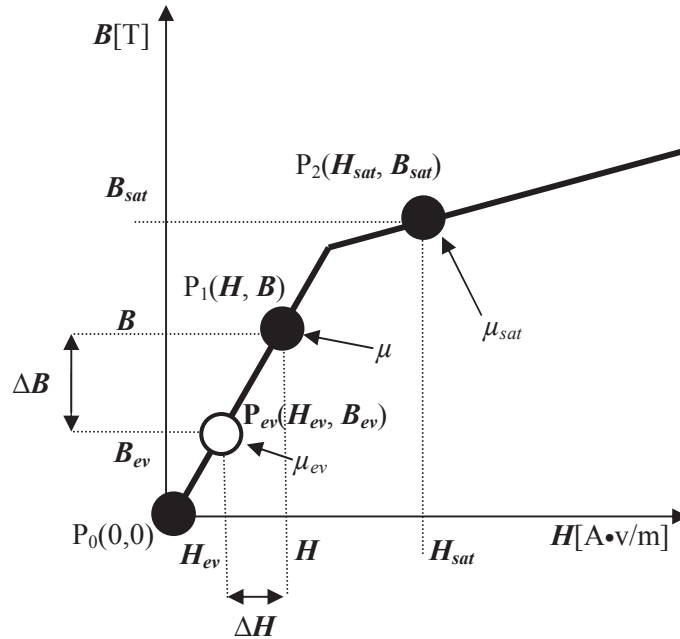


Figura 3.14 Efecto de entrehierro virtual en curva de magnetización

Ambos cambios dependen de la intensidad de I_a . El valor de los cambios aumenta si la intensidad de I_a es alta y disminuye si la intensidad de I_a es pequeña. Quiere decir que los valores de H_{ev} y de B_{ev} pueden ser controlados por los valores de H_{sat} y B_{sat} los cuales a su vez dependen de la intensidad de I_a .

Se llega a la conclusión de que el punto original (H, B) de la curva de magnetización ha sido desplazado a un nuevo punto (H_{ev}, B_{ev}) sobre la misma curva. Esto quiere decir que se puede controlar las características de magnetización de un núcleo por medio de un entrehierro virtual. Finalmente se concluye que un entrehierro virtual provoca cambios en el núcleo sobre:

- La intensidad de campo magnético H .
- La densidad de flujo magnético B .
- El flujo magnético Φ .
- La permeabilidad μ .

Se ha podido ver que el estudio de un entrehierro virtual puede ser complicado dada la distribución de los flujos magnéticos en la zona de los agujeros, lo cual produce la región de saturación no uniforme. Esto da paso al uso de un método numérico como el método del elemento finito para el estudio del entrehierro virtual en un núcleo magnético.

3.3 Comparación entre el entrehierro físico y el entrehierro virtual

La idea principal del entrehierro virtual es producir un núcleo magnético sin entrehierros físicos que funcione igual o mejor que un núcleo magnético con entrehierro físico. Las funciones principales de un entrehierro físico son:

- La curva de magnetización es lineal.
- El valor de la inductancia lo determina la longitud del entrehierro físico.

Esas dos características permiten construir inductores y transformadores con propiedades útiles, como son:

- Inductores con valor constante, pero de tamaño mucho más reducido que uno de núcleo puramente de aire, son mucho más baratos.
- Transformadores con pequeñas corrientes de avalancha o corrientes *inrush*.
- Se evita la saturación del núcleo en presencia de pequeños voltajes de CD súper impuestos a los voltajes de CA.

Todo esto se puede hacer mediante un entrehierro virtual. Con un entrehierro virtual se pueden aprovechar todas las ventajas de los núcleos magnéticos con y sin entrehierros físicos. Algunas comparaciones entre un entrehierro físico y un entrehierro virtual son:

1. El control de las características de saturación o de magnetización de un núcleo magnético con un entrehierro físico se hace mediante la variación de su longitud, mientras que un entrehierro virtual controla las características de saturación mediante la intensidad de CD aplicada a los devanados de los agujeros.
2. La longitud de un entrehierro físico es equivalente al tamaño del entrehierro virtual o de la región de saturación magnética. La longitud de un entrehierro físico puede

variarse físicamente mediante un proceso de corte, mientras que el tamaño del entrehierro virtual se controla mediante la intensidad de CD aplicada a los devanados de los agujeros.

3. Un núcleo magnético con un entrehierro físico necesita más corriente de magnetización que un núcleo magnético equipado con un entrehierro virtual.
4. El valor de la inductancia de un núcleo magnético con un entrehierro físico depende principalmente de la longitud del espacio de aire, mientras que la inductancia de un núcleo magnético con un entrehierro virtual depende del tamaño del entrehierro virtual el cual a su vez depende de la intensidad de CD aplicada a los devanados de los agujeros que puede controlarse en forma precisa.
5. En un entrehierro físico existen fuerzas magnéticas de atracción considerables que pueden producir deformaciones, pero en los núcleos magnéticos equipados con un entrehierro virtual dichas fuerzas magnéticas no existen.
6. Además un entrehierro virtual requiere de procesos de manufactura de menor costo que un entrehierro físico.

3.4 Entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal

La idea de introducir un entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal es por la construcción de este tipo de núcleos, los cuales no tienen entrehierros físicos, son construidos de lámina continua de acero al silicio de grano orientado y tienen mejores propiedades de magnetización. En la Figura 3.15 se muestra la geometría de un núcleo magnético toroidal de sección transversal cuadrada.

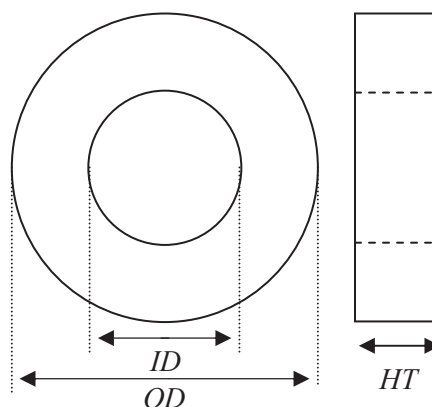


Figura 3.15 Núcleo magnético toroidal

Para empezar, se hacen dos pares de agujeros dentro del núcleo magnético toroidal. La idea de la colocación de dos pares de agujeros se muestra en la Figura 3.16.

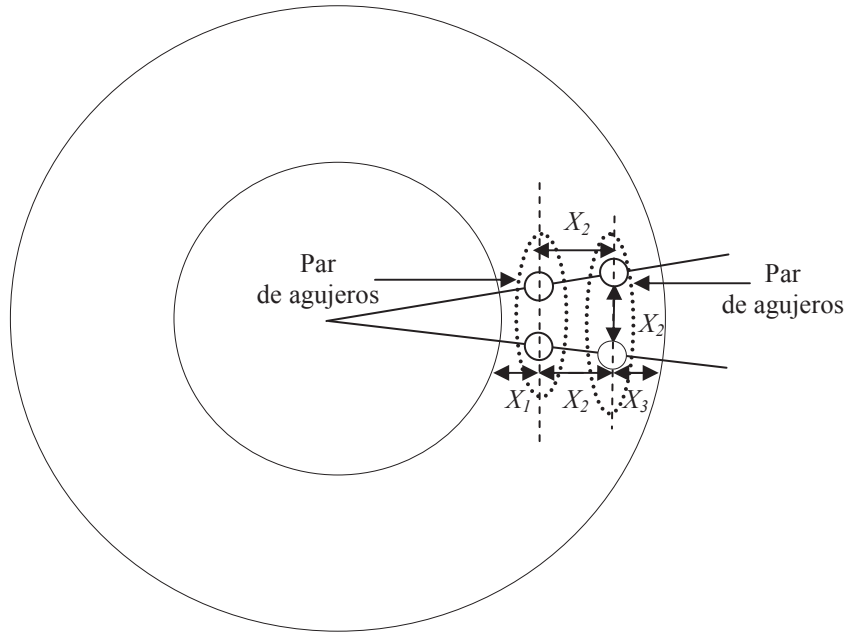


Figura 3.16 Colocación de dos pares de agujeros

Las distancias entre los dos pares de agujeros en el núcleo magnético toroidal son:

$$X_1 = X_3 \quad \text{m} \quad (3.12)$$

$$X_2 = 2(X_1) = 2(X_3) \quad \text{m} \quad (3.13)$$

Las distancias X_1 y X_3 se obtienen al dividir la distancia $(OD-ID)$ en 8 partes.

$$X_3 = \frac{OD-ID}{8} \quad \text{m} \quad (3.14)$$

Si se sustituye (3.12) en (3.13) y (3.14) se obtienen las distancias de los agujeros X_1 , X_2 y X_3 en función de los diámetros del núcleo magnético toroidal de la siguiente manera:

$$X_1 = X_3 = \frac{(OD-ID)}{8} = 0.125(OD-ID) \quad \text{m} \quad (3.15)$$

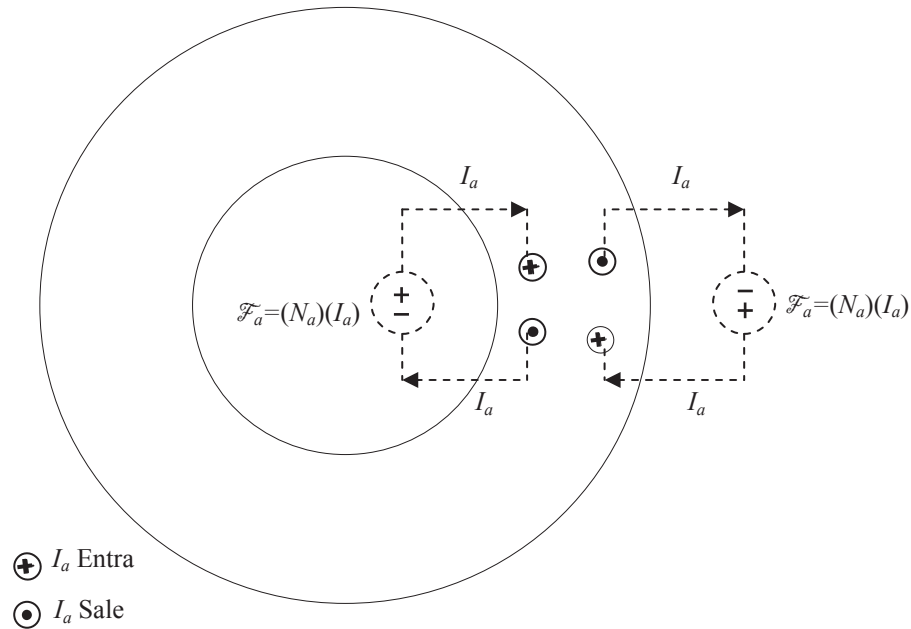
$$X_2 = 2(X_1) = 2(X_3) = \frac{2(OD-ID)}{8} = \frac{(OD-ID)}{4} = 0.25(OD-ID) \quad \text{m} \quad (3.16)$$

La distancia X_2 debe ser el doble de la distancia del centro de un agujero al radio interno o al radio externo del núcleo magnético toroidal.

Uno de los pares de agujeros lleva un devanado de N_a vueltas por el cual se hace circular una corriente I_a de CD, pero se necesita inyectar la misma corriente de CD en el otro par de agujeros de N_a vueltas para contrarrestar el flujo de CD del primer par de agujeros, Figura 3.17(a).

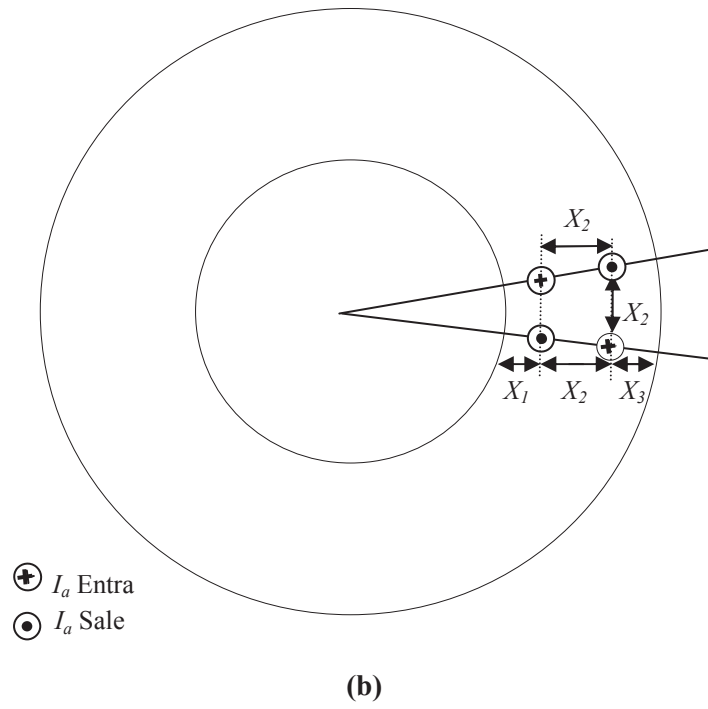
Se muestra en la Figura 3.17(b) la idea de la colocación de los dos pares de agujeros con sus respectivos sentidos de corriente de CD y con sus respectivas distancias siempre respetando las distancias entre dos pares de agujeros en función de los diámetros del toroide calculadas mediante (3.15) y (3.16).

Existe una manera de encontrar una posición adecuada en que se colocan los agujeros en un núcleo magnético toroidal. Para empezar se colocan los cuatro agujeros dentro del núcleo magnético toroidal en la posición indicada en la Figura 3.18. Se puede ver que hay dos agujeros de color blanco que representan el primer par de agujeros y existen otros dos agujeros de color negro que representan el otro par de agujeros. Se traza una línea del centro de un agujero negro al centro del otro agujero negro con esta línea se puede ver que se forma un triángulo que tiene dos lados iguales y uno diferente, denotado por las líneas más gruesas. El lado diferente del triángulo es el acotado por la línea trazada y es la distancia radial X_2 .



(a)

Dirección de las corrientes de CD en los devanados de los agujeros



Distancias de los dos pares de agujeros

Figura 3.17 Idea del entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal

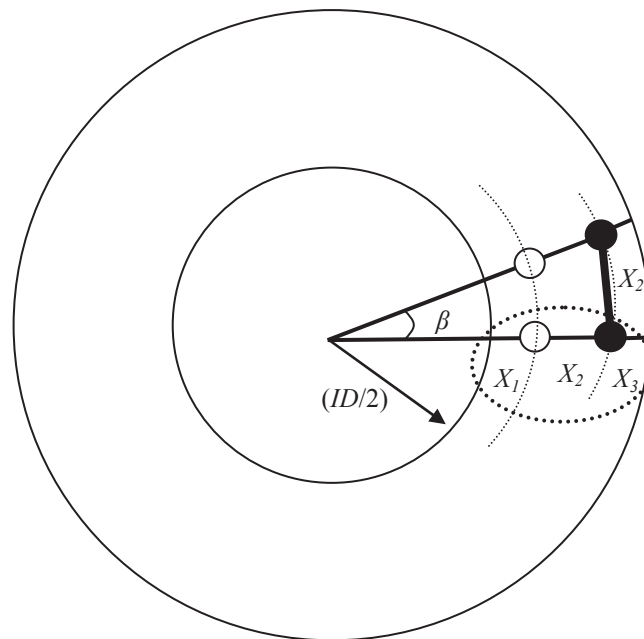


Figura 3.18 Cálculo de localización de los agujeros

De la Figura 3.18 se definen las respectivas variables, donde:

β =Ángulo en grados entre cada par de agujeros

$ID/2$ =Radio interno del toroide

X_1 =Distancia radial del centro de un agujero al radio interno del toroide

X_2 =Distancia radial entre los centros de dos agujeros

X_3 =Distancia radial del centro de un agujero al radio externo del toroide

Para la Figura 3.18 ya se conoce las distancias para un agujero de color blanco y uno negro encerrados en una gran círculo punteado. Para el círculo de color blanco su distancia es:

$$\frac{ID}{2} + X_1 \quad \text{m} \quad (3.17)$$

Y para el círculo de color negro la distancia es:

$$\frac{ID}{2} + X_1 + X_2 \quad \text{m} \quad (3.18)$$

Después se procede a calcular por medio de la ley de cosenos el ángulo β . En la Figura 3.19 vemos las acotaciones del triángulo que intervienen en el cálculo del valor del ángulo β .

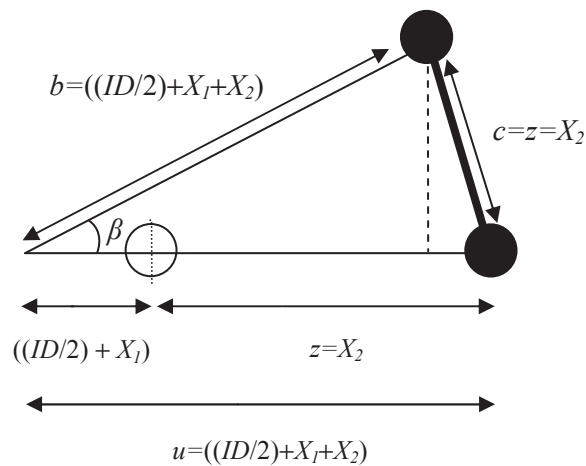


Figura 3.19 Distancias para calcular el ángulo β

Se aplica la ley de cosenos al triángulo de la Figura 3.19 se obtiene:

$$z^2 = u^2 + b^2 - (2)(u)(b)(\cos(\beta)) \quad (3.19)$$

Despejando el ángulo β de (3.19) se obtiene:

$$\beta = \cos \left(\frac{z^2 - u^2 - b^2}{(2)(u)(b)} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

Ya que se conoce el valor del ángulo β se calculará la posición de los agujeros para el caso que se muestra en la Figura 3.20 con el cual se trabajará de aquí en adelante.

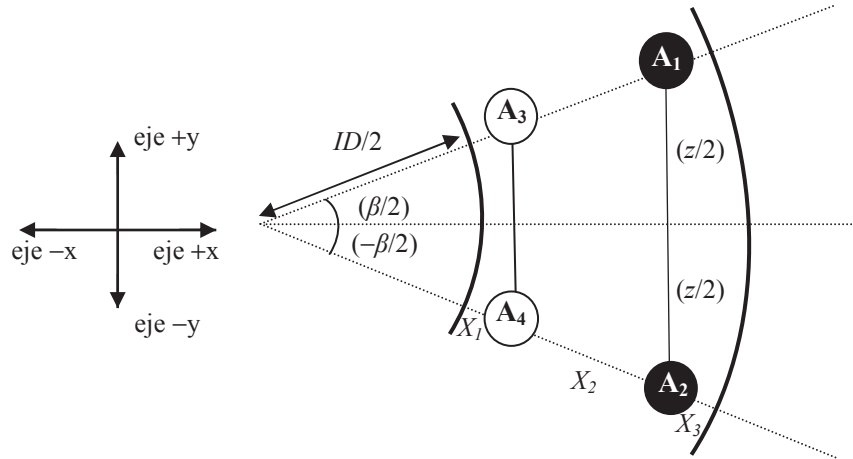


Figura 3.20 Idea de localización de agujeros

Se puede observar que existe simetría en los agujeros A₃ con A₄ y A₁ con A₂ respecto al eje x , quiere decir que basta con calcular las coordenadas de los agujeros A₁ y A₃ para conocer las coordenadas de A₂ y A₄ la única diferencia es que la coordenada del eje y para A₂ y A₄ tendrá el signo negativo.

Se empieza por encontrar las coordenadas del agujero de color negro A₁ encerrado en un círculo punteado que se muestra en la Figura 3.21. La distancia radial b de la Figura 3.21 se mantiene constante.

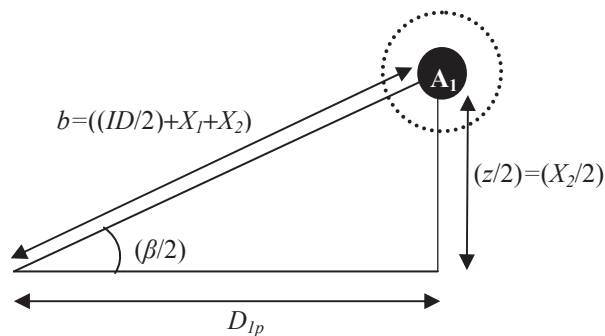


Figura 3.21 Localización del agujero A₁

Se puede ver que es un triángulo rectángulo y que además se conoce de antemano el valor del ángulo $\beta/2$ por lo tanto basta con aplicar la función coseno para encontrar la distancia D_{lp} en el eje x para el agujero de color negro A_1 . Pero no es necesario calcular la distancia en el eje y $z/2$ porque el valor de z ya se conoce ($z=X_2$) para ese agujero A_1 y por lo tanto también se conoce el valor para el otro agujero negro A_2 que sería negativo $-z/2$. Aplicando solamente la función coseno al triángulo rectángulo de la Figura 3.21 se obtiene:

$$\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{D_{lp}}{b} \quad (3.21)$$

Se despeja D_{lp} de (3.21) y se obtiene:

$$D_{lp} = \left(\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) (b) \quad \text{m} \quad (3.22)$$

Además se sabe de antemano que:

$$\frac{z}{2} = \frac{X_2}{2} \quad \text{m} \quad (3.23)$$

Ahora se calcula las coordenadas (D_{2p} , Y_2) para el agujero de color blanco A_3 que se ve encerrado en un círculo punteado en la Figura 3.22 de la misma forma que se calculó para el agujero de color negro A_1 ya que se conoce el valor del ángulo $\beta/2$. Para A_1 el valor de la coordenada en el eje y si se conoce con anterioridad que es $z/2$ pero para A_3 el valor de la coordenada en el eje y no se conoce.

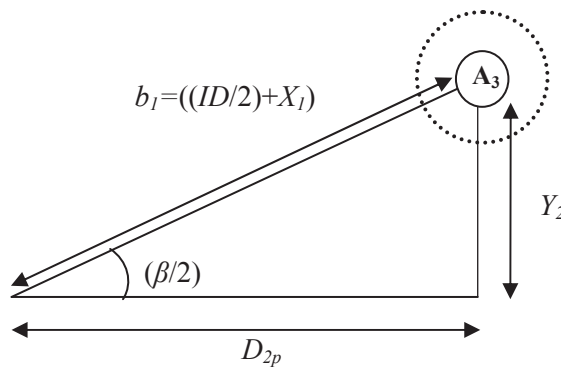


Figura 3.22 Localización de agujero A_3

Aplicando las funciones seno y coseno al triángulo rectángulo de la Figura 3.22 se obtiene:

$$\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{D_{2p}}{b_l} \quad (3.24)$$

$$\sen\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{Y_2}{b_l} \quad (3.25)$$

Después se despeja D_{2p} y Y_2 de (3.24) y (3.25), respectivamente y se obtiene:

$$D_{2p} = \left(\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)(b_l) \quad \text{m} \quad (3.26)$$

$$Y_2 = \left(\sen\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)(b_l) \quad \text{m} \quad (3.27)$$

El valor de la coordenada del eje y del otro agujero blanco A_4 será negativa $-Y_2$. Finalmente las coordenadas cartesianas de cada agujero $A(x, y)$ son las siguientes:

$$A_1 (D_{1p}, (z/2)) \quad \text{mm}$$

$$A_2 (D_{1p}, (-z/2)) \quad \text{mm}$$

$$A_3 (D_{2p}, Y_2) \quad \text{mm}$$

$$A_4 (D_{2p}, -Y_2) \quad \text{mm}$$

En la Figura 3.23 se ve la localización final de los agujeros. Con esto se cumple la idea del entrehierro virtual dentro del núcleo magnético toroidal mostrado en la Figura 3.17(b).

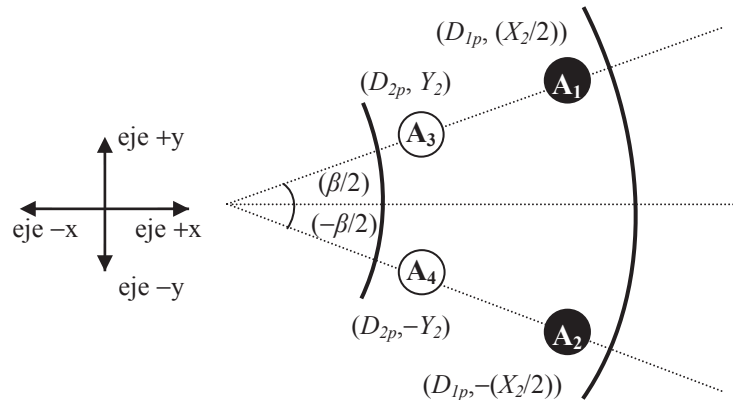


Figura 3.23 Localización final de agujeros

Por fin se tiene la localización final de los agujeros para formar el entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal.

3.5 Aplicaciones del entrehierro virtual

La mayor parte de las máquinas eléctricas están construidas con materiales ferromagnéticos a los cuales se les puede aplicar la tecnología del entrehierro virtual, esto abre muchas posibilidades para el diseño y construcción de nuevos equipos de conversión de energía. Algunas aplicaciones que se le han dado a la tecnología del entrehierro virtual son:

1. En transformadores: Se ha utilizado para limitar y controlar las corrientes de avalancha o corrientes *inrush* de un transformador monofásico tipo núcleo [Molcrette et al. 1998].
2. En la construcción de una nueva máquina de soldar: Se usó para empezar a construir un nuevo prototipo de máquina de soldar que usa potencia de CA para soldar con alta calidad típica de máquinas de soldar de CD [Napieralska y Lecointe 2002].

Capítulo 4

Controlando las características de la curva de magnetización de un núcleo toroidal

4.1 Simulaciones con el elemento finito

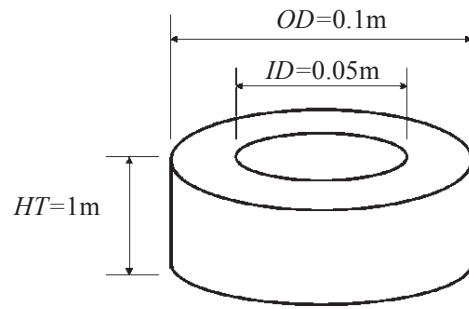
Se hicieron varias simulaciones con el elemento finito para comprobar el funcionamiento del entrehierro virtual dentro de un núcleo toroidal con características no lineales. Se realizó un análisis de elemento finito magnetostático, sin variación en el tiempo, no lineal en dos dimensiones para un núcleo magnético toroidal con un entrehierro virtual. Para un caso magnetostático las pérdidas tanto magnéticas como eléctricas quedan fuera del análisis. Sin embargo, los resultados obtenidos son confiables cuando se está interesado en el estudio del comportamiento magnético. Al tratarse de un caso magnetostático las corrientes aplicadas a todos los devanados del modelo son de CD.

Todas las simulaciones de elemento finito fueron realizadas con el programa comercial ANSYS.

4.2 Características del modelo

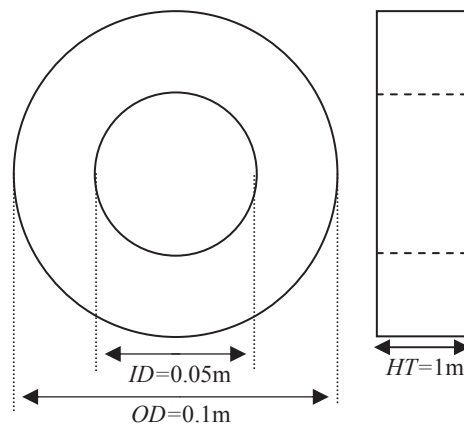
Se usó como modelo un núcleo magnético toroidal de sección transversal cuadrada. Los núcleos magnéticos toroidales no tienen entrehierros físicos o espacios de aire en su construcción por lo cual son ideales para introducir en ellos un entrehierro virtual.

Se muestra en la Figura 4.1 la geometría en tres y dos dimensiones del núcleo magnético toroidal de sección transversal cuadrada. Para realizar las simulaciones de elemento finito se usó la geometría en dos dimensiones del núcleo magnético toroidal, Figura 4.1(b). La causa de usar una geometría en dos dimensiones es porque el tiempo de cómputo se reduce considerablemente.



(a)

En tres dimensiones



(b)

En dos dimensiones

Figura 4.1 Geometría del núcleo magnético toroidal del modelo

Se consideró que la lámina continua que forma el núcleo magnético toroidal está perfectamente apretada, lo que quiere decir que el núcleo no tiene entrehierros físicos, por lo que el factor de apilamiento se considera como $k=1$. Es por esta razón que el núcleo magnético toroidal se modeló como un núcleo entero, Figura 4.1, sin tener que modelar cada una de las vueltas de la lámina continua que forma el núcleo toroidal. También es importante aclarar que en el programa ANSYS el valor de la altura del núcleo magnético toroidal es $HT=1\text{m}$ porque el análisis y el modelo son en dos dimensiones. Otra cosa que se debe aclarar es que se está tomando en cuenta que todos los devanados del modelo tienen una sola vuelta

($N=N_p=N_a=1$), representada por anillos. Esta es una representación adecuada de un devanado. Los valores de inductancia simplemente se multiplican por N^2 .

Para los cálculos posteriores se necesita el valor del área de sección transversal A del núcleo toroidal. El valor de A se calcula como:

$$A = \left(\frac{OD - ID}{2} \right) (HT) (k) \quad \text{m}^2 \quad (4.1)$$

Sustituyendo $OD=0.1\text{m}$, $ID=0.05\text{m}$, $HT=1$ y $k=1$ en (4.1) se obtiene el valor del área de sección transversal A para el núcleo toroidal de la Figura 4.1.

$$A = 0.025 \quad \text{m}^2 \quad (4.2)$$

El núcleo toroidal del modelo está hecho de acero al silicio de grano orientado M3, que es un material ferromagnético, por lo tanto tiene su curva de magnetización. Los datos de la curva de magnetización del material ferromagnético fueron escogidos de la biblioteca de materiales de ANSYS.

En la Figura 4.2 se muestran algunas vistas de la curva de magnetización del acero al silicio de grano orientado M3.

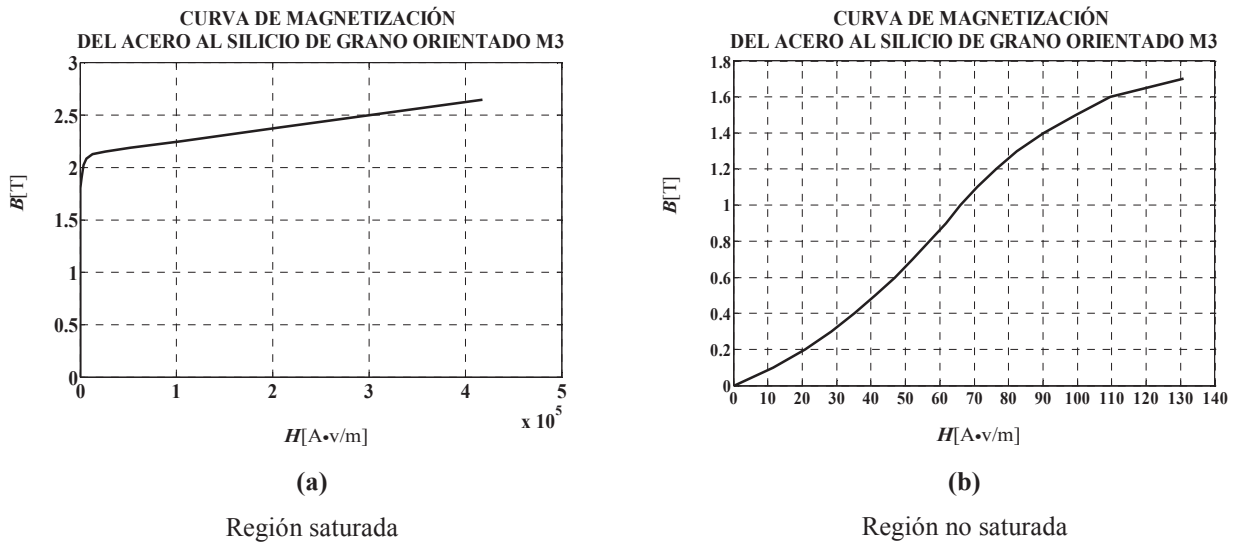


Figura 4.2 Vistas de las diferentes regiones de la curva de magnetización del modelo

En la Tabla 4.1 se muestran los 28 datos de la curva de magnetización para el acero al silicio de grano orientado M3.

Tabla 4.1 Datos de la curva de magnetización del núcleo magnético del modelo

$H[A\bullet v/m]$	$B[T]$	$H[A\bullet v/m]$	$B[T]$
0	0	90.16	1.4
11.53	0.1	99.55	1.5
20.85	0.2	109.58	1.6
28.41	0.3	130.91	1.7
35.25	0.4	324.77	1.8
41.38	0.5	1358	1.9
46.95	0.6	3581	2.02
52.12	0.7	6525	2.08
57.06	0.8	13052	2.125
61.83	0.9	26104	2.15
66.05	1	52208	2.183
71.03	1.1	104416	2.249
76.4	1.2	208832	2.38
82.44	1.3	417664	2.643

Los puntos sombreados dentro de la Tabla 4.1 son los puntos situados en la región saturada de la curva de magnetización. Los puntos para $B=1.8T$ y $B=1.9T$ son los puntos situados cerca y en la rodilla de la curva. El punto a partir del cual el material se satura es $B=1.7T$, este punto también está cerca de la rodilla de la curva y divide la región no saturada de la región saturada. Los puntos no sombreados de la Tabla 4.1 representan todos los puntos situados en la región no saturada de la curva de magnetización.

Después de darle la característica magnética de la curva de magnetización al núcleo toroidal se procedió a realizar en el núcleo los cuatro agujeros que formarán el entrehierro virtual. Se tomó la geometría de la Figura 3.17(b) para colocar los cuatro agujeros dentro del núcleo magnético toroidal. La posición de los cuatro agujeros se empezó por el cálculo de las distancias a la que debe ir un solo par de agujeros. Sustituyendo $OD=0.1m$ e $ID=0.05m$ en (3.15) y (3.16) se obtienen las distancias de los agujeros en función de los diámetros del núcleo toroidal:

$$X_1 = X_3 = 6.25 \times 10^{-3} \quad m \quad (4.3)$$

$$X_2 = 0.0125 \quad m \quad (4.4)$$

Después se calculó el ángulo β entre los agujeros usando (3.20).

$$\beta = 16.42^\circ \quad (4.5)$$

Por lo tanto el valor de $\beta/2$ es de:

$$\frac{\beta}{2} = 8.21^\circ \quad (4.6)$$

Teniendo el valor de $\beta/2$ se calcularon las coordenadas para los cuatro agujeros por medio de (3.22), (3.23), (3.26) y (3.27). Finalmente las coordenadas cartesianas $A(x, y)$ de cada agujero son las siguientes:

A_1 (43.3mm, 6.25mm)

A_2 (43.3mm, -6.25mm)

A_3 (30.9mm, 4.5mm)

A_4 (30.9mm, -4.5mm)

En la Figura 4.3 se muestran las coordenadas cartesianas de cada agujero usadas en el modelo y en la Figura 4.4 se muestra la posición final de los agujeros dentro del núcleo magnético toroidal.

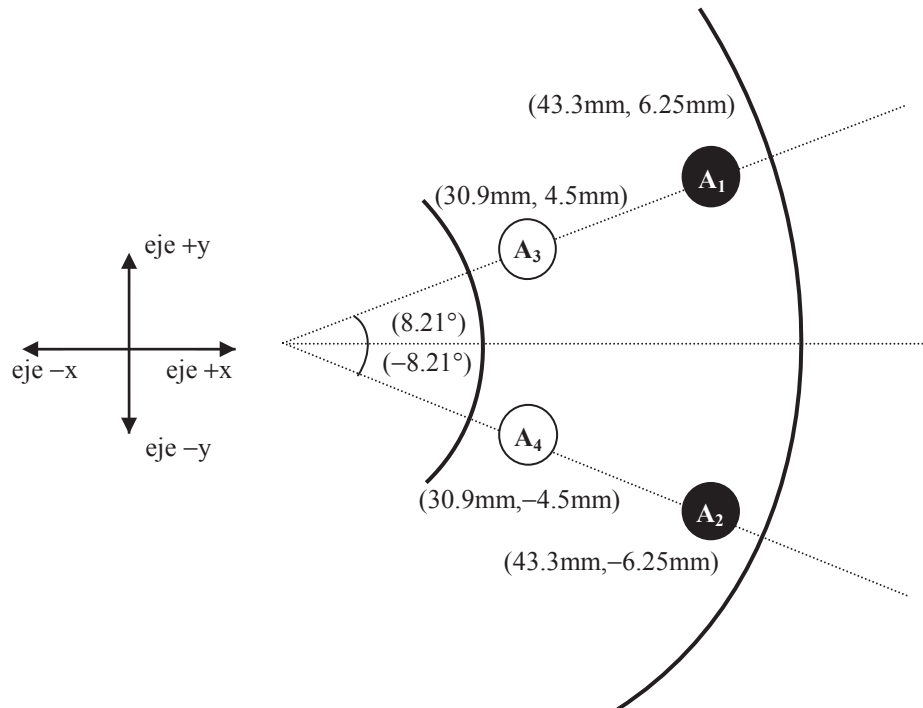


Figura 4.3 Localización de los cuatro agujeros en el modelo

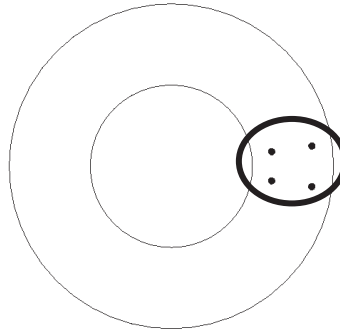


Figura 4.4 Colocación final de agujeros en el modelo

Los cuatro agujeros son iguales con un radio de $R=1\text{mm}$. Se está considerando que cada uno de los agujeros tiene una sola vuelta cuyo radio también es R . En otras palabras, el alambre del devanado ocupa todo el espacio de cada agujero. La Figura 4.5 muestra la geometría para los cuatro agujeros.

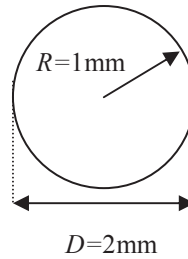


Figura 4.5 Geometría para los cuatro agujeros del modelo

Ya que se tienen colocados los cuatro agujeros con su respectivo devanado en el núcleo se procede a colocar el devanado principal que cubrirá los 360° del mismo. El devanado principal se modela por medio de dos anillos delgados con un espesor ξ . Cada uno de los anillos tiene un espesor $\xi=2.5\text{mm}$, uno de los anillos forma la parte interna y el otro la parte externa del devanado principal como se muestra en la Figura 4.6.

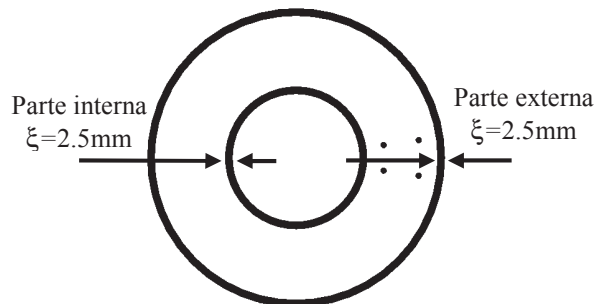


Figura 4.6 Devanado principal del modelo

La realidad es que el método de elementos finitos necesita tener un espacio cerrado. Es por esto que todo el modelo (el núcleo, el devanado principal y los devanados de los agujeros), se encerró en un círculo concéntrico de aire con un radio $R_a=0.1\text{m}$ como se muestra en la Figura 4.7. Este círculo de aire sirve para poner en su línea exterior una frontera de Dirichlet. La frontera se pone una a una distancia suficiente como para que no se distorsione el campo magnético en la región que nos interesa.

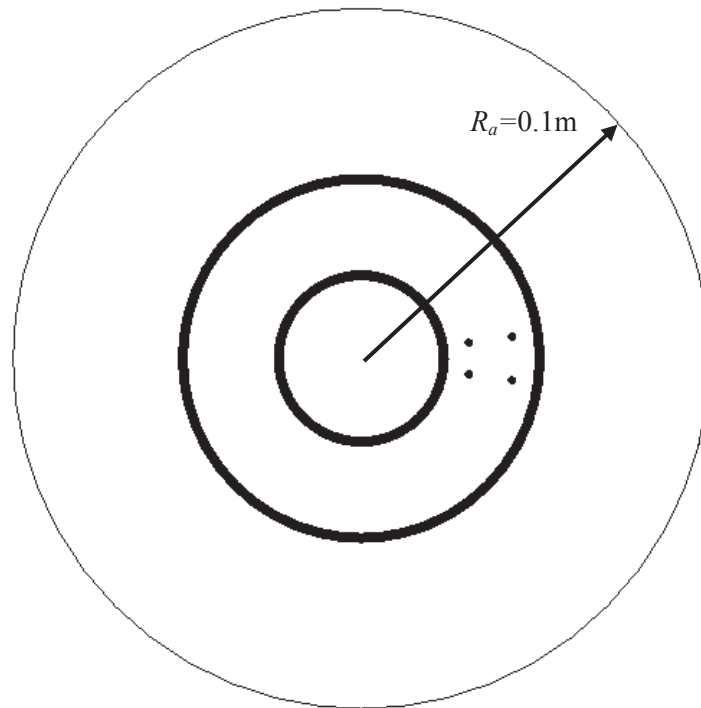


Figura 4.7 Círculo concéntrico de aire que encierra al modelo

En la Figura 4.8 se muestran las propiedades magnéticas usadas en cada parte del modelo y además en la Tabla 4.2 se proporcionan los valores de permeabilidad relativa aplicados a cada parte del modelo.

Tabla 4.2 Permeabilidades relativas aplicadas al modelo

Parte del modelo	Material	Permeabilidad relativa μ_r
Círculo concéntrico que encierra a todo el modelo	Aire	1
Todos los devanados	Cobre	1
Núcleo magnético toroidal	Acero al silicio de grano orientado M3	Depende de cada punto de la curva de magnetización

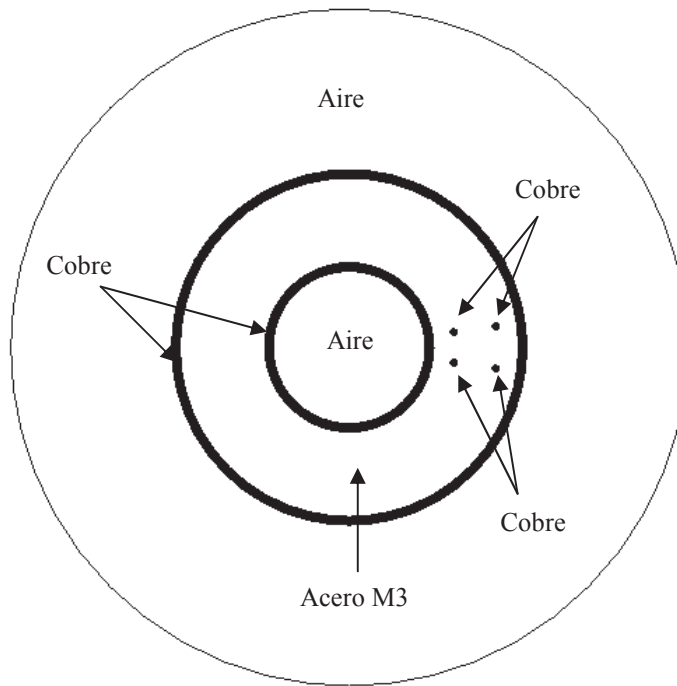


Figura 4.8 Propiedades magnéticas del modelo

4.3 Malla de elementos finitos del modelo

Se utilizó el tipo de elemento finito PLANE53 del programa ANSYS el cual es un elemento finito de seis nodos locales. El tipo de elemento finito PLANE53 es de segundo orden y aplicable a un análisis no lineal magnetostático. Este elemento finito es compatible con características no lineales, por lo tanto puede tener curvas de magnetización de cualquier material magnético. En la Figura 4.9 se muestra la geometría del elemento finito PLANE53 en un sistema de coordenadas cartesianas.

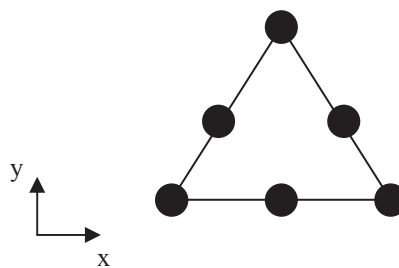


Figura 4.9 Elemento finito PLANE53

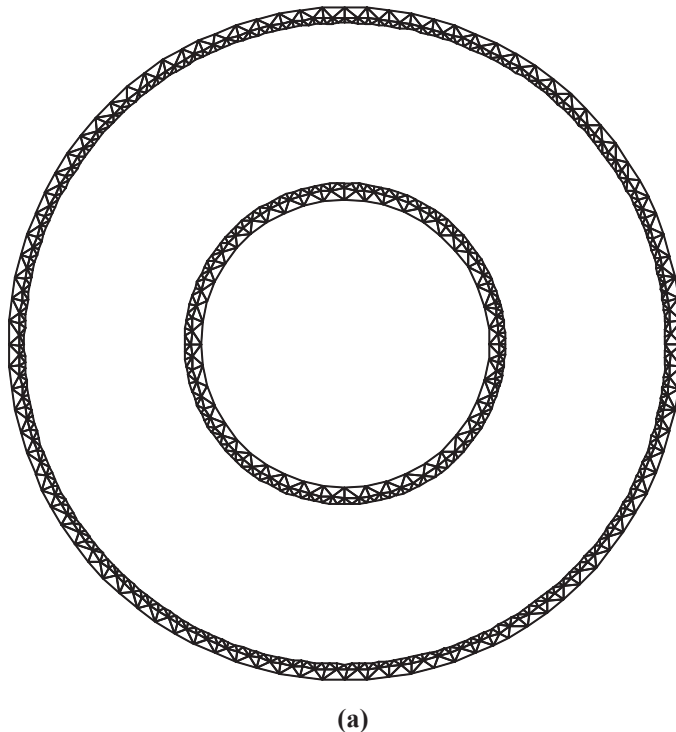
En la Tabla 4.3 se muestran el número de elementos finitos de cada parte del modelo.

Tabla 4.3 Número de elementos finitos de cada parte del modelo

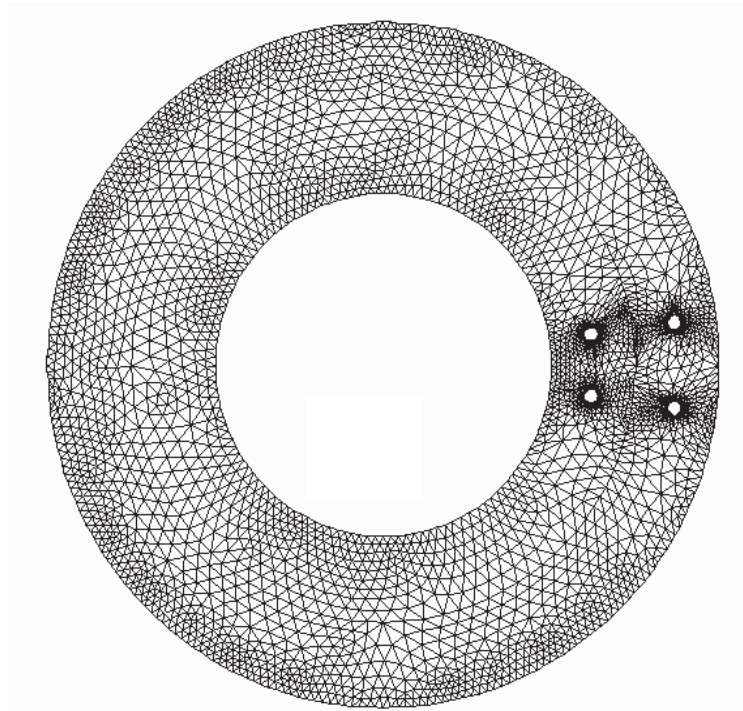
Parte del modelo	Número de elementos finitos
Los espacios de aire	2062
Devanado principal	1106
Los cuatro devanados de los agujeros	1056
Núcleo magnético toroidal	7466
	TOTAL=11690

En total se utilizaron 11690 elementos finitos los cuales forman la malla del modelo completo. Cada uno de los cuatro devanados de los agujeros cuenta con una malla de 264 elementos por lo tanto el número total de elementos finitos de los cuatro agujeros es de 1056, Tabla 4.3. En la Figura 4.10 se muestra la malla de elementos finitos para varias partes del modelo, incluyendo el modelo completo, Figura 4.10(d). Para el devanado principal ver Figura 4.10(a), para el núcleo magnético toroidal sin los devanados de los agujeros Figura 4.10(b) y para uno de los devanados de los agujeros Figura 4.10(c).

Observe que todas las mallas están formadas por elementos finitos triangulares los cuales corresponden al elemento finito PLANE53 del programa ANSYS para análisis electromagnéticos. El modelo completo cuenta con 23469 nodos globales.

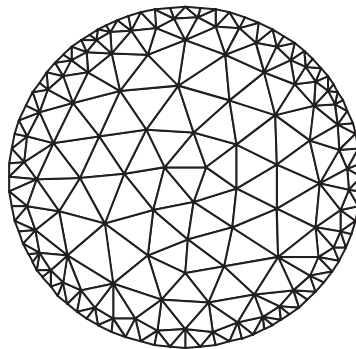


Malla de elementos finitos del devanado principal (1106 elementos finitos)



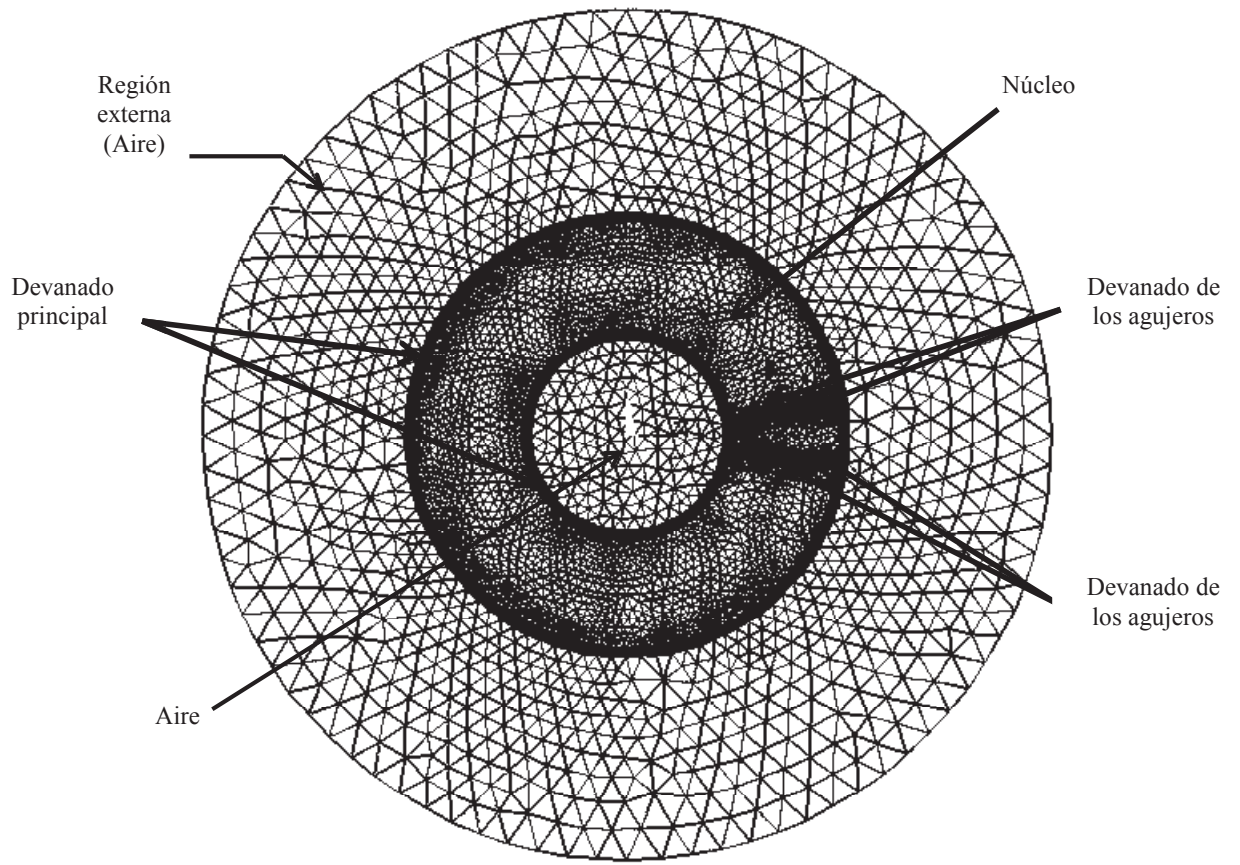
(b)

Malla de elementos finitos del núcleo magnético toroidal (7466 elementos finitos)



(c)

Malla de elementos finitos de cada uno de los devanados de los agujeros (264 elementos finitos)



(d)

Malla de elementos finitos del modelo completo

Figura 4.10 Malla de elementos finitos del modelo

4.4 Cargas del modelo o densidades de corriente

La carga que se aplica a un problema magnetostático en dos dimensiones se muestra en (2.22). Se puede ver que la carga que debe aplicarse es un valor de densidad de corriente en el eje z . Se aplicaron a todos los devanados del modelo densidades de corriente J_z y fueron calculadas como:

$$J_z = \pm \frac{(N)(I)}{A_c} \quad \text{A}\cdot\text{v}/\text{m}^2 \quad (4.7)$$

Para el devanado principal (parte exterior e interior) la densidad de corriente estará designada como J_{zp} y para los devanados de los agujeros como J_{za} . Además se está considerando para todas las simulaciones de elemento finito que todos los devanados del modelo tienen una sola vuelta, por lo tanto se tiene que $N=N_p=N_a=1$ en (4.7). Finalmente para cada uno de los devanados del modelo se tiene que el valor de la densidad de corriente se puede calcular como:

$$J_z = \pm \left(\frac{I}{A_c} \right) \quad \text{A}\cdot\text{v/m}^2 \quad (4.8)$$

El signo (+) indica que la densidad de corriente J_z o la corriente I sale del devanado (hacia fuera de la página) y el signo (−) indica que la densidad de corriente J_z o la corriente I entra al devanado (hacia dentro de la página). El valor de A_c corresponde a las áreas de sección transversal de cada uno de los devanados del modelo, ya sea del devanado principal o de los devanados de los agujeros. En la Tabla 4.4 se muestran los valores de las áreas de sección transversales A_c de todos los devanados del modelo.

Tabla 4.4 Valores de las áreas de sección transversal de todos los devanados del modelo

Devanado	Área de sección transversal $A_c[\text{m}^2]$
Devanado principal (parte exterior)	8.0503×10^{-4}
Devanado principal (parte interior)	3.7306×10^{-4}
Devanado de cada agujero	3.1415×10^{-6}

4.5 Condiciones de frontera

Para todo modelo de elemento finito se necesita especificar una condición de frontera inicial en alguna parte del modelo. De (2.22) se puede ver que para un caso magnetostático en dos dimensiones los valores que se calcularán con las simulaciones de elemento finito son los valores del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$ en el eje z . Por lo tanto el valor inicial del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$ será aplicado en el eje z al modelo de estudio.

Las condiciones de frontera para el modelo de estudio son bastante simples. En todos los nodos de la línea exterior del círculo concéntrico de aire se colocó una frontera de Dirichlet, donde se aplicó un valor de potencial vectorial magnético sobre el eje z , $\mathbf{A}_z=0$. Quiere decir

que para todos estos nodos el valor del campo magnético es cero. En la Figura 4.11 se ve la frontera de Dirichlet aplicada al modelo entero.

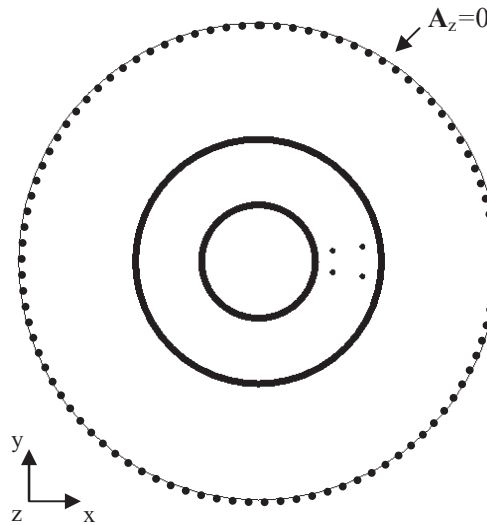


Figura 4.11 Frontera de Dirichlet del modelo

La frontera se coloca a una distancia $R_a=0.1\text{m}$ la cual es suficiente para que el campo magnético no se distorsione en la región que nos interesa. Mediante la aplicación de esta frontera de Dirichlet las líneas de campo magnético serán siempre paralelas a ella.

4.6 Características de la solución del modelo

Al ser un modelo con una característica no lineal en el núcleo magnético se tuvo que utilizar el método iterativo de Newton Raphson para resolver el modelo. La tolerancia utilizada para el método fue de 0.00001. El modelo se resolvió para los potenciales vectoriales magnéticos A_z . Dependiendo de la simulación que se hizo el número de iteraciones utilizadas por el programa ANSYS fue variable (de 15 a 30).

4.7 Propósitos de las simulaciones de elemento finito

Los propósitos principales de las simulaciones con el elemento finito son las siguientes:

1. Estudio de un entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal.

2. Cálculo del entrehierro físico equivalente.
3. Control de las características de la curva de magnetización.
4. Control del grado de saturación del entrehierro virtual.
5. Control del tamaño del entrehierro virtual.

4.7.1 Estudio de un entrehierro virtual en un núcleo magnético toroidal

Para estudiar el comportamiento magnético de un entrehierro virtual dentro del núcleo magnético toroidal primeramente se tiene que magnetizar el núcleo mediante una intensidad de I_p aplicada al devanado principal, la cual se calcula a partir de la curva de magnetización del acero al silicio de grano orientado M3 del núcleo toroidal.

Para empezar a calcular el valor de la intensidad de I_p se escogió el punto $H=130.91\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $B=1.7\text{T}$ que está localizado en la región casi saturada de la curva de magnetización del acero al silicio de grano orientado M3. Este es el punto de operación (H, B) sin entrehierro virtual. En la Figura 4.12 se observa el punto de operación (H, B) en la curva de magnetización.

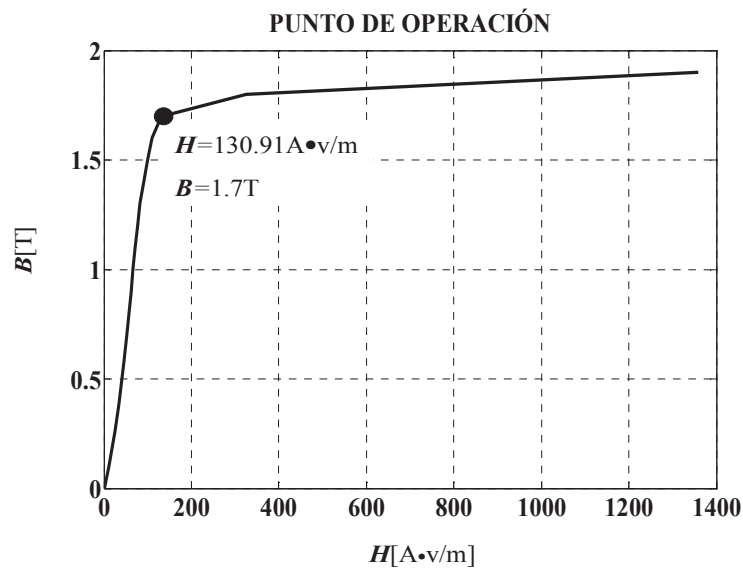


Figura 4.12 Punto de operación en la curva de magnetización

El valor de la intensidad de I_p se calculó mediante la Ley de Ampere la cual corresponde a (3.3), ésta se aplica al punto de operación (H, B) de la curva de magnetización para tener en la longitud media geométrica l del núcleo toroidal una densidad de flujo $B=1.7\text{T}$. Pero para

aplicar la Ley de Ampere es necesario primero calcular la longitud media geométrica l del núcleo magnético a partir de los diámetros del núcleo toroidal de la siguiente manera:

$$l = (\pi) \left(\frac{OD + ID}{2} \right) \quad \text{m} \quad (4.9)$$

Sustituyendo los valores de $OD=0.1\text{m}$, $ID=0.05\text{m}$ se obtiene la longitud media geométrica l del núcleo toroidal, Figura 4.1.

$$l = 0.235619 \quad \text{m} \quad (4.10)$$

En la Figura 4.13 se muestra la trayectoria de la longitud media geométrica l del núcleo toroidal.

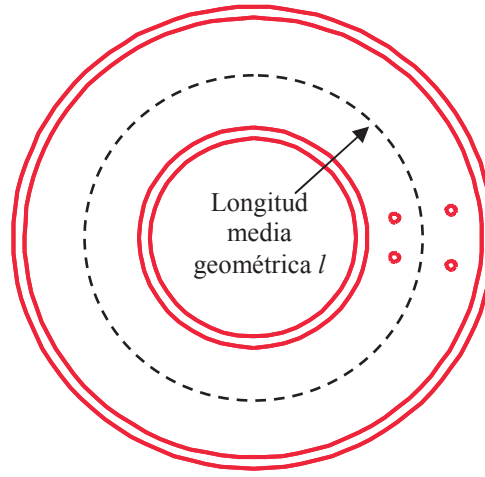


Figura 4.13 Trayectoria de la longitud media geométrica en el modelo

Después se despeja I_p de (3.4) y se obtiene:

$$I_p = \frac{(H)(l)}{N_p} \quad \text{A} \quad (4.11)$$

Si se sustituye $N_p=1$ en (4.11), la intensidad de I_p queda como:

$$I_p = (H)(l) \quad \text{A} \quad (4.12)$$

Sustituyendo en (4.12) el valor de $H=130.91\text{A}\cdot\text{v/m}$ y de $l=0.235619\text{m}$ se obtiene el valor de la intensidad de I_p :

$$I_p = 30.84 \quad \text{A} \quad (4.13)$$

Después se aplicó una densidad de corriente J_{zp} en el devanado principal (en la parte interior y exterior), mediante (4.8) y utilizando los valores de A_c para el devanado principal, Tabla 4.4.

Si la corriente $I_p=30.84\text{A}$ la densidad de corriente J_{zp} en el devanado principal es:

$$\text{Para la parte interior: } J_{zp} = -82667.66 \quad \text{A}\cdot\text{v}/\text{m}^2 \quad (4.14)$$

$$\text{Para la parte exterior: } J_{zp} = +38309.13 \quad \text{A}\cdot\text{v}/\text{m}^2 \quad (4.15)$$

En la Figura 4.14 se muestran las direcciones de las densidades de corriente J_{zp} en el devanado principal, las cuales sirven para magnetizar el núcleo magnético toroidal. Además se muestra la dirección de la intensidad de campo H en el núcleo magnético toroidal. La dirección de la intensidad de campo H cumple la regla de la mano derecha.

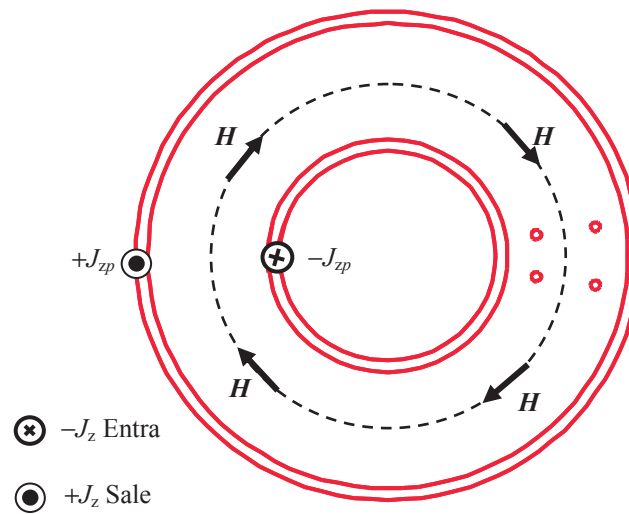
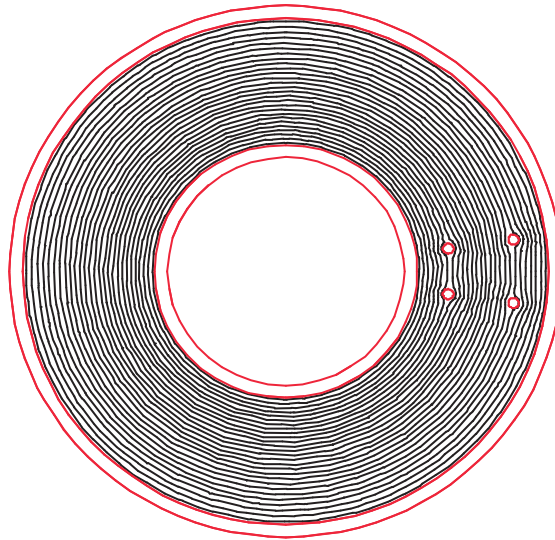


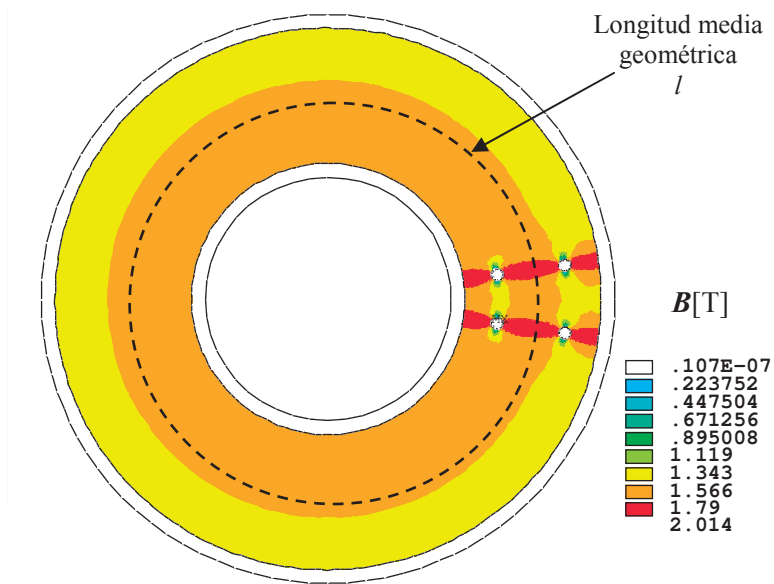
Figura 4.14 Direcciones de las densidades de corriente en el devanado principal

Por lo tanto, para tener un valor aproximado de $H=130.91\text{A}\cdot\text{v}/\text{m}$ y $B=1.7\text{T}$ en la longitud media geométrica l del núcleo magnético toroidal se necesita un valor de intensidad de $I_p=30.84\text{A}$. En la Figura 4.15 se puede observar la intensidad de campo H (líneas de campo magnético) en el núcleo magnético toroidal con el entrehierro virtual inactivo.



(a)

Flujo magnético en el núcleo toroidal con el entrehierro virtual inactivo



(b)

Distribución de la densidad de flujo en el núcleo toroidal con el entrehierro virtual inactivo

Figura 4.15 Entrehierro virtual inactivo ($I_p=30.84\text{A}$, $I_a=0\text{A}$)

El flujo magnético Φ circula principalmente por el núcleo magnético y circula menos por el interior de los agujeros. En el interior de los agujeros la permeabilidad tiene prácticamente el valor de μ_0 por lo que es un valor muy pequeño. El flujo magnético Φ prefiere circular por

el núcleo magnético toroidal que tiene una permeabilidad mucho mayor que μ_0 . En la Figura 4.16 se observa claramente como el flujo magnético Φ preferentemente rodea los agujeros.



Figura 4.16 Flujo magnético rodeando los agujeros

Para conocer el valor de la intensidad de campo H y de la densidad de flujo B dado por la simulación de elementos finitos en la longitud media geométrica l , se midió dicho valor en un nodo localizado en dicha longitud l como se muestra en la Figura 4.17. El nodo de medición está localizado fuera de la zona de los agujeros.

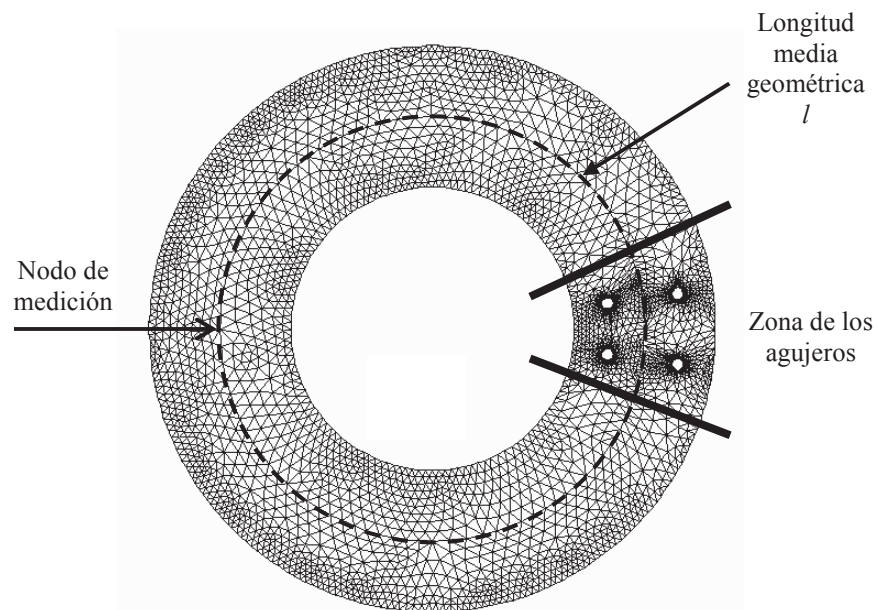


Figura 4.17 Nodo donde se realizan las respectivas mediciones

El valor medido en dicho nodo fue $H=113.838\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $B=1.63385\text{T}$. Se puede ver que el valor de la densidad de flujo B nos da un valor aproximado, pero es menor que $B=1.7\text{T}$ por lo que el punto original $H=99.55\text{A}\cdot\text{v/m}$ no le corresponde a $B=1.63385\text{T}$ si no a $H=113.838\text{A}\cdot\text{v/m}$.

La causa de que los valores de H y B disminuyan en la longitud l es porque existe una pequeña región saturada en la zona de los agujeros, Figura 4.15(b), en donde $B=2.014T$. Esta saturación es causada por el flujo Φ que rodea los agujeros, dicho flujo los rodea y luego se acumula entre ellos, Figura 4.16, lo que ocasiona que sature esa región y se produzca una pequeña permeabilidad la cual provoca que el valor del flujo Φ disminuya al pasar por ahí. También hay otras regiones saturadas con un valor de $B=2.014T$ entre los agujeros más cercanos al diámetro interno y al diámetro externo del núcleo toroidal, también son producidas por el flujo Φ que rodea a dichos agujeros, estas regiones tienen una baja permeabilidad y contribuyen a la reducción del flujo Φ , de la intensidad de campo H y de la densidad de flujo B fuera de la zona de los agujeros.

Debe hacerse una observación muy importante sobre este caso. Si los agujeros que se hacen dentro del núcleo toroidal fueran más grandes provocarían que el flujo Φ que los rodea se acumulara en mayor medida entre ellos y provocaría una mayor saturación en esa región, lo cual provocaría una mayor disminución de la permeabilidad en esas regiones produciendo una mayor disminución del flujo magnético Φ al pasar por ahí y por lo tanto una mayor disminución de la intensidad de campo H y de la densidad de flujo B fuera de la zona de los agujeros. Este es el efecto magnético que tiene el tamaño de los agujeros hechos dentro del núcleo toroidal para formar posteriormente el entrehierro virtual en la zona de los agujeros. En la Figura 4.18 se muestra una vista de la región no saturada de la curva de magnetización donde se muestra el punto de operación (H, B) antes de la simulación y el punto de operación (H, B) obtenido después de haber realizado la simulación.

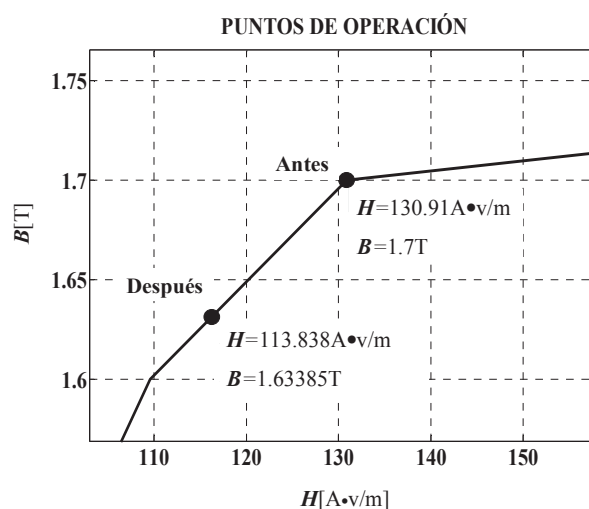


Figura 4.18 Puntos de operación antes y después de la simulación de elementos finitos

Para el análisis se utilizó el punto de operación $H=113.838\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $B=1.63385\text{T}$ obtenido con la simulación de elementos finitos, estos valores corresponden ahora al punto de operación (H, B) en la región no saturada de la curva de magnetización cuando el entrehierro virtual está inactivo, con $I_a=0\text{A}$.

Después aplicando (3.6) se obtuvo el valor de la permeabilidad μ para el punto de operación (H, B) obtenido con la simulación de elementos finitos.

$$\mu = 1.4352 \times 10^{-2} \quad \text{H/m} \quad (4.16)$$

Ahora se procede a crear un entrehierro virtual dentro del núcleo toroidal. Para esto se introduce una intensidad de $I_a=100\text{A}$ en los devanados de los agujeros. Se utiliza (4.8) y el valor de A_c de la Tabla 4.4 para calcular la densidad de corriente J_{za} en cada uno de los devanados de los agujeros. Por lo tanto la densidad de corriente J_{za} en los devanados de los agujeros para una intensidad de $I_a=100\text{A}$ es:

$$J_{za} = \pm 31831927.42 \quad \text{A}\cdot\text{v/m}^2 \quad (4.17)$$

En la Figura 4.19 se muestran las direcciones de las densidades de corriente J_{zp} y J_{za} de todos los devanados del modelo. Las direcciones de las intensidades de campo H y H_a cumplen la regla de la mano derecha.

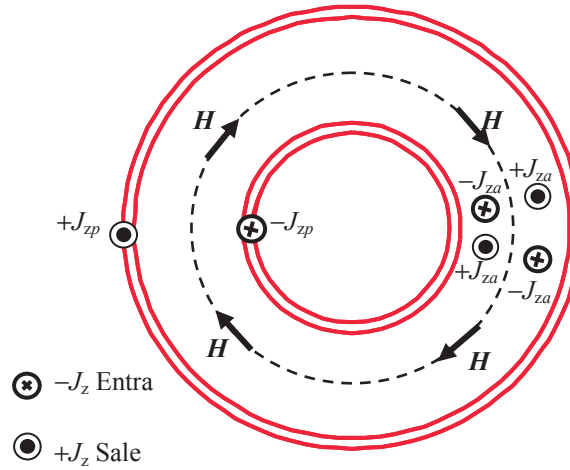
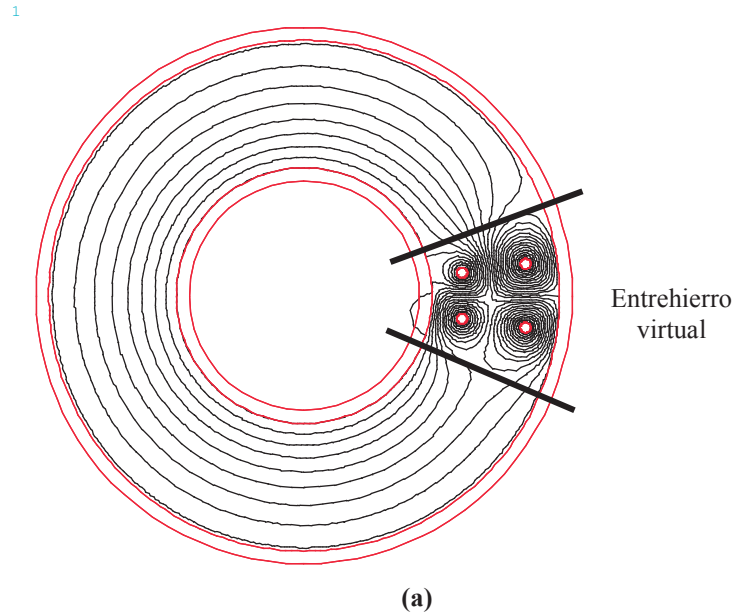
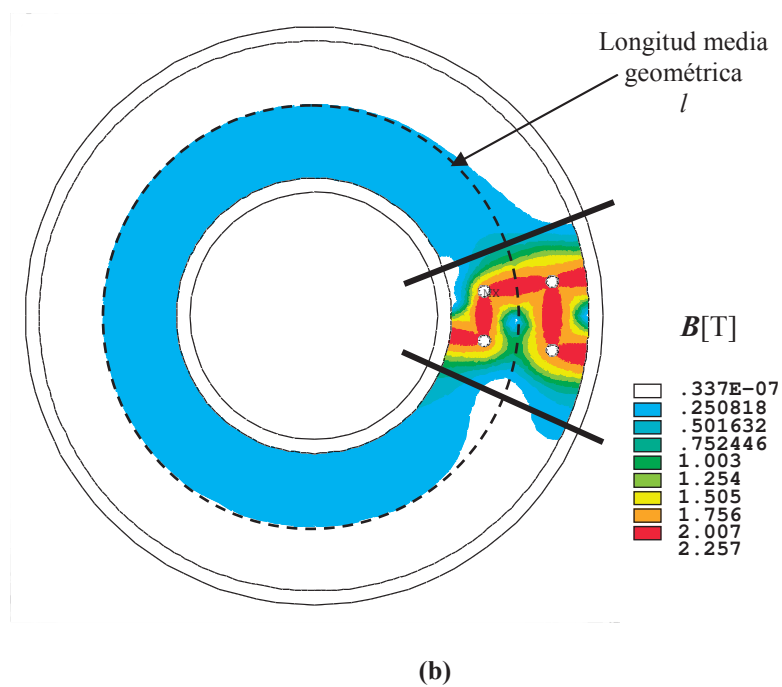


Figura 4.19 Dirección de las densidades de corriente de todos los devanados

En la Figura 4.20 se puede observar la intensidad de campo H , líneas de campo magnético, en el núcleo toroidal con el entrehierro virtual activo, con una intensidad de $I_a=100A$ en los devanados de los agujeros.



Flujo magnético en el núcleo toroidal con el entrehierro virtual activo



Distribución de la densidad de flujo en el núcleo toroidal con el entrehierro virtual activo

Figura 4.20 Entrehierro virtual activo ($I_p=30.84A$, $I_a=100A$)

Observe en la Figura 4.20(a) la trayectoria del flujo Φ en la zona de los agujeros. Existen algunas zonas donde el flujo Φ se suma con los flujos rotacionales Φ_a de cada uno de los agujeros, esta interacción entre el flujo Φ y los flujos Φ_a en la zona de los agujeros se muestra en la Figura 3.12. Además se puede observar en la Figura 4.20(b) que la distribución de la saturación en la zona de los agujeros corresponde a la mostrada en la Figura 3.12.

En la Figura 4.20(b) se puede observar que existe dentro del entrehierro virtual valores muy altos de H_{sat} y de B_{sat} los cuales provocan que el circuito magnético del núcleo toroidal se modifique y aparezcan regiones con una permeabilidad muy pequeña que provocan la disminución del flujo Φ al pasar por ahí y por lo tanto una disminución de la densidad de flujo B y de intensidad de campo H fuera del entrehierro virtual. Al disminuir el valor de H y B fuera del entrehierro virtual aparece una nueva intensidad de campo H_{ev} y una nueva densidad de flujo B_{ev} ambas fuera del entrehierro virtual.

Ya que se tiene el entrehierro virtual formado dentro del núcleo toroidal se puede calcular su permeabilidad promedio μ_{sat} . Para calcular la permeabilidad promedio μ_{sat} dentro del entrehierro virtual se tomaron los valores máximos de H_{sat} y B_{sat} dentro del mismo. Los valores máximos son $H_{sat}=111682\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $B_{sat}=2.257\text{T}$. Estos valores corresponden al punto de operación dentro del entrehierro virtual (H_{sat}, B_{sat}) y está localizado en la región saturada de la curva de magnetización, Figura 4.21.

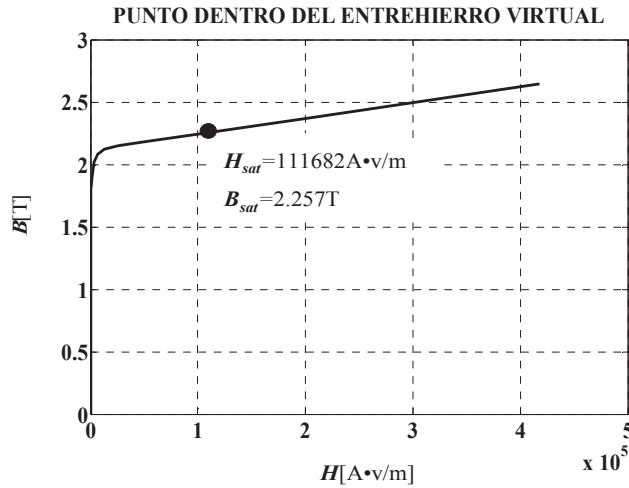


Figura 4.21 Punto de operación dentro del entrehierro virtual

Después aplicando (3.1) se obtuvo el valor de la permeabilidad promedio μ_{sat} para el punto (H_{sat}, B_{sat}).

$$\mu_{sat} = 2.0209 \times 10^{-5} \quad \text{H/m} \quad (4.18)$$

Después se obtuvo el valor de la densidad de flujo B y de la intensidad de campo H en el nodo de medición mostrado en la Figura 4.17, para este caso donde el entrehierro virtual está activo. Los valores que se obtuvieron fueron $H_{ev}=25.4334\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $B_{ev}=0.25884\text{T}$.

Con el entrehierro virtual activo el punto de operación (H, B) ha sido desplazado sobre la misma curva de magnetización a un nuevo punto de operación (H_{ev}, B_{ev}) . Este nuevo punto está localizado en la región no saturada de la curva de magnetización. En la Figura 4.22(a) se muestra el nuevo punto de operación (H_{ev}, B_{ev}) en la región no saturada y el punto de operación original (H, B) en misma región no saturada. En la Figura 4.22(b) se muestra solamente el nuevo punto de operación (H_{ev}, B_{ev}) en la región no saturada.

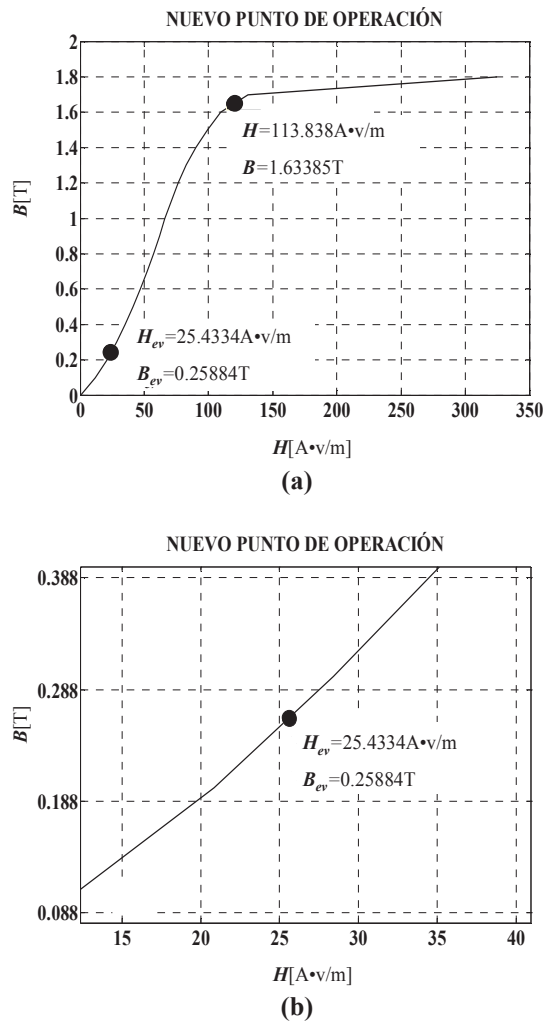


Figura 4.22 Vistas del nuevo punto de operación producido por el entrehierro virtual

Después aplicando (3.10) se obtuvo la permeabilidad μ_{ev} del núcleo para el nuevo punto (H_{ev}, B_{ev}) .

$$\mu_{ev} = 1.0177 \times 10^{-2} \text{ H/m} \quad (4.19)$$

Con las simulaciones de elemento finito se obtuvieron resultados muy interesantes. En la Tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones de elemento finito y en la Figura 4.23 se pueden ver los resultados en la curva de magnetización.

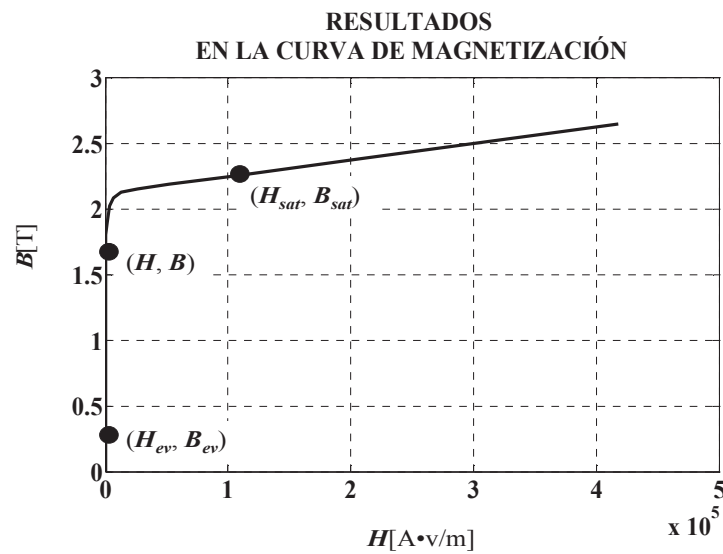


Figura 4.23 Resultados sobre la curva de magnetización

Tabla 4.5 Resultados de las simulaciones de elemento finito para cada uno de los puntos en la curva de magnetización

Punto	Variable	Valor
(H, B)	H	113.838 $\text{A}\cdot\text{v/m}$
	B	1.63385T
	μ	$1.4352 \times 10^{-2} \text{ H/m}$
(H_{sat}, B_{sat})	H_{sat}	111682 $\text{A}\cdot\text{v/m}$
	B_{sat}	2.257T
	μ_{sat}	$2.0209 \times 10^{-5} \text{ H/m} \rightarrow \mu_0$
(H_{ev}, B_{ev})	H_{ev}	25.4334 $\text{A}\cdot\text{v/m}$
	B_{ev}	0.25884T
	μ_{ev}	$1.0177 \times 10^{-2} \text{ H/m}$

De la Figura 4.23 se puede ver que el punto (H, B) corresponde al punto de operación normal en la región no saturada de la curva de magnetización donde el entrehierro virtual está inactivo, donde $I_a=0A$. El punto (H_{sat}, B_{sat}) corresponde a los valores localizados en la región saturada de la curva de magnetización y son los valores dentro del entrehierro virtual activo, donde $I_a=100A$. Y finalmente aparece un nuevo punto (H_{ev}, B_{ev}) sobre la misma curva de magnetización en la región no saturada por efecto del entrehierro virtual activo, donde $I_a=100A$. De este análisis se pueden hacer algunas importantes observaciones:

1. Verdaderamente se ha creado un entrehierro virtual en la zona de los agujeros dentro del núcleo toroidal por medio de la corriente $I_a=100A$ en los devanados de los agujeros, Figura 4.20.
2. Existe una interacción en la zona de los agujeros entre el flujo Φ provocado por la corriente I_p y los flujos rotacionales Φ_a provocados por I_a . Esta interacción provoca un entrehierro virtual y dentro de él una permeabilidad μ_{sat} la cual es muy pequeña que tiende al valor de la permeabilidad del vacío μ_0 . De esta forma se crea un entrehierro virtual o un espacio de aire virtual en la zona de los agujeros.
3. La intensidad de I_p fue la misma para los casos donde el entrehierro virtual está activo e inactivo en el núcleo toroidal. Quiere decir que al usar un entrehierro virtual no es necesario incrementar la intensidad de corriente de magnetización, en cambio cuando se usa un entrehierro físico si se necesita incrementar la corriente de magnetización para vencer la reluctancia del entrehierro físico.
4. Para el caso del entrehierro virtual inactivo el valor de H casi no cambia en el núcleo toroidal, Figura 4.15, pero para el caso del entrehierro virtual activo el valor de H disminuyó a un nuevo valor H_{ev} en el núcleo toroidal, Figura 4.20, sobre la misma curva de magnetización, Figura 4.22.
5. Para los casos donde el entrehierro virtual está activo e inactivo se utilizó la misma intensidad de I_p , para el caso del entrehierro virtual inactivo el valor de B casi no cambia en el núcleo toroidal, Figura 4.15(b), pero para el caso del entrehierro virtual activo el valor de B disminuyó a un nuevo valor B_{ev} en el núcleo toroidal, Figura 4.20(b), sobre la misma curva de magnetización, Figura 4.22.

6. La permeabilidad del núcleo toroidal es más pequeña en la Figura 4.20(b) (entrehierro virtual activo) que en la Figura 4.15(b) (entrehierro virtual inactivo). Esto indica que existe un cambio en la permeabilidad del núcleo magnético toroidal cuando el entrehierro virtual está activo.
7. Todos los cambios provocados por el entrehierro virtual están sobre la misma curva de magnetización, Figura 4.23, ya que el material magnético del núcleo toroidal es el mismo para todas las simulaciones de elemento finito.
8. Por lo tanto, se pudo comprobar los cambios que produce el entrehierro virtual en el núcleo magnético toroidal sobre H , B , Φ y μ .

4.7.2 Cálculo del entrehierro físico equivalente

Después de obtener los resultados de las variables del núcleo para el caso del entrehierro virtual activo con una intensidad de $I_a=100A$, se puede hacer la comparación de que se obtiene aproximadamente la misma densidad de flujo $B_{ev}=0.25884T$ y la misma intensidad de campo $H_{ev}=25.4334A\cdot v/m$ en la longitud media geométrica l del núcleo toroidal mediante un entrehierro físico equivalente. Para esto es necesario aplicar la Ley de Ampere (3.3) al modelo magnético de la Figura 4.24 el cual tiene la misma geometría en dos dimensiones que el núcleo magnético toroidal de la Figura 4.1(b), el núcleo tiene la misma curva de magnetización del acero al silicio de grano orientado M3 cuyos datos se muestran en la Tabla 4.1 y su curva se muestra en la Figura 4.2, solamente que ahora este núcleo toroidal tiene un entrehierro físico con una longitud l_g . Además tiene enrollado un devanado principal con $N_p=1$ por el cual circula una corriente de magnetización I_p .

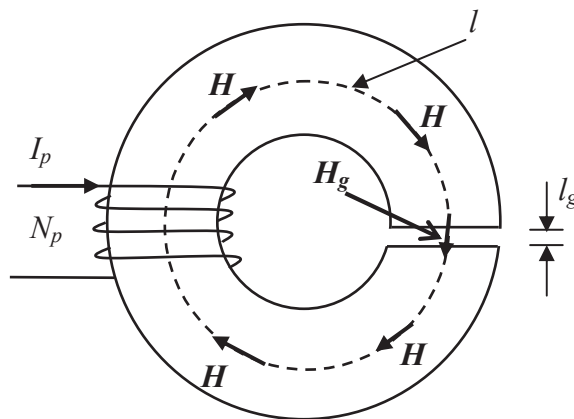


Figura 4.24 Entrehierro físico en modelo magnético

Al aplicar la Ley de Ampere (3.3) al modelo magnético a través de la longitud media geométrica l (4.10), Figura 4.24, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\mathcal{F}_p = \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \oint_{l_g} \mathbf{H}_g \cdot d\mathbf{l}_g = (N_p)(I_p) \quad (4.20)$$

La relación entre la intensidad de campo $\mathbf{H}$ y la densidad de flujo $\mathbf{B}$ en el núcleo está dada por (3.5) y para el entrehierro físico la relación es:

$$\mathbf{B}_g = (\mu_0)(\mathbf{H}_g) \quad \text{T} \quad (4.21)$$

Se supone que la longitud del entrehierro físico es muy pequeña, de esta manera se desprecia el efecto de contorno (el aire cercano a los lados del entrehierro). Por lo tanto, la densidad de flujo $\mathbf{B}$ en el núcleo y la densidad de flujo $\mathbf{B}_g$ en el entrehierro físico se suponen iguales.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_g \quad (4.22)$$

Se despeja la intensidad de campo $\mathbf{H}$ del núcleo de (3.5) y la intensidad de campo $\mathbf{H}_g$ del entrehierro físico de (4.21) y se sustituyen en (4.20).

$$\oint_l \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu} \right) \cdot d\mathbf{l} + \oint_{l_g} \left(\frac{\mathbf{B}_g}{\mu_0} \right) \cdot d\mathbf{l}_g = (N_p)(I_p) \quad (4.23)$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{(\mathbf{B})(l)}{\mu} \right) + \left(\frac{(\mathbf{B}_g)(l_g)}{\mu_0} \right) = (N_p)(I_p) \quad (4.24)$$

Se toma en cuenta la igualdad de (4.22) y se sustituye en (4.24) y se obtiene:

$$\left(\frac{(\mathbf{B})(l)}{\mu} \right) + \left(\frac{(\mathbf{B})(l_g)}{\mu_0} \right) = (N_p)(I_p) \quad (4.25)$$

Finalmente se despeja l_g de (4.25) y se obtiene:

$$l_g = \left(\frac{(N_p)(I_p)(\mu_0)}{\mathbf{B}} \right) - \left(\frac{(l)(\mu_0)}{\mu} \right) \quad (4.26)$$

Si $N_p=1$ entonces se tiene:

$$l_g = \left(\frac{(I_p)(\mu_0)}{\mathbf{B}} \right) - \left(\frac{(l)(\mu_0)}{\mu} \right) \quad \text{m} \quad (4.27)$$

Todos los valores de las variables involucradas en (4.27) corresponden al caso donde el entrehierro virtual está activo con $I_a=100\text{A}$, de tal forma que sustituyendo las variables de la Tabla 4.5 para el punto $(\mathbf{H}_{ev}, \mathbf{B}_{ev})$ en (4.27) se tiene:

$$l_g = \left(\frac{(I_p)(\mu_0)}{\mathbf{B}_{ev}} \right) - \left(\frac{(l)(\mu_0)}{\mu_{ev}} \right) \quad \text{m} \quad (4.28)$$

Después se sustituyen los valores de I_p , $\mathbf{B}_{ev}=0.25884\text{T}$, μ_{ev} y l en (4.28) y se obtiene:

$$l_g = 1.2 \times 10^{-4} \quad \text{m} \quad (4.29)$$

En milímetros:

$$l_g = 0.12 \quad \text{mm} \quad (4.30)$$

De esta manera se obtuvo la longitud del entrehierro físico la cual es equivalente al tamaño del entrehierro virtual activo creado por $I_a=100\text{A}$ en el núcleo toroidal. Se puede ver que el tamaño del entrehierro físico es pequeño dadas las dimensiones del núcleo toroidal y dado que se está considerando que $N=1$ vuelta en todos los devanados del modelo. Aún así una longitud de 0.12mm es usada en la construcción de inductores.

Para comprobar que se obtiene $\mathbf{H}_{ev}=25.4334\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $\mathbf{B}_{ev}=0.25884\text{T}$ con $l_g=1.20 \times 10^{-4}\text{m}$ se resuelve el circuito magnético de la Figura 4.25 que representa el núcleo toroidal con el entrehierro físico de la Figura 4.24.

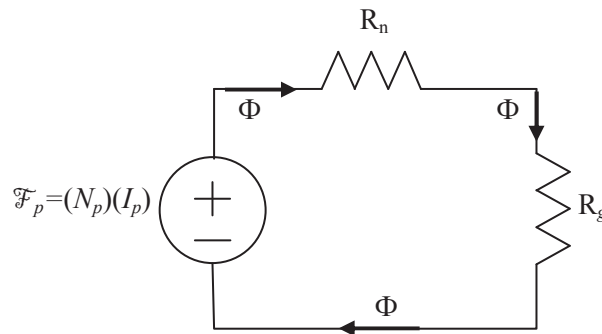


Figura 4.25 Circuito magnético del modelo magnético

Donde R_n es la reluctancia del núcleo para el punto de operación (H_{ev} , B_{ev}) donde el entrehierro virtual está activo con $I_a=100A$ y R_g es la reluctancia del entrehierro físico.

$$R_n = \frac{l}{(\mu_{ev})(A)} \quad \text{A/Wb} \quad (4.31)$$

$$R_g = \frac{l_g}{(\mu_0)(A)} \quad \text{A/Wb} \quad (4.32)$$

La Ley de Ampere (3.3) se aplica a cualquier trayectoria cerrada en un sistema en el que exista un campo magnético. En un circuito magnético como el de la Figura 4.25, la Ley de Ampere (3.3) es representada por la siguiente relación:

$$\sum \mathcal{F} = \sum (N)(I) = \sum_{\text{alrededor-trayectoria-cerrada}} (R)(\Phi) \quad \text{A}\cdot\text{v} \quad (4.33)$$

Esta relación dice que: “Alrededor de cualquier trayectoria cerrada, el total de fuerza magnetomotriz $\mathcal{F}$ provocada por la corriente I circulando en los devanados de N vueltas es igual a la suma de los productos de reluctancia R y el flujo magnético Φ ”. De este modo se aplica (4.33) al circuito magnético de la Figura 4.25 y se obtiene:

$$\mathcal{F}_p = (R_n)(\Phi) + (R_g)(\Phi) \quad (4.34)$$

Si $\mathcal{F}_p = (N_p)(I_p)$ y $N_p=1$ se tiene entonces:

$$I_p = (R_n)(\Phi) + (R_g)(\Phi) \quad (4.35)$$

Se despeja el flujo magnético Φ de (4.35) y se obtiene:

$$\Phi = \frac{I_p}{R_n + R_g} \quad \text{Wb} \quad (4.36)$$

Después se sustituyen los valores de μ_{ev} , A , l en (4.31) y los valores de l_g y A en (4.32) se obtiene:

El valor de la reluctancia del núcleo:

$$R_n = 926.07073 \quad \text{A/Wb} \quad (4.37)$$

El valor de la reluctancia del entrehierro físico:

$$R_g = 3839.8078 \text{ A/Wb} \quad (4.38)$$

Finalmente se sustituyen los valores de I_p , R_n y R_g en (4.36) y se obtiene el valor del flujo magnético Φ :

$$\Phi = 6.471 \times 10^{-3} \text{ Wb} \quad (4.39)$$

El valor de la densidad de flujo B para este caso puede ser calculado mediante la siguiente relación:

$$B = \frac{\Phi}{A} \text{ T} \quad (4.40)$$

Finalmente se obtiene el valor de la densidad de flujo B en la longitud media geométrica l del modelo magnético, Figura 4.24. Ahora sustituyendo el valor del flujo Φ y del área A en (4.40) y tomando en cuenta la igualdad de (4.22) se obtiene el valor de la densidad de flujo B :

$$B = B_g = 0.25884 \text{ T} \quad (4.41)$$

Después se calcula el valor de la fuerza magnetomotriz para la reluctancia del núcleo toroidal R_n y para la reluctancia del entrehierro físico R_g .

$$\text{Para } R_n: \quad \mathcal{F}_n = (\Phi)(R_n) = (6.5 \times 10^{-3})(921.8157) = 5.9926 \text{ A}\cdot\text{v} \quad (4.42)$$

$$\text{Para } R_g: \quad \mathcal{F}_g = (\Phi)(R_g) = (6.5 \times 10^{-3})(3822.7996) = 24.8474 \text{ A}\cdot\text{v} \quad (4.43)$$

El valor de la fuerza magnetomotriz total $\mathcal{F}_t$ es la suma de $\mathcal{F}_n$ y $\mathcal{F}_g$.

$$\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_n + \mathcal{F}_g = 30.84 \text{ A}\cdot\text{v} \quad (4.44)$$

Para conocer el valor de la intensidad de campo H dentro del núcleo toroidal se aplica la Ley de Ampere (3.3) solamente al núcleo toroidal (sin el entrehierro físico) y se obtiene:

$$\oint_l H \cdot dl = \mathcal{F}_n \text{ A}\cdot\text{v} \quad (4.45)$$

De (4.45) se obtiene H :

$$\mathbf{H} = \frac{(\mathcal{F}_n)}{l} \quad \text{A}\cdot\text{v/m} \quad (4.46)$$

Sustituyendo el valor de $\mathcal{F}_n$ y de l en (4.46) se obtiene el valor de la intensidad de campo $\mathbf{H}$ dentro del núcleo toroidal.

$$\mathbf{H} = 25.4334 \quad \text{A}\cdot\text{v/m} \quad (4.47)$$

Para obtener la intensidad de campo $\mathbf{H}_g$ se aplica la Ley de Ampere (3.3) al entrehierro físico y se obtiene:

$$\oint_l \mathbf{H}_g \cdot d\mathbf{l}_g = \mathcal{F}_g \quad \text{A}\cdot\text{v} \quad (4.48)$$

De (4.48) se obtiene $\mathbf{H}_g$:

$$\mathbf{H}_g = \frac{(\mathcal{F}_g)}{l_g} \quad \text{A}\cdot\text{v/m} \quad (4.49)$$

Sustituyendo el valor de $\mathcal{F}_g$ y de l_g en (4.49) se obtiene el valor de la intensidad de campo $\mathbf{H}_g$ dentro del entrehierro físico.

$$\mathbf{H}_g = 205978.33 \quad \text{A}\cdot\text{v/m} \quad (4.50)$$

Con estos cálculos se ha obtenido el valor de la intensidad de campo $\mathbf{H}=25.4334\text{A}\cdot\text{v/m}$ y de la densidad de flujo $\mathbf{B}=0.25884\text{T}$ para el núcleo toroidal con su respectivo entrehierro físico con $l_g=1.20\times 10^{-4}\text{m}$, estos valores son los mismos que se obtuvieron con la simulación de elemento finito del núcleo toroidal con el entrehierro virtual creado con $I_a=100\text{A}$ cuyos valores son $\mathbf{H}_{ev}=25.4334\text{A}\cdot\text{v/m}$ y $\mathbf{B}_{ev}=0.25884\text{T}$.

Para comprobar estos cálculos y además que el entrehierro físico calculado en (4.29) funciona igual que el entrehierro virtual se realizó la simulación de elementos finitos del núcleo toroidal con su entrehierro físico. El propósito de la simulación de elementos finitos es medir el valor de la intensidad de campo $\mathbf{H}$ y de la densidad de flujo $\mathbf{B}$ en la longitud media geométrica l del núcleo toroidal con el entrehierro físico, estos valores deben ser aproximadamente iguales a los valores de $\mathbf{H}_{ev}=25.4334\text{A}\cdot\text{v/m}$ y de $\mathbf{B}_{ev}=0.25884\text{T}$ medidos fuera del entrehierro virtual en el nodo mostrado en la Figura 4.17 y provocados por la intensidad de $I_a=100\text{A}$.

Se tomó la geometría en dos dimensiones del núcleo toroidal mostrada en la Figura 4.1(b), además el núcleo magnético toroidal está formado de acero al silicio de grano orientado M3,

por lo tanto, el núcleo tiene la misma curva de magnetización cuyos valores de H y B se muestran en la Tabla 4.2 y cuya curva se muestra en la Figura 4.2.

También se aplicaron a cada una de las partes del modelo las mismas permeabilidades relativas mostradas en la Tabla 4.2, también se tomó la misma geometría y distribución del devanado principal mostrado en la Figura 4.6. El entrehierro físico se modeló mediante un corte rectangular de una parte del núcleo toroidal cuya altura se obtuvo en (4.29). Se encerró el modelo dentro del mismo círculo concéntrico de aire mostrado en la Figura 4.7. En la Figura 4.26 se muestra el modelo.

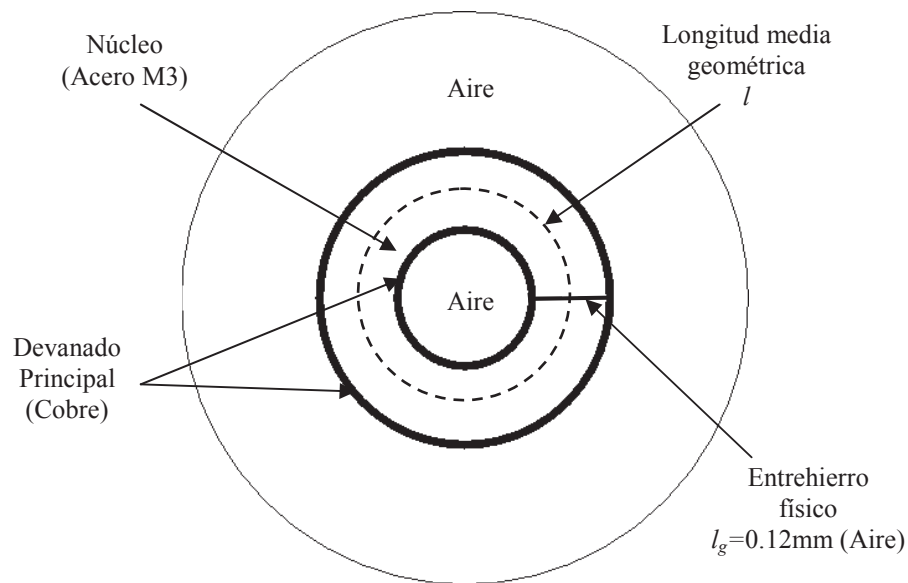


Figura 4.26 Modelo con el entrehierro físico

Para formar la malla del modelo se utilizó el elemento finito PLANE53 mostrado en la Figura 4.9. En la Figura 4.27 se muestra la malla de elementos finitos del modelo completo y en la Tabla 4.6 se muestra el número de elementos finitos usados en cada parte del modelo y el total de elementos usados en todo el modelo.

Tabla 4.6 Número de elementos finitos de cada parte del modelo con el entrehierro físico

Parte del modelo	Número de elementos finitos
Espacios de aire (incluyendo el entrehierro físico)	4790
Devanado principal (parte interior y exterior)	1806
Núcleo magnético toroidal	13172
	TOTAL=19768

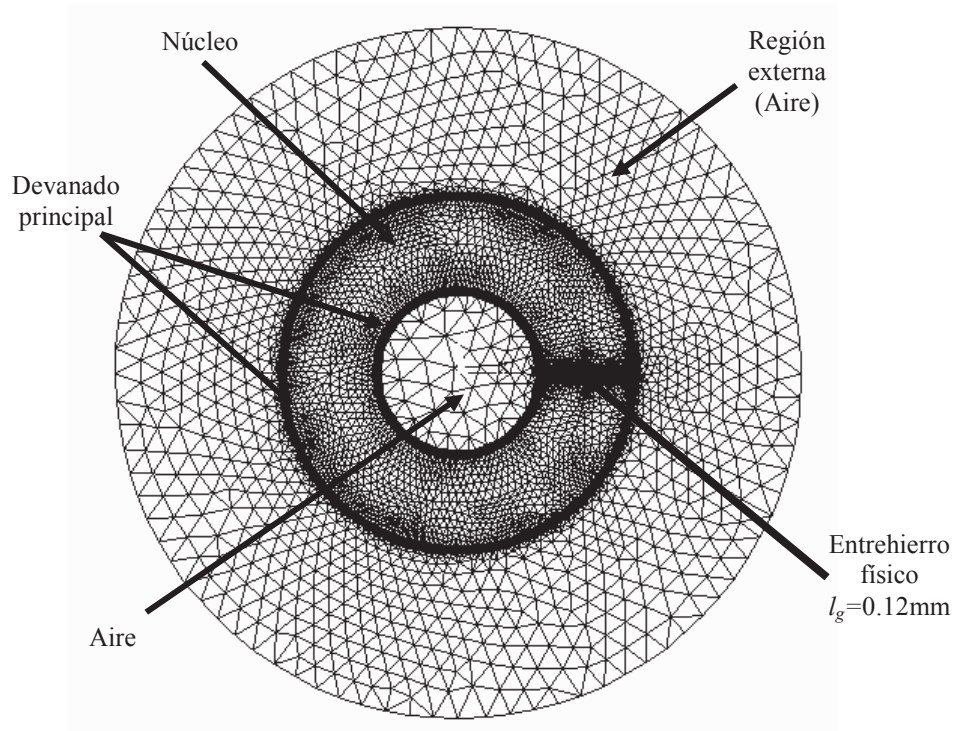


Figura 4.27 Malla de elementos finitos del modelo completo

En la Figura 4.28 se muestran los elementos finitos y los nodos localizados dentro del entrehierro físico en la trayectoria de la longitud media geométrica del núcleo toroidal.

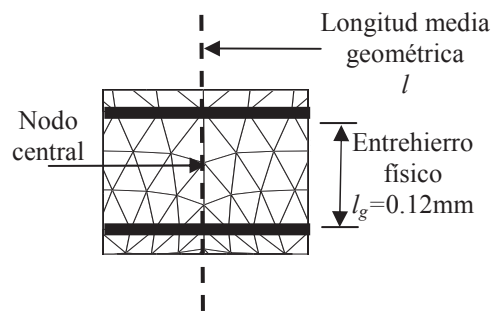


Figura 4.28 Elementos y nodos dentro del entrehierro físico en la longitud media geométrica

En total se utilizaron 19768 elementos finitos para formar la malla del modelo completo. El modelo cuenta con un total de 39625 nodos.

Se utilizó la misma intensidad de I_p calculada en (4.13) para el devanado principal, el valor del área de sección transversal A_c de la parte interna y externa del devanado principal cambia respecto a los valores de la Tabla 4.4 ya que el espacio donde está el entrehierro físico no tiene devanado principal, ya que se tuvo que cortar ese pequeño pedazo de devanado

principal. En la Tabla 4.7 se muestran los nuevos valores de las áreas de sección transversal A_c del devanado principal para el caso del entrehierro físico.

Tabla 4.7 Valores de las áreas de sección transversal del devanado principal

Partes del devanado principal	Área de sección transversal $A_c[\text{m}^2]$
Parte exterior	8.0473×10^{-4}
Parte interior	3.7277×10^{-4}

Después se calcularon los valores de la densidad de corriente J_{zp} para la parte exterior e interior del devanado principal utilizando las áreas de sección transversal A_c , Tabla 4.7, para una intensidad de $I_p=30.48\text{A}$.

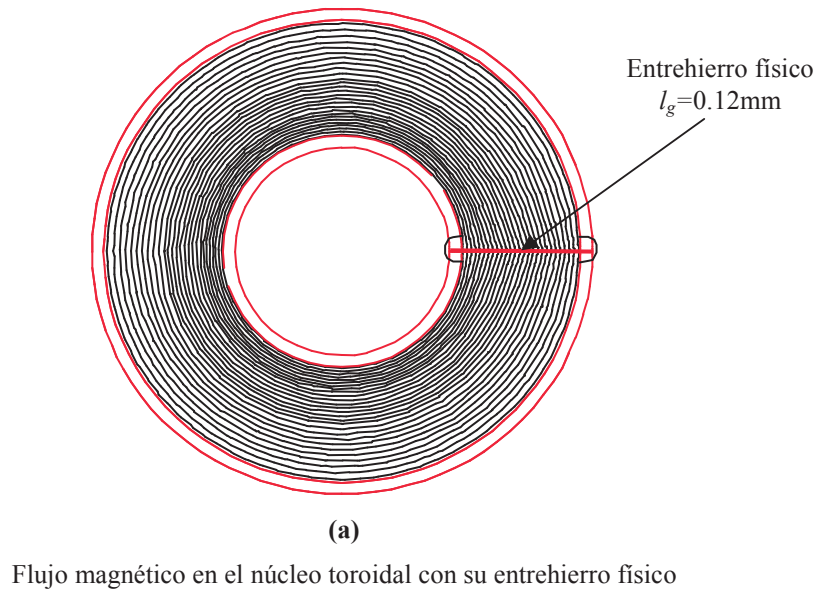
$$\text{Para la parte interior: } J_{zp} = -82731.97 \quad \text{A}\cdot\text{v}/\text{m}^2 \quad (4.51)$$

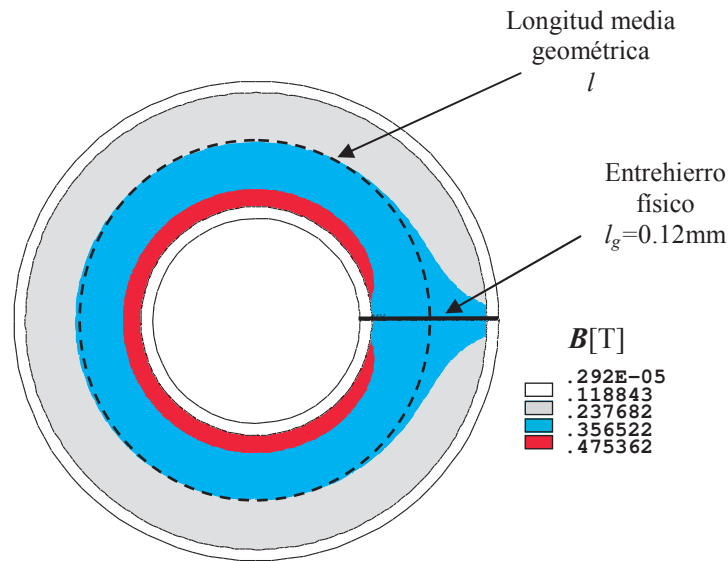
$$\text{Para la parte exterior: } J_{zp} = +38323.41 \quad \text{A}\cdot\text{v}/\text{m}^2 \quad (4.52)$$

La dirección de la densidad de corriente J_{zp} en el devanado principal se muestra en la Figura 4.14.

Después se aplicó la misma condición de frontera mostrada en la Figura 4.11 y se aplicó el método de Newton Raphson para resolver el problema no lineal con una tolerancia de 0.00001. Se utilizaron 4 iteraciones para obtener la solución.

En la Figura 4.29 se muestra la distribución del flujo magnético y la distribución de la densidad de flujo $\mathbf{B}$ en el núcleo toroidal con el entrehierro físico equivalente.





(b)

Densidad de flujo magnético en el núcleo toroidal con su entrehierro físico

Figura 4.29 Distribución del flujo magnético y de la densidad de flujo magnético en el núcleo toroidal con su entrehierro físico

Se puede ver en la Figura 4.29 que por muy pequeño que sea el entrehierro físico existe un cambio importante en el valor de la intensidad de campo H y en la densidad de flujo B dentro del núcleo toroidal. Se puede ver en la Figura 4.30 que el flujo Φ sufre el efecto de contorno magnético en ambos lados del núcleo toroidal por la presencia del entrehierro físico.

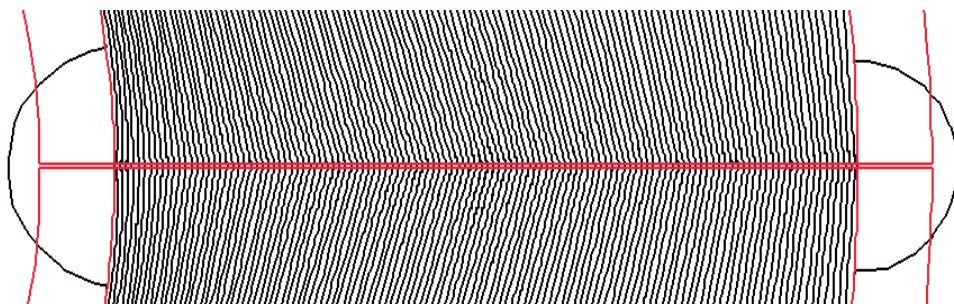


Figura 4.30 Efecto de contorno magnético

Después de solucionar el modelo se midió el valor de la densidad de flujo B en la longitud media geométrica l del núcleo toroidal. El valor de la densidad de flujo B fue medido en el

nodo mostrado en la Figura 4.31, este nodo está localizado en la longitud l dentro del núcleo toroidal.

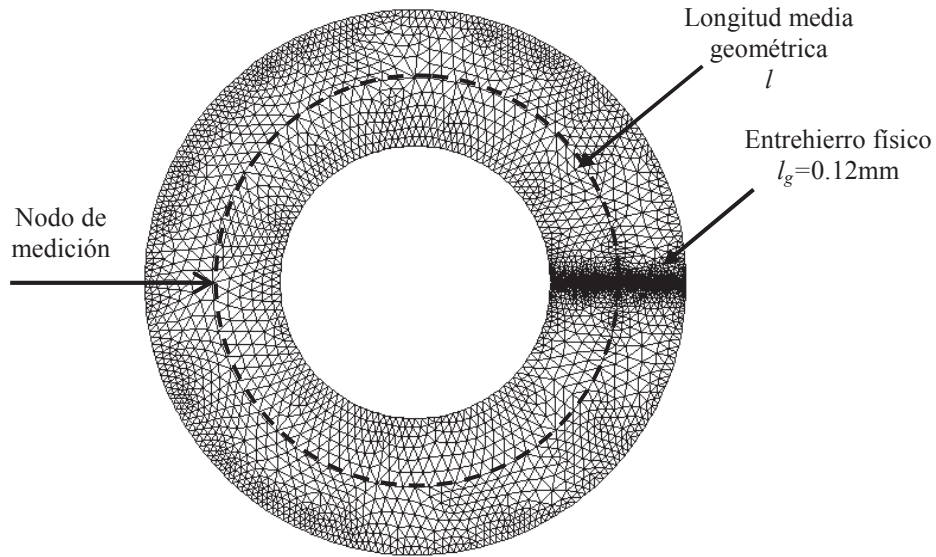


Figura 4.31 Nodo de medición del núcleo toroidal en el caso del entrehierro físico

El valor medido fue $H=24.8541 \text{ A}\cdot\text{v/m}$ y $B=0.251 \text{ T}$ que son valores un poco menores a $H_{ev}=25.4334 \text{ A}\cdot\text{v/m}$ y a $B_{ev}=0.25884 \text{ T}$ producidos por el entrehierro virtual con una intensidad $I_a=100 \text{ A}$, son resultados bastante buenos tomando en cuenta que en un núcleo con un entrehierro virtual no hay espacios de aire en la trayectoria del flujo, en cambio para un núcleo con un entrehierro físico si existe un pequeño espacio de aire en la trayectoria del flujo, esta situación cambia el valor de B y de H dentro del núcleo toroidal.

De esta manera se comprueba que el entrehierro físico sí modifica las características de magnetización del núcleo toroidal al igual que un entrehierro virtual, quiere decir que el entrehierro virtual creado con $I_a=100 \text{ A}$ dentro del núcleo toroidal funciona igual que un entrehierro físico de longitud $l_g=1.20 \times 10^{-4} \text{ m}$. Ambos realizan la misma función, uno con corrientes en los devanados de unos agujeros hechos en el núcleo y el otro mediante el corte de un pedazo de material del núcleo.

También se hicieron mediciones de H_g y B_g en el nodo central localizado dentro del entrehierro físico en la trayectoria de la longitud media geométrica l , Figura 4.28. Los valores que se obtuvieron son $H_g=208047 \text{ A}\cdot\text{v/m}$ y $B_g=0.26144 \text{ T}$. Se puede ver que el valor de H

cambia y es mucho más grande dentro del entrehierro físico que dentro del núcleo toroidal. El valor de H_g obtenido con la simulación de elemento finito es mayor que la H_g calculada en (4.50), de igual manera el valor de B_g obtenido con la simulación de elemento finito es menor que B_g (4.41).

Además se midieron los valores de fuerza magnetomotriz a lo largo de la trayectoria de la longitud media geométrica l para el núcleo toroidal y a través de la longitud l_g del entrehierro físico. El valor de fuerza magnetomotriz para el núcleo toroidal es $\mathcal{F}_n=5.87373935A\cdot v$ y el valor de fuerza magnetomotriz para el entrehierro físico es $\mathcal{F}_g=24.9656558A\cdot v$. El valor de la fuerza magnetomotriz total $\mathcal{F}_t=30.83939515A\cdot v$.

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos de las variables magnéticas para el núcleo toroidal con el entrehierro físico en forma analítica y mediante la simulación de elemento finito.

Tabla 4.8 Resultados obtenidos para el núcleo toroidal con el entrehierro físico de forma analítica y con la simulación de elemento finito

Variable	Cálculo analítico	Simulación de elemento finito	Porcentaje de error
$H_g[A\cdot v/m]$	205978.33	208047	0.99 %
$B_g[T]$	0.25884	0.26144	0.99 %
$\mathcal{F}_n[A\cdot v]$	5.9926	5.87373935	1.98 %
$\mathcal{F}_g[A\cdot v]$	24.8474	24.9656558	0.47 %
$\mathcal{F}_t[A\cdot v]$	30.84	30.83939515	0.0022 %

Los resultados del cálculo analítico y de la simulación de elemento finito son muy aproximados. Con los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

1. Se realizó el calculo de la longitud del entrehierro físico a partir de los resultados de la simulación de elemento finito del entrehierro virtual con $I_a=100A$.
2. Se ha propuesto una forma aproximada de calcular la longitud del entrehierro físico equivalente.
3. Se pudo comprobar que la simulación de elemento finito es correcta, comparando los resultados de la simulación de elemento finito con los resultados analíticos.

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados comparativos de las variables magnéticas obtenidas para las simulaciones de elemento finito del núcleo magnético toroidal con el entrehierro virtual inactivo, con el entrehierro virtual activo y su comparación con el cálculo analítico de la longitud del entrehierro físico equivalente.

Tabla 4.9 Resultados comparativos obtenidos de las simulaciones de elemento finito

Variable	Entrehierro virtual inactivo $I_a=0\text{A}$	Entrehierro virtual activo $I_a=100\text{ A}$	Entrehierro físico $l_g=1.2\times10^{-4}\text{ m}=0.12\text{mm}$
$B[\text{T}]$	1.634	0.25884	0.251 no pues
$H[\text{A}\cdot\text{v/m}]$	116.5	25.4334	24.8541
$I_p[\text{A}]$	30.84	30.84	30.83939515
$\mu[\text{H/m}]$	1.4026×10^{-2}	1.0177×10^{-2}	1.0098×10^{-2}

Variable	Entrehierro virtual activo $I_a=100\text{ A}$	Entrehierro físico $l_g=1.2\times10^{-4}\text{ m}=0.12\text{mm}$	Porcentaje de error
$B[\text{T}]$	0.25884	0.251	3 %
$H[\text{A}\cdot\text{v/m}]$	25.4334	24.8541	2.2 %
$I_p[\text{A}]$	30.84	30.83939515	0.0022 %
$\mu[\text{H/m}]$	1.0177×10^{-2}	1.0098×10^{-2}	0.77 %

De la Tabla 4.9 se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. Se aplicó prácticamente la misma intensidad I_p al devanado principal para el caso del entrehierro virtual activo y para el caso del entrehierro físico.
2. El valor de la densidad de flujo B_{ev} dentro del núcleo toroidal fuera del entrehierro virtual, con el entrehierro virtual activo es casi igual a la densidad de flujo B dentro del núcleo toroidal con el entrehierro físico.
3. El valor de la intensidad de campo H_{ev} dentro del núcleo toroidal fuera del entrehierro virtual, con el entrehierro virtual activo es casi igual a la intensidad de campo H dentro del núcleo toroidal con el entrehierro físico.
4. El valor de la permeabilidad μ para ambos casos es casi igual.
5. Finalmente se demostró que el entrehierro virtual funciona igual y mejor que un entrehierro físico. Ambos modifican las características de magnetización del núcleo toroidal.

4.7.3 Control de las características de la curva de magnetización

Mediante simulaciones de elemento finito se comprobó que se puede el control de las características de la curva de magnetización de un núcleo toroidal mediante un entrehierro virtual. Se realizaron 187 simulaciones de elemento finito donde se varió la intensidad de I_a en los devanados de los agujeros para diferentes intensidades de I_p en el devanado principal.

Para la prueba solo se tomaron en cuenta los primeros 18 puntos de la curva de magnetización, Tabla 4.1, ya que son los puntos donde el material no está saturado. El entrehierro virtual funciona cuando el núcleo magnético toroidal no está saturado; a partir de $B=1.8T$ el material del núcleo se satura.

Se crearon en la longitud media geométrica l del núcleo toroidal densidades de flujo B desde 0T a 1.7T en intervalos de 0.1T con diferentes intensidades de I_p . El valor de la intensidad de I_p está en función de cada una de las intensidades de campo H correspondientes a cada uno de los puntos de densidad de flujo B que se analizaron. El valor de la intensidad de I_p para cada punto analizado se calcula mediante (4.12). En la Tabla 4.10 se muestran los valores de las intensidades de I_p para cada uno de los 18 puntos analizados de la curva de magnetización.

Tabla 4.10 Valores de las corrientes de magnetización aplicadas al devanado principal

$I_p[A]$	$H[A\bullet v/m]$	$B[T]$	$I_p[A]$	$H[A\bullet v/m]$	$B[T]$
0	0	0	14.57	61.83	0.9
2.72	11.53	0.1	15.56	66.05	1.0
4.91	20.85	0.2	16.74	71.03	1.1
6.69	28.41	0.3	18.00	76.4	1.2
8.31	35.25	0.4	19.42	82.44	1.3
9.75	41.38	0.5	21.24	90.16	1.4
11.06	46.95	0.6	23.46	99.55	1.5
12.28	52.12	0.7	25.82	109.58	1.6
13.44	57.06	0.8	30.84	130.91	1.7

En la Tabla 4.11 se muestran los valores de las intensidades de I_p y sus respectivos valores de densidad de corriente J_{zp} calculadas mediante (4.8) para cada uno de los puntos analizados de la curva de magnetización.

Tabla 4.11 Valores de las densidades de corriente aplicadas al devanado principal

J_{zp} parte exterior [A•v/m ²]	J_{zp} parte interior [A•v/m ²]	I_p [A]	J_{zp} parte exterior [A•v/m ²]	J_{zp} parte interior [A•v/m ²]	I_p [A]
0	0	0	+18098.70	-39055.37	14.57
+3378.75	-7291.05	2.72	+19328.47	-41709.10	15.56
+6099.15	-13161.42	4.91	+20794.25	-44872.13	16.74
+8310.24	-17932.77	6.69	+22359.41	-48249.61	18.00
+10322.59	-22275.23	8.31	+24123.32	-52055.96	19.42
+12111.34	-26135.20	9.75	+26384.10	-56934.54	21.24
+13738.61	-29646.70	11.06	+29141.77	-62885.32	23.46
+15254.08	-32916.95	12.28	+32073.33	-69211.38	25.82
+16695.03	-36026.37	13.44	+38309.13	-82667.66	30.84

La intensidad de I_a aplicada a los devanados de los agujeros fue variada desde $I_a=0A$ hasta $I_a=100A$ en intervalos de 10A para cada uno de los 18 puntos analizados de la curva de magnetización. En la Tabla 4.12 se muestran los valores de las densidades de corriente J_{za} calculadas mediante (4.8). Para el cálculo de la densidad de corriente J_{za} en los devanados de los agujeros, el área de sección transversal A_c fue tomada de la Tabla 4.4.

Tabla 4.12 Valores de las densidades de corriente aplicadas a los devanados de los agujeros

I_a [A]	J_{za} [A•v/m ²]
0	±0
10	±3183192.742
20	±6366385.48
30	±9549578.22
40	±12732770.97
50	±15915963.71
60	±19099156.45
70	±22282349.20
80	±25465541.94
90	±28648734.68
100	±31831927.42

En la Figura 4.19 se muestran las direcciones de las densidades de corriente J_{zp} y J_{za} en los devanados del modelo para las simulaciones del control de la curva de magnetización.

Para cada punto de análisis ($\mathbf{H}$, $\mathbf{B}$) de la curva de magnetización original se varió la intensidad de I_a a través de los devanados de los agujeros y se midieron los valores de la nueva densidad de flujo $\mathbf{B}_{ev}$ y de la nueva intensidad de campo $\mathbf{H}_{ev}$ provocados por el entrehierro virtual en el nodo mostrado en la Figura 4.17.

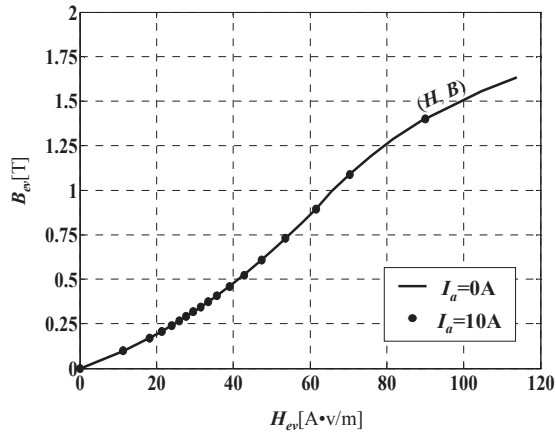
Para mostrar los resultados obtenidos con las simulaciones se hicieron varias gráficas donde se colocó la curva de magnetización original ($\mathbf{H}$, $\mathbf{B}$) que corresponde al caso donde $I_a=0A$ y sobre la misma curva se colocaron los nuevos puntos ($\mathbf{H}_{ev}$, $\mathbf{B}_{ev}$) obtenidos con las simulaciones de elemento finito para las diferentes intensidades de I_p e I_a , Figura 4.32(a), (c) y (e). En la Figura 4.32(b), (d) y (f) se muestran los respectivos rangos de operación que tiene el entrehierro virtual sobre la curva de magnetización original para las diferentes intensidades de I_a .

Se puede ver en la Figura 4.32 que al variar la intensidad de I_a en los devanados de los agujeros los valores de $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ de la curva de magnetización original sufren una disminución y aparecen nuevos puntos $\mathbf{H}_{ev}$ y $\mathbf{B}_{ev}$ sobre la misma curva original. Esta disminución depende de la intensidad de I_a . Con $I_a=10A$ los valores $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ de la curva original disminuyen muy poco, Figura 4.32(a), los nuevos puntos ($\mathbf{H}_{ev}$, $\mathbf{B}_{ev}$) que se originan por la presencia del entrehierro virtual activo siguen manteniendo la forma no lineal de la curva de magnetización. Aquí el efecto del entrehierro virtual con $I_a=10A$ no es tan notorio y se asemeja a tener un entrehierro físico con una pequeña longitud.

En cambio para $I_a=20A$ los valores de $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ de la curva de magnetización original disminuyen aun más, Figura 4.32(c), los nuevos puntos ($\mathbf{H}_{ev}$, $\mathbf{B}_{ev}$) que se originan por la presencia del entrehierro virtual ya no mantienen la no linealidad de la curva original, si no que ahora están situados en una región lineal de la curva original. Aquí el efecto del entrehierro virtual con $I_a=20A$ es más notorio y se asemeja a tener un entrehierro físico equivalente con una mayor longitud.

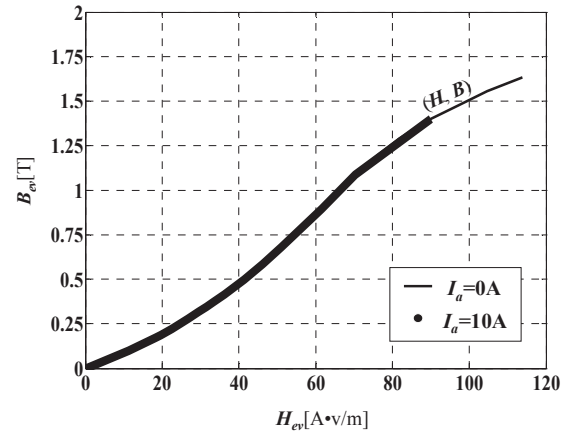
Para $I_a=50A$ los valores de $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ disminuyen a tal grado de que los nuevos puntos ($\mathbf{H}_{ev}$, $\mathbf{B}_{ev}$) originados por la presencia del entrehierro virtual están situados en la región más lineal de la curva original, Figura 4.32(e). El efecto del entrehierro virtual es muy notorio y se asemeja a tener un entrehierro físico con una gran longitud.

No se graficaron los casos para $I_a=60A$, $70A$, $80A$, $90A$ y $100A$ ya que son muy parecidos al caso de $I_a=50A$.



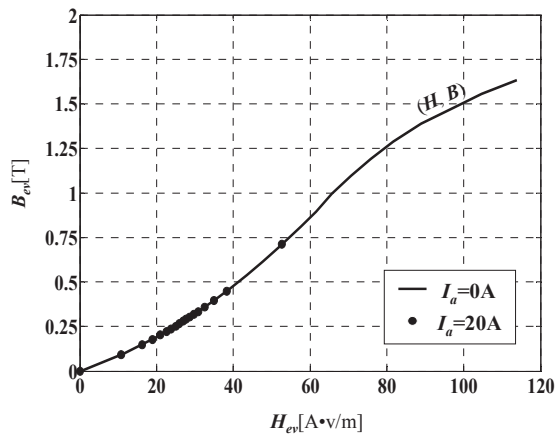
(a)

$I_a = 10A$



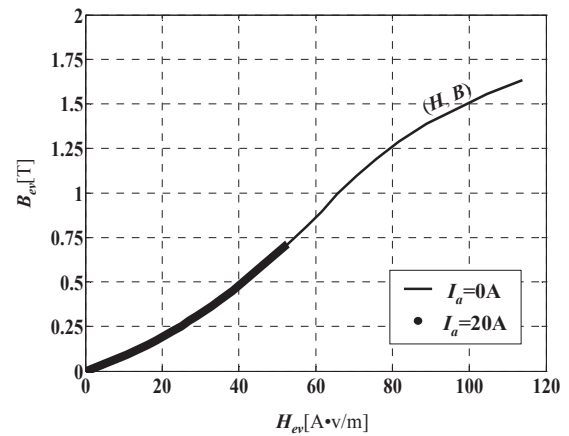
(b)

Rango: [$B=0T$ a $1.39T$] y [$H=0A\cdot v/m$ a $90A\cdot v/m$]



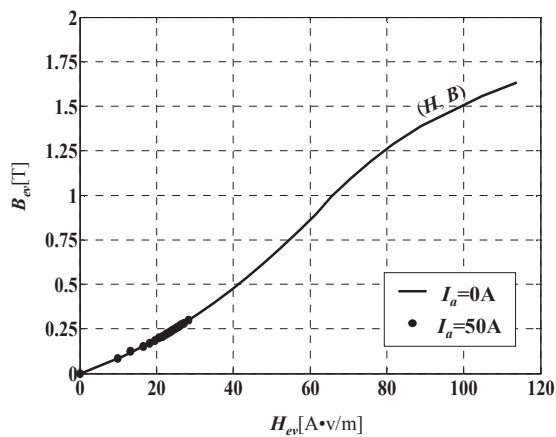
(c)

$I_a = 20A$



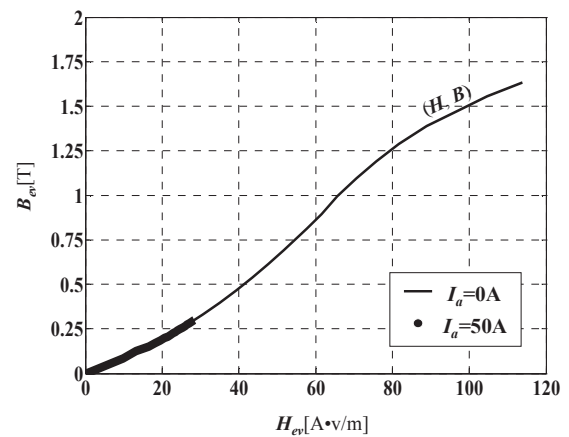
(d)

Rango: [$B=0T$ a $0.71T$] y [$H=0A\cdot v/m$ a $52.69A\cdot v/m$]



(e)

$I_a = 50A$



(f)

Rango: [$B=0T$ a $0.3T$] y [$H=0A\cdot v/m$ a $28.34A\cdot v/m$]

Figura 4.32 Resultados del control de las características de la curva de magnetización

Para todos los nuevos puntos (H_{ev} , B_{ev}) que se generan por medio del entrehierro virtual se modifica su permeabilidad en cada punto. Se modifica tanto su permeabilidad puntual como incremental.

Quiere decir que se puede tener el control de las características de la curva de magnetización original de un núcleo toroidal por medio de un entrehierro virtual, este control dependerá principalmente de la intensidad de I_a aplicada a los devanados de los agujeros. Dependiendo de la intensidad de I_a se podrá trabajar en diferentes partes de la curva de magnetización del núcleo toroidal, de tal manera que en lugar de trabajar con la no linealidad de la curva, cerca de la región saturada, se puede trabajar en las regiones más lineales de la curva de magnetización, lejos de la región saturada.

Las regiones de trabajo dentro de la curva de magnetización estarán dadas por la intensidad de I_a , estas regiones pueden ser marcadas por medio de rangos de operación sobre la curva de magnetización original. Si la intensidad de I_a es alta entonces el rango de operación del entrehierro virtual dentro de la curva de magnetización es pequeño, pero se está trabajando en la parte más lineal de la curva de magnetización. Mientras que para pequeñas intensidades de I_a el rango de operación del entrehierro virtual dentro de la curva de magnetización es mayor, pero aún se trabaja con la no linealidad de la curva de magnetización original. Se puede decir que con altas intensidades de I_a se está trabajando con un tramo lineal muy pequeño de la curva de magnetización y cuando la intensidad de I_a es pequeña se trabaja con un amplio tramo no lineal de la curva de magnetización, todo dependerá del material magnético utilizado en el núcleo toroidal, ya que cada material tiene una curva de magnetización diferente.

Ya se vio lo que pasa cuando se hacen variaciones de la intensidad de I_a . Ahora se verá cual es el comportamiento de la densidad de flujo B_{ev} dentro del núcleo magnético toroidal con la variación de la intensidad de I_p mientras se deja constante un valor de intensidad de I_a . En la Figura 4.33 se ilustra la secuencia del comportamiento de la densidad de flujo B_{ev} en el núcleo magnético toroidal para diferentes valores de I_p para los casos donde $I_a=10A$ y $100A$. La Figura 4.33(a) y la Figura 4.33(e) corresponden al caso donde $I_p=0A$. Se puede apreciar que las intensidades de I_a de $10A$ y de $100A$ producen alrededor de cada agujero un flujo magnético rotacional Φ_a los cuales producen una región de saturación en la zona de los agujeros, de esta forma se crea un entrehierro virtual dentro del núcleo toroidal. Además se

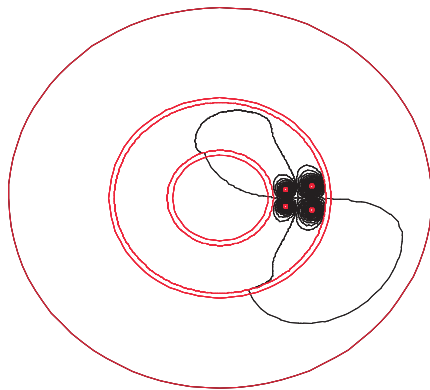
puede ver en la Figura 4.33(a) y (e) que no existe un flujo magnético Φ neto circulando completamente alrededor del núcleo magnético toroidal.

En la Figura 4.33(a) y (e) se puede ver que existe una línea de flujo Φ_a que sale del núcleo toroidal, esto ocurre porque existen alguna pequeña región con un alto grado de saturación en la zona de los agujeros donde la permeabilidad disminuye a tal grado que alguna línea de flujo Φ_a sale del núcleo, circula en el aire, pero regresa nuevamente, recordando que las líneas de flujo magnético deben ser siempre cerradas. El grado de la saturación en la zona de los agujeros es provocado por la intensidad de I_a aplicada a los devanados de los agujeros.

También se puede ver en la Figura 4.33(f) que ya existe la interacción entre el flujo Φ y los flujos Φ_a , pero ahora se ve que sale del núcleo una línea de flujo Φ , esto ocurre porque pasa por la misma región saturada localizada en la zona de los agujeros, como la región tiene una permeabilidad muy pequeña la línea de flujo Φ al pasar por ahí sale del núcleo, circula en el aire, pero regresa de nuevo, de esta manera se cumple que las líneas de flujo magnético siempre son cerradas.

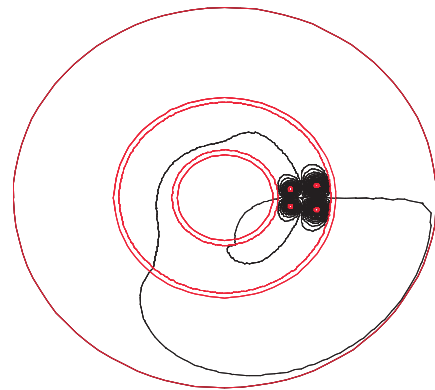
Además se puede ver en la Figura 4.33(d) y en la Figura 4.33(h) que cuando la intensidad de I_p es alta la región de saturación alrededor de los agujeros desaparece, ya que todo el núcleo toroidal se satura y por lo tanto el núcleo y el entrehierro virtual tienen aproximadamente la misma permeabilidad.

Cuando la intensidad de I_a es alta el efecto del entrehierro virtual es mucho más suave. Para el caso donde $I_a=10A$ el efecto del entrehierro virtual va desapareciendo más rápidamente comparado con el efecto del entrehierro virtual cuando $I_a=100A$.



(a)

$$I_p=0A, I_a=10A, B=0T, B_{ev}=4.30281 \times 10^{-6} T$$



(e)

$$I_p=0A, I_a=100A, B=0T, B_{ev}=8.64501 \times 10^{-6} T$$

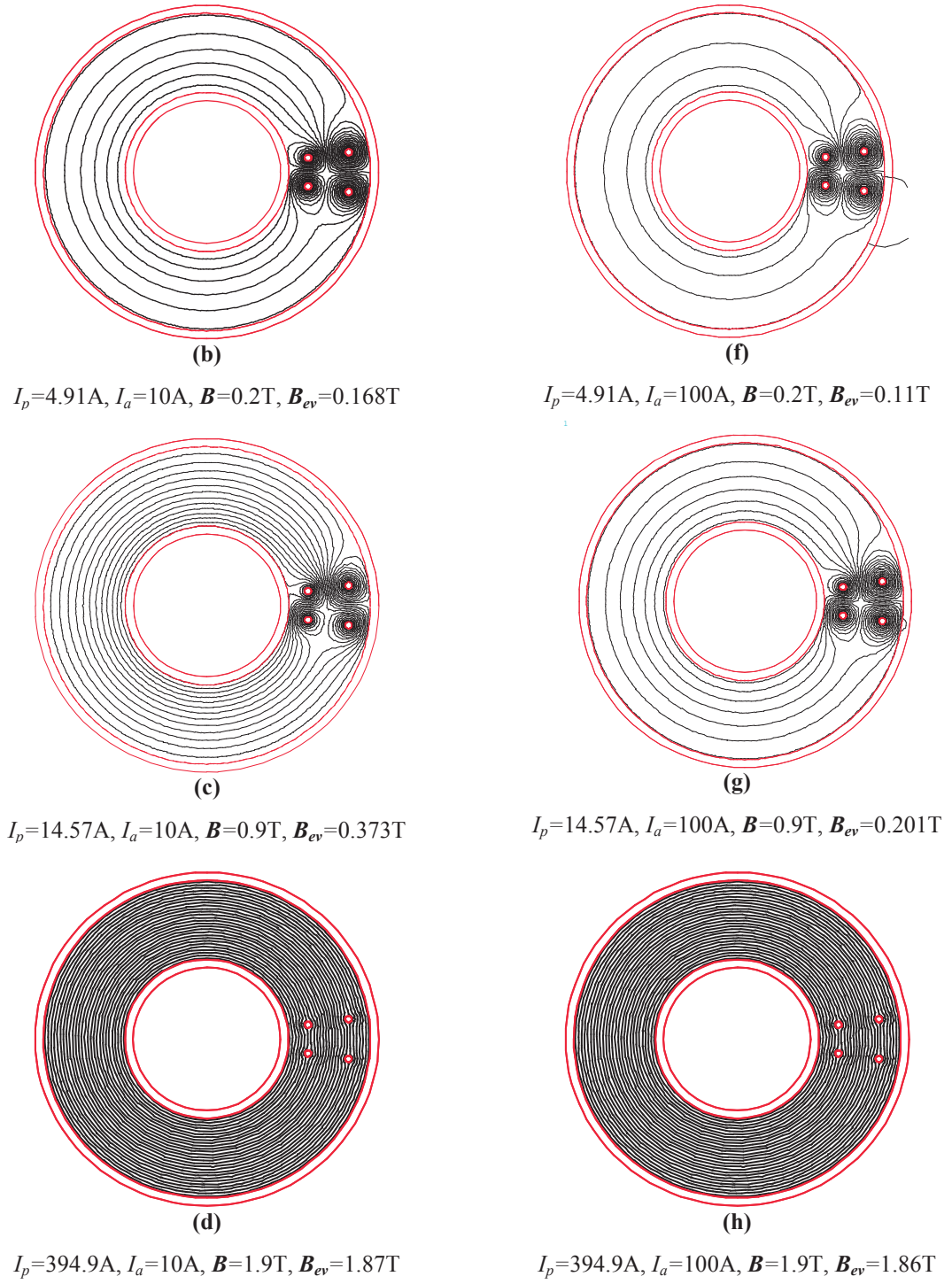


Figura 4.33 Densidad de flujo para $I_a=10\text{A}$ y 100A con diferentes intensidades de I_p

En la Figura 4.34 se muestran los resultados obtenidos para la densidad de flujo B_{ev} fuera del entrehierro virtual en el nodo mostrado en la Figura 4.17 mediante las variaciones de la

intensidad de I_p e I_a . La Figura 4.34 es una gráfica en tres dimensiones que muestra como se realiza el control de la densidad de flujo B_{ev} por medio de la intensidad de I_a e I_p .

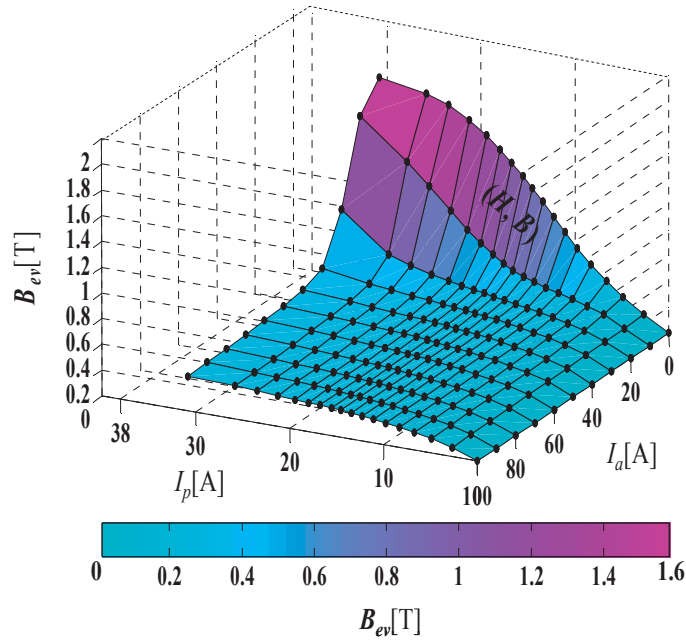


Figura 4.34 Control de la densidad de flujo fuera del entrehierro virtual

Los valores de H y de B de la curva de magnetización original para las diferentes intensidades de I_p corresponde en la Figura 4.34 al caso donde $I_a=0A$ (región marcada con (H, B)).

Cada punto dentro de la gráfica es un valor de densidad de flujo B_{ev} para las diferentes intensidades de I_p e I_a . Se puede observar que al aplicar una intensidad de I_p más alta que la intensidad de I_a se pueden obtener pequeños valores de B_{ev} (regiones menos oscuras) fuera del entrehierro virtual, un ejemplo para este caso se muestra en la Figura 4.33(c) donde $B_{ev}=0.373T$. En este caso el valor de la permeabilidad promedio μ_{sat} en el entrehierro virtual provocada por la intensidad de I_a es más pequeña que la permeabilidad fuera del entrehierro virtual, lo que provoca que la densidad de flujo original $B=0.9T$ fuera del entrehierro virtual disminuya provocando una nueva densidad de flujo $B_{ev}=0.373T$.

También se observa que al aplicar una intensidad de I_p más pequeña que la intensidad de I_a se puede obtener valores más pequeños de B_{ev} (regiones menos oscuras) fuera del entrehierro virtual, un ejemplo para este caso se muestra en la Figura 4.33(b) donde $B_{ev}=0.168T$ y en la Figura 4.33(f) donde $B_{ev}=0.11T$. Para los dos casos existe una reducción

de la permeabilidad promedio μ_{sat} en el entrehierro virtual, hay una mayor disminución para el caso de $I_a=100A$ ya que esta intensidad es más alta que $I_a=10A$ por lo que la permeabilidad μ_{sat} que se presenta en la zona de los agujeros es mucho más baja para $I_a=100A$ y un poco mayor para $I_a=10A$, ambas permeabilidades μ_{sat} son menores que la permeabilidad fuera del entrehierro virtual, por esta razón existe una disminución para la densidad de flujo $B=0.2T$ y aparece una nueva densidad de flujo $B_{ev}=0.168T$ fuera del entrehierro virtual para el caso de la Figura 4.33(b) y para el caso de la Figura 4.33(f) hay una mayor disminución para la densidad de flujo $B=0.2T$ y aparece una nueva densidad de flujo $B_{ev}=0.11T$. El efecto del entrehierro virtual es más notorio para el caso de $I_a=100A$, Figura 4.33(f). Los mismos efectos se pueden ver en la Figura 4.33(c) y (g).

En dado caso que la intensidad de I_p sea más alta que la intensidad de I_a se obtienen valores altos de B_{ev} fuera del entrehierro virtual, un ejemplo para este caso se muestra en la Figura 4.33(d) donde la densidad de flujo original es $B=1.9T$ y disminuye a una nueva densidad de flujo $B_{ev}=1.87T$, para el caso donde $I_a=10A$ y en la Figura 4.33(h) donde la densidad de flujo original es $B=1.9T$ y disminuye a una nueva densidad de flujo $B_{ev}=1.86T$, para el caso donde $I_a=100A$, para estos dos casos el núcleo toroidal está completamente saturado, recordando que a partir de $B=1.8T$ el material del núcleo toroidal se satura. El efecto del entrehierro virtual desaparece para los dos casos donde el punto de trabajo esta saturado, $B=1.9T$. En la Figura 4.33(d) y (h) no se ve el entrehierro virtual o la región de saturación, la causa de esto es que el núcleo toroidal está completamente saturado por lo que la permeabilidad fuera del entrehierro virtual es pequeña y es aproximadamente igual a la permeabilidad del entrehierro virtual por lo que el efecto del entrehierro virtual desaparece. Este caso queda fuera de la gráfica de la Figura 4.34 ya que es un valor saturado, $B=1.9T$. Por lo tanto se concluye que el entrehierro virtual solo trabaja sobre los puntos no saturados de la curva de magnetización, todo dependerá las características de la curva de magnetización.

Observe que si $I_a=0A$ y la intensidad de I_p es muy alta entonces la densidad de flujo B_{ev} fuera del entrehierro virtual tiene un valor muy alto (punto situado en lo más alto de la gráfica, Figura 4.34), quiere decir que el entrehierro está inactivo y que el núcleo toroidal está saturado.

Ahora si $I_p=0A$ y existe una cierta intensidad de I_a entonces el valor de la densidad de flujo B_{ev} fuera del entrehierro virtual es muy pequeña, casi cero, (puntos situados en la parte

más baja de la gráfica) ya que solamente el entrehierro virtual está activo y no hay flujo Φ neto circulando por el núcleo toroidal, un ejemplo para este caso es el mostrado en la Figura 4.33(a) donde $B_{ev}=4.30281 \times 10^{-6}$ T y en la Figura 4.33(e) donde $B_{ev}=8.64501 \times 10^{-6}$ T. En ambos casos el valor de la densidad de flujo B_{ev} es muy pequeño.

Si existe un control de la densidad de flujo B de la curva de magnetización original fuera del entrehierro virtual por medio de un entrehierro virtual, también existe un control sobre la intensidad de campo H fuera del entrehierro virtual para cada densidad de flujo B por medio del uso de un entrehierro virtual. Esto se asemeja a tener un verdadero entrehierro físico.

4.7.4 Control del grado de saturación del entrehierro virtual

Para tener el control del grado de saturación es necesario variar la intensidad de I_a en los devanados de los agujeros, para esto se realizaron variaciones de la intensidad de I_a desde 10A hasta 100A en intervalos de 10A, en estas pruebas $I_p=0$ A. Los valores de las densidades de corriente J_{za} aplicadas a los devanados de los agujeros se muestran en la Tabla 4.9. En la Figura 4.35 se muestran las direcciones de las densidades de corriente J_{za} en los devanados de los agujeros utilizadas en las pruebas de saturación.

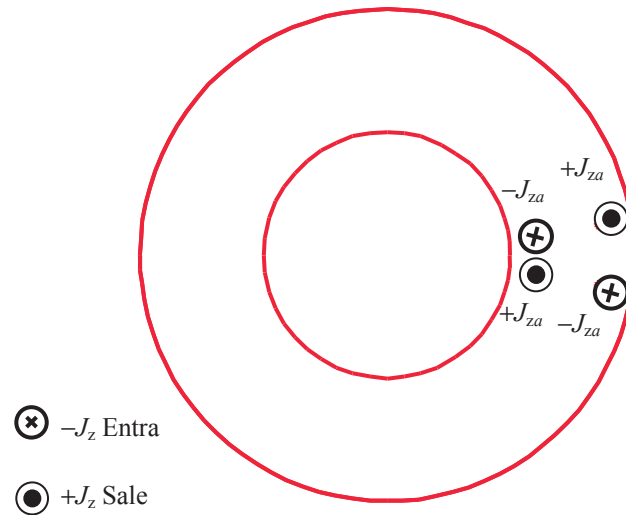
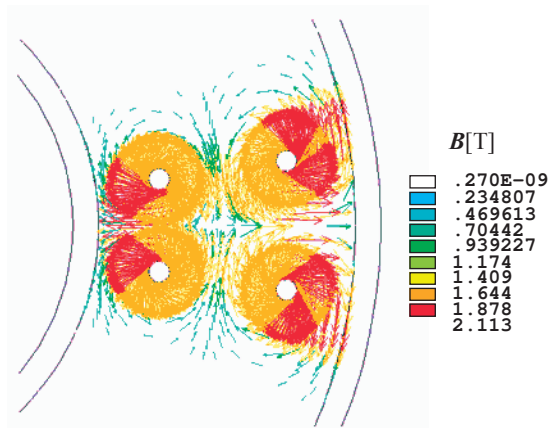
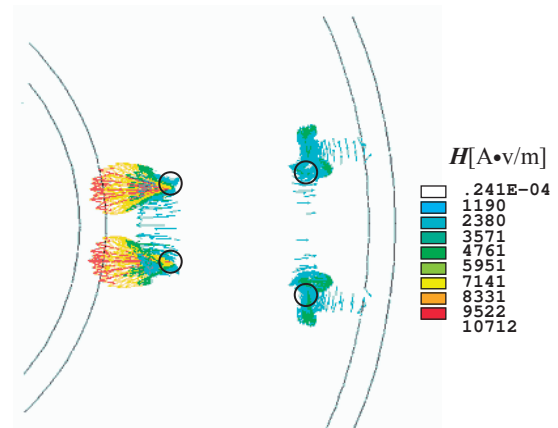


Figura 4.35 Dirección de las densidades de corriente para las pruebas de saturación

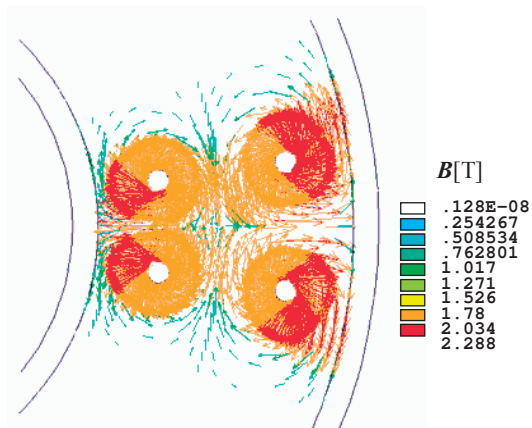
En la Figura 4.36 se muestran las distribuciones vectoriales de H y B dentro del entrehierro virtual para $I_a=10$ A y 100A.



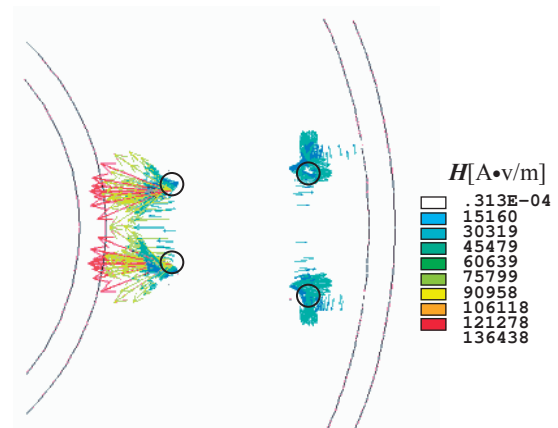
(a)
Distribución de la densidad de flujo
para $I_a=10A$



(b)
Distribución de la intensidad de campo
para $I_a=10A$



(c)
Distribución de la densidad de flujo
para $I_a=100A$



(d)
Distribución de la intensidad de campo
para $I_a=100A$

Figura 4.36 Distribución vectorial de la densidad de flujo y de la intensidad de campo dentro del entrehierro virtual para diferentes intensidades de corriente aplicadas a los devanados de los agujeros

En la Figura 4.36(a) y (c) se puede ver que la distribución de la densidad de flujo B es en forma axial y radial, en otras palabras su distribución es rotacional alrededor de cada agujero. Además en la Figura 4.36(b) y (d) se puede ver que la intensidad de campo H se acumula entre los agujeros superiores e inferiores de tal forma que la mayor intensidad de campo H esta entre ellos.

En la Figura 4.36(b) y (d) se puede ver que es mayor la intensidad de campo H para $I_a=100A$ comparada con la intensidad de campo H para $I_a=10A$. Para el caso de $I_a=10A$ la intensidad de campo H tiene un valor entre los agujeros que va de $8331A\cdot v/m$ a $10712A\cdot v/m$, para este caso $H_{sat}=10712A\cdot v/m$. Para el caso de $I_a=100A$ la intensidad de campo H tiene un valor entre los agujeros que va de $106118A\cdot v/m$ a $136438A\cdot v/m$, para este caso $H_{sat}=136438A\cdot v/m$.

De igual manera es mayor la densidad de flujo B alrededor de los agujeros para $I_a=100A$ compara con la densidad de flujo B para $I_a=10A$. Para el caso de $I_a=10A$ la densidad de flujo B tiene un valor alrededor de los agujeros que va de $1.644T$ a $2.113T$, para este caso $B_{sat}=2.113T$. Para el caso de $I_a=100A$ la densidad de flujo B tiene un valor alrededor de los agujeros que va de $1.78T$ a $2.288T$, para este caso $B_{sat}=2.288T$.

En la Figura 4.37 se muestran los valores de H_{sat} y de B_{sat} para las variaciones de I_a desde $10A$ hasta $100A$.

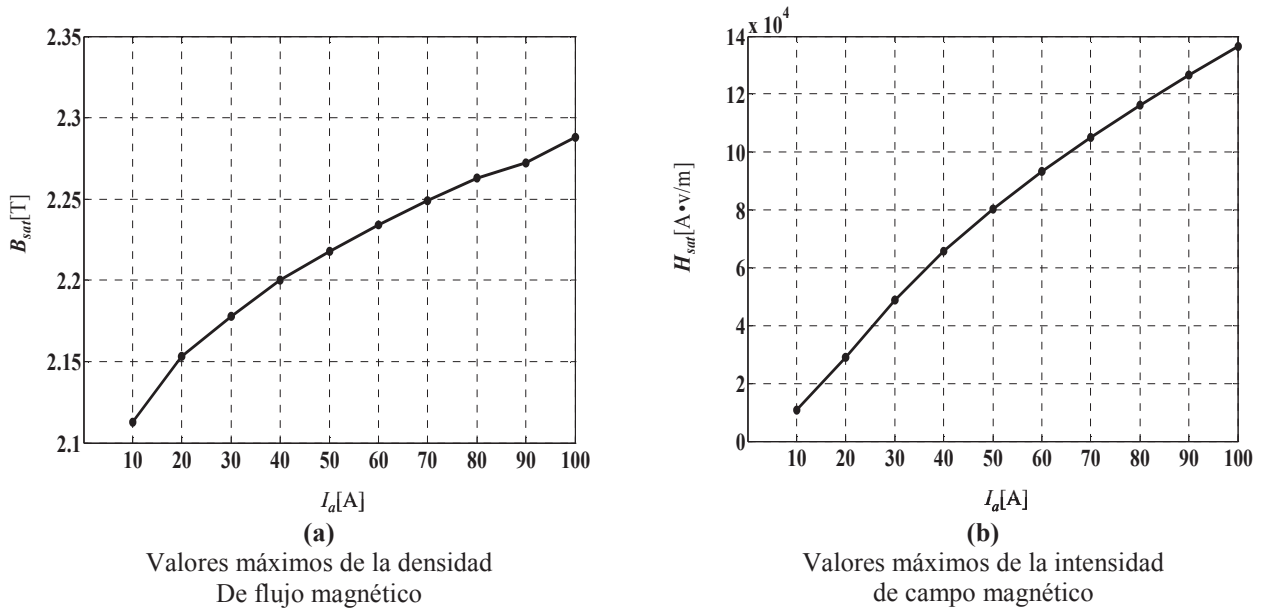


Figura 4.37 Control de los valores máximos de la densidad de flujo y de la intensidad de campo dentro del entrehierro virtual mediante diferentes intensidades de corriente en los devanados de los agujeros

De la Figura 4.37 se puede ver que al aumentar la intensidad de I_a los valores de H_{sat} y de B_{sat} también aumentan, quiere decir que el incremento de la intensidad de I_a contribuye a una

mayor saturación del entrehierro virtual. De esta manera se tiene un control del grado de saturación del entrehierro virtual por medio de la intensidad de I_a . Se puede ver en la Figura 4.37(a) y (b) que la relación entre la intensidad de I_a con la intensidad de campo H_{sat} y con la densidad de flujo B_{sat} no es lineal.

Después de las pruebas de saturación se calcularon los valores de la permeabilidad promedio μ_{sat} usando (3.1) para cada uno de los valores de H_{sat} y B_{sat} calculados en la Figura 4.37. Los resultados obtenidos para la permeabilidad promedio μ_{sat} se muestran en la Figura 4.38.

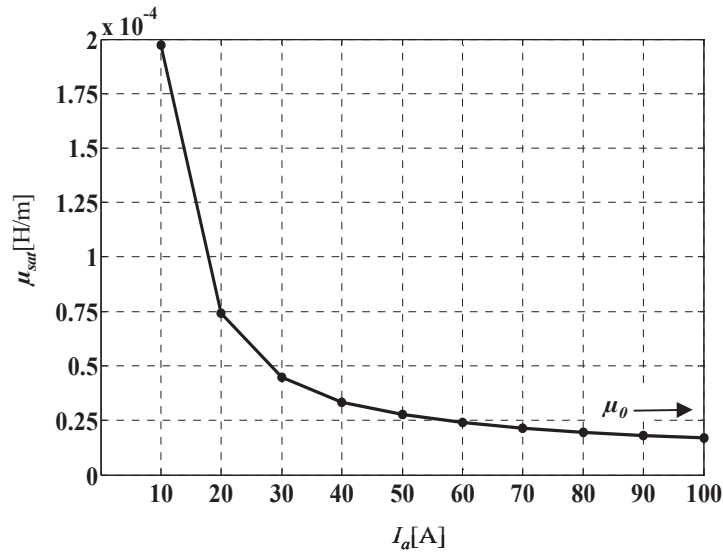


Figura 4.38 Control de la permeabilidad promedio dentro del entrehierro virtual mediante diferentes intensidades de corriente en los devanados de los agujeros

En la Figura 4.38 se puede ver que mediante altas intensidades de I_a se provoca una mayor disminución de la permeabilidad promedio μ_{sat} dentro del entrehierro virtual. Observe que con altas intensidades de I_a el valor de μ_{sat} tiende a tener un valor muy cercano al de μ_0 . Con una intensidad de $I_a=100$ A se obtuvo un valor de permeabilidad promedio $\mu_{sat}=1.6769 \times 10^{-5}$ H/m el cual es muy pequeño y es muy cercano al valor de la permeabilidad del vacío $\mu_0=1.2566 \times 10^{-6}$ H/m. Con los resultados obtenidos se puede concluir que se puede tener el control del valor de la permeabilidad del entrehierro virtual mediante la intensidad de I_a .

Finalmente en la Figura 4.38 se puede ver que la relación entre la intensidad de I_a y la permeabilidad promedio μ_{sat} no es lineal.

4.7.5 Control del tamaño del entrehierro virtual

Cuando se aplica una intensidad de I_a en los devanados de los agujeros se produce una región de saturación magnética en la zona de los agujeros, que provoca un cambio en la permeabilidad en dicha zona que da lugar a la creación del entrehierro virtual. El tamaño del entrehierro virtual l_{ev} depende de la intensidad de I_a en los devanados de los agujeros.

Se realizaron dos pruebas para comprobar que el tamaño del entrehierro virtual l_{ev} depende de la intensidad de I_a . En estas pruebas se aplicó una intensidad $I_a=1A$ e $I_a=100A$ en los devanados de los agujeros. Solo se necesitaron los devanados de los agujeros, el devanado principal no fue necesario. En la Figura 4.35 se muestran las direcciones de las densidades de corriente J_{za} en los devanados de los agujeros. Los valores de las densidades de corriente J_{za} se calcularon mediante (4.8) para $I_a=1A$ e $I_a=100A$. Para el cálculo del valor de la densidad de corriente J_{za} , el valor de A_c de los devanados de los agujeros fue tomado de la Tabla 4.4.

Para el caso donde $I_a=1A$ el valor de la densidad de corriente J_{za} en los devanados de los agujeros es de:

$$J_{za} = \pm 318319.27 \quad A \cdot v/m^2 \quad (4.53)$$

Y para el caso donde $I_a=100A$ el valor de la densidad de corriente J_{za} en los devanados de los agujeros es de, Tabla 4.12:

$$J_{za} = \pm 31831927.42 \quad A \cdot v/m^2 \quad (4.54)$$

En la Figura 4.39 se muestra el tamaño del tamaño entrehierro virtual para una intensidad $I_a=1A$ y para una intensidad $I_a=100A$.

En la Figura 4.39(a) se muestra la distribución de la densidad de flujo B en la zona de los agujeros para el caso de $I_a=1A$ en los devanados de los agujeros. La región de saturación máxima está localizada en las cercanías de los agujeros, alrededor de ellos. El valor de la densidad de flujo B varía aproximadamente de 0.19T en la región más alejada de los agujeros hasta un valor de 1.761T en las cercanías de los agujeros. El tamaño del entrehierro virtual l_{ev} es pequeño ya que la intensidad de I_a es igualmente pequeña; esto equivale a tener el mismo núcleo magnético toroidal interrumpido por un entrehierro físico con una longitud muy pequeña.

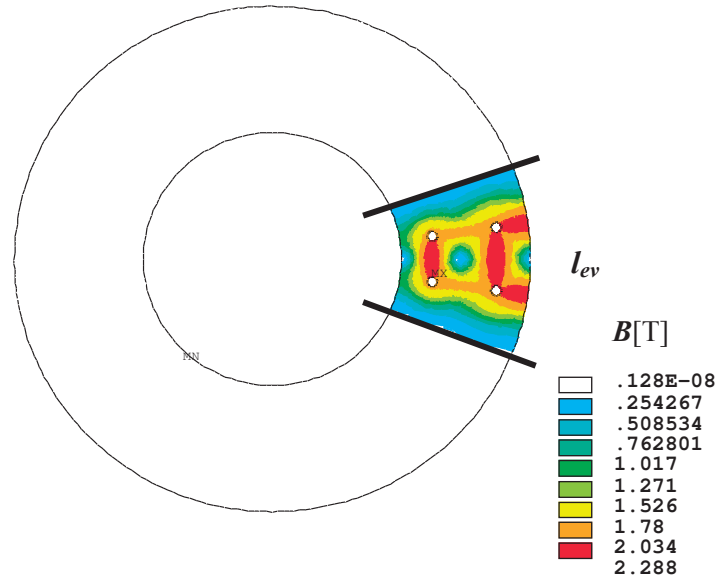
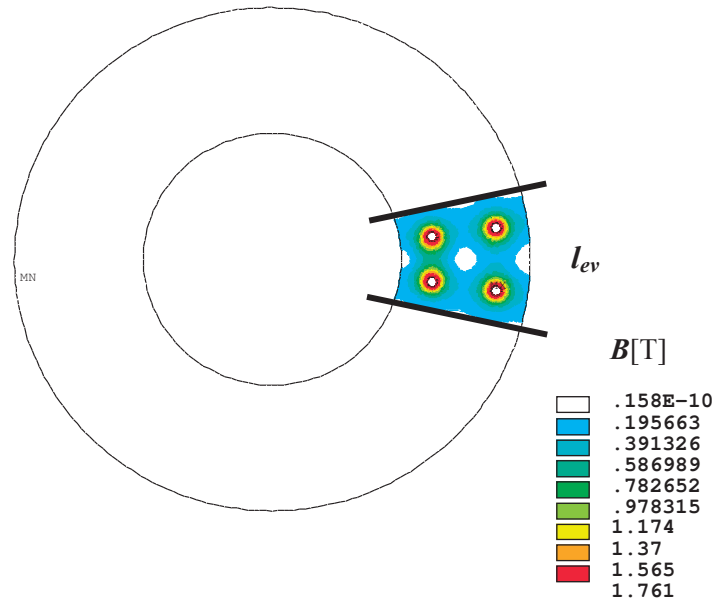


Figura 4.39 Tamaño del entrehierro virtual con diferentes intensidades de corriente en los devanados de los agujeros

En la Figura 4.39(b) se muestra la distribución de la densidad de flujo B en la zona de los agujeros para el caso de $I_a=100A$ en los devanados de los agujeros. La región de saturación

máxima sigue estando localizada en las cercanías de los agujeros. El valor de la densidad de flujo B varía aproximadamente de 0.25T en la región más alejada de los agujeros hasta un valor de 2.288T en las cercanías de los agujeros. El tamaño del entrehierro virtual l_{ev} es grande ya que la intensidad de I_a es alta; esto equivale a tener el mismo núcleo magnético toroidal interrumpido por un entrehierro físico con una longitud grande.

Se puede hacer una comparación de la intensidad de I_a contra el tamaño o longitud de un entrehierro físico.

- Con altas intensidades de I_a se tendría un entrehierro físico con una gran longitud.
- Con pequeñas intensidades de I_a se tendría un entrehierro físico con una pequeña longitud.

Mediante estas pruebas se puede concluir lo siguiente:

1. El tamaño del entrehierro virtual se puede controlar mediante la intensidad de I_a .
2. El grado de saturación del entrehierro virtual depende de la intensidad de I_a .
3. La permeabilidad dentro del entrehierro virtual depende de la intensidad de I_a .
4. Un entrehierro virtual equivale a tener un cierto entrehierro físico.

4.8 Posibles aplicaciones

La tecnología del entrehierro virtual ha sido usada para controlar y reducir las corrientes avalancha o corrientes *inrush* en transformadores monofásicos tipo núcleo [Molcrette et al. 1998] y para construir un nuevo prototipo de máquina de soldar de CA que solde con calidad de CD [Napieralska y Lecointe 2002]. En estas aplicaciones fue inyectada una corriente de CD en los devanados de los agujeros.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede ver que al controlar las características de la curva de magnetización se podrían diseñar y construir inductores y reactores variables en núcleos magnéticos toroidales. También se podrían diseñar y construir transformadores toroidales de distribución. En todas estas posibles aplicaciones se inyectaría una corriente de CD en los devanados de los agujeros.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones

En este trabajo se obtuvieron muchos resultados interesantes. Primeramente se debe mencionar que el uso del programa comercial ANSYS fue muy útil ya que nos permitió hacer pruebas y se obtuvieron buenos resultados. Además se pudo comprobar que mediante el uso del método del elemento finito se puede realizar un buen estudio de la tecnología del entrehierro virtual dada la compleja distribución de campo magnético.

Se vio que efectivamente el entrehierro virtual es creado por medio de corrientes de CD en los devanados de los agujeros. Se comprobó que el entrehierro virtual es creado por medio de saturación en la zona de los agujeros.

Se comprobó la existencia de un entrehierro virtual dentro de un núcleo magnético toroidal y se pudo ver que la distribución de la densidad de flujo en la zona de los agujeros es muy compleja. También se comprobó que mediante un entrehierro virtual se trabaja en dos puntos distintos sobre la misma curva de magnetización del núcleo toroidal. Cuando el entrehierro virtual está activo se está trabajando en la región saturada de la curva de magnetización, quiere decir que dentro del entrehierro virtual existen altos valores de intensidad de campo y de densidad de flujo que provocan una disminución de la permeabilidad en el interior del entrehierro virtual lo cual modifica las características de magnetización fuera del entrehierro virtual en el núcleo toroidal. Al modificar las características de la intensidad de campo y de la densidad de flujo fuera del entrehierro virtual aparece un nuevo punto sobre la curva de magnetización del núcleo toroidal el cual tiene valores más pequeños de intensidad de campo y de densidad de flujo, quiere decir que mediante un entrehierro virtual se tiene el control de cualquier punto no saturado de la curva de magnetización.

Se comprobó que efectivamente el entrehierro virtual funciona igual que un entrehierro físico, ambos modifican las características de magnetización de los núcleos donde están localizados.

Además mediante simulaciones de elemento finito se ha demostrado como la tecnología del entrehierro virtual puede ser aplicada para controlar las características de magnetización o de la curva de magnetización de un núcleo magnético toroidal. Se comprobó que mediante la variación de la corriente de CD en los devanados de los agujeros se puede tener un control completo de las características de magnetización fuera del entrehierro virtual. Los valores originales de cada uno de los puntos no saturados de la curva de magnetización fueron modificados por medio del entrehierro virtual con diferentes intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros. Al ir aumentando la intensidad de corriente de CD en los devanados de los agujeros para cada punto de la curva de magnetización se pudo ver que aparecen nuevos puntos sobre la misma curva pero con un valor menor. Quiere decir que se puede tener el control completo de las características de magnetización fuera del entrehierro virtual por medio del entrehierro virtual activo. Además se pudo ver que se puede tener un cierto rango de operación de la curva de magnetización del núcleo toroidal mediante un entrehierro virtual formado por las diferentes intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros. Se puede trabajar en regiones muy cercanas o muy alejadas de la región no saturada de la curva de magnetización mediante las diferentes intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros. Se comprobó que con altas intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros se trabaja en una región no saturada de la curva de magnetización y se trabaja en una parte mucho más lineal, y mediante pequeñas intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros se trabaja en una región muy cercana a la región saturada pero se mantiene la no linealidad de la curva de magnetización. Este rango de operación del entrehierro virtual dependerá de la intensidad de corriente de CD en los devanados de los agujeros.

Después se comprobó que el grado de saturación del entrehierro virtual depende de la intensidad de corriente de CD en los devanados de los agujeros. Los valores de la intensidad de campo, de la densidad de flujo y de la permeabilidad del entrehierro virtual dependen de la intensidad de corriente en los devanados de los agujeros. Además se vio que efectivamente la mayor saturación está entre los agujeros y alrededor de ellos. Se vio que mediante altas

intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros la saturación aumenta provocando que la permeabilidad disminuya a tal grado de tener una permeabilidad muy cercana a la del vacío dentro del entrehierro virtual. Con altas intensidades de corriente de CD en los devanados de los agujeros que se forma un verdadero espacio de aire virtual en la zona de los agujeros.

También se comprobó que la distribución de la densidad de flujo en la zona de los agujeros es muy compleja y por eso se justifica el uso en este trabajo del método del elemento finito para su estudio.

Se comprobó que el tamaño del entrehierro virtual depende de la intensidad de corriente de CD en los devanados de los agujeros.

Finalmente al poder controlar las características de magnetización de los núcleos magnéticos mediante un entrehierro virtual se abren muchas posibilidades para el diseño de nuevos equipos electromagnéticos.

5.2 Trabajos futuros

- Excitar con CA los devanados de los agujeros.
- Diseño y construcción de inductores y reactores variables.
- Aplicaciones a la construcción de transformadores toroidales de distribución.
- Controlar la corriente de CD en los devanados de los agujeros utilizando electrónica de potencia.

Referencias

[Konrad y Brudny 2005] A. Konrad y J.F. Brudny, “An Improved Method for Virtual Air Gap Length Computation”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 10, págs.4051 – 4053, October 2005.

[Molcrette et al. 1998] V. Molcrette, J.L. Kotny, J.P. Swan y J.F. Brudny, “Reduction of Inrush Current in Single Phase Transformer using Virtual Air Gap Technique”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 4, págs.1192 – 1194, July 1998.

[Galván et al. 2006] J. O. Galván, Marco A. Venegas y Salvador Magdaleno, “La Historia del Transformador”, IEEE RVP – AI/2006 – TRO – 09 – Acapulco, Julio 2006.

[Napieralska y Lecointe 2002] Ewa Napieralska y J. P. Lecointe, “The active control of the leakage reluctance in welding transformers”, IEEE RVP – AI/02 – A1 – 08 – Acapulco, July 2002.

[Arango 2005] Jesús M. B. Arango, Distribución de voltaje en aisladores de suspensión utilizando el Método de Elemento Finito, Tesis para obtener grado de Maestro en Ciencias, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico, 2005.

[Balanis 1989] Constantine A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, New York: John Wiley and Sons, 1989.

[Hayt 1991] William Hayt, Teoría Electromagnética, México: Mc. Graw Hill Interamericana de México. S.A. de C.V, 1991.

[Jin 1993] Jianming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, New York: John Wiley and Sons, 1993.

[Kulkarni y Khaparde 2004] S.V. Kulkarni y S.A. Khaparde, Transformer Engineering: Design and Practice, New York: Mercel Dekker, First Edition, 2004.

[McLyman 1978] Colonel Wm. T. McLyman, Transformer and inductor design handbook, New York: Mercel Dekker, Second Edition, 1978.

[Matsch 1990] Leander W. Matsch, Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas, México D.F: Ediciones Alfaomega, S.A. de C.V, 1990.

[Sadiku 1998] Matthew N.O. Sadiku, Elementos de Electromagnetismo, México D.F: Compañía editorial continental (CECSA), Segunda Edición, 1998.

[Sadiku 2001] Matthew N.O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, Boca Raton: CRC Press, Second Edition, 2001.

[Pérez 2001] Pedro Avelino Pérez, Transformadores de distribución, Teoría, cálculo, construcción y pruebas, México D.F: Editorial Reverté, S.A., Segunda Edición, 2001.

[Rojas 1990] Carlos Pérez Rojas, Cálculo de Campos Magnéticos en Máquinas Eléctricas utilizando el Método del Elemento Finito, Trabajo que para obtener el Título de Ingeniero Electricista, U.M.S.N.H, Morelia, Michoacán, Julio de 1990.

[Slemon 1992] Gordon R. Slemon, Electric Machines and Drives, New York: Addison Wesley, 1992.

[Arnold 2006] Arnold. Arnold – Precision Rolled Strip & Foil ARNON™ 5 and ARNON™ 7 Products. E.U.A. 11 Enero 2006.

http://www.arnoldmagnetics.com/products/rolled/arnon5_mag.htm

[IEEEVM 2006] IEEEVM. IEEEVM: Faraday's Induction Ring. E.U.A. 15 Enero 2006.
<http://www.ieee-virtual-museum.org/collection/event.php?id=3456912&lid=1>

[Cortech Machines 2006] Cortechmachines. Cortech Machines – Toroidal Core Production Equipment – Picture Page. E.U.A. 10 Enero 2006.
<http://www.cortechmachines.com/pic-kt2k-3.html>

[EIA 2006] EIA – Energy Information Administration. Famous People in Energy and Science. E.U.A. 10 Enero 2006.
<http://www.eia.doe.gov/kids/history/people/pioneers.html>

[Nicore Electrical 2006] Nicore Electrical. Gapped O – Core Manufacturer exporting direct from China. 20 Diciembre 2006.
http://nipponcore.en.alibaba.com/product/50154912/50850927/Gapped_Cores/Gapped_O_Core.html

[Nicore Electrical 2007] Nicore Electrical. Toroidal Core Manufacturer exporting direct from China. 10 Enero 2007.
http://nipponcore.en.alibaba.com/product/50363097/50850919/Power_Transformer_cores/Toroidal_Core.html

[Petra 2007] Petra. PETRA – Toroidal Transformers Producer – Toroidal Advantages. Rumania. 16 Enero 2007.
<http://www.petra-toroid.ro/eng/advantages.htm>

[Plitron 2005] Plitron. PLITRON – audio transformers – toroidal transformers – toroids – output transformers – current transformers – power transformers – medical isolation transformers – power toroids. Canada. 15 Enero 2005.
<http://www.plitron.com/advantages.asp>

[Plitron 2006] Plitron. PLITRON – audio transformers – toroidal transformers – toroids – output transformers – current transformers – power transformers – medical isolation transformers – power toroids. Canada. 10 Enero 2006.

<http://www.plitron.com/pprocess.asp>

[Plitron 2007] Plitron. PLITRON – audio transformers – toroidal transformers – toroids – output transformers – current transformers – power transformers – medical isolation transformers – power toroids. Canada. 20 Enero 2007.

http://plitron.com/standard_spec.asp

[Powertronix 2006] Powertronix. Core. E.U.A. 23 Enero 2006.

http://www.powertronix.com/html/body_core.html

[Torivac 2006] Torivac. Transformadores toroidales. España. 1 Mayo 2006.

http://www.torivac.com/transformadores_toroidales.htm#

[Keenoccean 2007] Keenoccean. Toroidal transformer. Hong Kong. 1 Febrero 2007.

http://www.keenoccean.com.hk/toroidal_transformer.htm

[Wikimedia 2006] Wikimedia. Image:Toroid coil2.jpg – Wikimedia Commons. E.UA. 11 Enero 2006.

http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Toroid_coil2.jpg