

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE APRENDIZAJE DE
MÁQUINA EN LA DETERMINACIÓN DE FUERZAS
ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS DEVANADOS DE
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA CASOS CON
CORRIENTE DE EXCITACIÓN DESPRECIABLE**

**DISEÑO DE UN MODELO BASADO EN ÁRBOLES ALEATORIOS
PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS
ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS DEVANADOS DE
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA CASOS CON
CORRIENTE DE EXCITACIÓN DESPRECIABLE**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRICIDAD**

WALTER ANDRÉS SANTAMARÍA PÉREZ

walter.santamaria@epn.edu.ec

DIRECTOR: MSc. FAUSTO RAMIRO VALENCIA ARCOS

fausto.valencia@epn.edu.ec

DMQ, abril 2023

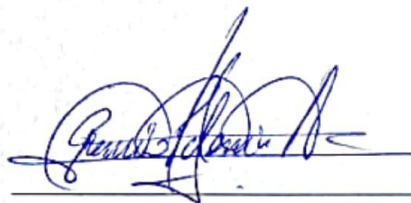
CERTIFICACIONES

Yo, Walter Andrés Santamaría Pérez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



WALTER ANDRÉS SANTAMARÍA PÉREZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Walter Andrés Santamaría Pérez, bajo mi supervisión.



FAUSTO RAMIRO VALENCIA ARCOS
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

WALTER ANDRÉS SANTAMARÍA PÉREZ

MSc. FAUSTO RAMIRO VALENCIA ARCOS

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Resumen | v |
| Abstract | vi |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 2 |
| 1.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.3 Alcance | 3 |
| 1.4 Marco teórico | 3 |
| 1.4.1 Transformador | 3 |
| 1.4.1.1 Consideraciones de un transformador | 4 |
| 1.4.1.2 Transformadores de distribución | 5 |
| 1.4.2 Fuerzas Electromagnéticas | 6 |
| 1.4.3 Método de Elementos Finitos | 7 |
| 1.4.3.1 Discretización del dominio | 7 |
| 1.4.3.2 Selección de las funciones de interpolación | 7 |
| 1.4.3.3 Planteamiento del sistema de ecuaciones | 8 |
| 1.4.3.4 Solución del sistema de ecuaciones | 8 |
| 1.4.4 Bosque Aleatorio | 8 |
| 2 METODOLOGÍA | 11 |
| 2.1 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN | 11 |
| 2.1.1 Dimensionamiento del núcleo magnético | 11 |
| 2.1.1.1 Sección del núcleo magnético | 12 |
| 2.1.2 Diseño de los devanados | 13 |
| 2.1.3 Distancias de aislamiento | 15 |
| 2.1.4 Reactancia porcentual | 15 |
| 2.2 MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR EN FEMM | 17 |
| 2.3 OBTENCIÓN DE DATOS | 19 |
| 2.4 DESARROLLO DEL MODELO BASADO EN ÁRBOLES ALEATORIOS | 23 |
| 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 25 |
| 3.1 RESULTADOS | 25 |
| 3.1.1 Resultados obtenidos mediante FEMM | 25 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.2 | Análisis de sensibilidad ante la variación de parámetros del modelo basado en árboles aleatorios | 31 |
| 3.1.3 | Comparación de los resultados obtenidos mediante FEMM con los obtenidos mediante el modelo basado en árboles aleatorios | 34 |
| 3.2 | CONCLUSIONES | 40 |
| 3.3 | RECOMENDACIONES | 40 |
| 4 | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 41 |

RESUMEN

El presente documento plantea un método basado en árboles aleatorios para la determinación de fuerzas electromagnéticas que se producen en los devanados de transformadores de distribución en condiciones de operación normal y cuando se presentan cortocircuitos, el cual tarda un menor tiempo en hallar la solución que el Método de Elementos Finitos.

Se detallan los pasos necesarios para realizar el diseño de un transformador, enfocado principalmente en el comportamiento del campo magnético. Este procedimiento se aplica para el diseño de un transformador de 500 kVA, 13.8 kV/208 V, en conexión Dy11, con una reactancia de dispersión de 12.47%.

Una vez determinadas las dimensiones del núcleo de hierro y de los discos de cada uno de los devanados de alto y bajo voltaje, se implementa el transformador en el software FEMM (Finite Element Method Magnetics).

Se realizaron simulaciones para valores de corrientes que van desde 1 p.u. hasta 8.019246 p.u. que es el valor de corriente que se tendría al ocurrir un cortocircuito trifásico en terminales del transformador. Se consideraron tres instantes del periodo, los instantes en los cuales cada una de las fases se encuentra en su valor máximo.

Se muestra un análisis de los resultados obtenidos ante la variación de los parámetros de diseño del modelo basado en árboles aleatorios.

Finalmente se presenta una comparación de los valores de las fuerzas electromagnéticas producidas en los devanados de transformadores de distribución debido a corrientes de cortocircuito obtenidos mediante el Método de Elementos Finitos con los obtenidos mediante un modelo basado en árboles aleatorios.

PALABRAS CLAVE: transformador, árboles aleatorios, fuerzas electromagnéticas.

ABSTRACT

This document proposes a method based on random trees for the determination of electromagnetic forces that occur in the windings of distribution transformers under normal operating conditions and when short circuits occur, which takes less time to find the solution than the Method of Finite Elements.

The necessary steps are detailed to carry out the design of a transformer, focused mainly on the behavior of the magnetic field. This procedure is applied for the design of a 500 kVA, 13.8 kV/208 V transformer, in Dy11 connection, with a leakage reactance of 12.47 %.

Once the dimensions of the iron core and the discs of each of the high and low voltage windings have been determined, the transformer is implemented in the FEMM (Finite Element Method Magnetics) software.

Simulations were performed for values of currents ranging from 1 p.u. up to 8.019246 p.u. which is the value of current that would occur when a three-phase short circuit occurs in the transformer terminals. Three instants of the period were considered, the instants in which each of the phases is at its maximum value.

An analysis of the results obtained by varying the design parameters of the random forest model is shown.

Finally, a comparison of the values of the electromagnetic forces produced in the windings of distribution transformers due to short-circuit currents obtained by the Finite Element Method with those obtained by a random forest model is presented.

KEYWORDS: transformer, random forest, electromagnetic forces.

1 INTRODUCCIÓN

Las fuerzas electromagnéticas en los conductores de transformadores se producen como resultado de la interacción de la corriente que circula por los conductores con el campo magnético que se presenta en las zonas de los devanados. Y considerando que la densidad de flujo magnético es proporcional a la corriente de los devanados, siempre que el núcleo del transformador no se encuentre en la zona de saturación, estas fuerzas electromagnéticas son proporcionales al cuadrado de la corriente. [1]

Es por esto que, al producirse un cortocircuito, las fuerzas electromagnéticas que soportan los devanados del transformador aumentan considerablemente y pueden causar la deformación de los mismos.

Generalmente se utiliza el Método de Elementos Finitos para determinar las fuerzas electromagnéticas que se presentan en los conductores de transformadores. Este método encuentra la solución siguiendo un proceso iterativo resolviendo ecuaciones matriciales hasta alcanzar la precisión requerida. [2]

Debido a esto, el Método de Elementos Finitos tarda un tiempo considerable en determinar la solución. Esto representa un problema en caso de que se requiera calcular las fuerzas electromagnéticas varias veces.

Es entonces que, para solucionar este inconveniente, se plantea el uso de un modelo basado en árboles aleatorios para determinar las fuerzas electromagnéticas en los discos que forman cada uno de los devanados de transformadores de distribución para casos en los que la corriente de excitación es despreciable.

La técnica de árboles aleatorios, junto con regresión lineal, regresión de soporte vectorial y redes neuronales artificiales, ha sido utilizada en el artículo de F. Valencia, H. Arcos y F. Quilumba para calcular la presión que ejerce la fuerza electromagnética radial en el disco central de los devanados de un transformador de potencia con resultados favorables, por lo cual se esperan buenos resultados en el cálculo de fuerzas electromagnéticas en transformadores de distribución. [2]

Un modelo basado en árboles aleatorios consta de un determinado número de árboles y es aleatorio de dos formas: cada árbol está construido en base a un subconjunto aleatorio de muestras de datos, y cada división dentro de cada árbol se crea en función de un subcon-

junto aleatorio de variables escogidas de los datos de entrada. Debido a la aleatoriedad del modelo, existen diferencias en las predicciones de los árboles individuales. La predicción general del modelo es el promedio de las predicciones individuales de cada árbol. [3]

Para el trabajo desarrollado, el transformador de distribución diseñado se modela en el software FEMM y se realizan 6300 simulaciones para valores de corrientes entre 1 p.u. y 8.019246 p.u. De los resultados obtenidos mediante FEMM, se utiliza el 90% para el entrenamiento del modelo y el 10% restante se utiliza para validación.

Las corrientes que circulan por los devanados del transformador son los datos de entrada para el entrenamiento del modelo y las fuerzas en x y en y en cada uno de los discos que conforman los devanados son los datos de salida.

Para mejorar el modelo y lograr que los resultados sean lo más parecidos posible a los obtenidos mediante FEMM, se modifican los parámetros de diseño del modelo, como son el número de árboles y la cantidad máxima de capas de cada árbol. Se realiza un análisis de los resultados obtenidos ante la variación de los 2 parámetros de diseño del modelo basado en árboles aleatorios y se comparan los valores de las fuerzas electromagnéticas obtenidos mediante FEMM con los obtenidos mediante el modelo basado en árboles aleatorios.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las fuerzas electromagnéticas que se producen en los devanados de transformadores de distribución debido a corrientes de cortocircuito mediante un modelo basado en árboles aleatorios.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un esquema básico del proceso a seguir para el diseño de un transformador.
2. Realizar un análisis de la sensibilidad ante la variación de los parámetros de diseño del modelo basado en árboles aleatorios.
3. Comparar los valores de las fuerzas electromagnéticas producidas en los devanados de transformadores de distribución debido a corrientes de cortocircuito obtenidos me-

diante el método de elementos finitos con los obtenidos mediante un modelo basado en árboles aleatorios.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo de integración curricular abarca el estudio y posterior diseño de un modelo basado en árboles aleatorios para la determinación de las fuerzas electromagnéticas en los devanados de transformadores de distribución. Primero se realiza una revisión bibliográfica de conceptos básicos de diseño de transformadores de distribución y de árboles aleatorios. Se realiza el diseño de un transformador de 500 kVA, 13.8 kV/208 V, en conexión Dy11, con una reactancia de dispersión de 12.47 %. El diseño del transformador es básico, enfocado principalmente en el comportamiento del campo magnético. El modelo del transformador se implementa en FEMM para la simulación de elementos finitos. Luego se elabora una base de datos de las corrientes en los devanados y de las fuerzas electromagnéticas mediante el software FEMM. Esta base de datos será utilizada para el entrenamiento del modelo basado en árboles aleatorios. Finalmente, se diseña el modelo basado en árboles aleatorios mediante scikit-learn.

Se limita al estudio de casos en los que la corriente de excitación es despreciable, tales como condiciones de corriente transitoria de cortocircuito o condiciones normales operativas.

1.4 MARCO TEÓRICO

Se presenta una introducción a los transformadores, cómo se producen las fuerzas electromagnéticas que afectan a los devanados de transformadores. Se explica en qué consiste el Método de Elementos Finitos y cómo funciona un modelo basado en árboles aleatorios.

1.4.1 Transformador

Un transformador consiste en un núcleo de un material de alta permeabilidad en el cual se enrollan dos devanados aislados eléctricamente de forma que el flujo magnético que produce uno de los devanados induzca una fuerza electromotriz en el otro. De esta forma, la energía se transfiere entre ambos devanados mediante el flujo magnético.

Se escoge un material de alta permeabilidad para que buena parte del flujo producido por

el uno de los devanados se concatene con el otro devanado y para que la reluctancia del circuito magnético sea lo menor posible. Además, para reducir las pérdidas en el núcleo, se construye con láminas delgadas y cada cara de cada lámina tiene un recubrimiento de barniz aislante. [4]

Al conectar una fuente de voltaje AC a uno de los devanados (primario), se produce un flujo magnético alterno cuya amplitud depende de la magnitud y la frecuencia del voltaje aplicado, y del número de espiras del primario. El flujo magnético que se concatena con el otro devanado (secundario), induce un voltaje que depende de la magnitud y la frecuencia del flujo mutuo, y del número de espiras del secundario. [5]

La relación de voltaje se define como la razón entre el voltaje aplicado en el lado primario y el voltaje que se obtiene en el lado secundario.

1.4.1.1 Consideraciones de un transformador

Todo conductor tiene un valor de resistencia, aunque sea pequeño. Es por esto que, en un transformador, la potencia de salida es menor que la de entrada, el voltaje en terminales es diferente a la fuerza electromotriz inducida y la eficiencia es menor al 100 %.

No todo el flujo magnético producido por el devanado primario fluye a través del núcleo del transformador, una parte de este flujo (flujo de dispersión) fluye a través del aire. Lo mismo ocurre cuando fluye corriente por el devanado secundario, existe un flujo de dispersión a través del aire. [4]

La resistencia y el flujo de dispersión de cada devanado de un transformador se pueden representar con una resistencia y una reactancia, respectivamente, en serie con cada devanado. [4]

En el núcleo del transformador también se producen pérdidas, representadas por la corriente de excitación que consta de dos componentes. La componente de pérdida en el núcleo explica las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, mientras que la componente de magnetización permite establecer el flujo mutuo. [4]

Todos los componentes que afectan el rendimiento de un transformador se muestran en Figura 1.1.

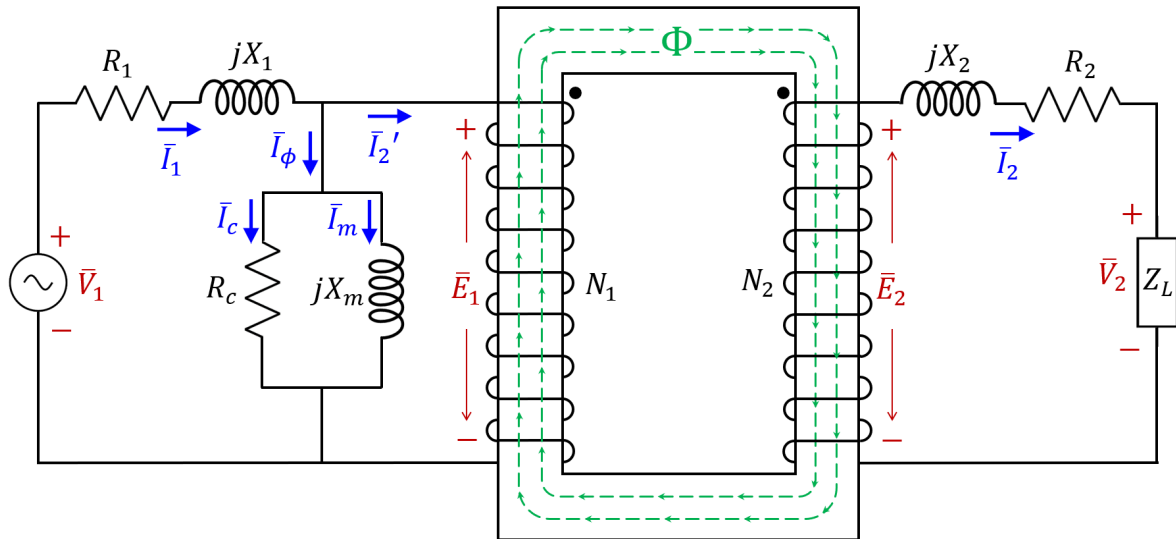


Figura 1.1: Representación de un transformador considerando la resistencia de los devanados, el flujo de dispersión y las pérdidas en el núcleo

1.4.1.2 Transformadores de distribución

Los transformadores de distribución se utilizan para reducir el nivel de voltaje del alimentador primario, que generalmente se encuentra entre 2,4 kV y 34,5 kV, a un nivel de voltaje que la población pueda utilizar, entre 120 V y 600 V. [6]

Con respecto a la potencia nominal, en el caso de transformadores monofásicos se encuentran desde 5 kVA hasta 500 kVA, mientras que los transformadores trifásicos se encuentran desde 30 kVA hasta 500 kVA. [6]

Para reducir al mínimo los costes de instalación, se fabrican pequeños transformadores de distribución para ser montados en postes. Por otra parte, para reducir el tamaño y el peso, se suele utilizar acero orientado para la construcción del núcleo. [6]

El calor es un factor que limita la operación del transformador, por lo que la disipación del calor generado dentro del transformador es un aspecto relevante en su diseño.

Los transformadores de distribución se pueden clasificar en tipo seco y tipo lleno de líquido. Los de tipo seco son enfriados y aislados por aire, mientras que los de tipo lleno de líquido son enfriados y aislados por aceite.

En los de tipo lleno de líquido, los devanados del transformador se sumergen en un tanque lleno de aceite. El aceite absorbe el calor de los devanados y lo transfiere a la superficie del tanque, la cual, a su vez, lo transfiere al entorno. Para aumentar aún más la capacidad de eliminación de calor, se puede forzar la circulación de aire sobre la superficie del tanque.

Dichos diseños se conocen como enfriados por aire forzado. En la actualidad, sin embargo, todos los transformadores de distribución están contruidos para ser autoenfriados. [6]

1.4.2 Fuerzas Electromagnéticas

Durante la operación de un transformador, se produce inherentemente un campo magnético dentro del mismo. La interacción de las corrientes que circulan por los devanados del transformador con este campo magnético da origen a fuerzas electromagnéticas que actúan sobre estos devanados.

En operación normal, estas fuerzas son pequeñas. Pero al producirse un cortocircuito, las corrientes que circulan por los devanados de un transformador aumentan considerablemente. Estas corrientes generan excesivas fuerzas electromagnéticas en los devanados, lo cual es un aspecto importante a considerar en el diseño, construcción y operación de transformadores. [7]

La fuerza que experimenta un elemento diferencial con densidad de corriente \vec{J} en un espacio en el que existe una densidad de flujo magnético \vec{B} está dada por el producto vectorial de \vec{J} y \vec{B} , como se expresa en (1.1).

$$d\vec{F} = (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot dv \quad (1.1)$$

En un espacio de tres dimensiones y considerando un sistema de coordenadas rectangulares, \vec{J} y \vec{B} se expresan en sus componentes rectangulares según (1.2) y (1.3), respectivamente.

$$\vec{J} = J_x \vec{i} + J_y \vec{j} + J_z \vec{k} \quad (1.2)$$

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} \quad (1.3)$$

Entonces, la fuerza que experimenta el elemento diferencial está dada por (1.4).

$$d\vec{F} = [(J_y B_z - J_z B_y) \vec{i} + (J_z B_x - J_x B_z) \vec{j} + (J_x B_y - J_y B_x) \vec{k}] \cdot dv \quad (1.4)$$

La fuerza que experimenta todo el conductor se calcula integrando el elemento diferencial a lo largo de todo el volumen, obteniendo así (1.5).

$$\vec{F} = \int_v [(J_y B_z - J_z B_y) \vec{i} + (J_z B_x - J_x B_z) \vec{j} + (J_x B_y - J_y B_x) \vec{k}] dv \quad (1.5)$$

1.4.3 Método de Elementos Finitos

Para el cálculo de las fuerzas electromagnéticas que se presentan en los conductores de transformadores generalmente se utiliza el Método de Elementos Finitos.

Este método permite obtener soluciones aproximadas de problemas con condiciones de frontera. Se basa en dividir un dominio continuo en un número finito de subdominios en los cuales la función desconocida es representada por funciones de interpolación con coeficientes desconocidos. La solución de todo el sistema es aproximada a un número finito de coeficientes desconocidos. Por lo tanto, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas y la solución del problema se consigue resolviendo este sistema de ecuaciones. [8]

El análisis de un problema con condiciones de frontera mediante el método de elementos finitos se realiza siguiendo los pasos: [8]

- Discretización del dominio
- Selección de las funciones de interpolación
- Planteamiento del sistema de ecuaciones
- Solución del sistema de ecuaciones

1.4.3.1 Discretización del dominio

Es una parte determinante del análisis mediante elementos finitos, ya que la forma en la cual el dominio se discretiza afecta el tiempo de cálculo y la precisión de los resultados.

El dominio, de n dimensiones, es dividido en subdominios, también de n dimensiones.

El problema se plantea en términos de una función desconocida en los nodos de cada subdominio. Es necesario describir cada nodo con sus coordenadas, número local y número global. El número local del nodo indica su posición en el subdominio y el número global, su posición en el dominio. [8]

1.4.3.2 Selección de las funciones de interpolación

La función de interpolación da una aproximación de la solución dentro de cada subdominio. Generalmente esta función se plantea como un polinomio, mientras mayor es el grado

del polinomio, mayor es la precisión del resultado, pero su planteamiento se vuelve más complicado. [8]

1.4.3.3 Planteamiento del sistema de ecuaciones

El sistema de ecuaciones a resolverse puede ser planteado con el método de Ritz o con el método de Galerkin. [8]

Una vez planteado el sistema de ecuaciones, se deben aplicar las condiciones de frontera para determinar la solución.

1.4.3.4 Solución del sistema de ecuaciones

Resolver el sistema de ecuaciones es el paso que toma más tiempo.

El sistema resultante puede ser del tipo determinista o del tipo valor propio. En caso de ser del primer tipo, proviene de una ecuación diferencial no homogénea, de condiciones de contorno no homogéneas o de ambas. Si es del segundo tipo, proviene de una ecuación diferencial homogénea y condiciones de frontera homogéneas.

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones, se pueden determinar los parámetros que se necesiten y mostrar los resultados de una forma fácil de interpretar. [8]

1.4.4 Bosque Aleatorio

Un bosque aleatorio consiste en un conjunto de árboles de predicción, cada uno de los cuales depende de los valores de un vector aleatorio muestreado de forma independiente.

Para generar un bosque aleatorio, se suelen crear vectores aleatorios que controlan el crecimiento de cada árbol. Una forma de realizar esto es la selección de división aleatoria, donde en cada nodo la división a realizarse se selecciona aleatoriamente entre las mejores divisiones. Por otra parte, el método del subespacio aleatorio hace una selección aleatoria de un subconjunto de características, las cuales usa para desarrollar cada árbol. [9]

Para cada árbol, se genera un vector aleatorio, el cual es independiente de los vectores ya generados para los anteriores árboles. El árbol se desarrolla usando los datos de entrenamiento y el vector, y de esta forma se obtiene un clasificador. [9]

Un árbol de regresión es construido mediante la segmentación sucesiva de los datos en grupos cada vez más pequeños, a los cuales se les llama nodos, empezando por el “nodo raíz” hasta llegar a los “nodos terminales” o “nodos hoja”. Cada segmentación se realiza en base a los valores de una variable y se selecciona de acuerdo con un criterio de división. [3]

Cuando la segmentación llega hasta un nodo terminal significa que ya se puede asignar un valor a una muestra que, en cada uno de los nodos anteriores, cumple las condiciones necesarias para llegar a dicho nodo terminal.

Una vez que se ha construido un árbol, la respuesta para cualquier muestra se puede predecir siguiendo el camino desde el nodo raíz hasta el nodo terminal que corresponda, dependiendo de los valores de las variables de división, y el valor que se obtiene como respuesta simplemente es el valor que le asigna ese nodo terminal. [9]

Se suele usar el algoritmo CART (Classification And Regression Trees) para crear estos árboles.

El algoritmo CART, propuesto por Breiman, elige la división en cada nodo de forma que se logre reducir la impureza general del nodo tanto como sea posible. Se llama impureza a la suma total de las desviaciones al cuadrado del centro de cada nodo.

Este algoritmo primero hace crecer un árbol muy grande y luego lo “poda”, es decir, elimina las ramas que no ayudan al rendimiento de la predicción de acuerdo con un criterio de poda.

La razón para podar un árbol grande en lugar de simplemente cultivar un árbol pequeño es que el limitar demasiado la cantidad de ramas del árbol podría empeorar el rendimiento de la predicción del árbol. [3]

Cada árbol está construido en base a un subconjunto aleatorio de datos y cada división dentro de cada árbol se crea en función de un subconjunto aleatorio de variables. [3]

Una vez que se crea una considerable cantidad de árboles, se puede obtener la predicción general del bosque, la cual es el promedio de las predicciones de los árboles individuales.

El error de un bosque aleatorio depende de la fuerza de los árboles individuales que conforman el bosque y de la correlación entre ellos.

La importancia de las variables utilizadas para la segmentación de los datos resulta útil para la selección de variables. Esta selección de variables permite lograr dos objetivos:

identificar variables que tengan una estrecha relación con la variable de respuesta para poder explicar e interpretar los resultados, o identificar una cantidad reducida de variables que sean suficientes para conseguir una buena predicción de la respuesta. [3]

En Figura 1.2 se muestra un ejemplo de árbol perteneciente a un bosque aleatorio implementado en Python. El árbol consta únicamente de dos capas y siete nodos y, dependiendo de los valores de las variables 'I_lv_A' y 'I_hv_C', el valor de la predicción puede ser 0.1, 0.3, 0.5 o 0.8. Además, para crear este árbol en particular se han utilizado 3579 muestras.

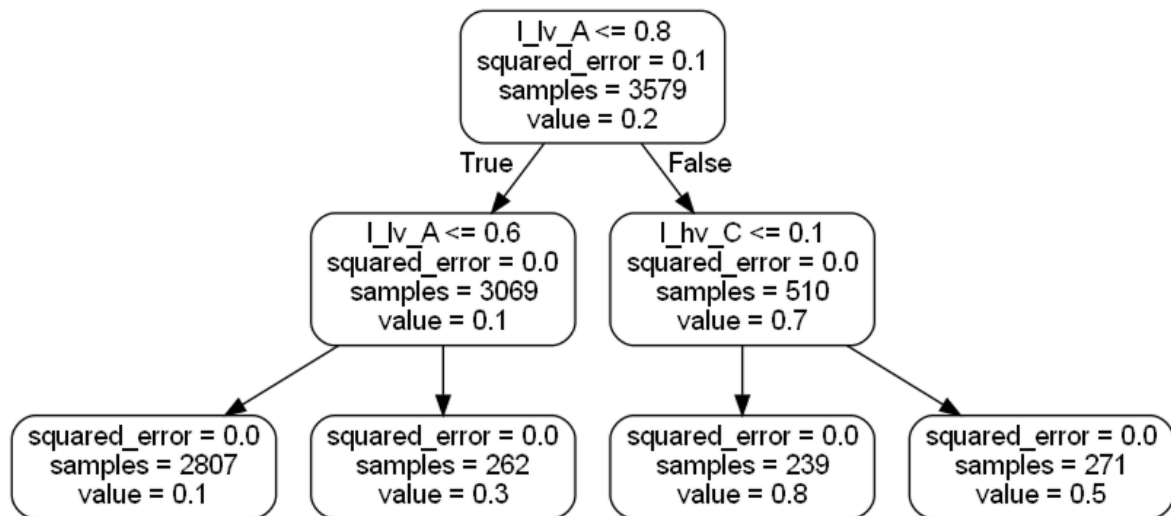


Figura 1.2: Ejemplo de un árbol de un bosque aleatorio

2 METODOLOGÍA

Para lograr desarrollar el modelo basado en árboles aleatorios y entrenarlo en primer lugar se realiza el diseño del transformador de distribución. Una vez determinadas las dimensiones de los elementos del transformador, se modela en el software FEMM y se simula para los distintos valores de corriente.

Finalmente, los resultados obtenidos se utilizan para el entrenamiento y comprobación el modelo.

Para mejorar el modelo, se modifican el número de árboles y la cantidad máxima de capas de cada árbol del modelo hasta obtener el menor error.

2.1 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN

Se realiza el diseño de un transformador de 500 kVA, 13.8 kV/208 V, en conexión Dy11. En cuanto a la reactancia de dispersión, inicialmente se planteó que tenga un valor máximo de 10 %, pero lo más cercano posible fue una reactancia de dispersión de 12.47 %.

El diseño considera principalmente el comportamiento del campo magnético, mientras que, para las distancias de aislamiento simplemente se utilizan valores típicos; conforme se detalla en la tesis de F. Sánchez. [10]

A continuación, se describen los pasos necesarios para determinar las dimensiones de todos los elementos que conforman el transformador, como son el núcleo, los discos de los devanados y los elementos aislantes.

2.1.1 Dimensionamiento del núcleo magnético

El diseño del núcleo magnético se realiza eligiendo el valor del voltaje por espira y el valor de densidad de flujo magnético.

Para calcular el voltaje por espira de un devanado, considerando su relación con la potencia aparente, se utiliza (2.1).

$$E_t = k\sqrt{S_n} \quad (2.1)$$

Donde

- E_t : Voltaje por espira
- S_n : Potencia aparente del transformador [kVA]
- k : Constante que se elige

Para devanados de cobre, k debe estar entre 0,37 y 0,45. Se escoge un valor de $k=0.37$, con lo cual se obtiene un voltaje por espira de 8.2735 V/espira.

Se utiliza una densidad de flujo magnético de 1,58 T.

El voltaje por espira en función de la sección transversal del núcleo está dado por (2.2).

$$E_t = 4.44 \cdot f \cdot B \cdot S_{Fe} \quad (2.2)$$

Donde

- f : Frecuencia [Hz]
- B : Densidad de flujo magnético [T]
- S_{Fe} : Sección transversal del núcleo [m²]

Una vez seleccionados el voltaje por espira y la densidad de flujo magnético, se dimensiona el núcleo, para lo cual se calculan la sección, la altura y la distancia entre columnas.

2.1.1.1 Sección del núcleo magnético

Para determinar la sección del núcleo en función del voltaje por espira y de la densidad de flujo magnético se utiliza (2.3).

$$S_{Fe,neto} = \frac{E_t}{4.44 \cdot f \cdot B} \quad (2.3)$$

Para considerar que el núcleo está formado por láminas de acero, se utiliza el factor de utilización (f_u). Para el núcleo del transformador se tiene un factor de utilización de 0.98. Con el factor de utilización se determina la sección bruta del núcleo utilizando (2.4).

$$S_{Fe,bruta} = \frac{S_{Fe,neto}}{f_u} \quad (2.4)$$

Como se considera un núcleo de sección cuadrada, el diámetro de la circunferencia circunscrita al núcleo está dado por (2.5).

$$D_{Fe} = \sqrt{2 \cdot S_{Fe,bruta}} \quad (2.5)$$

Se obtiene una sección bruta de 0.02 m². El lado de la sección cuadrada es de 141.47 mm y el diámetro de la circunferencia circunscrita es de 200.07 mm.

2.1.2 Diseño de los devanados

En primer lugar, se calculan las corrientes nominales de los lados de alto y bajo voltaje del transformador.

Dado que en el lado de alto voltaje se tiene conexión Delta y en el lado de bajo voltaje se tiene conexión Y, las corrientes nominales que circulan por los devanados de alto y bajo voltaje están dadas por (2.6) y (2.7), respectivamente.

$$I_{HV} = \frac{S_n}{3 \cdot V_{HV}} \quad (2.6)$$

$$I_{LV} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_{LV}} \quad (2.7)$$

La corriente nominal en el devanado de alto voltaje es 12.08 A y en el de bajo voltaje es de 1387.86 A.

Con los valores de las corrientes y considerando que para conductores de cobre se utiliza una densidad de corriente de 3 A/mm², la sección y el diámetro de los conductores se calculan aplicando (2.8) y (2.9), respectivamente.

$$S_{cu} = \frac{I}{J_{cu}} \quad (2.8)$$

$$D_{cu} = 2\sqrt{\frac{S_{cu}}{\pi}} \quad (2.9)$$

Para los conductores del devanado de alto voltaje se tiene una sección de 4.03 mm² y un diámetro de 2.26 mm, mientras que para los de bajo voltaje se tiene una sección de 462.62 mm² y un diámetro de 24.27 mm.

Para el devanado de alto voltaje se escoge un conductor 10 AWG que tiene un diámetro de 2.59 mm.

Ya que el diámetro del conductor del devanado de bajo voltaje es superior a 3.5 mm, en lugar de un conductor redondo se debe utilizar una pletina rectangular cuya área sea equivalente. En este caso se opta por dos pletinas de 40x10 mm obteniéndose un área de 800 mm².

El número de espiras de los devanados se obtiene de dividir el voltaje nominal que se tendrá individualmente en cada devanado considerando el tipo de conexión para el voltaje por espira. Dado el grupo de conexión del transformador, cada devanado de alto voltaje debe estar conformado por el número de espiras determinado por (2.10) y cada devanado de bajo voltaje por el número de vueltas determinado por (2.11).

$$N_{HV} = \frac{V_{HV}}{E_t} \quad (2.10)$$

$$N_{LV} = \frac{V_{LV}}{\sqrt{3} \cdot E_t} \quad (2.11)$$

El devanado de alto voltaje tiene 1668 espiras y el devanado de bajo voltaje tiene 15 espiras.

Se opta por arrollamiento por discos y se escoge el número de discos. Cada devanado de alto voltaje se divide en 39 discos y cada devanado de bajo voltaje se divide en 15 discos.

Una vez determinado el número de espiras y el número de discos de los devanados de alto y de bajo voltaje, se escoge el número de espiras dispuestas vertical y horizontalmente dentro de cada disco.

Cabe recalcar que tanto el número de discos como la cantidad de espiras que se dispongan vertical y horizontalmente dentro de cada disco debe seleccionarse de manera que las alturas de los devanados de alto y de bajo voltaje sean lo más parecidas posible.

Para lograr esto, las espiras en cada disco se disponen como se establece en Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Número de espiras en los discos

| Nivel de voltaje | Espiras horizontales | Espiras verticales | Total de espiras |
|------------------|----------------------|--------------------|------------------|
| Alto voltaje | 22 | 2 | 44 |
| Bajo voltaje | 1 | 1 | 1 |

2.1.3 Distancias de aislamiento

Para los devanados de alto voltaje se elige un aislamiento para los conductores de dos capas de papel solapando que tiene un espesor de 0.15 mm.

Para separar verticalmente cada uno de los discos de los devanados de alto voltaje se utilizan separadores de 4 mm de altura.

Para los devanados de bajo voltaje se elige un aislamiento para los conductores de dos capas de algodón que tiene un espesor de 0.2 mm.

Para separar verticalmente cada uno de los discos de los devanados de bajo voltaje se utilizan separadores de 5 mm de altura.

Para separar el núcleo de cada uno de los devanados de bajo voltaje se utilizan cilindros aislantes de 2 mm de espesor.

La separación entre el devanado de bajo voltaje y el devanado de alto voltaje de cada fase se escoge de 12 mm.

La separación entre dos devanados de alto voltaje contiguos se escoge de 40 mm.

La separación entre los devanados de alto voltaje y el yugo se escoge de 42 mm.

Una vez que se tienen todas las distancias de separación entre devanados, y entre devanados y el núcleo, se calcula el ancho y la altura de las ventanas. Finalmente, se determina el ancho y la altura del núcleo.

En Tabla 2.2 se detallan todas las dimensiones del transformador diseñado.

2.1.4 Reactancia porcentual

Para poder determinar la reactancia de dispersión porcentual en las bases del transformador se utiliza (2.12).

$$x_T = \frac{2.48 \cdot f \cdot N \cdot I \cdot D_m}{E_t \cdot H} \cdot \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot K_r \cdot 10^{-6} \quad (2.12)$$

Donde

- f : frecuencia [Hz]

Tabla 2.2: Dimensiones del transformador diseñado

| Parámetro | Valor [mm] |
|---|------------|
| Lado de la sección del núcleo | 141.47 |
| Altura del núcleo | 744.67 |
| Ancho del núcleo | 1093.54 |
| Ancho de la ventana del núcleo | 334.56 |
| Altura de la ventana del núcleo | 461.42 |
| Diámetro interno del devanado de alto voltaje | 308.87 |
| Diámetro externo del devanado de alto voltaje | 436.03 |
| Diámetro interno del devanado de bajo voltaje | 204.07 |
| Diámetro externo del devanado de bajo voltaje | 284.87 |
| Altura del devanado de alto voltaje | 377.42 |
| Altura del devanado de bajo voltaje | 376 |
| Altura de los discos de alto voltaje | 5.78 |
| Altura de los discos de bajo voltaje | 20.4 |
| Separación entre discos de alto voltaje | 4 |
| Separación entre discos de bajo voltaje | 5 |

- N : Número de espiras de los devanados de alto voltaje
- I : Corriente nominal del devanado de alto voltaje [A]
- D_m : Promedio de los diámetros medios de los devanados de alto y bajo voltaje [m]
- d : Separación entre el devanado de bajo voltaje y el devanado de alto voltaje de cada fase [m]
- a_1 : ancho de los discos del devanado de bajo voltaje [m]
- a_2 : ancho de los discos del devanado de alto voltaje [m]
- H : altura del devanado de alto voltaje [m]
- K_r : Factor de Rogowski

El factor de Rogowski está definido por (2.13).

$$K_r = 1 - \frac{1 - e^{-\frac{\pi \cdot H}{d+a_1+a_2}}}{\frac{\pi \cdot H}{d+a_1+a_2}} \quad (2.13)$$

Para el transformador diseñado se tiene un factor de Rogowski de 0.9022 y se obtiene una reactancia de dispersión de 12.47 %.

Las características principales del transformador diseñado se muestran en Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Características del transformador diseñado

| Parámetro | Valor | Unidad |
|----------------------------------|--------------|---------------|
| Potencia nominal | 500 | kVA |
| Voltaje nominal en el primario | 13.8 | kV |
| Voltaje nominal en el secundario | 208 | V |
| Frecuencia | 60 | Hz |
| Grupo de conexión | Dy11 | |
| Reactancia | 12.47 | % |
| Número de discos en alto voltaje | 39 | |
| Número de discos en bajo voltaje | 15 | |

2.2 MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR EN FEMM

Una vez determinadas las dimensiones de todos los elementos que conforman el transformador, como son el núcleo, los devanados y los elementos aislantes, se implementa el diseño del transformador en el software FEMM.

En Python, mediante el paquete pyFEMM se crean los segmentos que conforman los discos de los devanados de alto y bajo voltaje, y el núcleo. A cada área delimitada por segmentos se le llama bloque y a cada uno de estos bloques se le asigna una etiqueta.

En Figura 2.1 se muestra el transformador modelado en FEMM conformado por el núcleo y los discos de cada uno de los devanados.

Se utilizan materiales que ya se encuentran en la librería de FEMM, como son el aire, el acero estadounidense tipo 2-S de 0,024 pulgadas de espesor y el conductor 10 AWG.

Para las pletinas del devanado de bajo voltaje se crea un nuevo material. A este material se le asignan valores de conductividad y permeabilidad, además se define el tipo de conductor y las dimensiones.

Se definen seis circuitos, uno para cada devanado.

Mediante las etiquetas creadas, se asigna un material a cada bloque. En el caso de los discos, además de material, se define también el circuito al cual pertenece de acuerdo al devanado y la fase, y se establece el número de vueltas.

Con respecto a la convención para la dirección de la corriente de los devanados, en caso

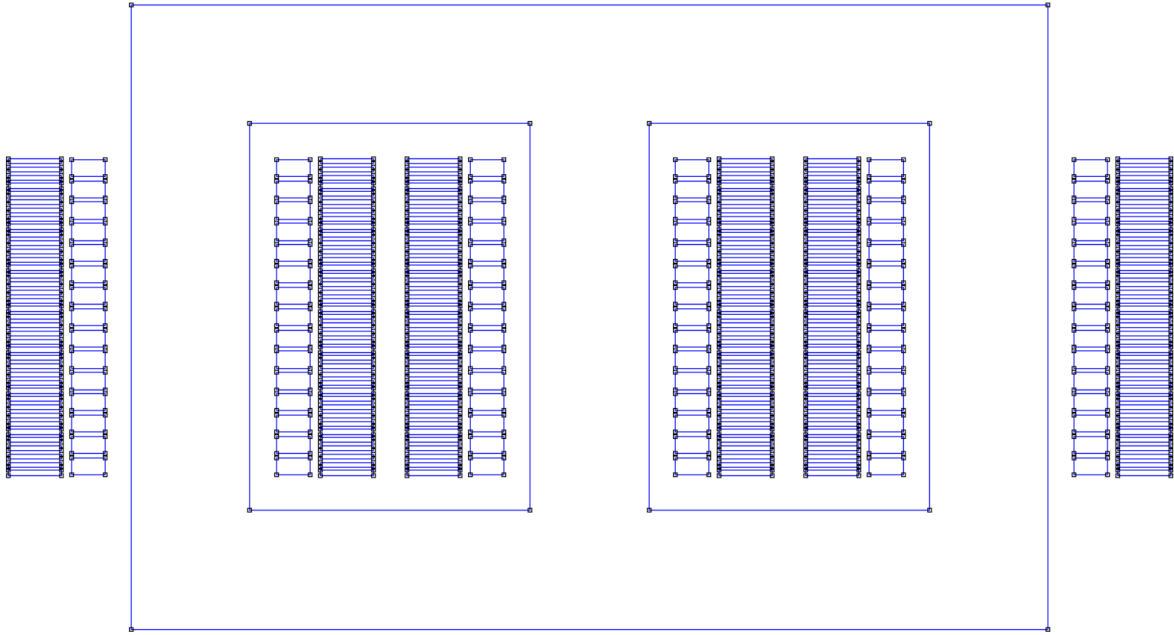


Figura 2.1: Modelo del transformador en FEMM

de que la corriente ingrese al plano, se establece un número de vueltas negativo; y en caso de que la corriente salga del plano, se establece un número de vueltas positivo.

A los discos de los devanados de alto voltaje se les asigna como material el conductor 10 AWG y un número de vueltas de 44 o -44 según corresponda. Mientras que, a los discos de los devanados de bajo voltaje se les asigna el material creado con las características de las pletinas y un número de vueltas de 1 o -1 según corresponda.

Al espacio que rodea al transformador se le asignó aire como material.

El material “acero estadounidense tipo 2-S de 0,024 pulgadas de espesor” se asignó al núcleo del transformador. De todos los materiales utilizados en FEMM, este material es el único que presenta una relación no lineal entre el campo magnético (H) y la densidad de flujo magnético (B), la cual se muestra en Figura 2.2.

Para establecer las condiciones de borde, se creó un borde circular alejado del transformador y se asignó como condición de borde que el potencial vectorial A sea igual a cero. Pues, las simulaciones en FEMM para transformadores utilizan la condición de frontera de Dirichlet, que establece un valor nulo para A en algún límite. [11]

En Figura 2.3 se presenta la discretización del transformador realizada por FEMM, en la cual se puede apreciar que alrededor de los vértices de los elementos se tiene una discretización más densa.

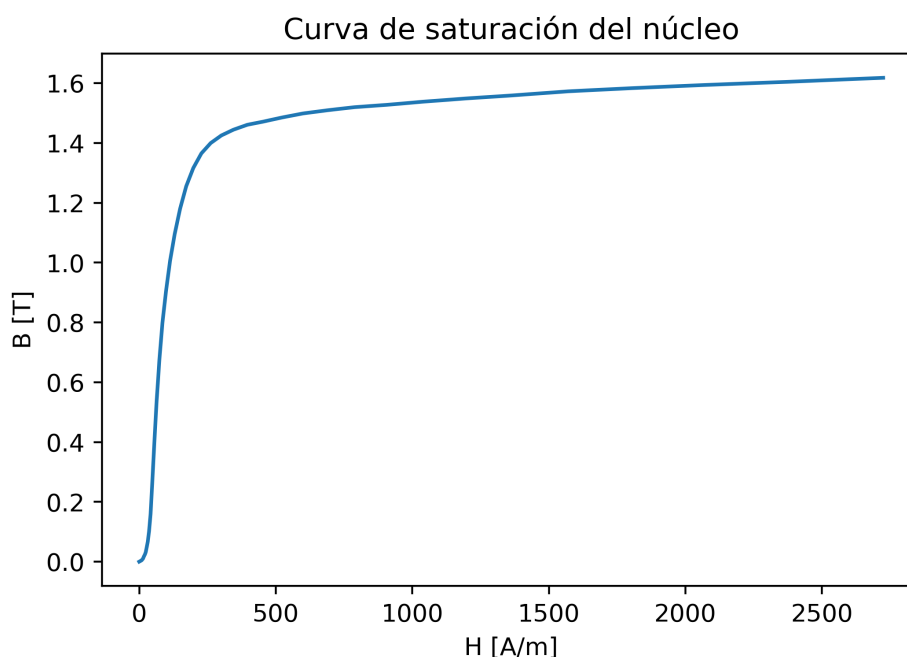


Figura 2.2: Curva de saturación del núcleo del transformador

En Figura 2.4 se muestra el comportamiento de las líneas de flujo magnético en el transformador cuando la corriente de la fase A se encuentra en su valor máximo en condiciones nominales. Como se puede ver, cierta parte del flujo circula a través de los devanados, este flujo al interactuar con la corriente de los discos da origen a las fuerzas en los mismos.

En Figura 2.5 se muestra la densidad de flujo magnético en las mismas condiciones que en Figura 2.4. Se nota que existe mayor densidad de flujo magnético en la primera columna del núcleo, que corresponde a la fase A.

2.3 OBTENCIÓN DE DATOS

Se realizan 6300 simulaciones para valores de corrientes que van desde 1 p.u. hasta 8.019246 p.u. que es el valor de corriente que se tendría al ocurrir un cortocircuito trifásico en terminales del transformador. Se consideraron tres instantes del periodo, los instantes en los cuales cada una de las fases se encuentra en su valor máximo.

En Python, mediante el paquete pyFEMM se modifican las corrientes que circulan por los devanados de alto y bajo voltaje para cada caso de simulación. Se obtienen los valores de densidad de flujo magnético (B) en el eje x y en el eje y , y de densidad de corriente (J) en el centro de cada uno de los discos.

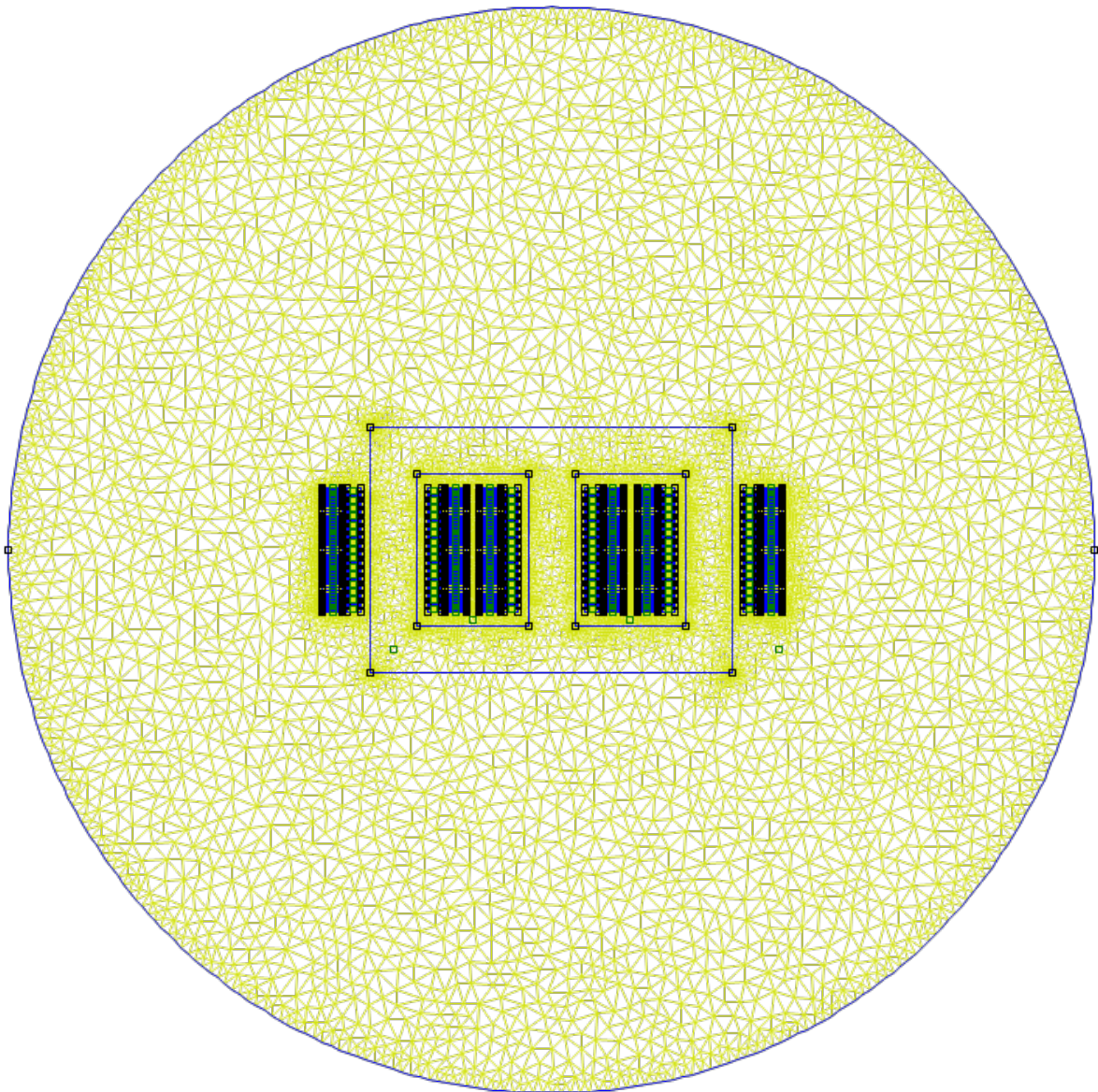


Figura 2.3: Discretización del transformador

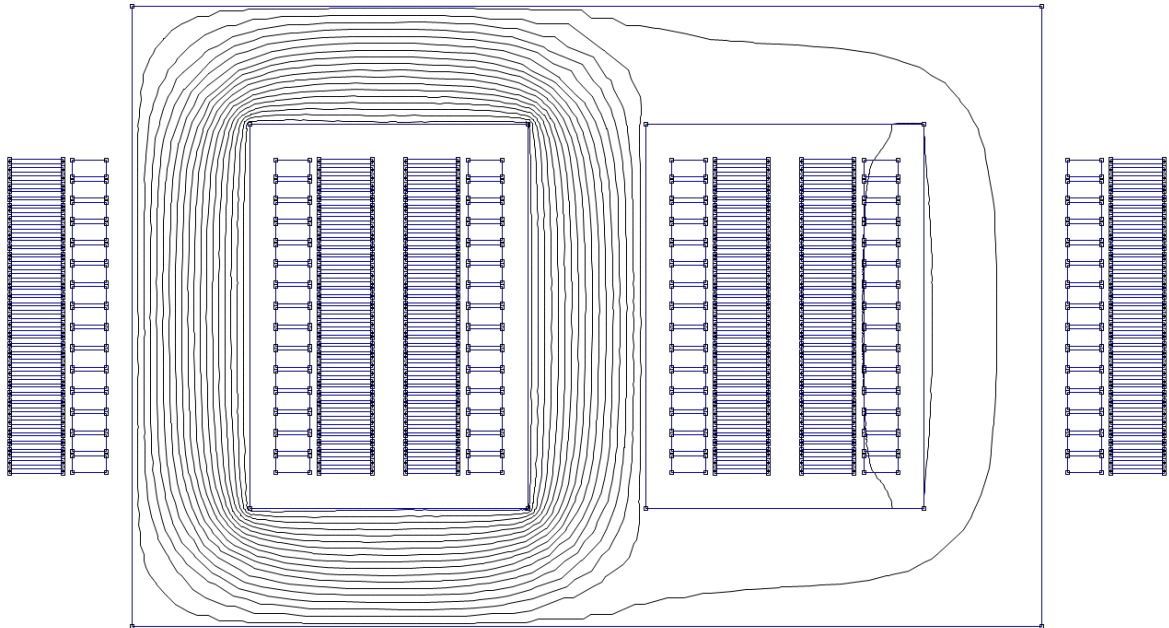


Figura 2.4: Líneas de campo magnético para corriente nominal del transformador

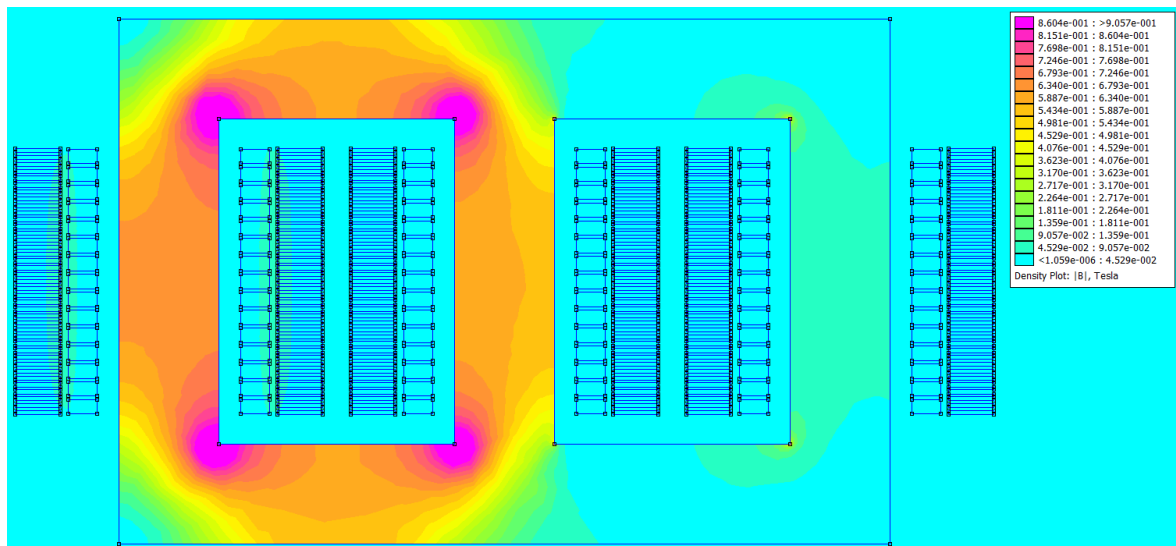


Figura 2.5: Densidad de flujo magnético para corriente nominal del transformador

Dado que se tiene densidad de corriente únicamente en el eje z y densidad de flujo magnético sólo en el eje x y en el eje y , la fuerza electromagnética que actúa sobre cada uno de los discos del transformador está dada por (2.14).

$$\vec{F} = \int_v [J_z B_y \vec{i} + J_z B_x \vec{j}] dv \quad (2.14)$$

Si además se considera que J y B tienen un valor constante en todo el volumen v_D de cada disco, la fuerza electromagnética está dada por (2.15).

$$\vec{F} = [J_z B_y \vec{i} + J_z B_x \vec{j}] \cdot v_D \quad (2.15)$$

Una vez calculado el valor de la fuerza electromagnética en ambos ejes, para los dos lados de cada disco, y para cada devanado, los resultados se guardan en un archivo de texto para luego ser utilizados en el entrenamiento y evaluación del modelo basado en árboles aleatorios.

Los datos se encuentran clasificados como se muestra en Tabla 2.4, según la jerarquía: nivel de voltaje, fase, lado del disco, eje.

Tabla 2.4: Orden de los datos de las fuerzas obtenidas en FEMM

| LV | | | | | | | | | | HV | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | | | B | | | | C | | | | A | | | | B | | | | C | | | |
| I | | D | | I | | D | | I | | D | | I | | D | | I | | D | | I | | D | |
| X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |

Se calcula el promedio de las fuerzas de ambos lados de cada disco, y se ordenan los nuevos datos como se muestra en Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Orden de las fuerzas promediadas

| X | | | | | | Y | | | | | |
|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|
| LV | | | HV | | | LV | | | HV | | |
| A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |

Las corrientes que circulan por cada uno de los seis devanados del transformador son los datos de entrada y las fuerzas en x y en y en cada uno de los discos que conforman los devanados de alto y bajo voltaje de cada fase son los datos de salida para el entrenamiento del modelo.

2.4 DESARROLLO DEL MODELO BASADO EN ÁRBOLES ALEATORIOS

Para el entrenamiento del modelo, los datos de entrada y de salida se estandarizan de tal forma que los valores se encuentren en el rango de cero a uno. Para esto se aplica (2.16).

$$x_{std} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.16)$$

Teniendo los valores ya estandarizados, se dividen los datos de entrada y de salida en dos conjuntos, de tal forma que uno de los conjuntos contiene el 90% de los datos y se usa para el entrenamiento del modelo y el otro conjunto contiene el restante 10% de los datos y se utiliza para probar el modelo.

De la librería scikit-learn se importa el regresor de bosque aleatorio, el cual consta de los siguientes parámetros: [12]

- `n_estimators`: número de árboles en el bosque.
- `criterion`: función para medir la calidad de una división.
- `max_depth`: cantidad máxima de capas de cada árbol.
- `min_samples_split`: número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo interno.
- `min_samples_leaf`: número mínimo de muestras requeridas en un nodo hoja.
- `max_features`: número de características que se tienen en cuenta al buscar la mejor división.
- `max_leaf_nodes`: número máximo de nodos hoja.
- `min_impurity_decrease`: valor mínimo en la disminución de la impureza que debe provocar la división de un nodo.
- `random_state`: estado que controla la aleatoriedad al generar las muestras utilizadas para construir los árboles y el muestreo de las características que se tienen en cuenta al buscar la mejor división en cada nodo.

Para evaluar los resultados del modelo basado en árboles aleatorios, se utiliza el coeficiente de determinación de la predicción R^2 , definido por (2.17). [12]

$$R^2 = 1 - \frac{u}{v} \quad (2.17)$$
$$u = \sum (y_{true} - y_{pred})^2$$
$$v = \sum (y_{true} - \bar{y}_{true})^2$$

Donde

- y_{true} : valor real de la variable de salida
- y_{pred} : valor de la variable de salida predicho por el modelo
- \bar{y}_{true} : valor real promedio de la variable de salida

Con el objetivo de mejorar el modelo basado en árboles aleatorios y lograr que los resultados sean lo más parecidos posible a los obtenidos mediante el software FEMM, se modifican los parámetros de diseño del modelo, como son el número de árboles y la cantidad máxima de capas de cada árbol.

El mejor modelo será aquel cuyo coeficiente de determinación de la predicción R^2 sea más cercano a uno. O bien, aquel para el que $1 - R^2$ sea más cercano a cero.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Resultados obtenidos mediante FEMM

Como se puede apreciar en Figura 3.1 y Figura 3.2, la fuerza electromagnética en x en los discos de la fase cuya corriente está en su valor máximo es considerablemente mayor que en las otras dos fases, en las cuales, la fuerza es prácticamente igual. Además, esta fuerza es mayor en el disco central de cada devanado.

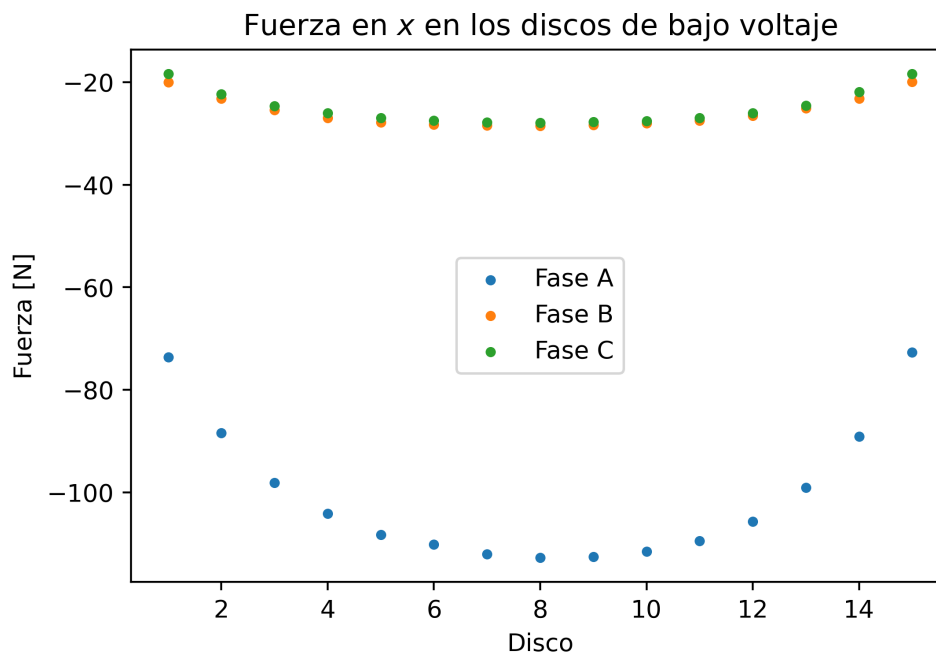


Figura 3.1: Fuerza en el eje x en los discos de los devanados de bajo voltaje para corriente nominal cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

En el caso de los discos de bajo voltaje, la fuerza electromagnética en x es negativa, lo cual significa que actúa hacia el interior de los discos, tendiendo a comprimirlos. Mientras que, en los discos de alto voltaje, esta fuerza es positiva, lo cual significa que actúa hacia el exterior de los discos, tendiendo a estirarlos.

En los devanados de bajo voltaje, la fuerza es mayor en el disco 8, mientras que, en los devanados de bajo voltaje la fuerza es mayor en el disco 19. Es decir, la fuerza es mayor en

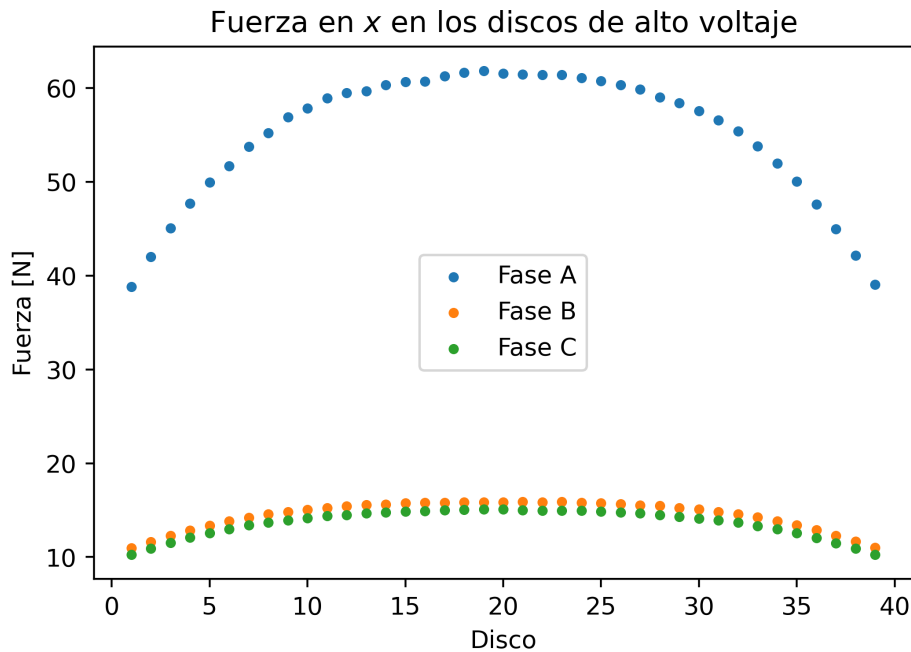


Figura 3.2: Fuerza en el eje x en los discos de los devanados de alto voltaje para corriente nominal cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

los discos que se encuentran en el centro del devanado.

Como se aprecia en Figura 3.3 y Figura 3.4, la fuerza electromagnética en y en los discos de la fase cuya corriente está en su valor máximo es bastante mayor que en las otras dos fases, en las cuales, la fuerza es prácticamente igual. Además, esta fuerza es mayor en los discos superior e inferior de cada devanado.

En el caso de los discos superiores, tanto los de bajo voltaje como los de alto voltaje, la fuerza electromagnética es negativa. Mientras que en los discos inferiores la fuerza es positiva. En los discos centrales la fuerza es casi nula. Esto implica que la fuerza tiende a comprimir todo el devanado hacia el centro.

En Figura 3.5 y Figura 3.6 se muestra una comparación de la fuerza electromagnética que se presenta en los discos cuando el transformador opera con corriente nominal con la fuerza cuando se presenta un cortocircuito trifásico en sus terminales, que es el escenario en el que se tiene la máxima corriente.

En Figura 3.7 se aprecia que la fuerza en y en el disco superior del devanado de bajo voltaje es ligeramente mayor que en el disco inferior. Mientras que, en Figura 3.8 se aprecia que la fuerza en y en el disco inferior del devanado de alto voltaje es ligeramente mayor que en el disco superior.

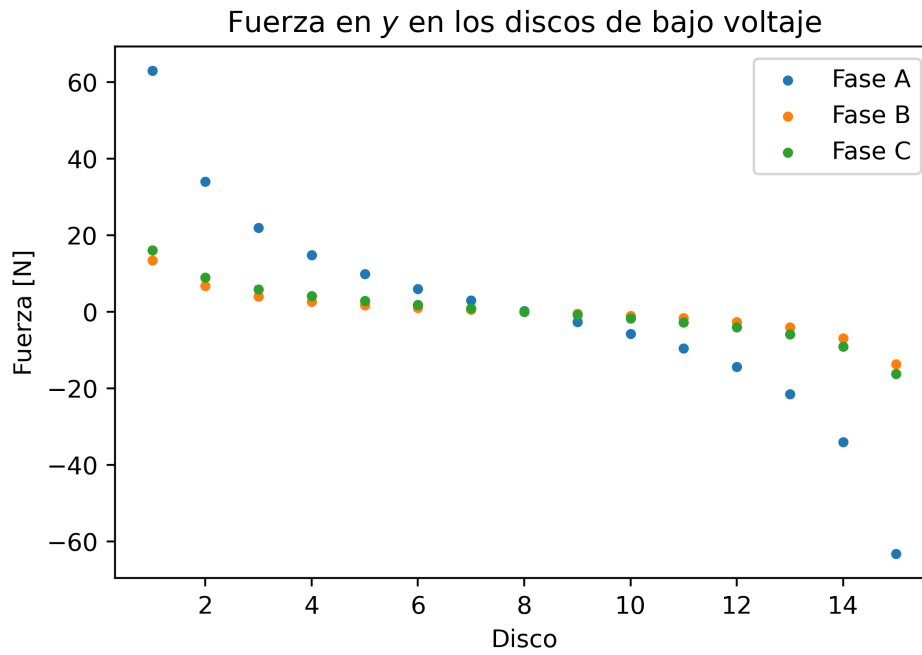


Figura 3.3: Fuerza en el eje y en los discos de los devanados de bajo voltaje para corriente nominal cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

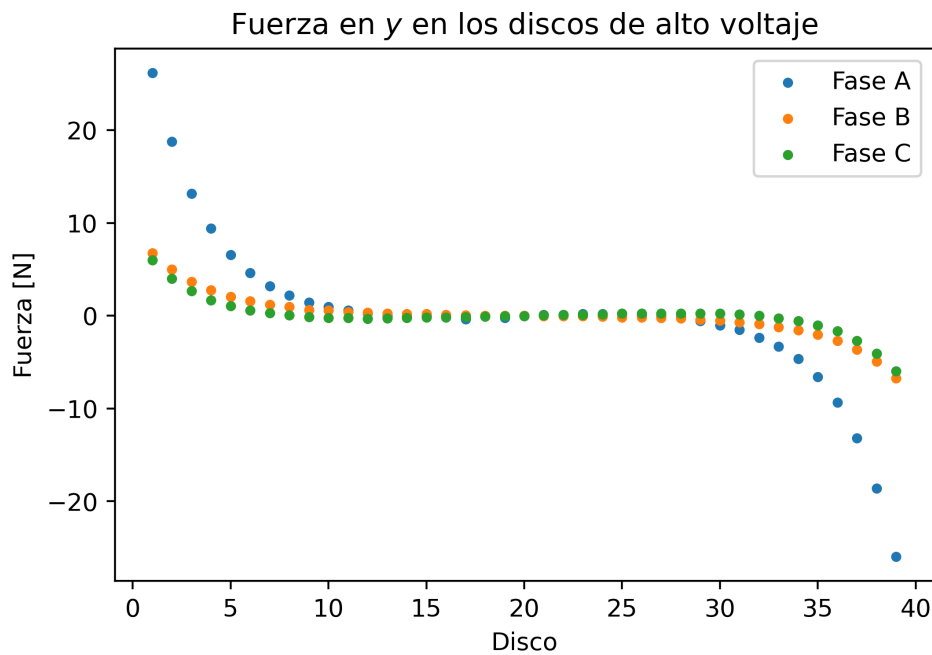


Figura 3.4: Fuerza en el eje y en los discos de los devanados de alto voltaje para corriente nominal cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

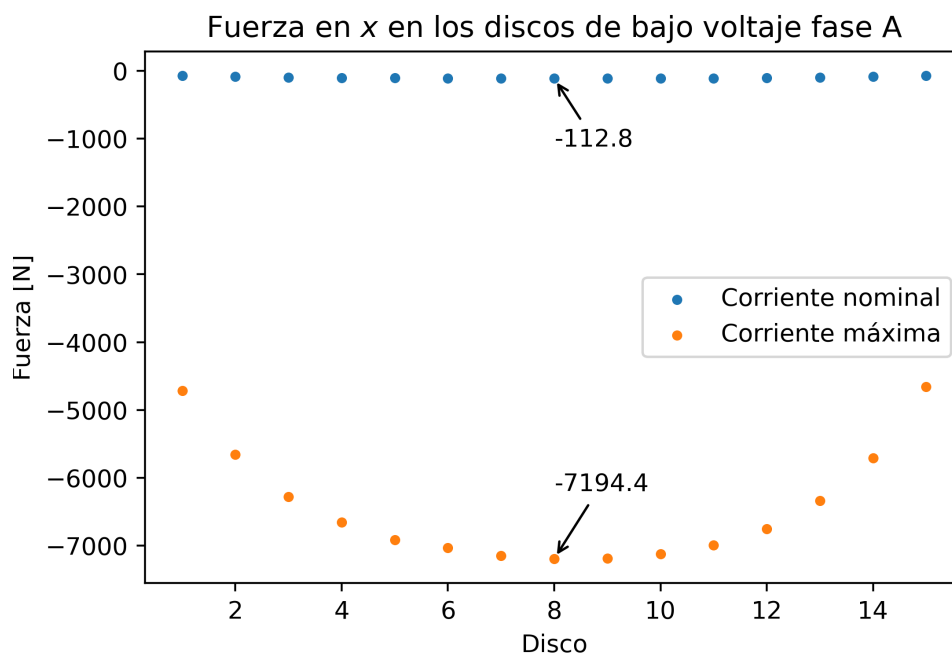


Figura 3.5: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase A

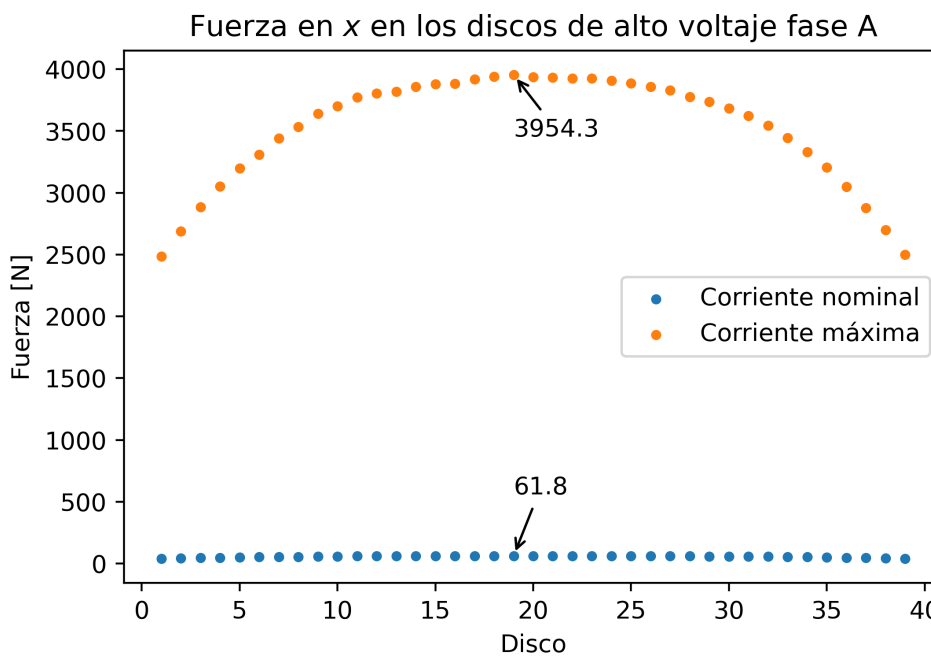


Figura 3.6: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de alto voltaje de la fase A

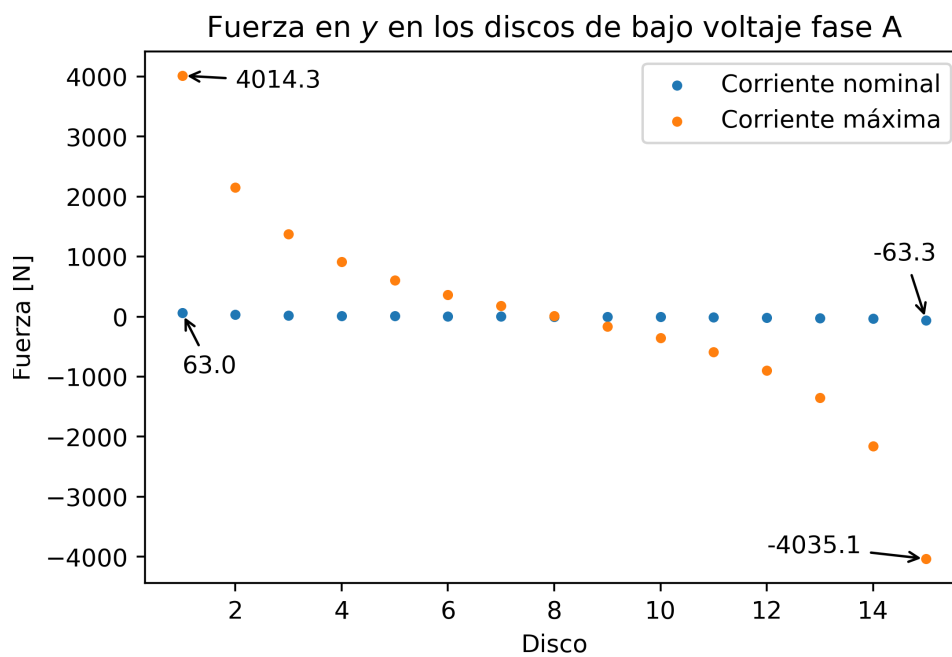


Figura 3.7: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase A

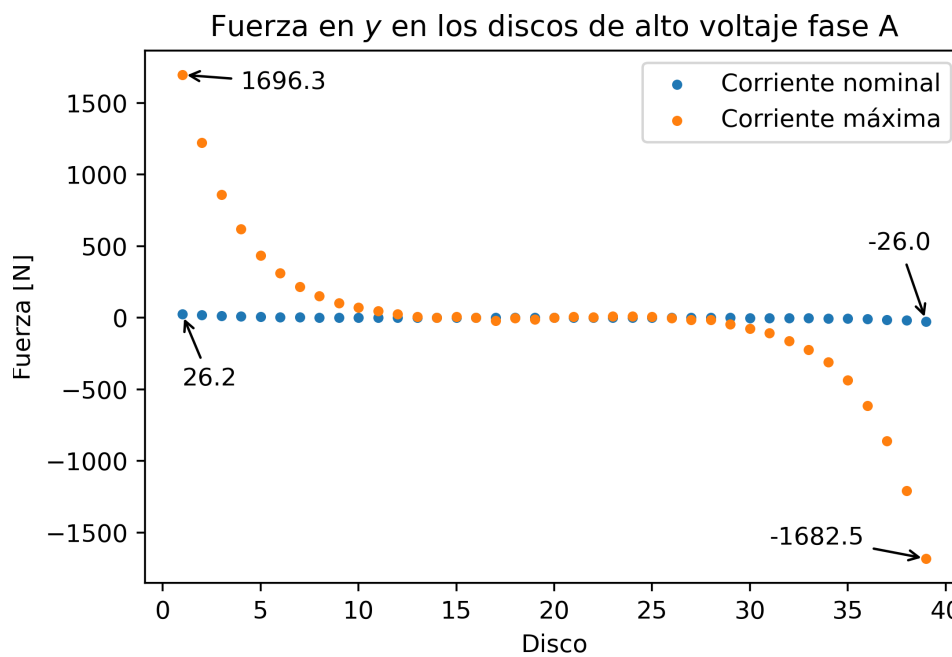


Figura 3.8: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de alto voltaje de la fase A

Al comparar los valores de la fuerza máxima con los valores de la fuerza en condiciones de corriente nominal, se aprecia que la razón entre estas dos es aproximadamente 64. Además, teniendo en cuenta que la corriente máxima es aproximadamente 8 veces la corriente nominal, la fuerza electromagnética aumenta con el cuadrado de la corriente.

En Figura 3.9 se muestra el comportamiento de la fuerza en x en los discos centrales de los devanados de la fase A según aumenta la corriente que circula por los devanados. El comportamiento de la fuerza en x en estos discos es especialmente relevante, pues su valor es mayor que en los otros discos del mismo devanado.

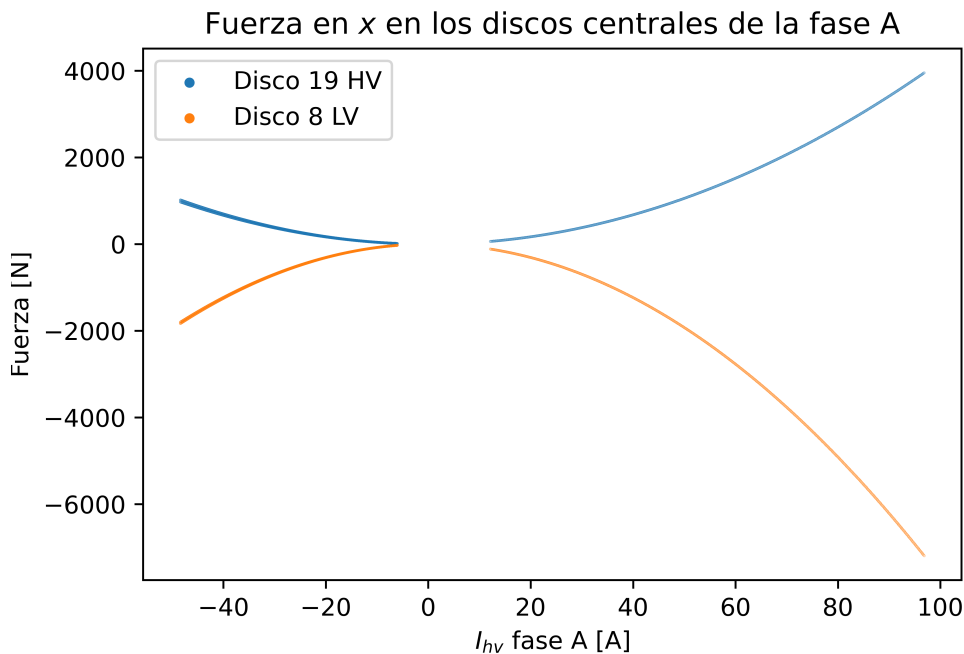


Figura 3.9: Fuerza en el eje x en los discos centrales de los devanados de la fase A

De igual forma, en Figura 3.10 se muestra la fuerza en y en los discos extremos de los devanados de la fase A en función de la corriente que circula por los devanados.

En cuanto a la fuerza en y , es de especial importancia el mayor valor se presenta en el disco inferior del devanado de alto voltaje y en el disco superior del devanado de bajo voltaje.

Tanto para las fuerzas en x como para las fuerzas en y , se puede apreciar que su valor describe un comportamiento aproximadamente cuadrático con el aumento de la corriente.

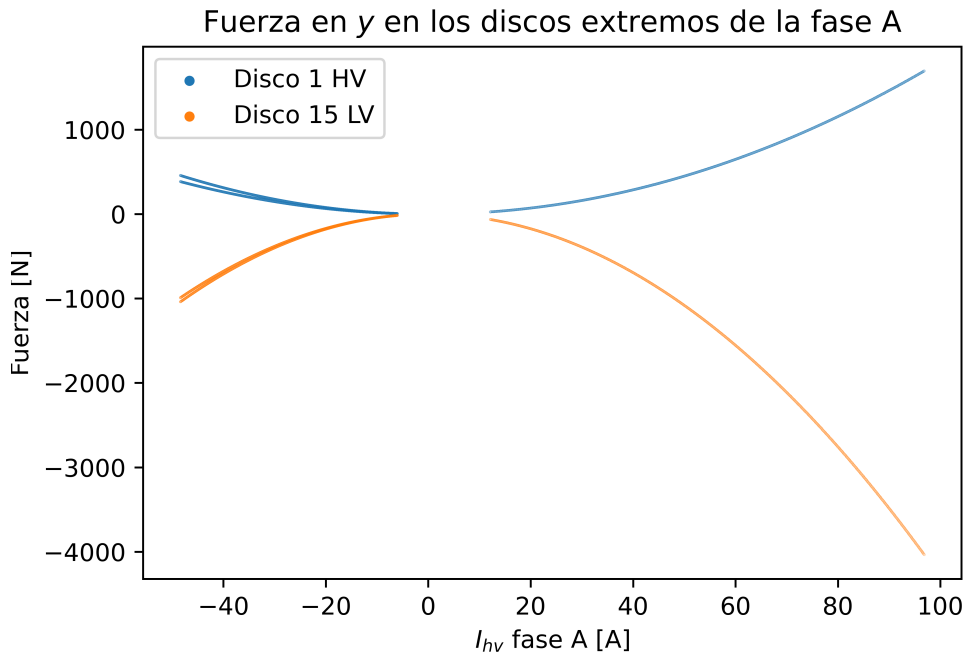


Figura 3.10: Fuerza en el eje y en los discos extremos de los devanados de la fase A

3.1.2 Análisis de sensibilidad ante la variación de parámetros del modelo basado en árboles aleatorios

Se analizan los resultados del error obtenido con los datos de validación que presenta el modelo para un número de árboles entre 1 y 200, y un número máximo de capas entre 1 y 20.

En Figura 3.11 se muestra la variación del error del modelo para todo el rango del número de árboles, pero únicamente para 1, 2, 3, 4 y 5 capas, esto debido a la gran diferencia de valores que existe para todo el rango del número máximo de capas.

El modelo que consta de una única capa presenta un error exagerado en comparación con los demás casos. Conforme aumenta el número máximo de capas, el error va disminuyendo, además, se puede apreciar que mientras más capas tiene el modelo, la diferencia en el error se va reduciendo.

En Figura 3.12 se muestra la variación del error del modelo únicamente para 10, 15 y 20 capas, esto con el fin de cubrir todo el rango del número máximo de capas.

A partir de las 15 capas, si se continúa aumentando el número máximo de capas, los errores para todo el rango del número de árboles apenas varían. O al menos no se pueden apreciar

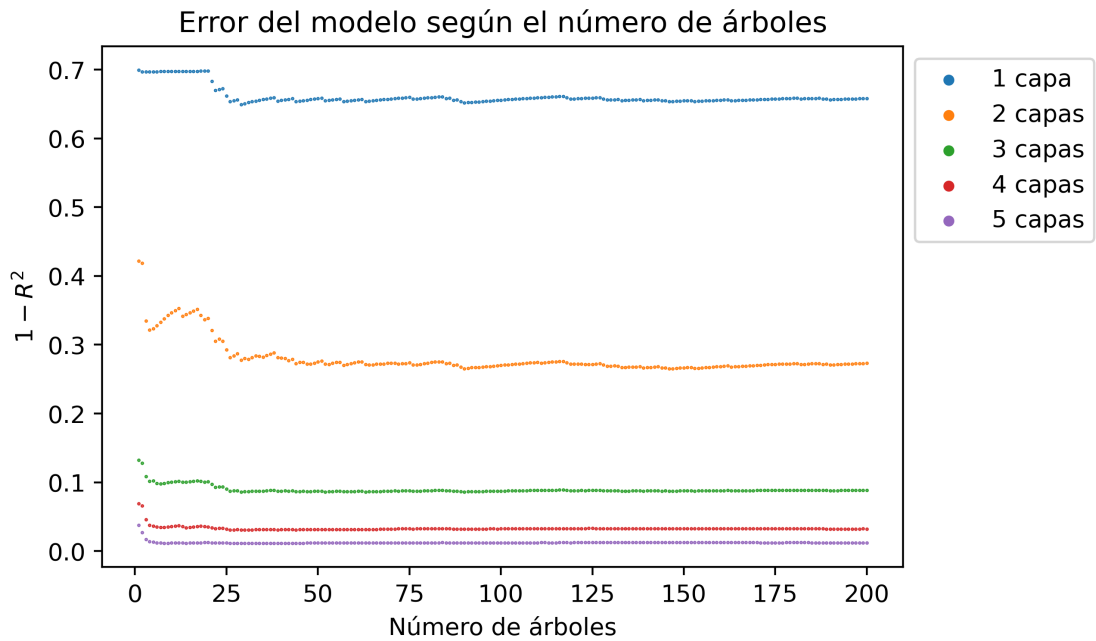


Figura 3.11: Error del modelo en función del número de árboles para un número máximo de capas entre 1 y 5 (obtenido con los datos de validación)

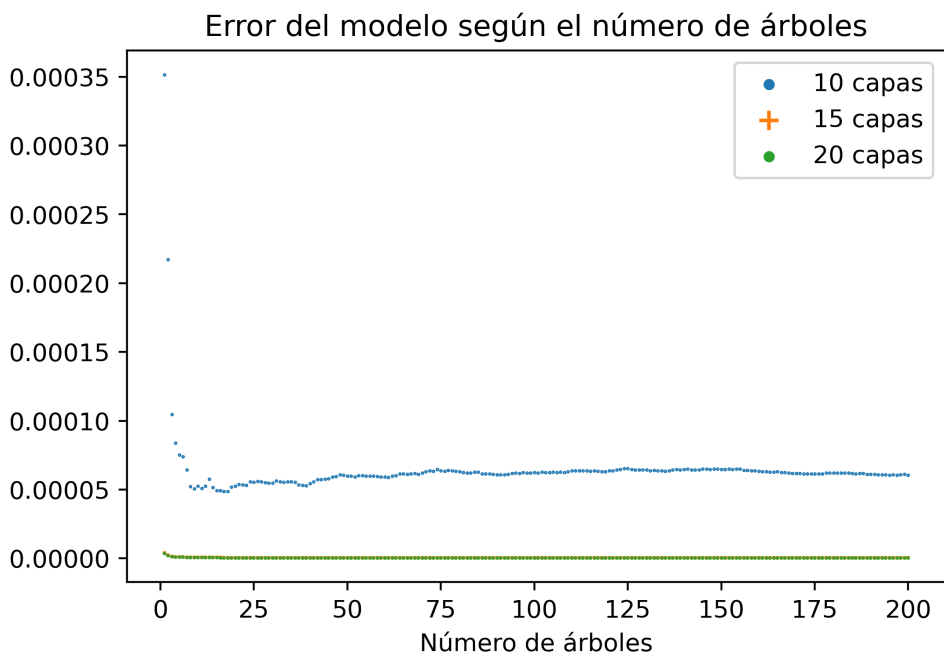


Figura 3.12: Error del modelo en función del número de árboles para 10, 15 y 20 capas (obtenido con los datos de validación)

las diferencias a la escala de Figura 3.12.

En Figura 3.13 se muestra la variación del error del modelo únicamente para 18 y 20 capas y para un rango del número de árboles entre 20 y 200, de esta forma se visualiza de mejor manera en dónde se encuentra el menor error.

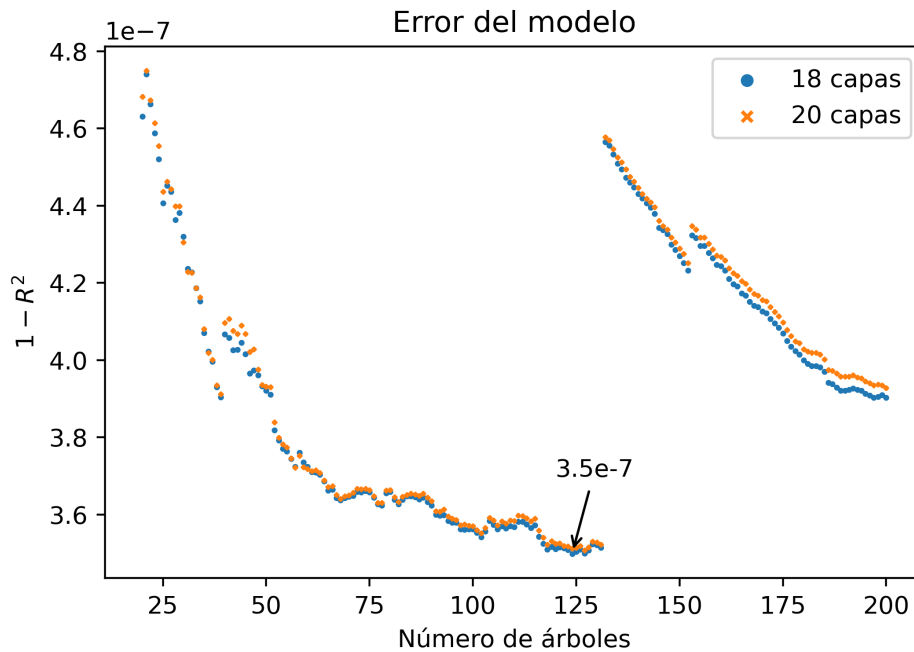


Figura 3.13: Error del modelo en función del número de árboles para 18 y 20 capas (obtenido con los datos de validación)

El error mínimo se da para el modelo con 124 árboles y 18 capas. Pero también resulta interesante el hecho de que, a partir de un número de árboles de 132, el error aumenta notablemente y vuelve a disminuir conforme se añaden más árboles.

En Figura 3.14 se muestra una comparación del error del modelo con 18 capas obtenido con los datos de validación con el error obtenido con los datos de entrenamiento.

En cuanto al error obtenido con los datos de validación, el valor mínimo se daba para 124 árboles. Mientras que, en el caso del error obtenido con los datos de entrenamiento, el valor mínimo se da para 57 árboles.

Además, el error obtenido con los datos de entrenamiento es menor que el obtenido con los datos de validación para cualquier cantidad de árboles.

Al comparar los valores mínimos en ambos casos, se tiene que con los datos de validación el error es más de dos veces que con los datos de entrenamiento.

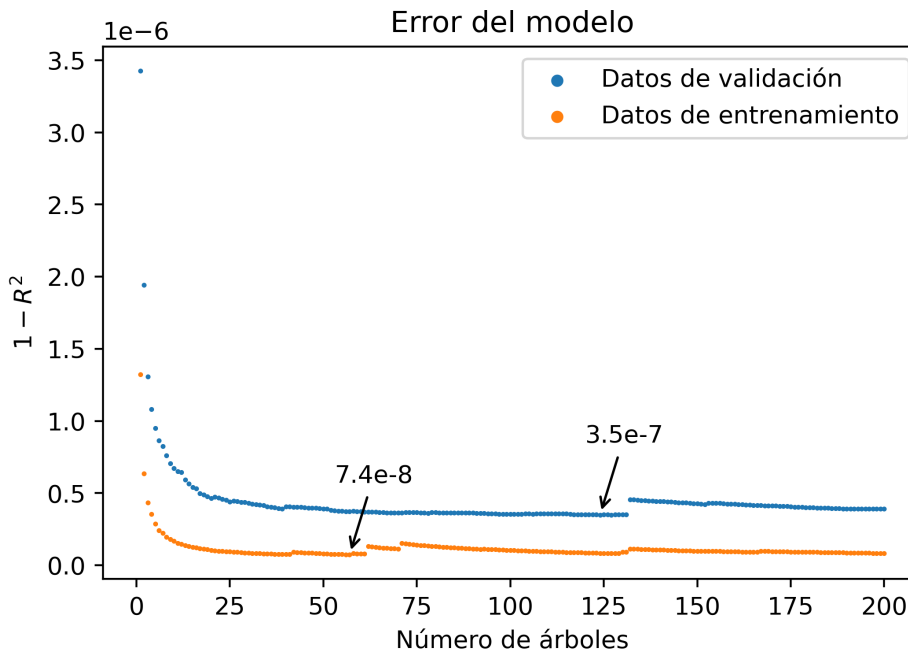


Figura 3.14: Error del modelo en función del número de árboles para 18 capas

3.1.3 Comparación de los resultados obtenidos mediante FEMM con los obtenidos mediante el modelo basado en árboles aleatorios

Se comparan los valores de las fuerzas electromagnéticas obtenidos mediante FEMM con los obtenidos con el modelo basado en árboles aleatorios que obtuvo mejores resultados.

En Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17 se muestra una comparación de las fuerzas en x en los discos de los devanados de bajo voltaje de cada una de las fases obtenidas con FEMM y las obtenidas mediante el modelo desarrollado.

En Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20 se muestra una comparación de las fuerzas en x en los discos de los devanados de alto voltaje de cada una de las fases obtenidas con FEMM y las obtenidas mediante el modelo desarrollado.

En Figura 3.21, Figura 3.22 y Figura 3.23 se muestra una comparación de las fuerzas en y en los discos de los devanados de bajo voltaje de cada una de las fases obtenidas con FEMM y las obtenidas mediante el modelo desarrollado.

En Figura 3.24, Figura 3.25 y Figura 3.26 se muestra una comparación de las fuerzas en y en los discos de los devanados de alto voltaje de cada una de las fases obtenidas con

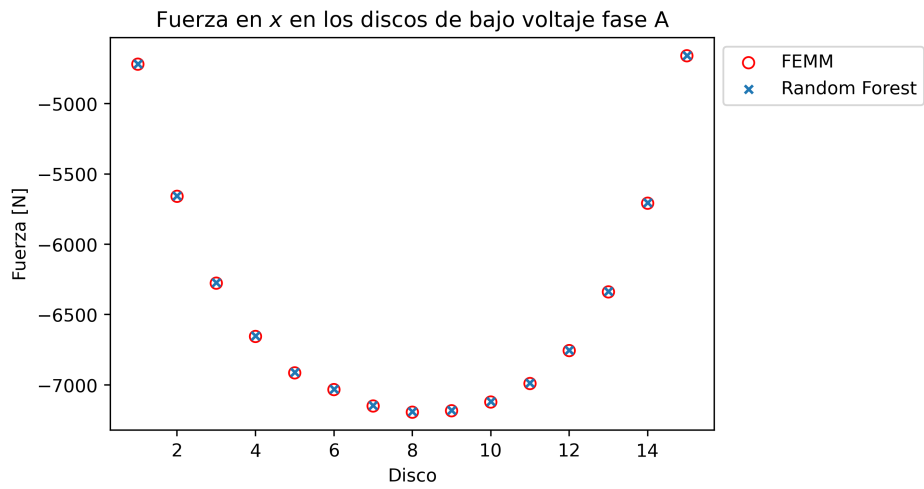


Figura 3.15: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase A para corriente máxima cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

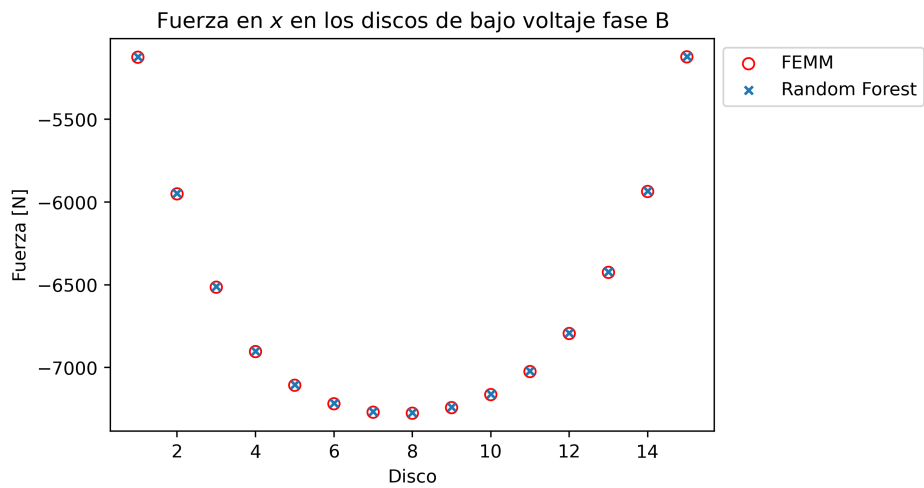


Figura 3.16: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase B para corriente máxima cuando la fase B se encuentra en su valor máximo

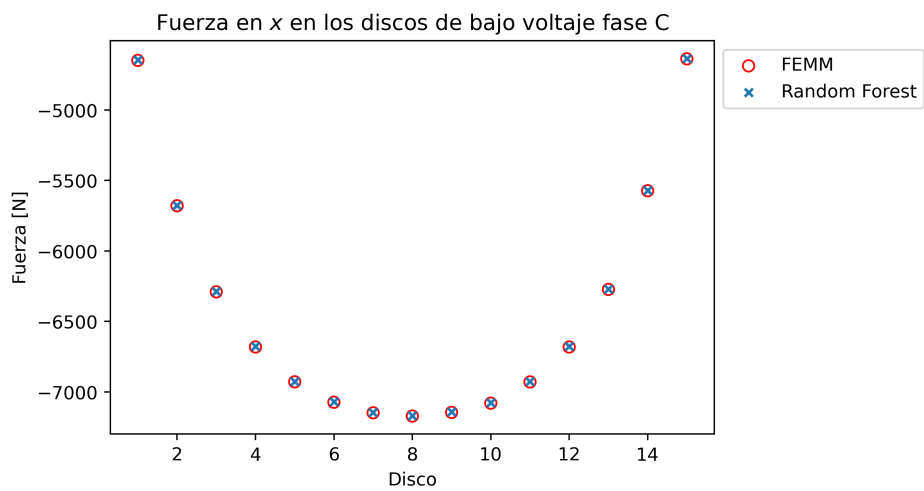


Figura 3.17: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase C para corriente máxima cuando la fase C se encuentra en su valor máximo

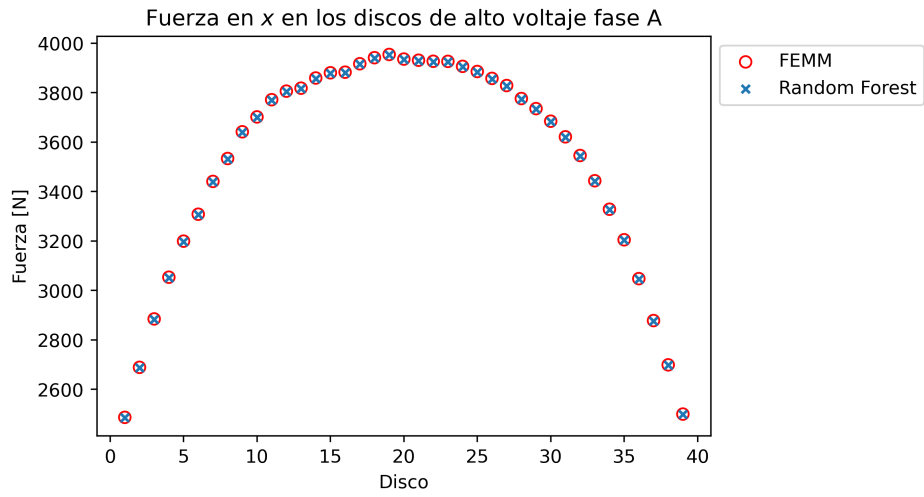


Figura 3.18: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de alto voltaje de la fase A para corriente máxima cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

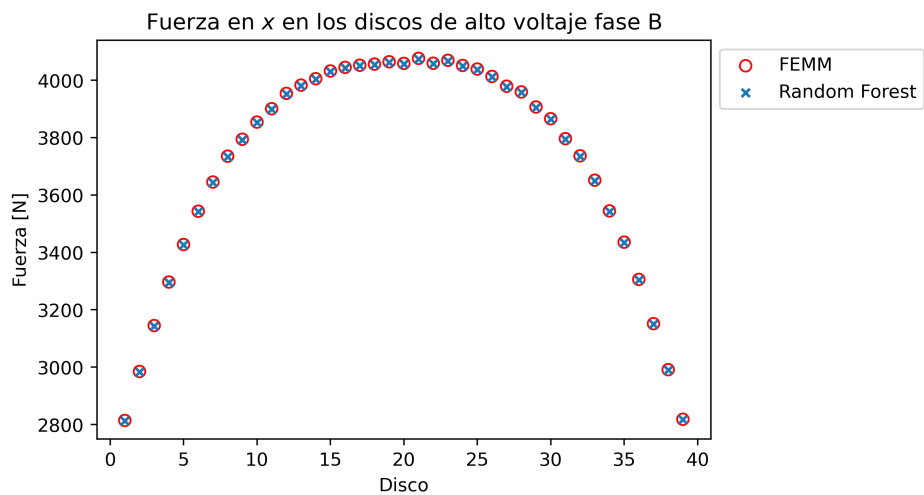


Figura 3.19: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de alto voltaje de la fase B para corriente máxima cuando la fase B se encuentra en su valor máximo

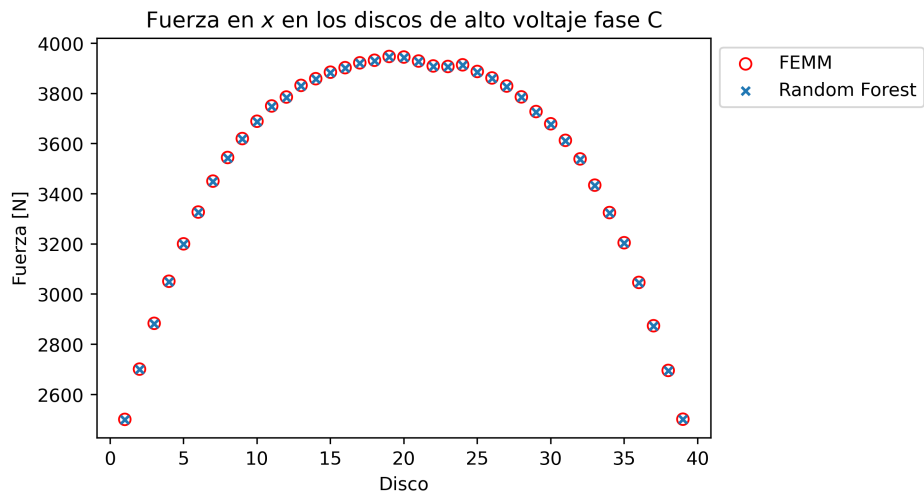


Figura 3.20: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de alto voltaje de la fase C para corriente máxima cuando la fase C se encuentra en su valor máximo

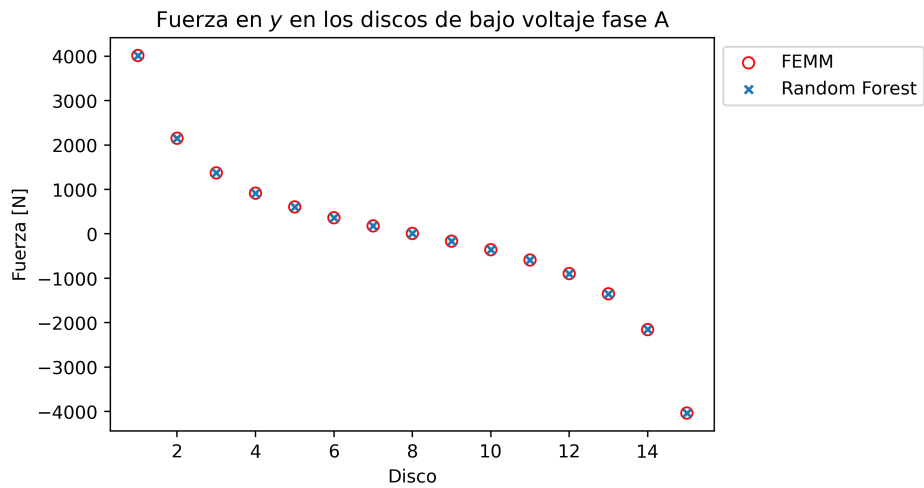


Figura 3.21: Fuerza en el eje x en los discos del devanado de alto voltaje de la fase A para corriente máxima cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

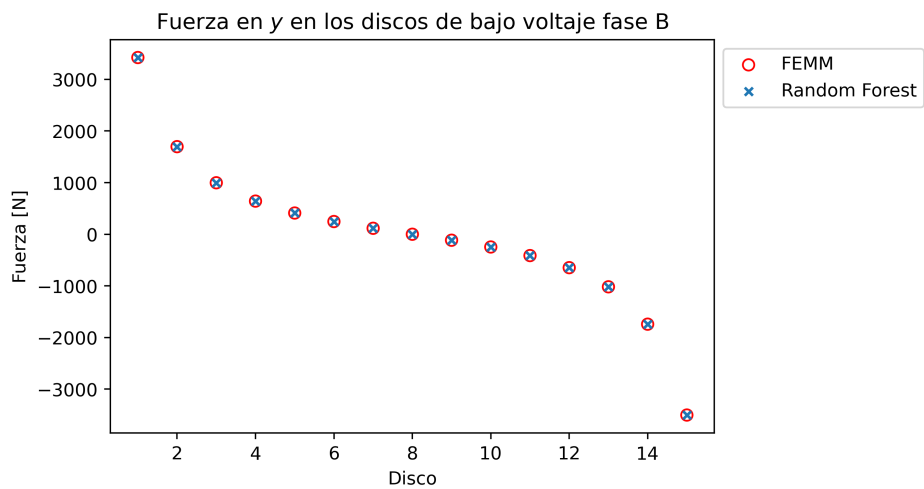


Figura 3.22: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase B para corriente máxima cuando la fase B se encuentra en su valor máximo

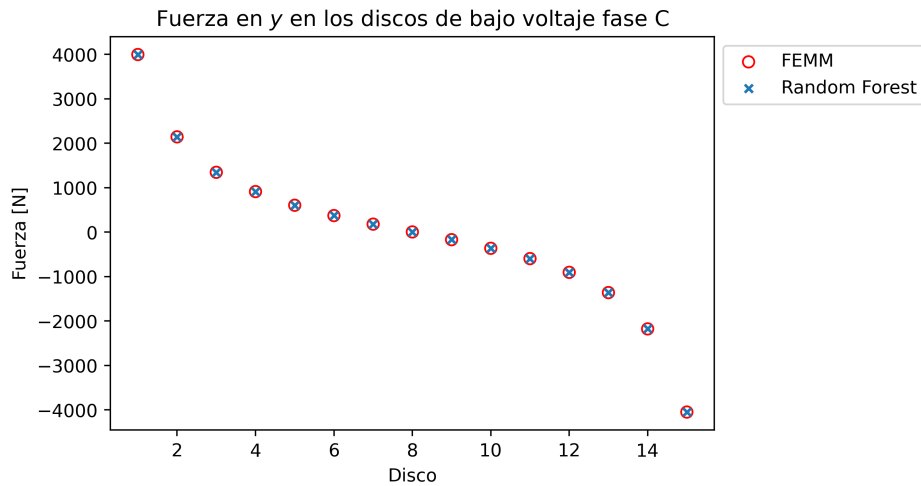


Figura 3.23: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de bajo voltaje de la fase C para corriente máxima cuando la fase C se encuentra en su valor máximo

FEMM y las obtenidas mediante el modelo desarrollado.

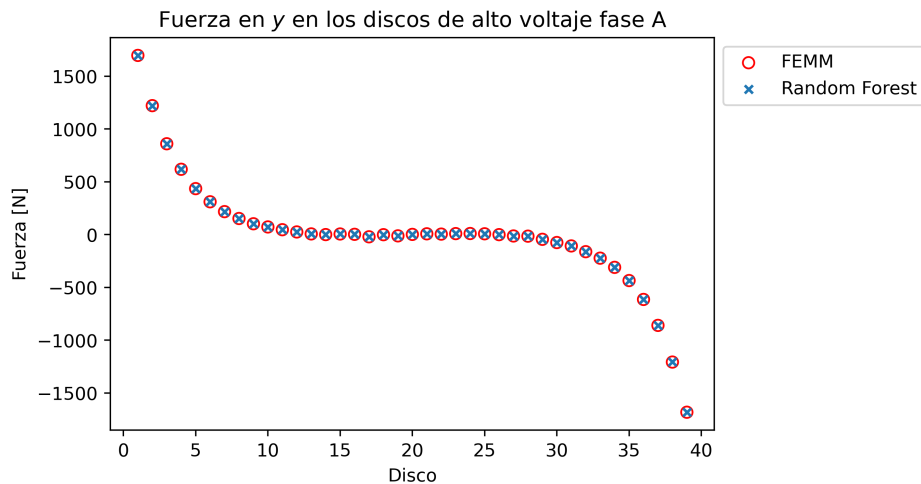


Figura 3.24: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de alto voltaje de la fase A para corriente máxima cuando la fase A se encuentra en su valor máximo

Al comparar las fuerzas en los discos, tanto en x como en y , obtenidas con FEMM y las obtenidas mediante el modelo desarrollado de cada uno de los devanados, se determina que la diferencia es apenas apreciable. Es decir, el modelo desarrollado permite obtener resultados bastante precisos, lo cual es particularmente importante para valores de corriente elevados, ya que es en estos casos que se producen fuerzas considerables.

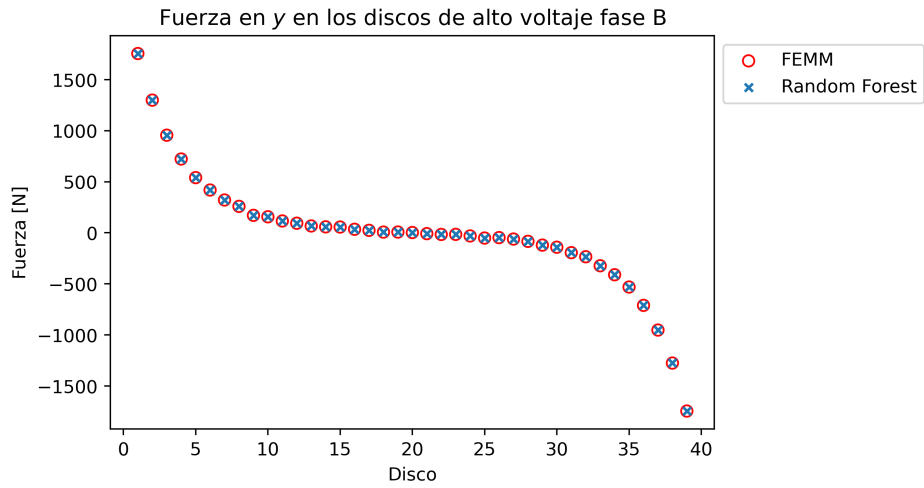


Figura 3.25: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de alto voltaje de la fase B para corriente máxima cuando la fase B se encuentra en su valor máximo

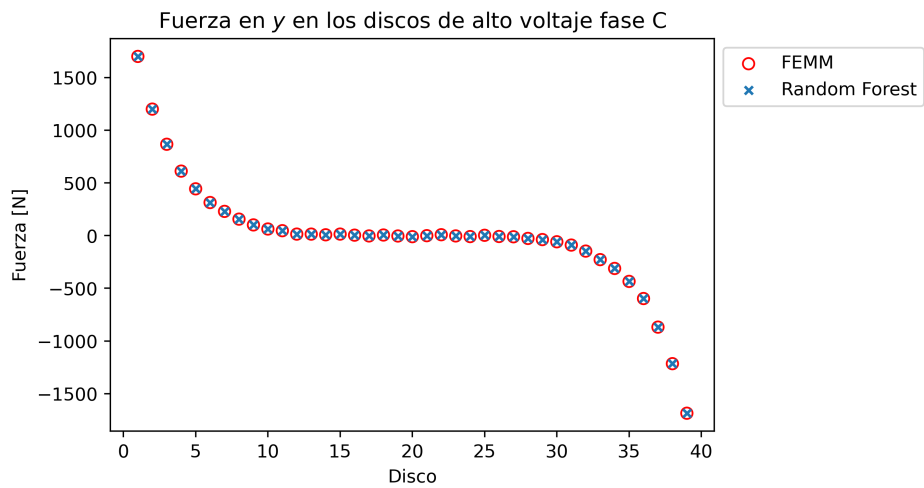


Figura 3.26: Fuerza en el eje y en los discos del devanado de alto voltaje de la fase C para corriente máxima cuando la fase C se encuentra en su valor máximo

3.2 CONCLUSIONES

- Se realizó el procedimiento para diseñar un transformador, así como su implementación en FEMM. Pero no se logró obtener una reactancia de dispersión del 10 %, debido a que en el secundario del transformador de distribución se tienen muy pocas espiras, por lo cual no hay muchas opciones en cuanto al número de discos y al número de espiras por disco. Esto limitó de gran manera la modificación de las dimensiones para conseguir el valor de reactancia planteado inicialmente.
- Se desarrolló un método basado en árboles aleatorios para la determinación de fuerzas electromagnéticas que se producen en los devanados de transformadores de distribución en condiciones de operación normal y cuando se presentan cortocircuitos, el cual tarda un menor tiempo en hallar la solución que el método de elementos finitos.
- En cuanto a la variación del error que presenta el modelo basado en árboles aleatorios al variar el número de árboles y la cantidad máxima de capas de cada árbol se determinó que el número máximo de capas del modelo basado en árboles aleatorios influye de forma más relevante que el número de árboles, hasta un cierto número de capas. Superado ese número de capas, el parámetro que influye en mayor medida es el número de árboles.
- Al comparar los valores de las fuerzas electromagnéticas obtenidos mediante FEMM con los obtenidos mediante el modelo basado en árboles aleatorios que obtuvo los mejores resultados, el error es mínimo. De esta manera, se comprueba que el modelo resulta de gran utilidad gracias a su precisión, especialmente cuando se producen corrientes elevadas como en un cortocircuito.

3.3 RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar el modelo basado en árboles aleatorios en casos de energización del transformador, en donde se tiene corriente de excitación, ya que podrían obtenerse resultados bastante satisfactorios.
- Se recomienda usar el modelo desarrollado en un transformador real, para determinar las fuerzas que se presentan durante un periodo en operación y analizar los resultados.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Najafi e I. Iskender, «Electromagnetic force investigation on distribution transformer under unbalanced faults based on time stepping finite element methods,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 76, págs. 147-155, 2016.
- [2] F. Valencia, H. Arcos y F. Quilumba, «Comparison of Machine Learning Algorithms for the Prediction of Mechanical Stress in Three-Phase Power Transformer Winding Conductors,» *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2021, págs. 1-9, 2021.
- [3] U. Grömping, «Variable importance assessment in regression: linear regression versus random forest,» *The American Statistician*, vol. 63, n.º 4, págs. 308-319, 2009.
- [4] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, J. E. Brito et al., *Máquinas eléctricas y transformadores*. Oxford University Press, 2003.
- [5] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley y S. D. Umans, «Electric machinery,» 2003.
- [6] T. Gonen, *Electric power distribution engineering*. CRC press, 2015.
- [7] N. Mahomed, «Electromagnetic forces in transformers under short circuit conditions,» *Energize Online*, págs. 36-40, 2011.
- [8] J.-M. Jin, *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [9] L. Breiman, «Random forests,» *Machine learning*, vol. 45, págs. 5-32, 2001.
- [10] F. I. Sánchez Blázquez, «Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11 kV Dyn11,» B.S. thesis, 2009.
- [11] F. Valencia, H. Arcos y F. Quilumba, «Prediction of stress in power transformer winding conductors using artificial neural networks: hyperparameter analysis,» *Energies*, vol. 14, n.º 14, pág. 4242, 2021.
- [12] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort et al., «Scikit-learn: Machine learning in Python,» *the Journal of machine Learning research*, vol. 12, págs. 2825-2830, 2011.