

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Diseño del núcleo de un transformador
trifásico de distribución para la reducción
de pérdidas técnicas**

Jhosselin Madahi Flores Camayo
Nando Ronaldo Inderique Inga
Carlos Elihu Javier Meza

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecerle a Dios por darnos la fuerza para realizar esta investigación.

A nuestros padres por estar a nuestro lado en cada una de nuestras batallas y en esta, fueron incondicionales.

A cada persona que nos dio su apoyo para poder seguir adelante a lo largo de la etapa universitaria y en la presente investigación.

DEDICATORIA

A mis padres, por haber estado presente en cada etapa de mi vida; lo que soy se los debo a ustedes.

Jhosselin

A Dios, a mis padres y a todas las personas que intervinieron en mi desarrollo profesional

Nando

A mis padres, quienes sin dudar me apoyaron, en este camino de vida universitaria, guiando mis pasos y todo aquel que intervino en este proceso.

Carlos

RESUMEN

El trabajo de investigación tiene como objetivo principal diseñar un transformador trifásico de distribución, que disminuya la cantidad de pérdidas técnicas dentro del sistema de distribución eléctrica, estas pérdidas se traducen en costos de energía perdida o disipada en el medio, si bien es cierto las pérdidas nunca serán nulas, se tiene que buscar la mayor eficiencia posible en el sistema y ellos se traducen en la minimización de pérdidas en el sistema, en especial en cada componente y uno de los componentes fundamentales es el transformador, que se encuentra a lo largo de todo el sistema, este se encarga de que se obtenga el nivel de voltaje adecuado, ya sea 220 V, 380 V o 440 V, en el caso de la investigación se enfocó en el nivel de tensión de 220 V en el secundario, el objetivo de la investigación es diseñar el transformador trifásico que pueda tener el menor porcentaje de pérdidas en comparación con los transformadores tradicionales, y que esa disminución de pérdidas se traduzca en incremento de eficiencia en el sistema eléctrico, el nivel de pérdidas que se alcanzó es de 4.6882 W y se encuentra dentro de las tolerancias establecidas por la norma internacional IEEE C57-12, el diseño presentado tiene una morfología cruciforme que es la variable con mayor relevancia dentro del diseño, también tiene una tensión de 13.2 kV con un área total de 9660 mm², el material del núcleo es mu_metal; así mismo el material de la bobina es cobre. La investigación del tipo tecnológico utiliza el método aplicado a diseño, de esta manera toma el diseño factorial 2⁴; así mismo, para el modelamiento se utilizan las técnicas de procedimiento de datos VDI 2221. El simulador utilizado es ANSYS Maxwell, para lo cual se realizan 16 combinaciones, como resultado se elige el mínimo valor expresado en potencia. De esta manera ante los resultados de las simulaciones, se obtuvo el mínimo valor que se expresa en potencia, para ello elegir el modelamiento, materiales y nivel de tensión, en general reduce las pérdidas técnicas.

Palabras claves: eficiencia, pérdidas técnicas, transformador trifásico

ABSTRACT

The main objective of the research work is to design a three-phase distribution transformer, which reduces the amount of technical losses within the electrical distribution system, these losses translate into costs of lost or dissipated energy in the environment, although the losses are true They will never be null, you have to seek the highest possible efficiency in the system and they translate into the minimization of losses in the system, especially in each component and one of the fundamental components is the transformer, which is found throughout The entire system, this ensures that the appropriate voltage level is obtained, be it 220V, 380V or 440V, in the case of the investigation it was focused on the voltage level of 220V in the secondary, the objective of the investigation is to design the three-phase transformer that may have the lowest percentage of losses compared to traditional transformers, and that this decrease in losses translates into i Increase in efficiency in the electrical system, the level of losses that was achieved is 4 W and is within the tolerances established by the international standard IEEE C57-12, the design presented has a cruciform morphology that is the most relevant variable within the design, it also has a voltage of 13.2 kV with a total area of 9660 mm², the core material is μ -metal; likewise the material of the coil is copper. The investigation of the technological type uses the method applied to design, in this way it takes the factorial design 2⁴; likewise, for the modeling, the VDI 2221 data procedure techniques are used. The simulator used is ANSYS Maxwell, for which 16 combinations are carried out, as a result the minimum value expressed in power is chosen. In this way, given the results of the simulations, the minimum value was obtained, which is expressed in power, for this to choose the modeling, materials and voltage level, in general, to reduce technical losses.

Keywords: efficiency, technical losses, three-phase transformer

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Índice de contenidos	vi
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Introducción.....	xiii
CAPÍTULO I.....	15
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1. Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1. Problema general	16
1.1.2. Problemas específicos	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3.1. Justificación técnica.....	17
1.3.2. Justificación económica.....	17
1.3.4. Justificación tecnológica	18
1.3.5. Importancia de la investigación	19
1.4. Alcances de la investigación	19
1.5. Descripción y operacionalización de variables.....	19
CAPÍTULO II.....	21
MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes del problema	21
2.1.1. Artículos científicos.....	21
2.1.2. Tesis	22
2.1.2.1. Locales	22
2.1.2.2. Nacionales	23
2.1.2.3. Internacionales	24
2.2. Bases teóricas	26
2.2.1. Sistema eléctrico de potencia.....	26

2.2.1.1. Sistemas de distribución	27
2.2.2. El transformador de distribución	27
2.2.2.1. Transformador monofásico	28
2.2.2.2. Transformador trifásico	29
2.2.3. Pérdidas en el sistema eléctrico	31
2.2.3.1. Pérdidas técnicas	32
2.2.3.2. Pérdidas en transformadores.....	32
2.2.4. Histéresis.....	33
2.2.4.1. Curva de histéresis	33
2.2.4.2. Pérdidas por histéresis	34
2.2.5. Pruebas en transformadores	36
2.2.5.1. Pruebas en vacío	36
2.2.5.2. Pruebas de corto circuito	36
2.2.6. Ecuaciones de Maxwell	37
2.2.6.1. Ley de Gauss para campo eléctrico	37
2.2.6.2. Ley de Gauss para el campo magnético.....	38
2.2.6.3. Ley de Faraday.....	39
2.2.6.4. Ley de Ampere – Maxwell.....	39
2.2.7. Métodos de los elementos finitos	40
2.2.8. Método de Aron.....	43
2.2.9. En relación a las tolerancias permitidas por la norma IEEE C57.12- 2015	44
2.3. Definición de términos básicos	45
CAPÍTULO III	46
METODOLOGÍA	46
3.1. Metodología aplicada para el desarrollo de la solución	46
3.2. Diseño de investigación	46
3.2.1. Diseño de investigación factorial 2^4 ($2 \times 2 \times 2 \times 2$)	46
3.2.2. Instrumentos utilizados en la investigación	48
3.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	48
3.4. Aplicación de la técnica VDI 2221.....	49
3.4.1. Especificaciones del proceso	49
3.4.2. Estructura de funciones.....	51
3.4.3. Caja blanca del desarrollo del diseño del transformador trifásico ...	52

3.4.4. Determinación de las dos posibles soluciones	53
CAPÍTULO IV.....	55
ANÁLISIS Y DISEÑO DE SOLUCIÓN.....	55
4.1. Identificación de requerimiento	55
4.1.1. Requerimientos que se integran al diseño matemático	55
4.1.1.1. El núcleo del transformador	55
4.1.1.2. Materiales típicos del núcleo de un transformador	55
4.2. Análisis de solución	57
4.2.1. Las principales características del transformador de distribución a diseñar.....	57
4.2.2. Cálculos de corriente y voltaje.....	57
4.2.3. Cálculo del número de vueltas, la sección transversal del conductor y la sección transversal del núcleo.....	58
4.2.4. Cálculo de la sección transversal del núcleo y sus dimensiones geométricas.....	61
4.2.5. Cálculo del tamaño total de la bobina y el ancho de la ventana del arco central.....	63
4.2.6. Determine el ancho y el peso de la ventana central de cada arco ..	69
4.2.7. Eliminación de vértices del núcleo.....	71
4.3. Diseño.....	72
CAPÍTULO V.....	74
CONSTRUCCIÓN.....	74
5.1. Construcción	74
5.1.1. Fase 1	77
5.1.2. Fase 2	79
5.1.3. Fase 3	80
5.1.4. Fase 4	82
5.2. Pruebas y resultados	90
5.3. Diseño factorial completa.....	90
5.3.1. Regresión factorial pérdidas (W) vs. A, B, C, D.....	90
5.3.2. Modelo matemático	92
5.3.3. Optimización.....	96
5.3.4. Predicción de las pérdidas de las combinaciones 14, 12 y 10 por tener las menores pérdidas seguidas de la combinación optimizada.....	98

5.4. Contrastación de resultados	100
5.4.1. Artículos científicos:.....	100
5.4.2. Tesis.....	102
Conclusiones.....	105
Recomendaciones.....	106
Trabajos futuros	107
Lista de referencias	108
Anexos	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	19
Tabla 2. Clasificación de pérdidas.....	32
Tabla 3. Tolerancias establecidas en la norma IEEE	44
Tabla 4. Matriz representativa de diseño factorial 2^4	47
Tabla 5. Combinaciones del tratamiento de variables.....	47
Tabla 6. Método de diseño de ingeniería VDI 2221	49
Tabla 7. Clasificación y definición de tareas realizadas en etapa de diseño	49
Tabla 8. Detalle de las dimensiones a analizar	51
Tabla 9. Valores típicos de pérdida de hierro de muestras típicas de láminas de acero eléctrico revestido de acero revestido con Carlite de AK a 50 Hz y 60 Hz. (Parte 1)	56
Tabla 10. Valores típicos de pérdida de hierro de muestras típicas de láminas de acero eléctrico revestido de acero revestido con Carlite de AK a 50 Hz y 60 Hz. (Parte 2)	56
Tabla 11. Características nivel de tensión 1.....	57
Tabla 12. Características nivel de tensión 2.....	57
Tabla 13. Nivel de voltaje de taps para 10 kV	57
Tabla 14. Nivel de voltaje de taps para 13.2 kV	57
Tabla 15. Diseño factorial (datos).....	90
Tabla 16. Resumen del diseño.....	90
Tabla 17. Análisis de varianza.....	90
Tabla 18. Resumen de modelo	91
Tabla 19. Coeficientes codificado.....	92
Tabla 20. Residuos para pérdidas (W).....	93
Tabla 21. Parámetros.....	96
Tabla 22. Solución.....	96
Tabla 23. Predicción de respuesta múltiple.....	96
Tabla 24. Predicción de respuesta múltiple combinación 14.....	98
Tabla 25. Predicción de respuesta múltiple combinación 12.....	98
Tabla 26. Predicción de respuesta múltiple combinación 10.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.	26
Figura 2. Redes de distribución.....	27
Figura 3. Transformador elemental	28
Figura 4. Transformador trifásico.	29
Figura 5. Circuitos magnéticos y eléctricos de un transformador trifásico.....	30
Figura 6. Denominación de terminales en un transformador trifásico.	31
Figura 7. Conexiones en el transformador trifásico.	31
Figura 8. Curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.....	34
Figura 9. Ensayo en vacío.....	36
Figura 10. Ensayo de corto circuito.	37
Figura 11. Líneas de campo de un dipolo eléctrico.	38
Figura 12. Representación del campo magnético.	38
Figura 13. Deformaciones en un elemento finito.	43
Figura 14. Método de Aron.....	43
Figura 15. Contenido de Ansys Maxwell.	44
Figura 16. Back box del diseño de núcleo del transformador.....	51
Figura 17. Caja blanca del diseño de transformación trifásica de distribución .	52
Figura 18. Diseño 1	53
Figura 19. Diseño 1	54
Figura 20. Dimensionamiento general del núcleo.	62
Figura 21. Corte de sección central del núcleo.	63
Figura 22. Designación de las partes de las arcadas.	69
Figura 23. Diseño establecido parte 1	72
Figura 24. Diseño establecido parte 2.....	72
Figura 25. Diseño establecido parte 3.....	73
Figura 26. Vista frontal 10 kV	75
Figura 27. Vista superior de sección rectangular 10 kV	75
Figura 28. Vista superior de sección cruciforme 10 kV	75
Figura 29. Vista frontal 13.2 kV	76
Figura 30. Vista superior de sección rectangular 13.2 kV	76
Figura 31. Vista superior de sección cruciforme 13.2 kV	77
Figura 32. Construcción del primer modelo tradicional	77

Figura 33. Dimensiones y material de las bobinas	77
Figura 34. Designación del parte primaria y secundaria de las boinas	78
Figura 35. Diseño de morfología rectangular integrado	78
Figura 36. Construcción del segundo modelo cruciforme	79
Figura 37. Construcción del segundo modelo cruciforme	79
Figura 38. Integración de valores para la curva H-B para el Acero M-4.....	80
Figura 39. Integración de valores para la curva H-B para el Mu_metal.....	80
Figura 40. Integración de valores para la curva B-P para el Acero M-4	81
Figura 41. Integración de valores para la curva B-P para el Mu_metal.....	81
Figura 42. Primera combinación.....	82
Figura 43. Segunda combinación.....	82
Figura 44. Tercera combinación.....	83
Figura 45. Cuarta combinación	83
Figura 46. Quinta combinación.....	84
Figura 47. Sexta combinación	84
Figura 48. Séptima combinación	85
Figura 49. Octava combinación.....	85
Figura 50. Novena combinación.....	86
Figura 51. Décima combinación	86
Figura 52. Décima primera combinación	87
Figura 53. Décima segunda combinación	87
Figura 54. Décima tercera combinación	88
Figura 55. Décima cuarta combinación	88
Figura 56. Décima quinta combinación	89
Figura 57. Décima sexta combinación	89
Figura 58. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	93
Figura 59. Gráfica normal de efectos estandarizados	94
Figura 60. Efectos principales de las pérdidas	94
Figura 61. Interacción de pérdidas (W)	95
Figura 62. Optimización en cada variable	97
Figura 63. Cubos de medidas ajustadas de pérdidas (W).....	97
Figura 64. Gráfica de contorno de pérdidas (W)	99
Figura 65. Gráfica de superficie de pérdidas (W)	100

INTRODUCCIÓN

Los transformadores de distribución son parte fundamental de los sistemas de distribución por lo que se pueden categorizar como el corazón de estas redes para obtener un nivel de tensión adecuado para el uso del usuario final, estos tienen que ser eficientes, pero se puede observar que las pérdidas en el sistema son un problema recurrente, por tal motivo se puede afirmar que necesitan ser minimizadas en todo el sistema. Existen pérdidas, pero esta investigación solo se enfocará en las pérdidas técnicas que encuentran en el corazón de las redes de distribución, buscando una solución a ese problema utilizando principios del diseño, por tal motivo, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuál será el diseño que reducirá las pérdidas técnicas del núcleo de un transformador trifásico de distribución? Por lo tanto, el objetivo que tiene es de diseñar un transformador trifásico de distribución que minimice las pérdidas que se generan en el núcleo, para lo cual se identificará el material ferromagnético del núcleo, la morfología del núcleo, las características del devanado y el nivel de tensión que brindará menores pérdidas. El trabajo de investigación se realiza por el motivo de las pérdidas que existe en el núcleo por efecto Joule o también llamado pérdidas por histéresis; de esta manera, para mejorar en partes el sistema de distribución eléctrico, se aporta con el diseño del núcleo de transformador trifásico de distribución.

Por lo cual el trabajo de investigación se subdivide en lo siguiente:

El capítulo I corresponde al planteamiento del estudio, donde se aborda de forma detallada el problema general y lo que el estudio quiere lograr.

El capítulo II corresponde al marco teórico el cual abarca estudios anteriores similares al presente, teoría fundamental para la comprensión del tema y conceptos fundamentales enfocados al objetivo de la investigación.

El capítulo III corresponde a la metodología usada en el estudio, modelos, simulaciones, pruebas y similares, que corresponden al diseño del transformador trifásico de distribución.

El capítulo IV corresponde al resultado y el análisis de estos, explicando los valores obtenidos en el estudio.

El capítulo V corresponde al análisis de la construcción del prototipo.

Por último, se tienen las conclusiones de la investigación y proyección a trabajos futuros que complementan esta investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

El mundo está en constante desarrollo y el Perú no está exento de dicha evolución, este tiene el deber de mantener un crecimiento económico en su población, pero para el crecimiento sostenible de la economía y los avances tecnológicos es importante la innovación dentro del subsector de electricidad y sobre todo el desarrollo de los sistemas eléctricos tradicionales. Es necesario establecer crecimiento progresivo en las redes eléctricas fortaleciendo la tecnología vigente e integrando nueva tecnología. Lacalle y Parrilla mencionan en su libro “La madre de todas las batallas” que “La verdadera batalla es la eficiencia y el coste” (1), además de recalcar que “La energía debe ser barata, abundante, asequible coste, disponible, de fácil transporte y almacenamiento” (1) es claro que dentro de estas ideas se puede resumir en: energía de calidad, eficiente y con el costo que sea óptimo para las empresas que se dedican al negocio de la distribución y comercialización de energía eléctrica. Para ello, es importante fortalecer la columna vertebral de dicho servicio esencial, que vendrían a ser las redes de distribución de energía eléctrica, cada componente dentro de ese completo sistema debe tener estándares de calidad y eficiencia elevados, y de ese modo poder ofrecer un servicio de calidad. Es decir, es necesario estudiar cada parte de los sistemas y redes de distribución, en especial lo que se considera el corazón de este sistema: “el transformador”

específicamente el transformador de distribución. Juárez en su libro “Sistemas de distribución de energía eléctrica” define al transformador de distribución como aquel que “reduce el voltaje del alimentador primario al voltaje de utilización del usuario. Los voltajes de utilización comunes son de 440 V y de 220 V entre fases” (2). Sin embargo, para lograr el mejor rendimiento es necesario reducir las pérdidas presentes en el sistema. “Dentro de las pérdidas de energía pueden existir gran cantidad de causas, pero se debe saber cuáles atacar y de esta manera manejar un sistema ideal” (3) adicional a ello se debe tener en cuenta que las pérdidas de energía eléctrica no pueden ser eliminadas en su totalidad, ya que en el trayecto hasta el usuario final hay pérdidas, ya sea por el calentamiento de conductores y en el caso de los transformadores específicamente en los núcleos ferromagnéticos (3). Sin duda alguna el tema de las pérdidas son la suma de ineficiencias dentro del sistema de distribución; estas se subdividen en pérdidas técnico-comerciales, pero al enfocarse en el transformador de distribución solo se guiará el enfoque en las pérdidas técnicas, que son típicas en las máquinas eléctricas, por ello es necesario contribuir al control de estas y maximizar la reducción enfocándose en lo que se denomina, el componente principal dentro del sistema de distribución, utilizando los conocimientos ingenieriles del sistema y de ese modo establecer una posible solución, a partir de ello se plantea la siguiente interrogante:

1.1.1. Problema general

- ¿Cuál será el diseño que reducirá las pérdidas técnicas del núcleo de un transformador trifásico de distribución?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el material adecuado del núcleo para reducir las pérdidas en el núcleo de un transformador trifásico de distribución?
- ¿Qué tipo de morfología del núcleo es el más adecuado para la reducción de las corrientes de Foucault en un transformador trifásico de distribución?
- ¿Cuáles serán las características del devanado de la bobina del transformador trifásico de distribución?
- ¿Cuál será el nivel de tensión que brindará menores pérdidas para el diseño de transformador trifásico?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar un transformador trifásico de distribución que minimice las pérdidas que se generan en el núcleo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar el material ferromagnético del núcleo que disminuya las pérdidas en el núcleo de un transformador trifásico de distribución.
- Determinar la morfología del núcleo que es la más adecuada para la reducción de las corrientes de Foucault en un transformador trifásico de distribución.
- Determinar las características del devanado del transformador trifásico de distribución.
- Determinar el nivel de tensión que brindará menores pérdidas para el diseño de transformador trifásico.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación técnica

El presente trabajo nace bajo la intención de disminuir las pérdidas generadas a lo largo del sistema eléctrico de distribución, en especial enfocar la investigación en las pérdidas técnicas que siempre están presentes dentro del sistema eléctrico de distribución, es cierto que las pérdidas nunca van a desaparecer por completo, pero la búsqueda continua de disminuirlas se ve reflejado de una mayor eficiencia en la distribución de energía eléctrica. Las pérdidas técnicas se encuentran presentes en todos los componentes a lo largo del sistema, sin embargo, enfocarse en cada uno de ellos dentro de una investigación es claramente ineficiente, por esta razón la investigación se enfocó en el corazón del sistema de distribución eléctrica, el transformador trifásico de distribución.

1.3.2. Justificación económica

Durante el proceso de generación de energía eléctrica a diario se invierten grandes sumas de dinero a lo largo de todo el sistema, para la optimización de energía producida, sin embargo, como se viene mencionando, las pérdidas son un problema persistente que se traducen a costo de pérdida de energía y, lo más

importante, para poder brindar un servicio de calidad se maximiza la inversión realizada, disminuyendo las pérdidas, en especial las técnicas en los componentes del sistema, adicional a ello estas pérdidas provocan una reducción de vida útil en los componentes, en especial en los transformadores, en tal motivo esta investigación se enfoca en disminuir esas pérdidas que se traducen en costos, mediante el diseño de transformador trifásico de distribución. Así mismo, diseñar el núcleo del transformador trifásico de distribución, aporta a la comunidad económicamente y sustenta la confiabilidad, lo primero por expresarse en los recibos de energía eléctrica mensuales, reduciendo el factor de mantenimiento, y lo segundo en temas de confiabilidad mejorando la calidad de servicio eléctrico.

1.3.3. Justificación teórica

Con el fin de reducir las pérdidas técnicas en el núcleo de los transformadores, se adopta una nueva teoría diferente a las típicas fórmulas analíticas que brindan un cálculo poco exacto de las pérdidas por Histéresis y Corriente de Foucault (Corrientes parásitas). Según la teoría revisada existen muchos modelos que son más exactos, entre ellas se encuentra el Método de Arón, por otro lado, también se encuentra el Método de Elementos Finitos que brinda datos en 98.5% cercanos a los reales; para esto se utiliza el simulador Ansys Maxwell, que contiene paquetes de construcción y base de datos de los materiales, lo cual prácticamente es un software de uso del método de elementos finitos.

1.3.4. Justificación tecnológica

Con el presente trabajo se buscó mitigar la presencia de las pérdidas en el núcleo del transformador con la incorporación de un material ferromagnético que tiene una nueva aleación, con nueva tecnología existente, se pueden realizar diferentes simulaciones para optimizar tiempo en las pruebas realizadas a los transformadores. Continuamente se van incluyendo y emergiendo nuevos materiales al mercado, lo cual las empresas de fabricación de transformadores están de igual manera en continuo innovación y mejoras. Para esto, la presente investigación utilizó materiales eficientes y de calidad para la comparación, para finalmente obtener el resultado óptimo.

1.3.5. Importancia de la investigación

La investigación es importante ya que permitirá diseñar el núcleo de un transformador trifásico de distribución para reducir parte de las pérdidas técnicas existentes a lo largo del sistema, dicha importancia radica en ello, debido a que las generadoras y en este caso las distribuidoras de energía eléctrica trabajan continuamente en la máxima disminución de estas pérdidas.

1.4. Alcances de la investigación

La investigación tiene un alcance experimental realizando un prototipo virtual que muestre las pérdidas obtenidas en el transformador.

1.5. Descripción y operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Autor	<ul style="list-style-type: none"> Flores Camayo, Jhosselin Madahi Inderique Inga, Nando Ronaldo Javier Meza, Carlos Elihu 			
Título	Diseño del núcleo de un transformador trifásico de distribución para la reducción de pérdidas técnicas			
Problema	¿Cuál será el diseño que reducirá las pérdidas técnicas del núcleo de un transformador trifásico de distribución?			
	Independiente		Dependiente	
Variables	Núcleo del transformador trifásico		Pérdidas técnicas	
Definición conceptual	"El núcleo del transformador está constituido por chapas magnéticas de alta permeabilidad, bajo campo coercitivo y baja resistencia óhmica, con el fin de reducir las pérdidas en los circuitos magnéticos" (4)		"Estas constituyen una parte de la energía que no es aprovechada en el sistema de transporte de distribución del fluido eléctrico que consume y requiere para su operación. Dicha energía no es facturada y es catalogada como pérdida" (5)	
Definición operacional	Variable que expresa la combinación óptima de elementos de diseño.		Variable que permite cuantificar el impacto del diseño en el sistema a analizar.	
Variable independiente	Núcleo del transformador trifásico			
Dimensiones	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Instrumento
Material	Variaciones de flujo magnético del núcleo del transformador	B	Cuantitativa-continua	Simulador Ansys
Morfología	Variaciones de la forma núcleo del transformador	M ²	Cuantitativa-continua	Simulador Ansys

Devanado	Variaciones de la resistividad del conductor	Ω/m	Cuantitativa-continua	Simulador Ansys
Nivel de Tensión	Variación del nivel de tensión	V	Cuantitativa-continua	Simulador Ansys
Variable dependiente	Pérdidas Técnicas			
Dimensiones	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Instrumento
Pérdidas	Potencia	kW	Cuantitativa-continua	Simulador Ansys

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Artículos científicos

En el artículo científico “*Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal*” (6), cuyo objetivo fue describir el comportamiento de factor K en los transformadores respecto a las cargas, la metodología que utiliza es un método deductivo. El artículo presenta como resultado el modelo del cual fue comprobado, para las cargas agrícolas, mineras e industriales; por lo que los contenidos armónicos presentes afectan en las pérdidas de los transformadores, esto respecto al factor K. El estudio aporta en la investigación tener claro un factor de pérdidas en los núcleos de los transformadores (6).

En el artículo científico “*Análisis de falla en la chapa de acero al silicio en transformadores de distribución. Efecto de la zona de precedencia de los transformadores*” (7), cuyo objetivo fue realizar un análisis para obtener la estructura y propiedades magnéticas del material acero al silicio, la metodología que utiliza esta investigación es un método inductivo. El artículo presenta como resultado las pruebas de microscopía electrónica, a todas las muestras de transformadores, del cual no es recomendable en factores térmicos utilizar el material presente. El estudio aporta en temas de materiales para el núcleo y diseño, para ello el estudio muestra unos ensayos descartando transformadores fallados (7).

En el artículo científico *“Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por barrido de frecuencia”* (8), cuyo objetivo fue la aplicación de una técnica aplicada a los transformadores para medir las pérdidas, la metodología que utiliza es un método de análisis. El artículo científico tiene como resultado las simulaciones aplicadas a transformadores, por lo que la espectroscopía es una herramienta importante para manejo de datos y posibles causas de fallas. El aporte que entrega el artículo es el análisis y la metodología en las pruebas de transformadores (8).

En el artículo científico *“Estimación temprana de la pérdida de vida útil de transformadores de distribución”* (9), cuyo objetivo es presentar un método para calcular las condiciones de operaciones de los transformadores de distribución, esto utilizando facturas mensuales, la metodología que utiliza la investigación es un método de análisis. Como resultado el artículo científico tiene la comparación de los transformadores considerados en riesgo con los dañados, como también con los fallados. El estudio tiene características importantes que se considera en la investigación como es la estimación de las pérdidas utilizando las facturaciones mensuales (9).

2.1.2. Tesis

2.1.2.1. Locales

En la tesis de posgrado *“Evaluación de las pérdidas en transformadores de distribución bajo condiciones de operación”* (10), la investigación tiene como objetivo evaluar las pérdidas en transformadores de distribución, para esto aplica una metodología de análisis; así mismo la investigación finaliza con las siguientes conclusiones, las pérdidas en los transformadores son influenciados por el tipo de carga, como también expresa que la variación de la carga no afecta las pérdidas en vacío de los transformadores de distribución, también ante una variación de la corriente afecta la variación de las pérdidas con carga. La investigación muestra información relevante, de los tipos de pérdidas que se encuentran en un transformador, así mismo el comportamiento del diagrama de carga, del cual se aprecian las pérdidas en el transformador (10).

En la tesis de posgrado *“Análisis comparativo de transformadores monofásicos con núcleo circular acorazado con respecto a los convencionales”* (11), la investigación tienen como objetivo realizar un análisis comparativo de transformadores monofásicos con núcleo circular, para esto utiliza el método de análisis; así mismo la investigación termina con la conclusión, los transformadores con núcleo circular acorazado tienen menores pérdidas y costos menores en construcción que los transformadores convencionales. La investigación cuenta con información relevante, en temas de diseño, tipo de material, los costos de construcción y los ensayos realizados comparados con los transformadores convencionales (11).

2.1.2.2. Nacionales

En la investigación *“Cálculo de pérdidas en el diseño del núcleo de un transformador de distribución aplicado el método de los elementos finitos”* (12), se tiene como objetivo realizar el cálculo de las pérdidas en el diseño del núcleo de un transformador, para esto utiliza el método deductivo; así mismo la investigación termina con la conclusión, utilizando el método de los elementos finitos se pueden diseñar núcleos para transformadores de diferentes potencias, materiales y anticipar en saber cuáles serán las pérdidas en el núcleo, también hace mención de un software para el modelado del núcleo del transformador. La investigación tiene características como informaciones importantes como es la metodología. (12)

En el informe de suficiencia *“Cálculos y pruebas en la reparación de transformadores de distribución”* (13), se tiene como objetivo realizar los cálculos y pruebas en la reparación de transformadores de distribución, para lo cual utiliza el método deductivo; así mismo la investigación termina con la conclusión, ante el diseño de transformadores, la experiencia y los diseños previos se apoyan en tablas y diagramas experimentales. Los transformadores tienen que soportar tensiones dieléctricas y mecánicas. Algunas soluciones pueden tener un impacto negativo en otro problema. Para que el transformador exhiba una buena tensión dieléctrica, puede ser necesario mejorar el aislamiento de sólidos contra elementos líquidos, pero esta solución hace que el problema de enfriar el

transformador no tenga solución, porque el aislamiento no es suficiente para proporcionar un buen flujo de calor (13).

2.1.2.3. Internacionales

En la tesis de posgrado *“Transformadores de distribución con núcleo de metal amorgo: Investigación y diseño”* (14), se tiene como objetivo realizar la investigación y diseño de un transformador de distribución con núcleo de metal amorgo, para ello utiliza el método aplicativo; así mismo la investigación concluye que la aplicación de las aleaciones amorfas en transformadores es conveniente en tres aspectos importantes, el valor relativo de la energía, costo y ejecución del material, diseño económicamente factible de fabricar. La investigación presenta datos relevantes de consideración en temas materiales, existiendo opciones o suplementos a materiales convencionales (14).

En la tesis de posgrado *“Cálculos eléctricos para diseño de transformador trifásico reductor de tensión de 75kVA, 208_20V para instalación galvánica de la empresa Zintepec Ltda.”* (15), se tiene como objetivo realizar los cálculos eléctricos para diseño de transformador trifásico reductor de tensiones, para ello utiliza el método inductivo. La investigación termina concluyendo que al llevar a cabo los cálculos de transformadores, necesariamente se toman en cuenta aspectos ambientales. La investigación presenta características importantes a considerar en temas de cálculos eléctricos (15).

En la tesis de posgrado *“Cálculos detallados de pérdidas en sistemas eléctricos de distribución aplicado al alimentador ‘Universidad’ perteneciente a la empresa eléctrica Ambato regional centro norte S. A.”* (3), se tiene como objetivo realizar los cálculos detallados de pérdidas en sistemas eléctricos de distribución al alimentador, para ello utiliza el método deductivo. La investigación concluyó que el análisis realizado para mejorar el funcionamiento de la red permitirá el diagnóstico de la tasa de pérdida y la pérdida técnica en cada componente de la red. El estudio incluye datos importantes como determinar las pérdidas en el alimentador y sus componentes (3).

En la tesis de posgrado *“Desarrollo de un software didáctico para simulación por computadora de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito a transformadores de distribución en los laboratorios de máquinas eléctricas UTE 2009”* (16), la investigación tiene como objetivo desarrollar un software didáctico para simulaciones por computadoras de las pruebas de circuito abierto, para ello utiliza el método aplicado; así mismo la investigación concluye que la utilización de simulaciones permite tener mejoras óptimas de comportamiento de las pruebas de los transformadores, así mismo ayuda en la comprensión de la intervención de cada elemento sometidos a niveles de corriente. La investigación tiene características importantes como es software para realizar la toma de datos y referencias (16).

En la tesis *“Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11 kV Dyn 11”*, se tiene como objetivo diseñar un transformador de 5MVA, para ello el método que utiliza es el aplicativo; así mismo la investigación concluye en la selección de causas sobre la pérdida más importante que es una de ellas, se encuentra en el núcleo del transformador para poder solucionar aún más este problema, el núcleo debe diseñarse en forma circular para reducir la pérdida en el transformador. La investigación llevó a cabo un amplio desarrollo en la parte de diseño, lo que llevó a las conclusiones anteriores (17).

En la tesis *“Modelo para el diseño térmico hidráulico de un transformador de distribución eléctrica”* (18), la investigación tiene como objetivo realizar un modelo para el diseño térmico hidráulico de un transformador de distribución eléctrica, para ello utiliza el método de análisis, finaliza su investigación desarrollando el modelo térmico de los devanados refrigerados por aceite de baja tensión que corresponde a un transformador de distribución monofásico. Solución analítica de la ecuación de transferencia de calor unidimensional del proceso de calor de convección de conducción de refrigerante de aceite de bobinado (18).

En la tesis *“Diseño para la construcción de los transformadores de distribución monofásicos tipo tanque”* (19), la investigación tiene como objetivo diseñar un transformador de distribución monofásico tipo tanque, para lo cual

utiliza el método aplicado. Se trata de la investigación de diseño y construcción de transformadores de distribución monofásicos tipo tanque con capacidades de 5, 10, 15 y 50 kVA (autoprotección). Programar la aplicación en formato Java para visualizar los resultados del cálculo mediante el método de enseñanza de las matemáticas con el fin de analizar los parámetros técnicos utilizados para construirlos. Tamaño del tanque, tipo de ferrosilicio, pérdida del núcleo, peso del núcleo y peso total del transformador. Basado en el tamaño de bobinado de cobre que cumple con el estándar INEN (19).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Sistema eléctrico de potencia

“El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible” (20). En el Perú se le denomina “Sistema Eléctrico Interconectado Nacional y este comprende todas las instalaciones y actividades dentro del sector eléctrico que se encuentra conectada a través de líneas de transmisión”; así mismo, en el sistema eléctrico de potencia se encuentran niveles de tensiones como por ejemplo, 13.2 kV, 10kV, estos para media tensión, también para baja tensión están los niveles de 220 V, 380 V, 440V (21).

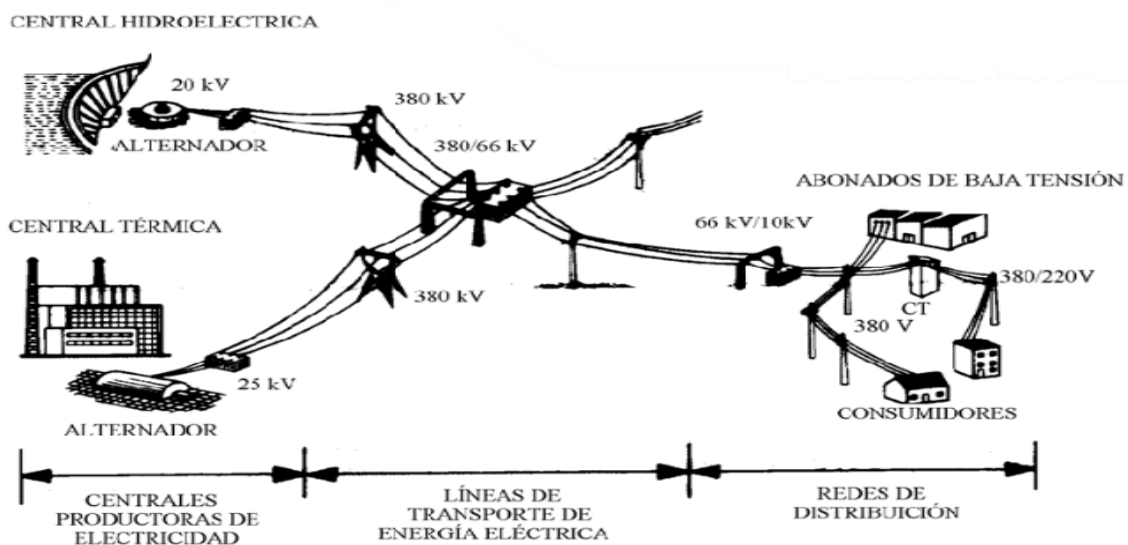


Figura 1. Sistema eléctrico de potencia. Tomada del Suministro de energía eléctrica (20)

2.2.1.1. Sistemas de distribución

La distribución eléctrica se enfoca en proporcionar suministro de energía eléctrica desde el sistema de transmisión hacia cada uno de los usuarios finales del servicio eléctrico, estas redes que conforman el sistema de distribución deben diseñarse de tal forma que exista un equilibrio. Entre la seguridad del suministro, en el sentido de tener la capacidad de seguir funcionando ante posibles fallas o desperfectos en algunas instalaciones, y la eficiencia, en el sentido de la minimización de costos (21).

Dentro del sistema de distribución se presentan estos componentes:

- Alimentadores primarios de distribución
- Transformadores de distribución
- Alimentadores secundarios
- Acometidas
- Equipos de medición

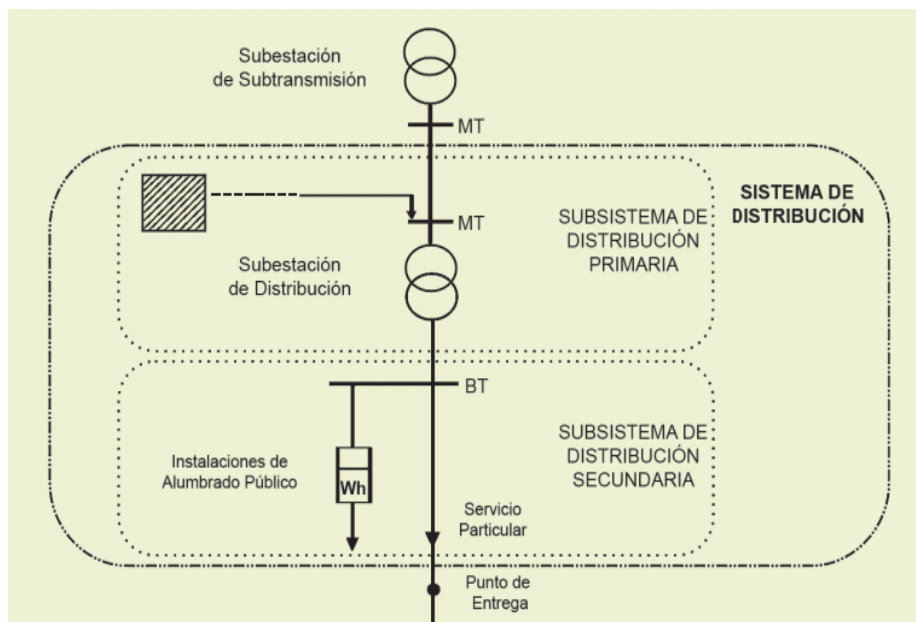


Figura 2. Redes de distribución. Tomada de la Norma EC 010

2.2.2. El transformador de distribución

“El transformador se puede considerar como una máquina eléctrica estática (sin movimiento) que es capaz de cambiar valores de tensión y corriente sin alterar la frecuencia ni la potencia de forma significativa” (4). El transformador es usado a lo largo de todo el sistema en diferentes potencias y para distintos

niveles de tensión con el fin de redistribuirlas, existen transformadores de potencia y también los transformadores de distribución.

Los transformadores de distribución son los equipos encargados de cambiar la tensión primaria a un valor menor de tal manera que el usuario pueda utilizarla sin necesidad de equipos e instalaciones costosas y peligrosas. En sí el transformador de distribución es la liga entre los alimentadores primarios y los alimentadores secundarios (20).

Según la norma NTP 370.002, un transformador "es un aditivo estático que convierte un sistema de corriente y voltaje variable en uno o más sistemas de corriente variable con la misma intensidad y voltaje y la misma frecuencia mediante inducción electromagnética". Consiste en un núcleo de hierro con vueltas de alambre llamado bobina. La bobina primaria o "primaria" es la bobina que recibe el voltaje de entrada, y la bobina secundaria o "secundaria" es la bobina que proporciona el voltaje convertido (22).

Existen transformadores monofásicos y trifásicos que a continuación se detallan:

2.2.2.1. Transformador monofásico

“Un transformador monofásico posee dos bobinados, uno primario y otro secundario, que se desarrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas” (4). Por el bobinado primario se conecta el voltaje de entrada y por el bobinado secundario se obtiene el voltaje de salida, este transformador puede ser del tipo reductor (4).

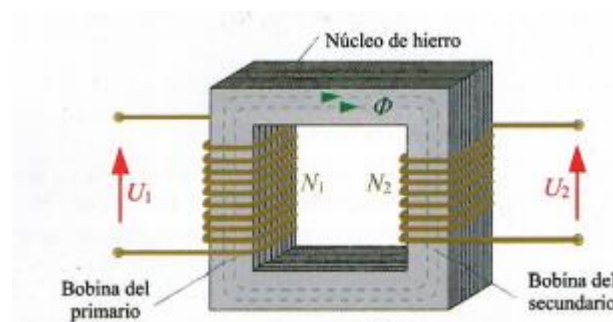


Figura 3. Transformador elemental Tomada de Electrotécnica (4)

De la figura anterior:

- a) $N_1 = N.^\circ$ de espiras del primario
- b) $N_2 = N.^\circ$ de espiras del secundario
- c) $U_1 =$ Nivel de voltaje del primario
- d) $U_2 =$ Nivel de voltaje del secundario

En el caso de la relación que existe entre el número de espiras y el nivel de voltaje es el siguiente:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

2.2.2.2. Transformador trifásico

El transformador trifásico en concepto equilibrado tiene en su lado primario un sistema simétrico de tensiones conectadas, en su lado secundario puede estar en vacío o conectadas a carga, del cual las impedancias son iguales. En su sistema trifásico, tanto el primario o secundario pueden estar conectados en estrella o triángulo, con o sin un conductor neutro. Un banco trifásico es representado por tres transformadores monofásicos iguales (23).

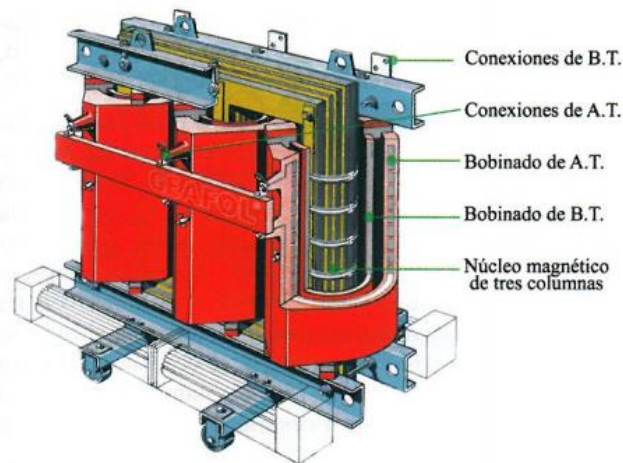


Figura 4. Transformador trifásico. Tomada de Electrotecnia (4)

Supóngase el banco de transformadores a base de cargas equilibradas, en los secundarios, para ello la suma de los flujos entrega como resultado cero.

$$\phi I + \phi I + \phi I = 0 \quad (2)$$

Donde:

ϕ l= línea monofásica

El bobinado es importante, y la elección de material a elegir de igual manera es importante, para ello se analiza la conductividad, de esta manera en primer lugar está el oro seguido del cobre y posteriormente la plata, estos materiales tiene alta conductividad eléctrica (23).

2.2.2.2.1. Núcleo trifásico

La ventaja de incluir un núcleo trifásico es el ahorro de peso, además reduce las pérdidas considerablemente; sin embargo, utilizar un núcleo trifásico no descarta el uso de utilizar un banco trifásico en el sistema eléctrico de potencia (24). Los núcleos más usados son de sección rectangular, lo cual facilita en su construcción. Sin embargo la utilización de sección cruciforme teóricamente reduce una proporción en pérdidas.

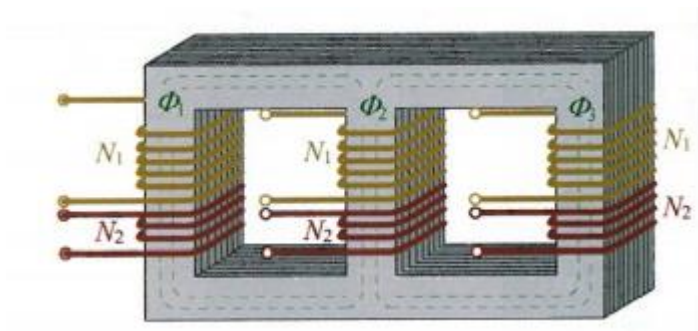


Figura 5. Circuitos magnéticos y eléctricos de un transformador trifásico. Tomada de Electrotecnia (4)

Los materiales más comunes en la construcción del núcleo de transformadores son el silicio, de igual manera el acero. Sin embargo, actualmente en el mercado de materiales de ingeniería y de construcción de chapas para transformadores está el material μ -metal, que tiene alta permeabilidad, esto favoreciendo a la utilización, de igual manera está el acero M-4, que esta segundo en temas de alta permeabilidad (24).

2.2.2.2.2. Conexiones de los transformadores trifásicos

Los bobinados de un transformador trifásico se pueden conectar en estrella o en triángulo esto pasa en ambos lados del transformador ya sea

primario o secundario. Según la Unesa 5201-D estas se denominan de la siguiente manera:

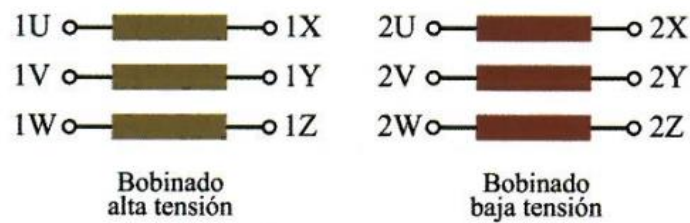


Figura 6. Denominación de terminales en un transformador trifásico. Tomada de Electrotecnia (4)

Estas básicamente se encargan de adaptar la corriente de acuerdo a los requerimientos de uso, por ejemplo, la conexión del tipo estrella consigue que cada fase del transformador sea $\sqrt{3}$ veces menos al voltaje de línea, por otro lado, la conexión del tipo Delta hace que la corriente en el sistema sea $\sqrt{3}$ veces mayor al de la corriente de línea. Estas con algunos de los tipos de conexión.

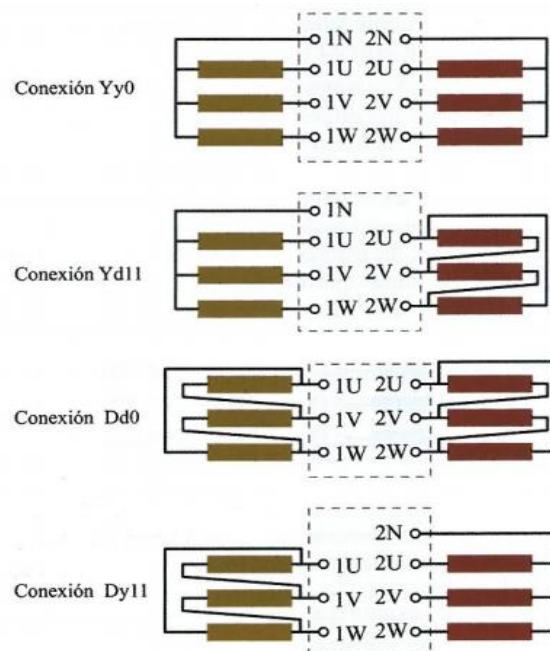


Figura 7. Conexiones en el transformador trifásico. Tomada de Electrotecnia (4)

2.2.3. Pérdidas en el sistema eléctrico

“Las pérdidas equivalen a la diferencia entre la energía generada, recibida o suministrada y la energía vendida, entregada o facturada por las compañías eléctricas” (5) estas a su vez se dividen en pérdidas técnicas y pérdidas comerciales como lo indica la siguiente tabla.

Tabla 2.
Clasificación de pérdidas



Tomad de Aplicaciones de sistema de medición avanzada (AMI) (5)

2.2.3.1. Pérdidas técnicas

Las pérdidas eléctricas que ocurren en la red de transmisión y distribución de energía del sistema eléctrico son causadas por el paso de corriente a través de los componentes de la infraestructura del sistema eléctrico: conductores, cables, transformadores, interruptores y otros equipos. (25) Estas pérdidas se manifiestan físicamente en forma de calor y se pueden cuantificar utilizando la siguiente fórmula:

$$Pérdidas = I^2 R \quad (3)$$

- I = corriente en que circula por el equipo (A)
- R= resistencia (Ω)

Este tipo de pérdidas es normal en cualquier distribuidora y no es posible suprimirlas totalmente, solo se puede reducirlas lo máximo tecnológicamente posible.

2.2.3.2. Pérdidas en transformadores

La pérdida en el transformador es la pérdida que se produce en el núcleo del transformador, que se puede dividir en dos tipos: la pérdida en el núcleo magnético y la pérdida en el conductor de bobinado. Al mismo tiempo, en el

núcleo del transformador, existen dos tipos de pérdida: pérdida por histéresis y pérdida por corrientes parásitas (22).

Existen procedimientos para poder calcular la carga en los transformadores y estos son:

2.2.3.2.1. Medir directamente la carga

“Este procedimiento se realiza con la instalación de amperímetros con pinzas, en los transformadores de distribución seleccionados durante la temporada de demanda máxima. Otro sistema de medición es realizar mediciones instantáneas, utilizando un amperímetro. Esto requiere que el personal técnico esté en el área durante la hora de máxima carga” (25).

2.2.3.2.2. Energía utilizada por los clientes

“Este sistema, conocido también como sistema de Administración de la Carga en los Transformadores, es muy efectivo y es ampliamente utilizado por las empresas distribuidoras. El sistema de Administración de la Carga en los Transformadores o *Transformers Load Management* (TLM)”.

2.2.4. Histéresis

Para comprender este fenómeno, se consideró una muestra de material ferromagnético que será el núcleo del transformador inicialmente desmagnetizado. El parámetro de control experimental se considera el campo H porque está directamente relacionado con la corriente (según la ley de Ampere). Si el campo H aumenta desde cero, la magnetización del material aumentará monótonamente. Primero, se observa la presencia de saturación. Es decir, si el campo magnético H alcanza un valor suficientemente alto, la magnetización M alcanza un valor máximo dependiendo del material. El resultado experimental se puede entender simplemente porque significa que, en una muestra saturada, todos los dipolos magnéticos básicos están alineados con el campo H (22).

2.2.4.1. Curva de histéresis

Ahora, el material ferromagnético es Si disminuimos H ahora, se regresa a lo largo de una nueva curva y se llega al punto e, donde $H = 0$, pero $B = t: 0$.

valor menor, el signo de la potencia es negativo y la energía vendrá dada por el material ferromagnético (22).

Para el período de tiempo de magnetización, el cálculo de la fórmula de la expresión anterior ayudará a determinar la pérdida de energía por ciclo debido a la histéresis. Si en un cierto volumen de material ferromagnético, el flujo magnético de cada punto se distribuye uniformemente, y se conoce la representación de su bucle de histéresis, y está configurado para cambiar periódicamente la frecuencia en Hertz, entonces la disipación de potencia causará histéresis (potencia perdida debido a histéresis, expresada en vatios) será (22):

$$pH = V.F (\text{área de lazo}) (5)$$

A partir de diferentes mediciones de la pérdida por histéresis de varios aceros utilizados, se descubrió empíricamente la siguiente relación de pH (22):

$$pH = V.(k.F.B \text{ max}) (6)$$

Donde:

- pH: pérdidas por histéresis en (Watts)
- F: frecuencia (Hz)
- B Max: inducción máxima (Tesla)
- V: volumen del material (m³)
- K: constante que depende del material

Las pérdidas por histéresis son producidas debido a la inversión del magnetismo, esto afectado por el efecto joule que sufre el núcleo, además generando las corrientes parásitas (22). A consecuencia de esto se genera pérdida técnica en el núcleo del transformador trifásico de distribución, esto expresado en potencia.

2.2.5. Pruebas en transformadores

2.2.5.1. Pruebas en vacío

El propósito de esta prueba es suministrar energía al transformador con un cierto voltaje a través de un devanado del transformador, de modo que la salida permanezca abierta. De manera similar, medir el voltaje de los dos devanados, corriente y potencia del lado primario. Una vez que se ejecuta el procedimiento, el resultado es la tasa de conversión y la impedancia (27).

A base de aplicar a uno de los arrollamientos el sistema trifásico de tensiones nominales, estando el secundario sin carga (en vacío). Relación de transformadores $r_t = N_1 / N_2$, es la misma que se refiere a tensiones compuestas o simples. Pérdidas $P_0 = P_{Fe}$. Si se dan en valores absolutos (W), las del transformador monofásico son iguales a un tercio de las reales del trifásico, expresadas porcentualmente conservan su valor (24).

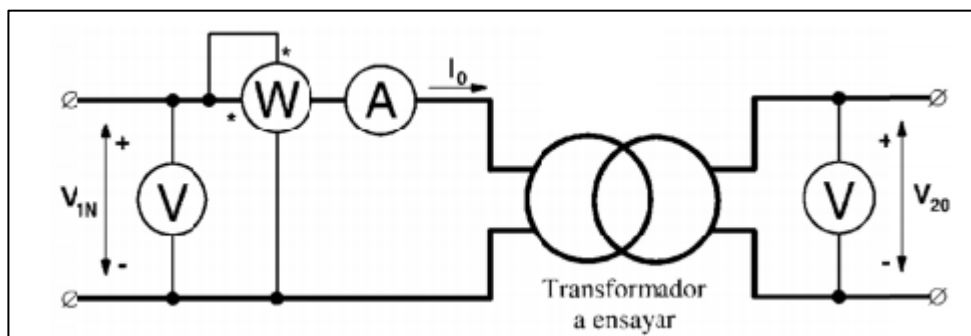


Figura 9. Ensayo en vacío. Tomada de Esquema de ensayo de transformador en vacío (27)

2.2.5.2. Pruebas de corto circuito

La prueba implica cortocircuitar uno de los devanados del transformador y alimentarlo al otro devanado con un voltaje reducido para que la corriente nominal fluya a través del circuito (27).

Aplicando un triángulo equilibrado de tensiones (U_{cc} , compuesta) en el primario, que motive intensidades de corrientes nominales, a base de que los bornes secundarios estén en cortocircuitos (24):

$$\text{➤ } E_{cc} (\%) = 100 * ((U_{CC, Compuesta}) / (U_{1n, Compuesta})) = 100 * ((U_{CC, Simple}) / (U_{1n, Simple})) \quad (7)$$

- Pérdidas reales, $P_{CC} = P_{CU} = 3 R_{CC} \cdot I_{1n}^2$ (8)
- Pérdidas del t. monofásico ideal = $P_{CC} / 3$ (9)

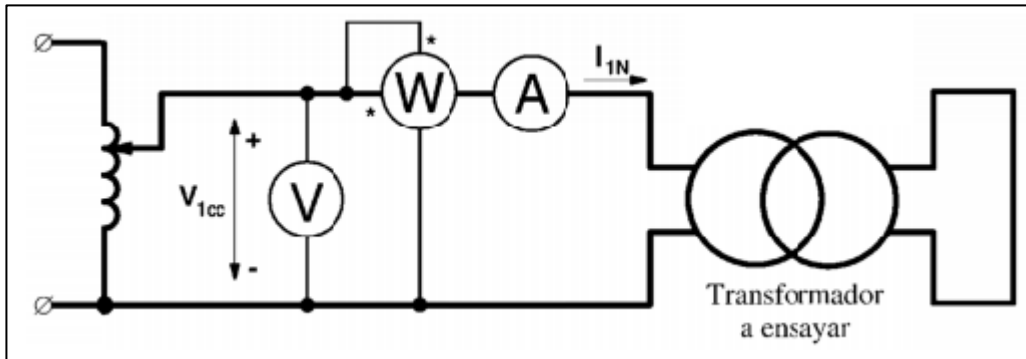


Figura 10. Ensayo de corto circuito. Tomada de Esquema de ensayo de transformador en vacío (27)

Donde:

P_{CC} = potencia de corto circuito

R_{CC} = resistencia de cortocircuito

I_{1n} = corriente nominal

2.2.6. Ecuaciones de Maxwell

2.2.6.1. Ley de Gauss para campo eléctrico

E es el símbolo del campo eléctrico, una magnitud física, que da el concepto de intensidad de campo eléctrico (atractivo o repulsivo) que sufrirá una carga en una posición determinada. El campo eléctrico es el vector de magnitud, la flecha: su dirección nos dice dónde se empuja la carga positiva si se coloca una carga positiva en ese punto, y se la empuja en la dirección negativa o en la dirección opuesta. Además de la dirección, también tiene fuerza (generalmente indicada por la longitud de la flecha). Este símbolo de triángulo aparentemente esotérico (∇) se llama nabra, el nombre griego del arpa hebrea, y su forma es similar a este símbolo. Es un operador matemático que puede participar en varias operaciones vectoriales. ρ , la letra griega rho, significa la densidad de carga eléctrica aquí: es una medida de cuántas cargas eléctricas positivas o negativas hay en el círculo que nos rodea. Cuanto mayor es ρ , más carga se acumula cerca del punto (si es positivo, entonces es más positivo; si es negativo, es más negativo). ϵ_0 , La letra griega épsilon con el subíndice 0 (el pequeño cero a la derecha) se llama permitividad o permitividad del vacío (28).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (10)$$

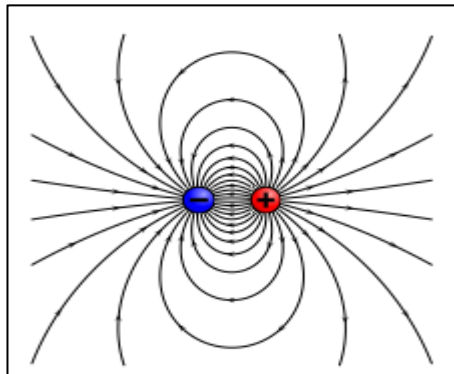


Figura 11. Líneas de campo de un dipolo eléctrico. Tomada de Geek3 (28)

2.2.6.2. Ley de Gauss para el campo magnético

Esta ley describe el comportamiento del campo magnético a través de su divergencia, $\nabla \cdot \mathbf{B}$, del mismo modo que la anterior hacía lo propio con la divergencia del campo eléctrico, las líneas del campo magnético no nacen ni mueren de manera neta en ninguna parte. Esto no depende de nada, ni es diferente para cada punto del espacio como sucedía con el eléctrico, sino que es una propiedad ineludible del campo magnético en todo lugar: las líneas de campo magnético no tienen principio ni fin. La letra B representa el campo magnético, que parece conmemorar al científico francés Jean-Baptiste Biot, uno de los pioneros en el estudio de la relación entre la electricidad y el magnetismo. (28)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (11)$$

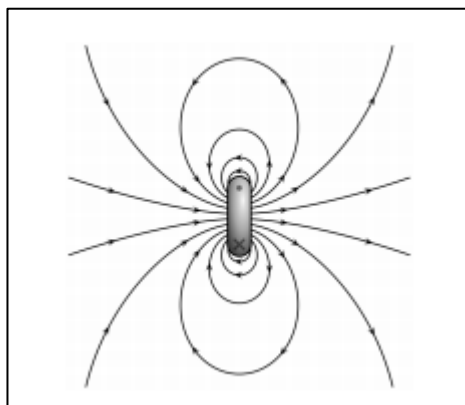


Figura 12. Representación del campo magnético. Tomada de Geek3 (28)

Como se puede ver, todas las filas son bucles cerrados, algunas son más pequeñas y otras más anchas. Aunque este es un ejemplo ridículo, parece que cualquier generación de campo magnético es el lanzamiento de un boomerang: puedes lanzarlo, pero siempre volverá a su estado original. Las líneas de campo magnético no tienen principio ni fin, siempre están cerradas (29).

2.2.6.3. Ley de Faraday

Las dos leyes de Gauss que hemos visto definen las características de los campos eléctricos y magnéticos respectivamente. El nombre en sí nunca se mezclará de esta manera. Si solo existen estos dos principios físicos, los campos eléctrico y magnético serán conceptos completamente independientes. Sin embargo, no existen en absoluto, por lo que se empezó a analizar aquí. Hay una gran diferencia entre las dos ecuaciones que se verán y las dos ecuaciones que ya se vieron: en las dos ecuaciones restantes, los dos campos están mezclados y $\partial/\partial t$ es relativo al tiempo de algo la derivada parcial. En términos cristianos, representa la velocidad a la que cambian las cosas. Por lo tanto, $\partial B / \partial t$ es la tasa de cambio del campo magnético. Si $\partial B / \partial t$ es cero, el campo magnético no cambiará con el tiempo. Si el cambio es pequeño, indica que el cambio es gradual y suave; si el cambio es grande, indica que el cambio es muy drástico; si el cambio es pequeño, indica que el cambio es grande. Además, dado que B es un vector con dirección, $\partial B / \partial t$ también lo es: tiene la dirección del cambio de campo magnético (28).

El campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico incluso cuando no hay carga, y el campo eléctrico generado es perpendicular al cambio del campo magnético.

$$\nabla \cdot E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (12)$$

2.2.6.4. Ley de Ampere – Maxwell

Incluso en ausencia de corriente, el campo eléctrico variable produce un campo magnético giratorio. Por tanto, se vuelve a ver como si uno de los dos campos cambia con el tiempo, se producirá una especie de interferencia que

hace aparecer el otro campo. En este sentido, son completamente simétricos: si son variables, cualquiera de los dos producirá otro campo de rotación. De hecho, parece que se puede "engañar" y generar campos magnéticos en todas partes: un campo eléctrico cambiante produce un campo magnético cambiante y, por lo tanto, un campo eléctrico cambiante $\mu_0 J$. La letra griega mu con el subíndice 0 es similar a ϵ_0 , es decir, la constante eléctrica o constante dieléctrica de un vacío; en este caso, μ_0 se llama permeabilidad al vacío, a veces también llamada constante magnética. Es una constante universal, aunque su valor ahora no es importante, es $4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$. Será importante más adelante, pero ahora es importante: es una constante. Por otro lado, J es lo único verdaderamente nuevo en la ecuación y, en última instancia, constituye la fuente básica del campo magnético. Esta es la densidad de corriente, que es similar a la densidad de carga que aparece en la ley de campos eléctricos de Gauss. Si J es grande en un punto determinado, significa que hay una gran concentración de corriente; si en el punto $J = 0$, significa que no hay corriente allí (28).

$$\nabla \cdot B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial B}{\partial t} \quad (13)$$

2.2.7. Métodos de los elementos finitos

Puede entenderse como un procedimiento para resolver numéricamente problemas planteados mediante ecuaciones diferenciales. La forma más elegante de explicar los fundamentos matemáticos del método de los elementos finitos (MEF) parte de la teoría de espacios normados y utiliza los conceptos del análisis funcional. Este es el marco en el que hay que situarse si se quieren estudiar con rigor las bases del (MEF) e investigar sobre sus propiedades matemáticas. Los datos básicos necesarios para los cálculos de (MEF) son los siguientes (29):

- Definir la geometría del dominio computacional y aprobarla. Esto se hace proporcionando una lista de nodos y elementos. Cada nodo es un punto en el dominio computacional y viene dado por el número de orden o etiqueta de identificación (número de nodo) y sus coordenadas en el sistema de referencia seleccionado. Cada elemento corresponde a uno de los subdominios en los

que se divide el dominio computacional. Vienen dados por el número de orden o etiqueta de identificación (número de elemento) y una lista de números de nodo, que también se denomina nombre de conexión del elemento. Como se verá más adelante, la forma geométrica del elemento está completamente definida por la fórmula interna del elemento y las coordenadas de sus nodos. La colección de nodos y elementos constituye la denominada cuadrícula o cuadrícula de elementos finitos (29).

- Los atributos del elemento. Estas propiedades dependen de la clase de elementos finitos utilizada. Así como en todos los casos se deben identificar los materiales que componen el subdominio o elemento, dependiendo del tipo de pregunta y elemento, se deben especificar o no otros atributos. Los ejemplos típicos incluyen: espesor, sección transversal y su dirección en el espacio, la dirección de anisotropía (30).
- Características del material. Cada material está identificado por un número o etiqueta. Cada material está asociado a un modelo matemático que representa su comportamiento (elasticidad, plasticidad, superplasticidad), y en cada caso se definen los parámetros numéricos del modelo matemático seleccionado (como módulo de elasticidad, razón de Poisson, tensión). El modelo matemático de comportamiento material se suele denominar modelo constitutivo o ley de comportamiento (30).
- Condiciones de borde. En problemas mecánicos, se distinguen dos tipos de condiciones de contorno: condiciones de contorno en desplazamiento y condiciones de contorno en vigor. La primera es una restricción de tipo cinemático y generalmente corresponde a las condiciones de contorno que se llaman condiciones básicas en el método de cambio. En el manual del usuario del programa de elementos finitos, estas restricciones se denominan condiciones de contorno apropiadas. Tienen características porque afectan directamente las variables de campo del problema. Los ejemplos típicos son viajes restringidos o viajes obligatorios. Estas condiciones se aplican directamente a los nodos, restringen o cancelan su movimiento, y se dan a

través de una lista de nodos asociados a los códigos correspondientes a las condiciones de contorno a aplicar (29).

- Otros datos. Los datos antes mencionados son esenciales para cualquier cálculo realizado con elementos finitos. Dependiendo del tipo de problema que esté intentando resolver, es posible que no se necesiten otros tipos de datos. Por ejemplo, se puede pensar en los datos de las condiciones iniciales del dominio (tensión, velocidad, temperatura), en las relaciones impuestas entre los movimientos (conexiones cinemáticas) de diferentes nodos (29).

Se considera cualquier elemento finito definido por múltiples nodos n . Para facilitar la explicación, se supondrá un problema de elasticidad plana. Cualquier punto del elemento tiene un desplazamiento definido por el vector \mathbf{u} , en este caso tiene dos componentes (29):

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Los nodos del elemento tienen una serie de grados de libertad, que corresponden a los valores adoptados por el campo de desplazamiento en ellos, y forman un vector llamado δ^e . Para el caso de nivelación, este vector es (30):

$$\delta^e = [U_1 \quad V_1 \quad U_2 \quad V_2 \quad \dots \quad U_n \quad V_n]^T \quad (15)$$

En este ejemplo, se asume que solo se usa el desplazamiento como deformación de la junta y no como distorsión, que es suficiente para la elasticidad del plano, que se verá más adelante. En otros elementos (por ejemplo, vigas o conchas), también se utiliza la torsión (30).

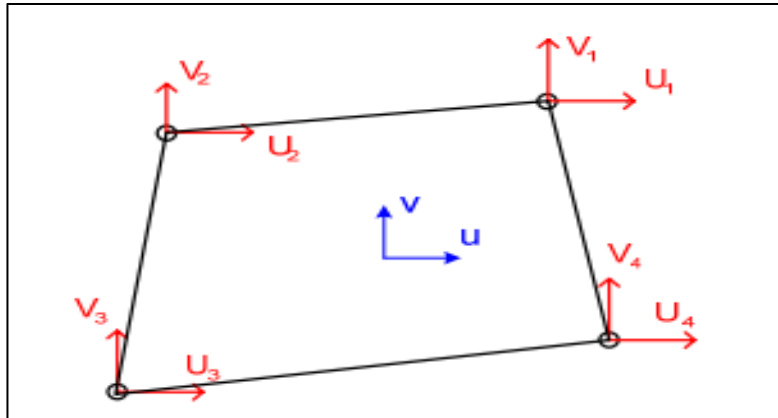


Figura 13. Deformaciones en un elemento finito. Tomada de Métodos de elementos finitos (30)

2.2.8. Método de Aron

El método Aron también conocido por utilizar dos vatímetros, para determinar la potencia en la carga.

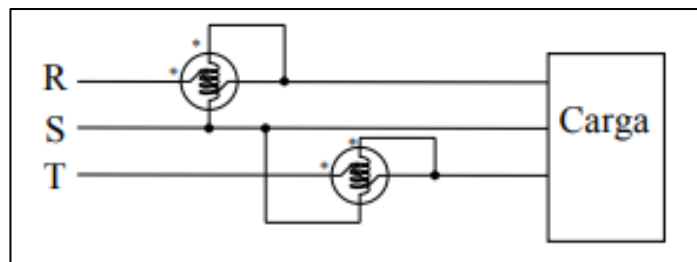


Figura 14. Método de Aron. Tomada de Sistemas trifásicos (31)

$$P = U_R^* i_R + U_S^* i_S + U_T^* i_T = U_R^* i_R + U_S(i_S + i_T) + U_T^* i_T = U_{RS}^* i_R + U_{TS}^* i_T \quad (16)$$

$$P = P_{med1} + P_{med2} \quad (17)$$

Solo en sistemas trifásicos, se tiene la siguiente igualdad.

$$i_S = -i_R - i_T \quad (18)$$

Donde:

P = potencia real

U = tensión en cada fase

I = corrientes en cada fase

2.2.9. En relación a las tolerancias permitidas por la norma IEEE C57.12-2015

Tabla 3.
Tolerancias establecidas en la norma IEEE

Cantidad medida	La precisión del sistema de ensayo
Pérdidas	$\pm 3.0\%$
Voltaje	$\pm 0.5\%$
Corriente	$\pm 0.5\%$
Resistencia	$\pm 0.5\%$
Temperatura	$\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tomada de IEEE C57.12-2015 (32)

2.2.10. Simulador ANSYS Maxwell

El simulador Ansys Maxwell es un paquete de software interactivo para análisis de elementos finitos, también para resolver problemas electrostáticos, magnetostáticos, de corrientes parásitas y transitorias tridimensionales (3D).

Funciones:

- Campos eléctricos estáticos, fuerzas, pares y capacitancias causados por distribuciones de voltaje y cargas.
- Campos magnéticos estáticos, fuerzas, pares e inductancias causados por corrientes de CC, campos magnéticos externos estáticos e imanes permanentes.
- Campos magnéticos variables en el tiempo, fuerzas, pares e impedancias causados por corrientes CA y campos magnéticos externos oscilantes.
- Campos magnéticos transitorios provocados por fuentes eléctricas e imanes permanentes.

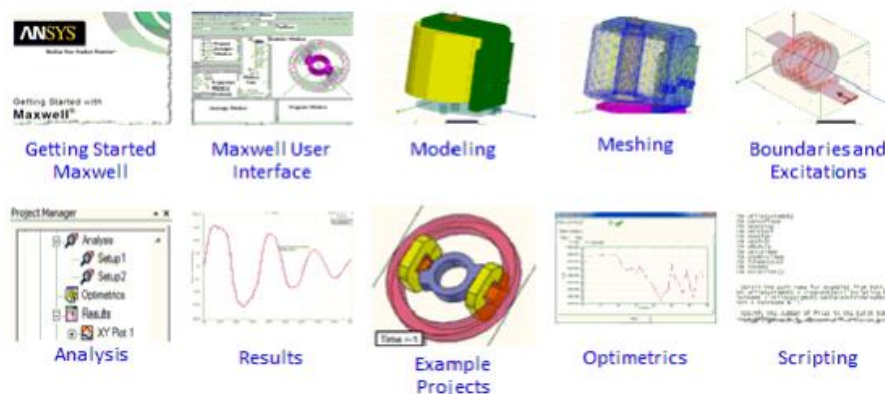


Figura 15. Contenido de Ansys Maxwell. Tomada de Ansys.com

2.3. Definición de términos básicos

Estos términos se relacionan de manera directa con la investigación y son extraídas de fuente confiables entre normas como norma NTP 370.002 y otros.

- **Transformador trifásico:** “el transformador trifásico en concepto equilibrado tiene en su lado primario un sistema simétrico de tensiones conectadas, en su lado secundario puede estar en vacío o conectadas a carga, del cual las impedancias son iguales” (24).
- **Núcleo:** “es un circuito magnético en el que se enrollan devanados y se genera un flujo magnético alterno” (22).
- **Pérdidas técnicas:** “la pérdida eléctrica exhibida en la red de transmisión y distribución del sistema eléctrico se produce por el paso de corriente por los componentes de la infraestructura del sistema eléctrico” (25).
- **Histéresis:** “es el resultado experimental puede entenderse simplemente, pues significa que en una muestra saturada todos los dipolos magnéticos elementales se han alineado con el campo H” (22).
- **Corriente de Foucault:** “estas pérdidas son debidas a las corrientes inducidas sobre el material ferromagnético como consecuencia de estar sometido a un campo magnético variable con el tiempo” (6).
- **Electromagnetismo:** “es una fuerza de las más importantes, ya que junto con la gravitatoria, nuclear fuerte y nuclear débil, forma parte de las Fuerzas Fundamentales del Universo, que son aquellas que no pueden ser explicadas en función de otras fuerzas más básicas” (33)
- **Prueba en vacío:** “el propósito de esta prueba es suministrar energía al transformador a una determinada tensión a través de un devanado del transformador, de manera que la salida quede abierta. De igual forma, medir la tensión en los dos devanados, de esta forma la corriente y potencia del servidor miden el lado primario” (27).
- **Prueba en cortocircuito:** “la prueba implica cortocircuitar un devanado del transformador y alimentarlo al otro devanado con un voltaje reducido para que la corriente nominal fluya a través del circuito” (27).
- **Material ferromagnético:** “la aleación de ferrosilicio es la aleación ferromagnética más utilizada en el diseño de núcleos de transformadores” (22).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Metodología aplicada para el desarrollo de la solución

“Los métodos de diseño traen a flote aspectos muy relevantes ayudan al diseñador a concebir el producto de forma integral antes de la materialización y también le permite trabajar de una manera estructurada aplicadas a problemas de diseño” (34). En la investigación se utilizó el tipo de investigación tecnológica debido a la creación de un prototipo de transformador de distribución asistido mediante el uso de varios softwares de diseño que permita representar el diseño del transformador con menores pérdidas técnicas en el núcleo del transformador. Cabe resaltar que esta investigación tecnológica tiene el propósito de aplicar el conocimiento científico para solucionar el problema de las pérdidas técnicas del transformador y a su vez esta beneficie a la sociedad en tal motivo sus niveles son la experimentación y la aplicación (35).

3.2. Diseño de investigación

3.2.1. Diseño de investigación factorial 2^4 (2 x 2 x 2 x 2)

Se decidió hacer uso de uno de los métodos factoriales experimentales mencionados por Espinoza que lo define como: el diseño que permite manipular tres variables o más variables, en este caso 4 variables cada una de ella con dos niveles adicionales; obteniendo de esta manera dieciséis combinaciones (35). Estos pueden representar de la siguiente manera:

Tabla 4.
Matriz representativa de diseño factorial 2⁴

C	C1	B	B1	A1B1C1D1	A1B1C1D2	A2B1C1D1	A2B1C1D2
			B2	A1B2C1D1	A1B2C1D2	A2B2C1D1	A2B2C1D2
	C2	B	B1	A1B1C2D1	A1B1C2D2	A2B1C2D1	A2B1C2D2
			B2	A1B2C2D1	A1B2C2D2	A2B2C2D1	A2B2C2D2
				D1	D2	D1	D2
				D		D	
				A1		A2	
				A			

En la tabla 4 se puede visualizar la representación matricial de un diseño factorial 2 x 2 x 2 x 2.

Tabla 5.
Combinaciones del tratamiento de variables

	Variables independiente				Variable dependiente	Réplicas
	Núcleo del transformador trifásico				Pérdidas Técnicas	
	Material	Morfología	Devanado	Nivel de tensión	Nivel de pérdidas generadas	
	g	m ²	Ω/m	V	W	Nivel de pérdidas
Modelo de observaciones	Acero M4 (nivel bajo)	Tradicional	plata	10 kV	D1A1B1C1	1
				13.2 kV	D1A1B1C2	2
			cobre	10 kV	D1A1B2C1	3
				13.2 kV	D1A1B2C2	4
		Sección cruciforme	plata	10 kV	D1A2B1C1	5
				13.2 kV	D1A2B1C2	6
			cobre	10 kV	D1A2B2C1	7
				13.2 kV	D1A2B2C2	8
	Mu_Metal	Tradicional	plata	10 kV	D2A1B1C1	9
				13.2 kV	D2A1B1C2	10
			cobre	10 kV	D2A1B2C1	11
				13.2 kV	D2A1B2C2	12
		Sección cruciforme	plata	10 kV	D2A2B1C1	13
				13.2 kV	D2A2B1C2	14
			cobre	10 kV	D2A2B2C1	15
				13.2 kV	D2A2B2C2	16
Técnicas de recolección de datos		Material: 2 niveles				
		Morfología: 2 niveles				
		Devanado: 2 niveles				
		Nivel de tensión: 2 niveles				
		Réplicas 1				
		Números de observaciones				

En la tabla 4 se visualizan 16 combinaciones, las cuales se evaluarán a través del diseño propuesto, ese diseño se desarrollará en el software ANSYS y el análisis factorial con ayuda del software MINITAB. De ese modo se complementa el estudio con la técnica de recolección de datos empíricos “la cual se permite la observación en contacto directo con el objeto de estudio, y el acopio de testimonios que permitan confrontar la teoría con la práctica en la búsqueda de la verdad” (35). Espinoza menciona que se tienen 4 posibles técnicas las cuales son: observación, entrevista, cuestionario y entrevista, de la cual la investigación utilizó la observación.

- Material del núcleo: A1= Mu_ Metal (aleación con hierro); A2= ACERO M4 (nivel bajo)
- Morfología del núcleo: B1= tradicional; B2= cruciforme.
- Devanado del núcleo: C1= plata calibre N.º; C2= cobre calibre N.º .
- Nivel de tensión: D1= 13.2 kV; D2= 10 kV

3.2.2. Instrumentos utilizados en la investigación

- Programa ANSYS (simulación del funcionamiento del núcleo del transformador)
- AutoCAD (composición)
- Excel (cálculos matemáticos)

3.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Del libro de “Metodología de investigación tecnológica para ingenierías” (34) mencionan diferentes tipos de diseños metodológicos aplicadas a investigaciones del tipo tecnológico, sobre el cual se eligió el diseño VDI 2221 “que es una variación de la famosa 2222” (34).

Tabla 6.
Método de diseño de ingeniería VDI 2221

Fase	Proceso
1. Especificaciones	Clasificar y definir la tarea
2. Estructura de funciones	Definir funciones y estructuras
3. Búsqueda de soluciones	Buscar principales soluciones y combinaciones.
4. Estructura de modelos	Definir en módulos realizables.
5. Arreglos	Arreglos preliminares y definitivos.
6. Documentación	Preparar instrucciones de operación y producción
7. Realización	Realización de productos

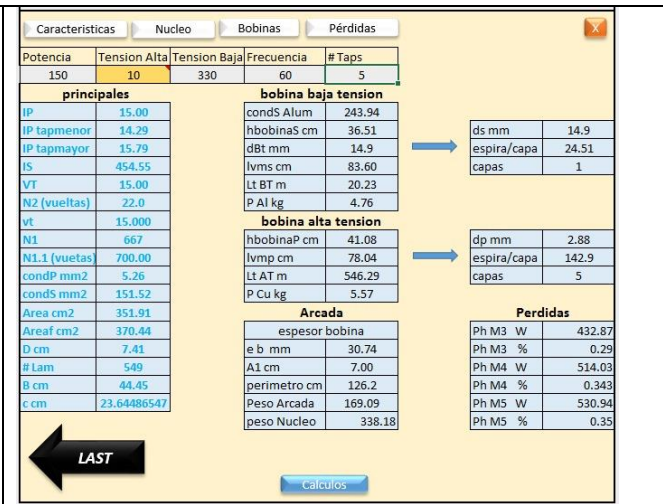
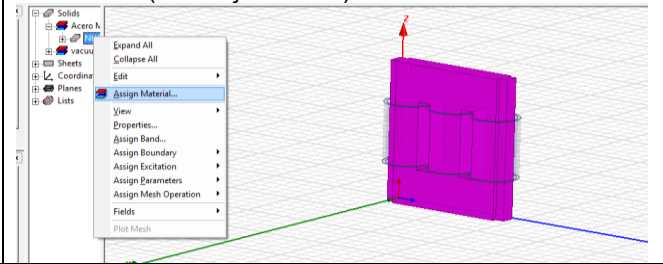
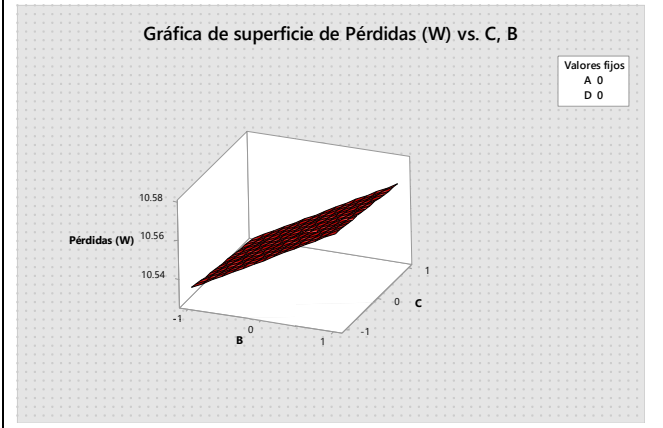
Tomada de Metodología de la investigación (34)

3.4. Aplicación de la técnica VDI 2221

3.4.1. Especificaciones del proceso

Tabla 7.
Clasificación y definición de las tareas realizadas en la etapa de diseño

Especificaciones		
Características	Observaciones	Responsable
Estudio de las fórmulas aplicativas	<ul style="list-style-type: none"> Estudios matemáticos de relación de transformación Flujo electromagnético Ensayos en los transformadores Estudio del nivel típico de pérdidas técnicas Estudio de los diferentes materiales disponibles para la construcción del núcleo, en especial su estructura química 	Equipo de trabajo
Estudio del material de trabajo	Se realizó un análisis del material ferromagnético con menores pérdidas, que tenga una adaptabilidad, sea resistente, accesible y con un costo que contraste con los materiales descartados.	Equipo de trabajo
Elección de los materiales de ferromagnético a la composición química	Se establecieron dos opciones para el material ferromagnético a utilizar en el diseño del núcleo el transformador, los cuales son el ACERO M-4 y el MU_METAL	Equipo de trabajo
Elección del conductor de la bobina	Se optó por dos materiales ferromagnéticos	Equipo de trabajo
Elaboración de los cálculos matemáticos	En esta etapa se desarrollan las matemáticas, estableciendo de esta manera cuáles serán los valores que se ingresarán en el programa ANSYS para su simulación.	Equipo de trabajo
Diseño del programa de diseño	Elaboración del programa para optimizar el cálculo matemático.	Equipo de trabajo

		
<p>Diseño de morfología del material ferromagnético</p>	<p>Establecer dos posibles diseños morfológicos, los cuales son: sección cuadrada y sección cruciforme para realizar la comparación en el nivel de pérdidas técnicas reducidas.</p>	<p>Equipo de trabajo</p>
<p>Diseño de la arcada de la bobina del transformador</p>	<p>Para ello de nuevo se recurre al cálculo matemático para establecer el alto, ancho, nivel de profundidad, es decir las dimensiones en general para que estos datos sean integrados en la etapa de simulación.</p>	<p>Equipo de trabajo</p>
<p>Etapa de simulación</p>	<p>En esta etapa se integra la elección del material (Acero M-4 y Mu_Metal), morfología (rectangular y cruciforme), material de la bobina (cobre y plata), nivel de tensión (10 kV y 13.2 kV).</p> 	<p>Equipo de trabajo</p>
<p>Análisis de pruebas</p>	<p>Se analizaron los 16 tipos de combinaciones para obtener el nivel de pérdidas y de ese modo obtener el factor determinante.</p> 	<p>Equipo de trabajo</p>

3.4.2. Estructura de funciones

La estructuración del proceso de diseño se realiza mediante el uso del recurso conocido como *back box*.

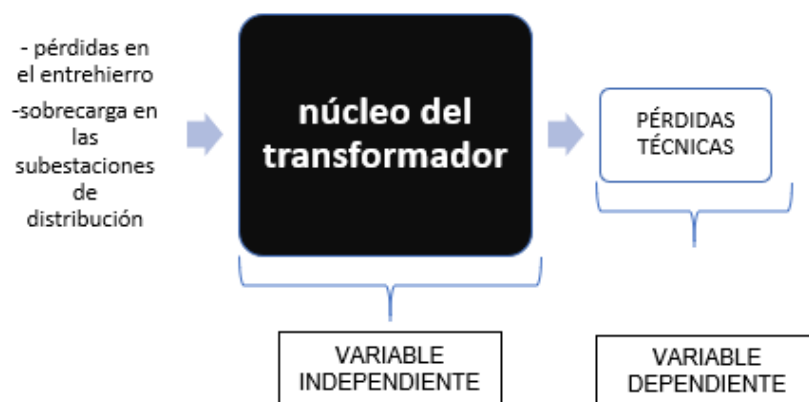


Figura 16. Back box del diseño de núcleo del transformador

En la figura 15 se puede observar el análisis gráfico de las variables independientes y dependientes que interviene en el diseño del núcleo del transformador trifásico de distribución.

De la variable independiente se elabora la siguiente matriz:

Tabla 8.
Detalle de las dimensiones a analizar

Material del núcleo	Bajo (-1)	Acero M-4 Es la aleación de aceros al silicio orientados.
	Alto (1)	Mu_metal Aleación de níquel-hierro que tiene una permeabilidad magnética muy alta
Morfología	Bajo (-1)	Sección cuadrada Es la sección tradicional o común de los transformadores.
	Alto (1)	Sección cruciforme Es una variación de la forma tradicional en la cual se forman escalones en los vértices de los transformadores.
Devanado	Bajo (-1)	Plata Metal con alta conductividad mayor al cobre. Además, poco usado en la industria eléctrica.
	Alto (1)	Cobre Metal con una conductividad menor a la plata y más utilizado en la industria eléctrica. Además, en comparación con el oro, aluminio o plata, el cobre es más eficiente en conducir la energía eléctrica en condiciones ambientales.
Nivel de tensión	Bajo (-1)	10 kV Tensión típica en las zonas urbanas
	Alto (1)	13.2 kV Tensión típica en las zonas rurales

3.4.3. Caja blanca del desarrollo del diseño del transformador trifásico

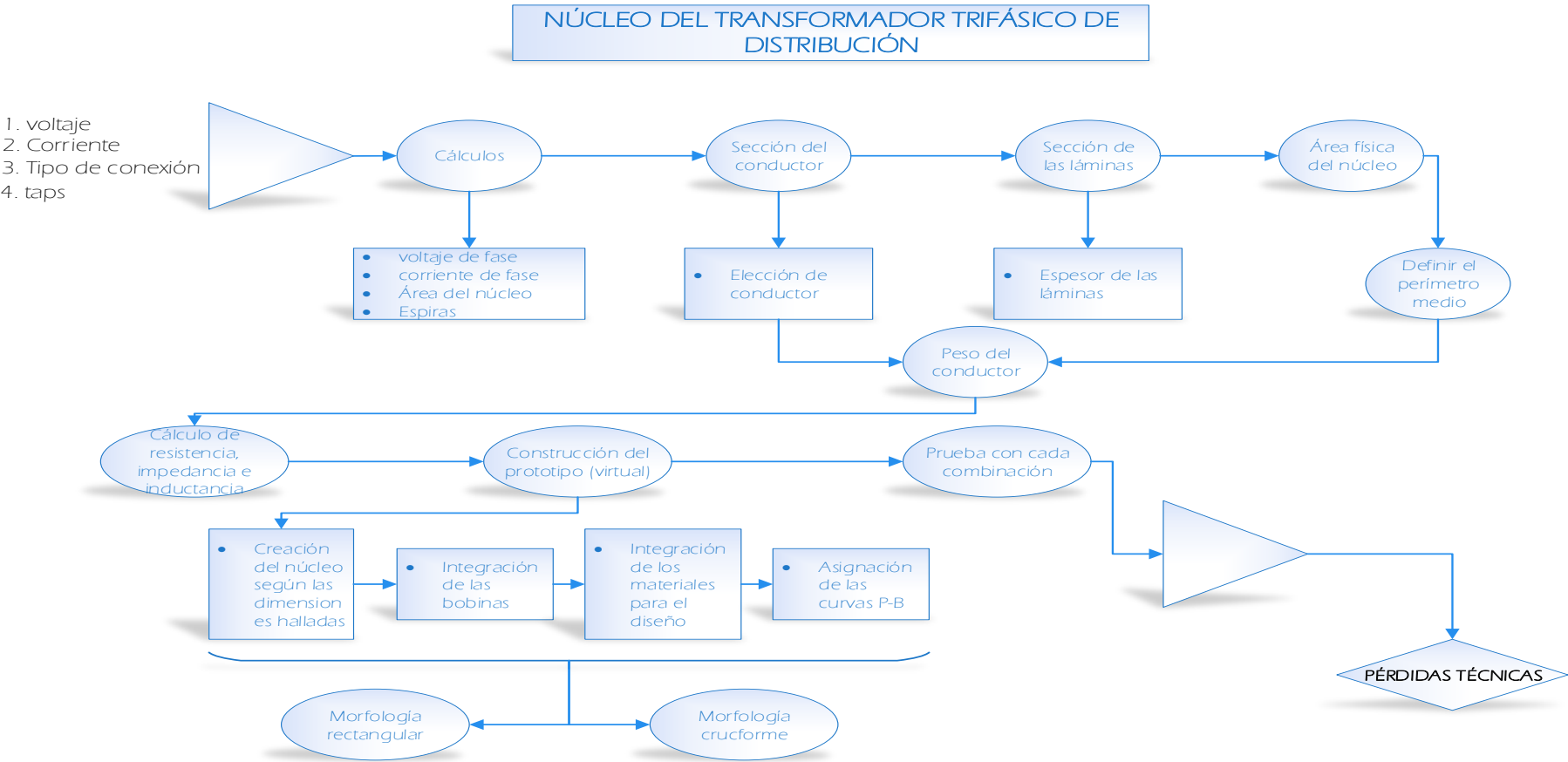


Figura 17. Caja blanca del diseño de la transformación trifásica de distribución

3.4.4. Determinación de las dos posibles soluciones

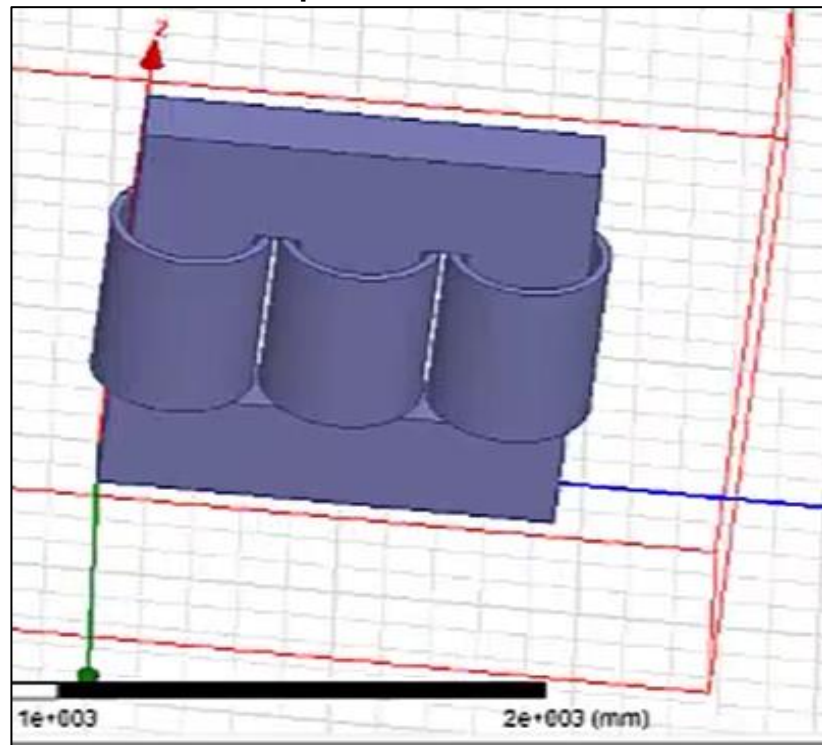


Figura 18. Diseño 1

El primer diseño se basa en su morfología que es el típico rectangular, que se irá variando por el tipo de conductor o el material ferromagnético a usar, pero el factor definitivo es el tipo de morfología. Este diseño fue creado en el programa Ansys.

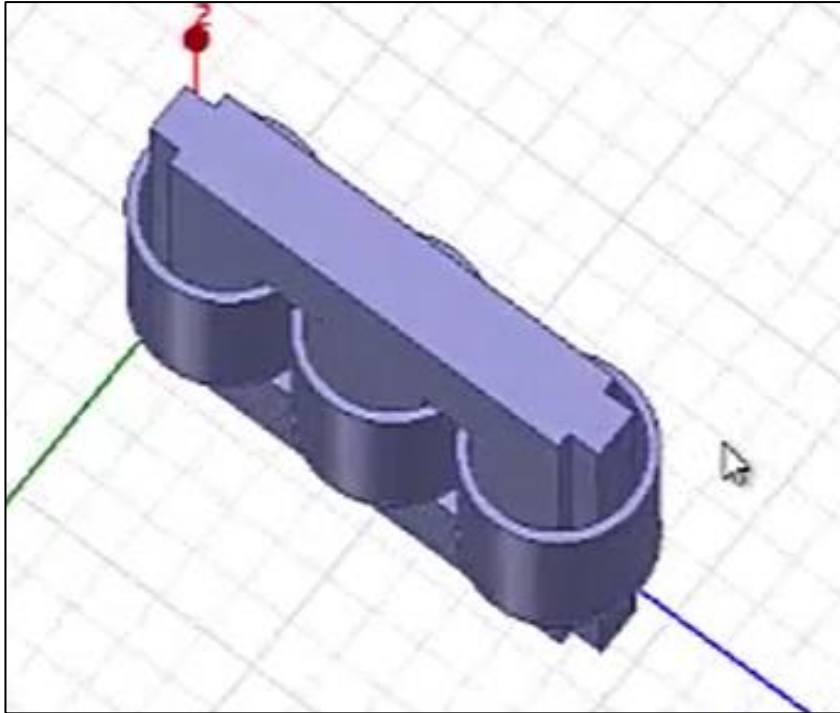


Figura 19. Diseño 1

En el segundo tipo de morfología se representa un diseño con incremento de vértices e incremento de espacios vacíos, que al igual que la morfología anterior se registró el funcionamiento en relación a las variables de nivel de voltaje, tipo de conductor y material ferromagnético.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISEÑO DE SOLUCIÓN

4.1. Identificación de requerimiento

4.1.1. Requerimientos que se integran al diseño matemático

En esta parte del proyecto se desarrollan los métodos y cálculos matemáticos necesarios para el diseño de transformadores de distribución y sus prototipos.

4.1.1.1. El núcleo del transformador

El material más utilizado por diferentes diseños de transformadores de distribución y empresas constructoras es el acero al silicio. El material consiste en una aleación de hierro y silicio con bajo contenido en carbono. La aleación se obtiene mediante un proceso de laminación en frío, en el que ambas caras de cada hoja se recubren con un material aislante denominado *Carlite* (el nombre de la empresa ARMCO ha sido patentado) (26).

4.1.1.2. Materiales típicos del núcleo de un transformador

Existen diferentes tipos de acero para lino comercialmente, que tienen diferentes características, como se muestra a continuación:

Tabla 9.

Valores típicos de pérdida de hierro de muestras típicas de láminas de acero eléctrico revestido de acero revestido con Carlite de AK a 50 Hz y 60 Hz. (Parte 1)

Flux Density (T)	Core Loss (W/kg) - ASTM A804							
	0.23 mm M-3 CARLITE GOES		0.27 mm M-4/120 CARLITE GOES		0.27 mm M-4/125 CARLITE GOES		0.30 mm M-5/125 CARLITE GOES	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.1	0.00324	0.00424	0.00404	0.00533	0.00442	0.0058	0.00426	0.00567
0.2	0.0125	0.0164	0.0155	0.0205	0.0166	0.0219	0.0165	0.0219
0.3	0.0275	0.0360	0.0336	0.0444	0.0357	0.0470	0.0359	0.0478
0.4	0.0481	0.0629	0.0584	0.0765	0.0613	0.0805	0.0621	0.0827
0.5	0.0740	0.0965	0.0882	0.116	0.0928	0.122	0.0948	0.126
0.6	0.105	0.137	0.124	0.164	0.130	0.171	0.134	0.178
0.7	0.141	0.184	0.166	0.218	0.173	0.227	0.180	0.238
0.8	0.183	0.238	0.213	0.281	0.222	0.292	0.232	0.307
0.9	0.229	0.298	0.267	0.351	0.278	0.365	0.291	0.385
1.0	0.281	0.366	0.327	0.430	0.340	0.447	0.358	0.473
1.1	0.339	0.441	0.395	0.519	0.410	0.539	0.432	0.570
1.2	0.404	0.525	0.471	0.620	0.489	0.642	0.515	0.680
1.3	0.477	0.621	0.558	0.734	0.580	0.760	0.608	0.803
1.4	0.562	0.731	0.657	0.863	0.682	0.893	0.714	0.942
1.5	0.668	0.866	0.778	1.02	0.806	1.05	0.842	1.11
1.6	0.799	1.03	0.921	1.20	0.955	1.24	0.993	1.30
1.7	1.00	1.28	1.13	1.47	1.18	1.52	1.21	1.57
1.8	1.34	1.70	1.45	1.86	1.51	1.94	1.53	1.98
1.9	1.75	2.20	1.70	2.18	1.91	2.42	1.92	2.45

Tomada de Aksteel.es

Tabla 10.

Valores típicos de pérdida de hierro de muestras típicas de láminas de acero eléctrico revestido de acero revestido con Carlite de AK a 50 Hz y 60 Hz. (Parte 2)

Flux Density (T)	Core Loss (W/kg) - ASTM A804					
	0.30 mm M-5/130 CARLITE GOES		0.30 mm M-5/140 CARLITE GOES		0.35 mm M-6 CARLITE GOES	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.1	0.00430	0.00572	0.00473	0.00629	0.00544	0.00725
0.2	0.0167	0.0222	0.0180	0.0240	0.0205	0.0274
0.3	0.0364	0.0485	0.0389	0.0519	0.0439	0.0589
0.4	0.0630	0.0839	0.0669	0.0892	0.0753	0.101
0.5	0.0963	0.128	0.102	0.135	0.114	0.153
0.6	0.136	0.181	0.143	0.190	0.160	0.214
0.7	0.183	0.242	0.191	0.253	0.214	0.286
0.8	0.236	0.312	0.246	0.326	0.275	0.367
0.9	0.296	0.392	0.308	0.408	0.344	0.458
1.0	0.364	0.481	0.378	0.500	0.421	0.560
1.1	0.439	0.580	0.456	0.602	0.507	0.673
1.2	0.524	0.692	0.543	0.718	0.602	0.799
1.3	0.620	0.818	0.643	0.849	0.709	0.940
1.4	0.728	0.960	0.756	0.997	0.829	1.10
1.5	0.860	1.13	0.894	1.18	0.970	1.28
1.6	1.02	1.33	1.06	1.39	1.14	1.51
1.7	1.25	1.62	1.30	1.69	1.38	1.81
1.8	1.59	2.05	1.66	2.14	1.71	2.24
1.9	1.98	2.54	2.07	2.66	2.03	2.62

Tomada de Aksteel.es

4.2. Análisis de solución

4.2.1. Las principales características del transformador de distribución a diseñar

Tabla 11.
Características nivel de tensión 1

S	=	150 kVA	Potencia
V _p	=	13.2 kV	Tensión alta
V _s	=	220 V	Tensión baja
F	=	60 Hz	Frecuencia
T	=	65°C	Temperatura
# Taps	=	+/- 2	Taps

Tabla 12.
Características nivel de tensión 2

S	=	150 kVA	Potencia
V _p	=	10 kV	Tensión alta
V _s	=	220 V	Tensión baja
F	=	60 Hz	Frecuencia
T	=	65°C	Temperatura
# Taps	=	+/- 2	Taps

4.2.2. Cálculos de corriente y voltaje

En primer lugar, el enrollamiento primario, el voltaje de línea es:

Voltaje de línea según la posición del transformador

Tabla 13.
Nivel de voltaje de Taps para 10 kV

Posición Taps N°	1	2	3
Voltaje de línea	10.5	10	9.5

Tabla 14.
Nivel de voltaje de Taps para 13.2 kV

Posición Taps N°	1	2	3
Voltaje de línea	14.7	13.2	11.7

Cálculo de la corriente de devanado primario en la posición 3

$$I_{pa} = \frac{S}{V_p} = \frac{150 \text{ kVA}}{10 \text{ kV}} = 15 \text{ A} \quad (19)$$

$$I_{pb} = \frac{S}{V_p} = \frac{150 \text{ kVA}}{13.2 \text{ kV}} = 11.36 \text{ A} \quad (20)$$

Cálculo de la corriente de devanado primario en la posición 1

$$I_{pa1} = \frac{S}{V_{p1}} = \frac{150 \text{ kVA}}{10.5 \text{ kV}} = 14.286 \text{ A} \quad (21)$$

$$I_{pb1} = \frac{S}{V_{p1}} = \frac{150 \text{ kVA}}{14.7 \text{ kV}} = 10.204 \text{ A} \quad (22)$$

Cálculo de la corriente de devanado primario en la posición 5

$$I_{pa5} = \frac{S}{V_{p5}} = \frac{150 \text{ kVA}}{9.5 \text{ kV}} = 15.789 \text{ A} \quad (23)$$

$$I_{pb5} = \frac{S}{V_{p5}} = \frac{150 \text{ kVA}}{11.7 \text{ kV}} = 12.821 \text{ A} \quad (24)$$

Cálculo de la corriente del devanado secundario

$$I_{ps} = \frac{S}{V_s} = \frac{150 \text{ kVA}}{0.220 \text{ kV}} = 681.818 \text{ A} \quad (25)$$

Donde:

I_{ps} = corriente en el devanado secundario

S = potencia aparente

V = tensión en el devanado

4.2.3. Cálculo del número de vueltas, la sección transversal del conductor y la sección transversal del núcleo

a) Establecer el número de espiras

El establecer el inicial del número de vueltas del devanado del transformador depende de lo siguiente (36).

- Sea parte de algún diseño similar disponible.
- Determinar la relación a través de la experiencia, es decir, la relación empírica del voltaje en el tiempo que es una relación proporcional en el nivel de voltaje en relación al número de vueltas.

De ese modo se sustituyen los valores para obtener:

$$Vt = \frac{V}{vueltas} = 15.307 \text{ V/vuelta} \quad (26)$$

Donde:

V_t = voltaje por vuelta del arrollamiento

V = tensión en devanado

Para facilitar el diseño, primero se determina el número de vueltas del devanado secundario (36).

$$N_2 = \frac{V_2}{V_t} = \frac{220}{15.307} = 14.372 \text{ espiras} = 14 \text{ espiras} \quad (27)$$

Donde:

N_2 = número de vueltas devanado secundario

V_2 = tensión en el devanado secundario

Por razones de fabricación, el valor debe establecerse en un número entero, que es el siguiente número entero, que es 14 en este caso. Usando este valor, se recalculan los voltios / vueltas para verificar que el valor esté indicado (36).

$$V_t = \frac{V}{N_2} = \frac{220}{14} = 15.71 \text{ V/vuelta} \quad (28)$$

Luego se continúa calculando el número de vueltas de N_{1a} y N_{1b} o el devanado primario (36).

$$N_{1a} = \frac{V_2}{V_t} = \frac{10\text{kV}}{15.714 \text{ V/vuelta}} = 636.375 \text{ espiras} = 636 \text{ espiras} \quad (29)$$

$$N_{1b} = \frac{V_2}{V_t} = \frac{13.2\text{kV}}{15.714 \text{ V/vuelta}} = 840.015 \text{ espiras} = 840 \text{ espiras} \quad (30)$$

Debido a que hay *taps* por encima y por debajo del valor nominal; para fines de diseño y construcción, se determinará el límite superior, es decir, la posición 1 (*taps* 1) del cambiador de cada derivación, por lo que (36):

$$N_{1a}(tp1) = \frac{V_2(tp1)}{V_t} = \frac{10.5 \text{ kV}}{15.714} = 668.19 \text{ espiras} = 668 \text{ espiras} \quad (31)$$

$$N_{1b}(tp1) = \frac{V_2(tp1)}{V_t} = \frac{14.7 \text{ kV}}{15.714} = 935.472 \text{ espiras} = 935 \text{ espiras} \quad (32)$$

b) Hallando el calibre del conductor

Para este cálculo se debe considerar la densidad de corriente, la cual dependerá del tipo de transformador y su valor es: 2.5 a 3.5 *ampere/mm²* Apto para transformadores sumergidos en aceite, de 1,5 a 2,5 *ampere/mm²* Utilizado en transformadores de tipo seco. El valor que se considera es 2.8 *ampere/mm²*, por lo que el medidor requerido será (36):

Para la bobina A.T., se recomienda que la corriente en la posición 5 sea ligeramente superior a la corriente nominal. Luego de obtener este valor a través de la tabla, se observa que el valor del número de calibre corresponde al valor de la sección transversal obtenida, y luego (36):

$$A_{acond} = \frac{I_{ap5}}{\rho} = 5.26 \text{ mm}^2 \quad 10 \text{ AWG} \quad (33)$$

$$A_{bcond} = \frac{I_{bp5}}{\rho} = 4.274 \text{ mm}^2 \quad 10 \text{ AWG} \quad (34)$$

Bobina de baja tensión (secundaria):

$$A_{cond} = \frac{I_{p5}}{\rho} = 227.27 \text{ mm}^2 \quad 450 \text{ Kcmil} \quad (35)$$

Donde:

Aacond = sección del primario (10 kV)

Abcond = sección del primario (13.2 kV)

Acond = área de la sección del conductor del devanado del secundario

4.2.4. Cálculo de la sección transversal del núcleo y sus dimensiones geométricas

Como se ha calculado el número de vueltas de la bobina y para el núcleo enrollado, la densidad de flujo magnético (B) utilizada es de 1500 a 1700 Gauss, y para el núcleo apilado, la densidad de flujo magnético utilizada es de 13000 a 15000 Gauss, entonces puede calcular el núcleo de la ecuación general del transformador (36).

Hallando el área neta:

$$A = \frac{v \times 10^8}{4.44 \times f \times N \times B} = \frac{10 \times 10^3 \times 10^8}{4.44 \times 60 \times 636 \times 16 \times 10^3} = 368.88 \text{ cm}^2 \quad (36)$$

Para transformadores con acero eléctrico grado M-4 en la estructura del núcleo enrollado, el factor de acumulación (f_e) está entre 0,93 y 0,96, mientras que en el núcleo apilado, el factor de acumulación (f_e) está entre 0,90 y 0,93. Para nuestro análisis, usaremos (f_e) = 0.95

$$A_f = \frac{A}{f_e} = \frac{368.88 \text{ cm}^2}{0.95} = 388.29 \text{ cm}^2 \quad (37)$$

Donde:

A = sección del núcleo del transformador

A_f = sección de núcleo del transformador con el factor de acumulación

V = tensión en la bobina primaria

F = frecuencia

N = # de espiras

B = intensidad del campo magnético

F_e = factor de acumulación

a) Hallando sección transversal

Para secciones rectangulares, como en nuestro caso, se debe considerar el ancho de la hoja (c) y el espesor del laminado (D).

C= (2 a 3) 2D, para núcleos tipo acorazado.

C= (1, 4 a 2) para núcleos tipo columna.

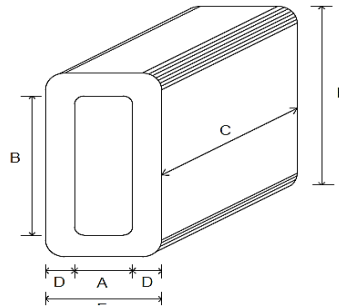


Figura 20. Dimensionamiento general del núcleo. Tomada de Sistemas trifásicos (31)

Se considera que el ancho de la chapa es de 25 cm y está diseñado en el núcleo del acorazado, entonces se puede calcular su espesor (2D) en base al área física (A_f), entonces:

$$2 D = \frac{A_f}{C} = \frac{388.29 \text{ cm}^2}{25 \text{ cm}} = 15.5316 \text{ cm} \quad (38)$$

Donde:

D= espesor del núcleo

A_f = sección de núcleo del transformador con el factor de acumulación

C = ancho del núcleo

Se verifica la relación de ancho C / 2D, se obtiene un valor de 1,69 veces. El número de capas o espesor (2D) para formar el paquete, se determina según el espesor de la hoja a utilizar, como se mencionó anteriormente, será acero eléctrico grado M4 con un espesor de 0.28 mm, luego se necesita realizar el enrollamiento.

$$\#Lam = \frac{2 D}{\text{Espesor de laminas}} = \frac{155.316 \text{ mm}}{0.28 \text{ mm}} = 554.7 \text{ lam} \quad (39)$$

es decir 554 vueltas

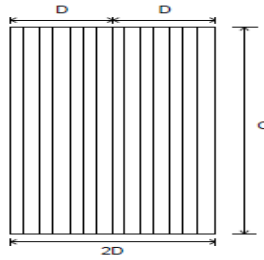


Figura 21. Corte de sección central del núcleo. Tomada de Sistemas trifásicos (31)

La altura de la ventana del núcleo (B) suele ser de 2,5 a 3,5 veces el espesor 2D: si el valor es 3, se tiene:

$$B = 2 D \times 3 = 15.5316 \times 3 = 46.5948 \text{ cm (40)}$$

4.2.5. Cálculo del tamaño total de la bobina y el ancho de la ventana del arco central

a) Diseño del aislamiento del transformador trifásico

➤ Cálculo del aislamiento del devanado secundario

El aislamiento entre las vueltas, capas y partes del devanado se denomina aislamiento secundario. Su determinación dependerá del tipo de construcción de la bobina.

○ El aislamiento de cada vuelta

En los transformadores de distribución esto no es un problema porque hay conductores aislados con capas de barniz dobles y triples. Puede verificarse en baja frecuencia y pulso.

○ El aislamiento entre cada capa

El aislamiento entre cada capa puede estimarse con la siguiente fórmula:

$$V_C = \frac{2V \times V_{pc}}{N} \times F \times S \text{ (41)}$$

El espesor de la capa aislante que se puede utilizar se puede determinar de acuerdo con el voltaje de ruptura de la capa aislante seleccionada, que debe exceder el valor calculado. El número de segmentos depende del diseño de la bobina.

○ El aislamiento en cada zona de cada derivación

Se debe verificar si existe una rotura entre los conductores en la capa aislante entre las capas para eliminar la tensión generada entre las capas del shunt (generalmente en la bobina de AT). Por lo general, la capa aislante de la capa mencionada estará reforzada por una capa aislante adicional.

b) Dimensionamiento de cada bobina

➤ Bobinado de baja tensión

El conductor utilizado para enrollar B. T. será papel de aluminio (papel de aluminio), por lo que debe ajustarse al valor de la sección transversal del conductor. Para el cobre, tenemos uno, por lo que para el aluminio, se tiene que compensar el área en un 61% para igualar la conductividad y la pérdida de presión.

$$A_{cond}(AL) = A_{cond}(cobre) \times 1.6 = 226.4 \text{ mm}^2 \quad (42)$$

Donde:

$A_{cond}(Al)$ = sección del conductor de aluminio

$A_{cond}(cobre)$ = sección del conductor de cobre

Para determinar la altura de la bobina de baja tensión se debe considerar el nivel de impulso básico (NBI), por lo que se cree que para baja tensión el nivel de aislamiento correspondiente es de 1.2 kV y el NBI es de 30 kV.

$$h_s = B - 2 \times (da + 3.7) = 44.364 - 2 \times (0.8 + 3.17) = 42.13 \text{ cm} = 421.3 \text{ mm} \quad (43)$$

B: altura de las ventanas del núcleo del transformador

da: distancia del aislamiento axial

Espesor radial de la bobina de la parte de la baja tensión se detallará mediante:

$$D_{bt} = 14 \times (0.54 + 0.13) = 9.38 \text{ mm} \quad (44)$$

Adicional a ello se le da una tolerancia de 5% por concepto del uso de cintas para adherirse, se tiene:

$$D_{bt} = 9.38 \times 1.05 = 9.849 \text{ mm (45)}$$

Donde:

D_{bt} = espesor radial de la bobina de baja tensión

La longitud de la vuelta media del devanado secundario está determinada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} Ivms &= 2 \times (C + 2 \times D) + \pi \times (2(\text{daisl}) + D_{bt}) \\ Ivms &= 2 \times (25 + 15.53) + \pi \times (2(0.32) + 9.849) \\ Ivms &= 91.549 \text{ cm (46)} \end{aligned}$$

Donde:

$Ivms$ = longitud de la vuelta media de la bobina secundaria

daisl = distancia de aislamiento entre vuelta

La longitud total del conductor requerido es:

$$\begin{aligned} LtBT &= N_s \times Ivms \\ LtBT &= 14 \times 91.549 = 12.82 \text{ m (47)} \end{aligned}$$

Donde:

$Ivms$ = longitud de la vuelta media de la bobina secundaria

$LtBT$ = longitud del conductor de baja tensión

N_s = # de vueltas de la bobina de baja tensión

Después del valor calculado, se debe sumar la distancia desde la guía o salida hasta la boquilla, que es del 10%:

$$LTBT = LtBT \times 1.10 = 13.26 \text{ m (48)}$$

Donde:

LTBT = Longitud total del conductor de baja tension

LtBT = Longitud del conductor de baja tension

Utilice la siguiente fórmula para determinar el peso del conductor (PAL) de cada bobina:

$$PAL = Val \times P_e \quad (49)$$

Donde:

Val: volumen de conductor (12617)

P_e : aluminio y su peso específico (2.7 gr/ cm³)

Al sustituir se obtiene:

$$PAL = 1261.72 \times 2.7 = 3.4067 \text{ kg}$$

➤ Bobinado de alta tensión

Para determinar el tamaño de la bobina de alto voltaje, es necesario obtener información técnica del fabricante, especialmente cuando se trata de distancias dieléctricas.

El conductor utilizado para enrollar A. T. para el cálculo, se necesita usar un calibre N.º 14 AWG. Para la clase de aislamiento de 15 kV, se necesitan conductores aislados con doble barniz. De la ficha técnica de producto de Magneto, se elige el alambre con doble barniz.

Para luego determinar la altura del bobinado de alta tensión:

$$hp = B - 2 \times (da + rc) \quad (50)$$

Donde:

B: altura de la ventaja del núcleo del transformador

da: aislamiento axial

rc: radio de la curvatura del núcleo del transformador

Sustituyendo se obtiene:

$$h_p = 44.364 - 2(1.55 + 0.137) = 40.99 = 409.9 \text{ mm (46)}$$

Después de conocer la altura efectiva del devanado, se puede usar la siguiente expresión para calcular el número de vueltas por capa:

$$\text{espiras/capas} = \frac{h_p}{d_{cond}} \text{ (51)}$$

Donde:

h_p : altura del devanado primario

d_{cond} : diámetro del conductor asignado

Al reemplazar:

$$\frac{\text{espiras}}{\text{capas}} = \frac{403.9}{2.59} = 158.26 = 158 \text{ espiras por capa (52)}$$

La capacidad requerida se obtendrá dividiendo el número total de vueltas entre cada capa de vueltas, por lo que se tiene:

$$\frac{\# \text{espiras}}{\# \text{espiras/capa}} = \frac{636}{158} = 4.025 \text{ capas (53)}$$

➤ Cálculo del aislamiento menor de la bobina de alta tensión.

El aislamiento entre cada vuelta medido en voltios por vuelta:

$$Vv = \frac{v}{N} \times Fs \text{ (54)}$$

Donde:

V_v = voltaje por vuelta

V = voltaje de la bobina de alta tensión

N = # de vueltas del bobinado

La longitud de la vuelta media del devanado primario se calcula de la siguiente manera:

$$I_{vmp} = 2 \times (C + 2D) + \pi \times (2 \times (d_{casq} + D_{bt} + d_{aisLAT - BT}) + d_{AT}) \quad (55)$$

Donde:

d_{casq} : 3.175

D_{bt} : 13.9

$d_{aisLAT-BT}$: 6.85

d_{AT} : 16.72

Al reemplazar:

$$I_{vmp} = 2 \times (25 + 15.53) + \pi \times (2 \times (0.32 + 0.97 + 0.69) + 1.672)$$

$$I_{vmp} = 97.24 \text{ cm}$$

La longitud total del conductor requerido es:

$$L_{tAT} = N_{pl} \times I_{vmp} \quad (56)$$

Donde:

N_{pl} = 668 vueltas a la 1 en la posición de tap.

Al reemplazar se tiene:

$$L_{tAT} = 668 \times 97.24 = 649.56 \text{ m}$$

El peso del conductor por bobina debe ser de:

$$P_{at} = LTAT \times 7.47 \text{ g/m} = 649.56 \text{ m} \times 7.47 \text{ g/m}$$

$$P_{at} = 4,85 \text{ kg} \quad (57)$$

Donde:

Pat = peso del conductor de la bobina de alta tensión

LTAT = longitud total del conductor de la bobina de alta tensión

4.2.6. Determine el ancho y el peso de la ventana central de cada arco

Hay dos arcos, ambos de igual tamaño y peso.

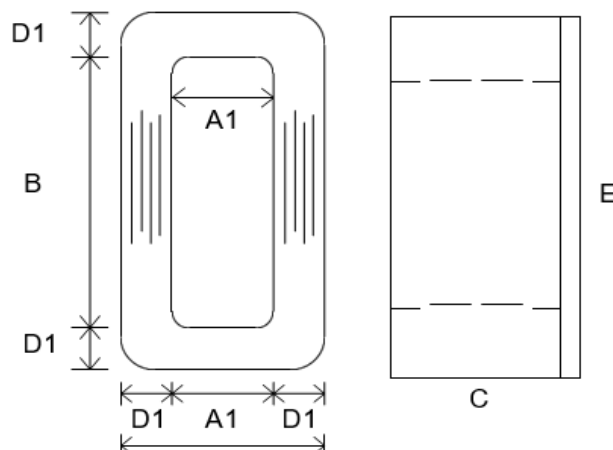


Figura 22. Designación de las partes de las arcadas. Tomada de Sistemas trifásicos (31)

Espesor de la bobina

$$= (\# \text{capas}) \times \left(\frac{\text{espesor}}{\text{capa}} \times BT \right) + (\# \text{capas}) \times \left(\frac{\text{espesor}}{\text{capas}} \times AT \right)$$

$$\text{Espesor de la bobina} = (7 \times 0.535) + (4 \times 2.59) \times 1,05$$

$$\text{Espesor de la bobina} = 14.81 \quad (58)$$

A1 = espesor de la bobina + aislamiento del nucleo

$$A1 = 14.81 + 2,5 = 17 \text{ mm} = 17.31 \text{ cm} \quad (59)$$

A2 = 2 × espesor de la bobina + aislamiento entre bobinas

$$A2 = 2 \times 14.81 + 6 \text{ mm} = 35.62 \text{ mm} = 3.562 \text{ cm} \quad (60)$$

La longitud media del arco está determinada por la siguiente expresión.

$$Lm1 = 2 \times (A1 + B) + \pi \times (D) \quad (61)$$

Donde:

Lm1 = longitud media del arco del núcleo

Sustituyendo se obtiene:

$$Lm1 = 2 \times (2,5 + 44,36) + \pi \times (7,4) = 116,9 \text{ cm}$$

El peso del arco pequeño estará determinado por:

$$P_1 = Vfe1 \times P_e \quad (62)$$

Donde:

P_1 = peso del arco del núcleo

$Vfe1$ = volumen del arco del núcleo

P_e = peso específico del material ferromagnético

Al sustituir se obtiene:

$$P_1 = (25 \times 7,394 \times 116,96) \times P_e = (21\,620,056) \times 7,65$$
$$P_1 = 165,4 \text{ Kg}$$

El peso total del núcleo será la suma del peso de cada arco, y luego:

$$Pt = 165,4 \text{ Kg} \times 2 = 330,8 \text{ kg} \quad (63)$$

La pérdida se puede encontrar multiplicando el peso por el factor de pérdida:

El material seleccionado es 0.27mm M-4/125 *Carlite goes*.

$$fPh (1.7 \text{ tesla}) = 1.52 \text{ W/kg} \text{ a una frecuencia de } 60 \text{ Hz}$$

$$Ph = fPh \times pt \text{ (64)}$$

Donde:

Ph = pérdidas en el material ferromagnético

fPh = factor de pérdidas

pt = peso total de núcleo del transformador

Al sustituir se obtiene:

$$Ph = 1.52 \text{ W/kg} \times 330.8 \text{ kg} = 502.8 \text{ W}$$

Porcentaje de pérdidas en función a lo calculado:

$$150 \text{ kw} = 100\%$$

$$502 \text{ W} = x\%$$

$$x = \frac{100 \times 502.78}{150000}$$

$$Ph = 0.3352\%$$

Donde:

Ph = pérdidas en el material ferromagnético en porcentaje

4.2.7. Eliminación de vértices del núcleo

a) En el primer nivel de tensión que vendría a ser 10 kV

En este primer modelo se extrae de cada vértice exterior del núcleo un área total de 8694 mm².

b) En el segundo nivel de tensión que vendría a ser 13.2 kV

En este primer modelo se extrae de cada vértice exterior del núcleo un área total de 9660 mm².

4.3. Diseño

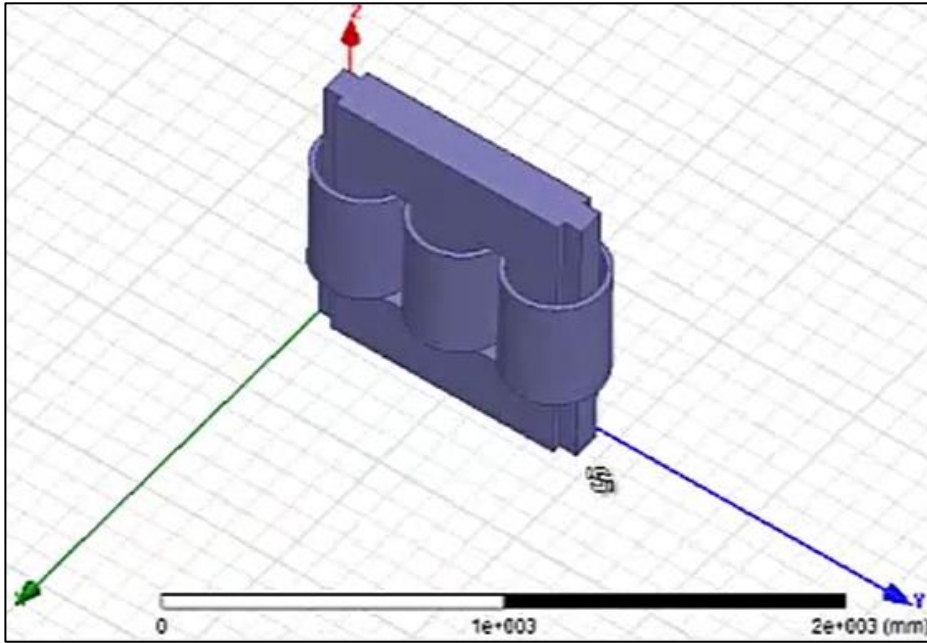


Figura 23. Diseño establecido parte 1

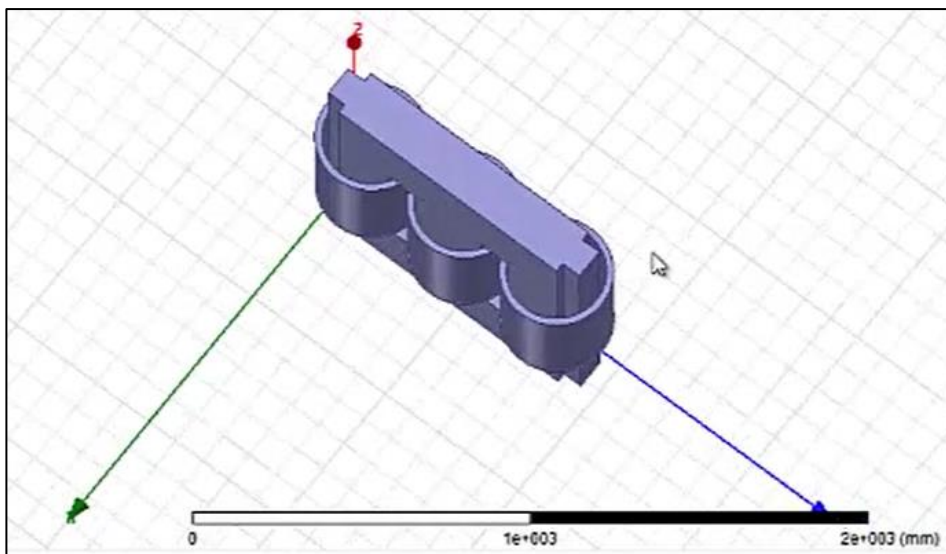


Figura 24. Diseño establecido parte 2

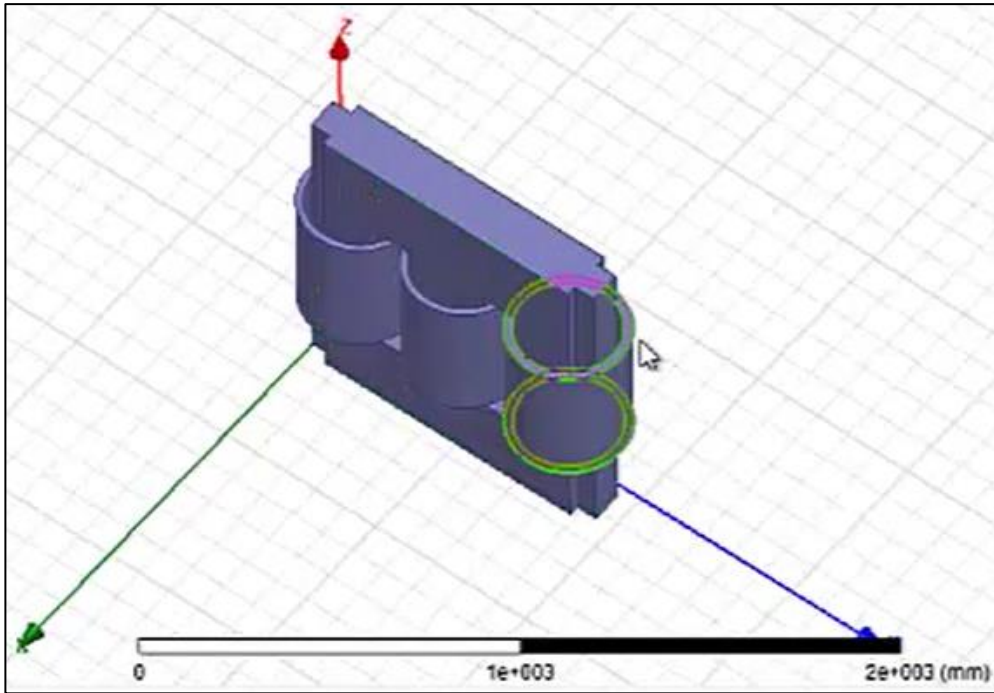


Figura 25. Diseño establecido parte 3

En la figura 22, 23 y 24 se pueden apreciar distintos ángulos del transformador con morfología cruciforme.

CAPÍTULO V CONSTRUCCIÓN

5.1. Construcción

Para el modelamiento del núcleo de transformador trifásico de distribución en el simulador Ansys Maxwell, se toma las siguientes características, se elige comparar los materiales Acero M-4 y Mu_Metal. También se compara la morfología de sección rectangular y cruciforme. Además se elige comparar el tipo de material de la bobina, cobre y plata, con los niveles de tensión 10 kV y 13.2 kV.

Las dimensiones que se toman son:

Para el nivel de tensión de 10 kV, de acuerdo a los cálculos predeterminados en el análisis de cálculos, se tienen las siguientes dimensiones, por lo que se muestran los perfiles, de esta manera en la siguiente figura se muestra la vista frontal de la bobina.

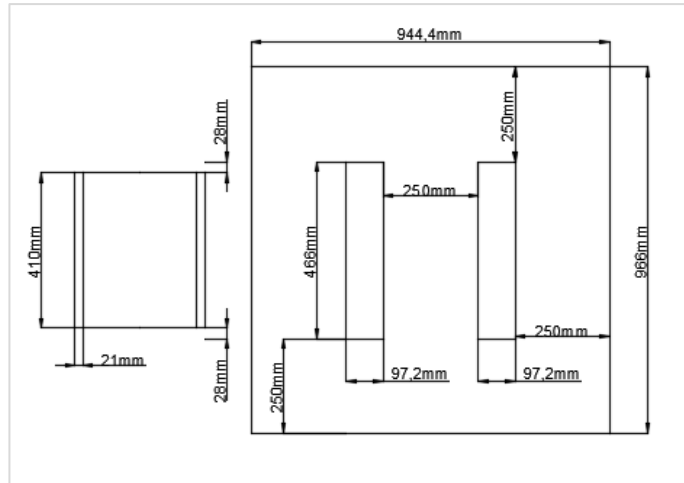


Figura 26. Vista Frontal 10 kV

En la siguiente figura se muestra una vista superior de la sección rectangular.

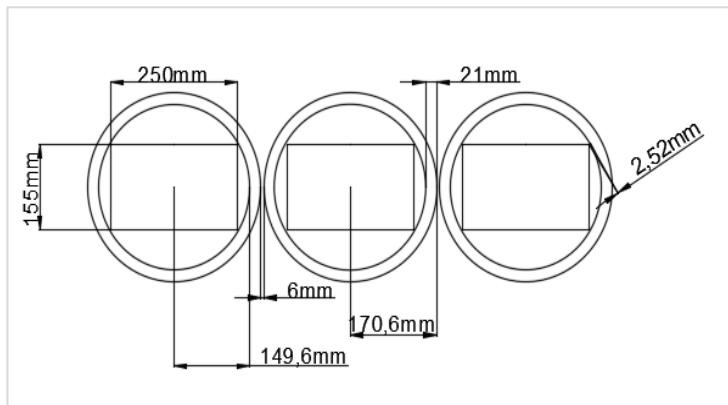


Figura 27. Vista superior de sección rectangular 10 kV

En la siguiente figura se muestra una vista superior de la sección cruciforme de 30 mm recortado.

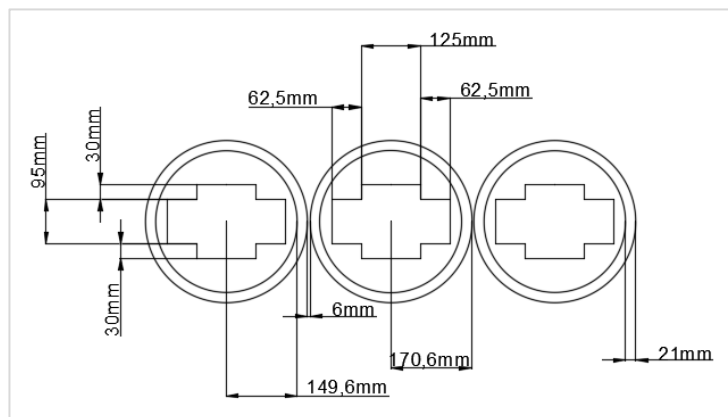


Figura 28. Vista superior de sección cruciforme 10 kV

Para el nivel de tensión de 13.2kV, de acuerdo a los cálculos predeterminados en el análisis de cálculos, se tienen las siguientes dimensiones. Por lo que se muestran los perfiles, de esta manera en la siguiente figura se muestra la vista frontal de la bobina.

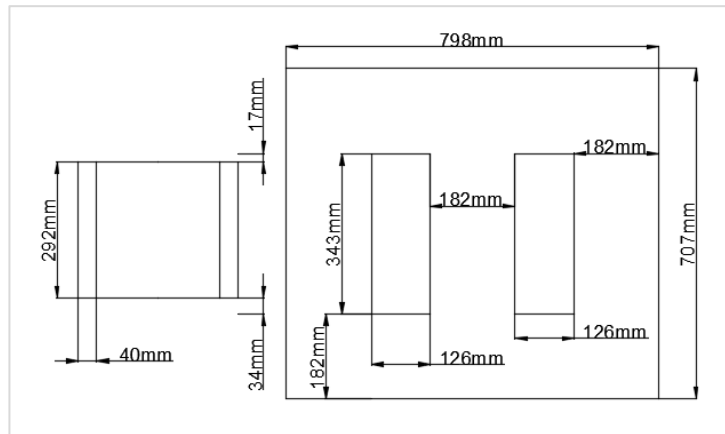


Figura 29. Vista frontal 13.2 kV

En la siguiente figura se muestra una vista superior de la sección rectangular.

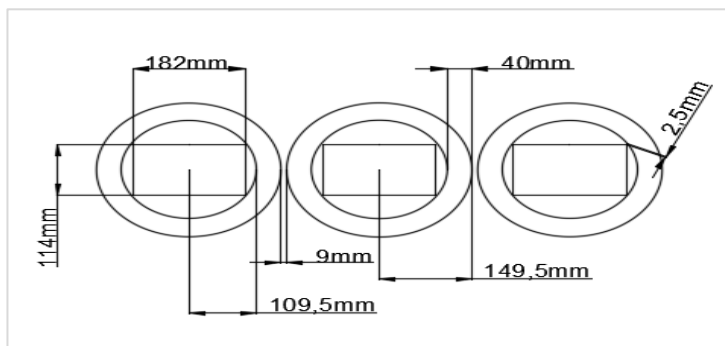


Figura 30. Vista superior de sección rectangular 13.2 kV

En la siguiente figura se muestra una vista superior de la sección cruciforme de 30 mm de recortado.

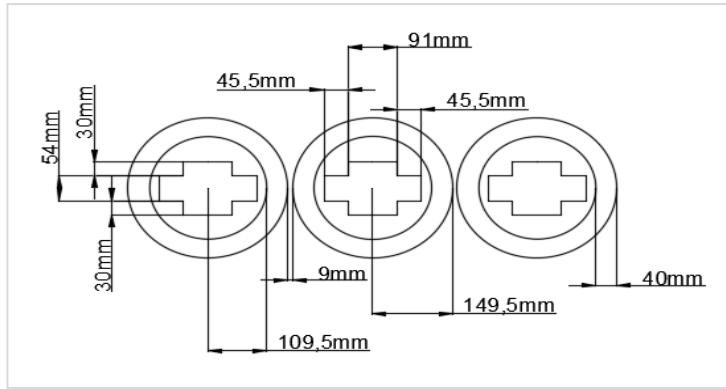


Figura 31. Vista superior de sección cruciforme 13.2 kV

5.1.1. Fase 1

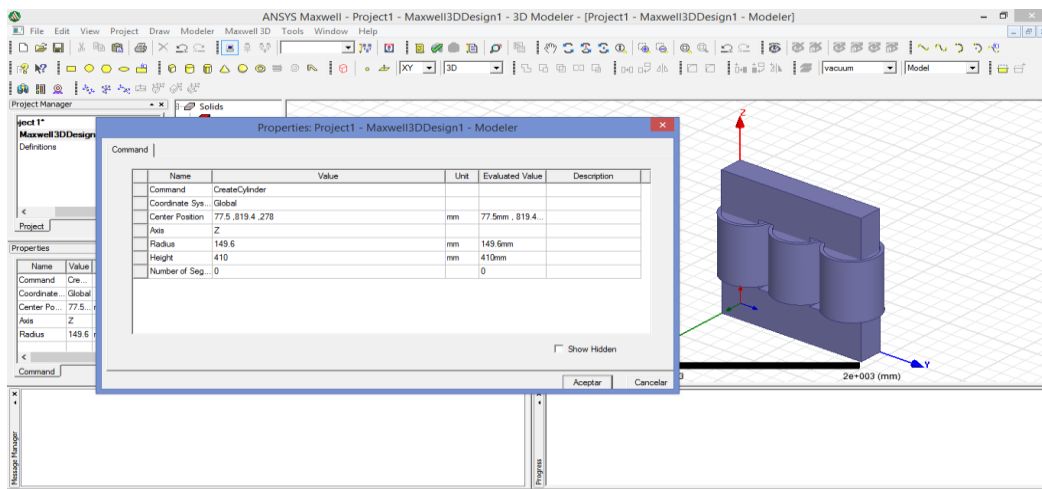


Figura 32. Construcción del primer modelo tradicional

En la figura 32 se puede observar la parte del diseño con tres bobinas y una morfología rectangular, todo ello ya integrada en el simulador Ansys, cada dimensión previamente establecida en el análisis matemático.

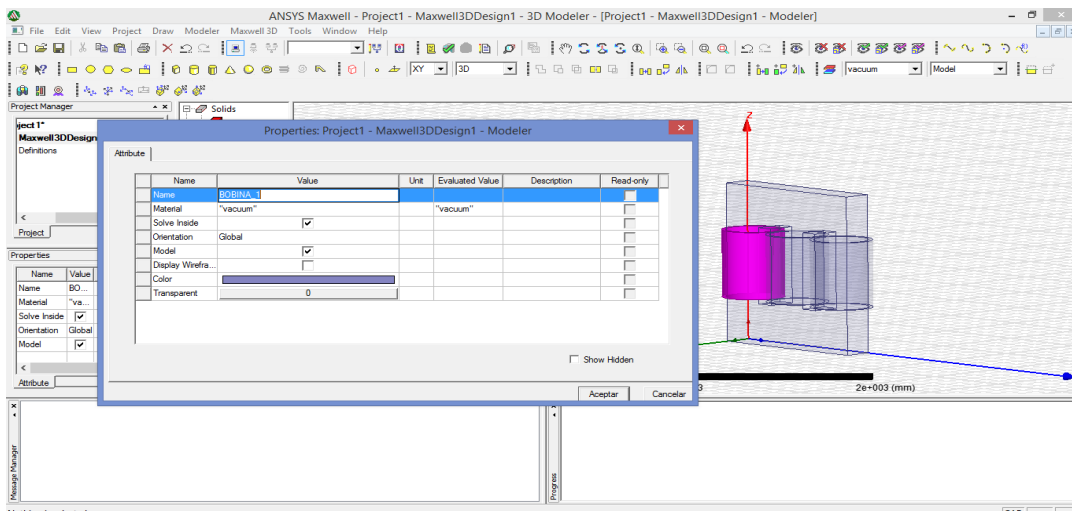


Figura 33. Dimensiones y material de las bobinas

En la figura 33 se integran los materiales del conductor al diseño del transformador, se recuerda que en este diseño se integran ambos conductores para de ese modo observar su funcionamiento en la simulación.

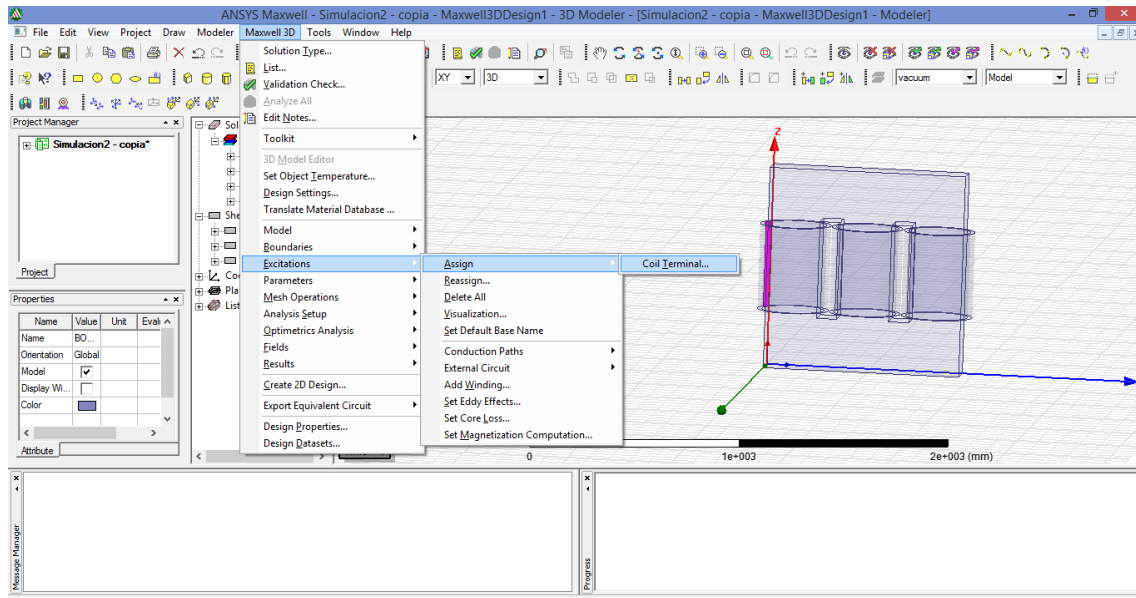


Figura 34. Designación del parte primaria y secundaria de las bobinas

En la figura 34 se puede ver que a cada bobina se le asignan los valores de acuerdo al número de vueltas en el enrollamiento y el nivel de tensión al cual se pretende trabajar, en cada prueba a realizar se cambia el tipo de conductor y los valores asignados de acuerdo al tipo de conductor.

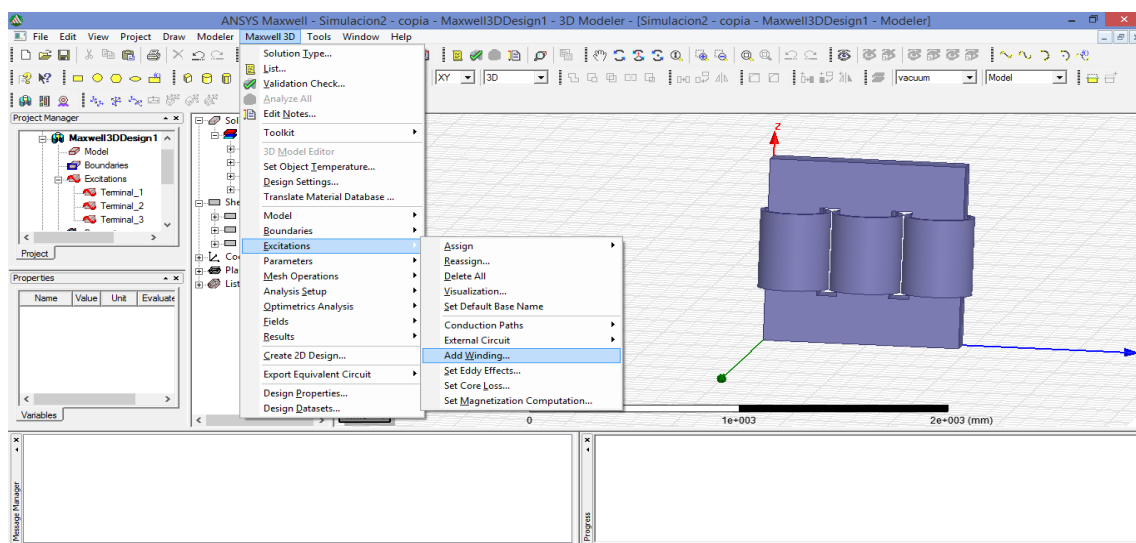


Figura 35. Diseño de morfología rectangular integrado

En la figura 35 se puede ver el diseño que ya ha sido integrado para las pruebas a raíz del diseño factorial.

5.1.2. Fase 2

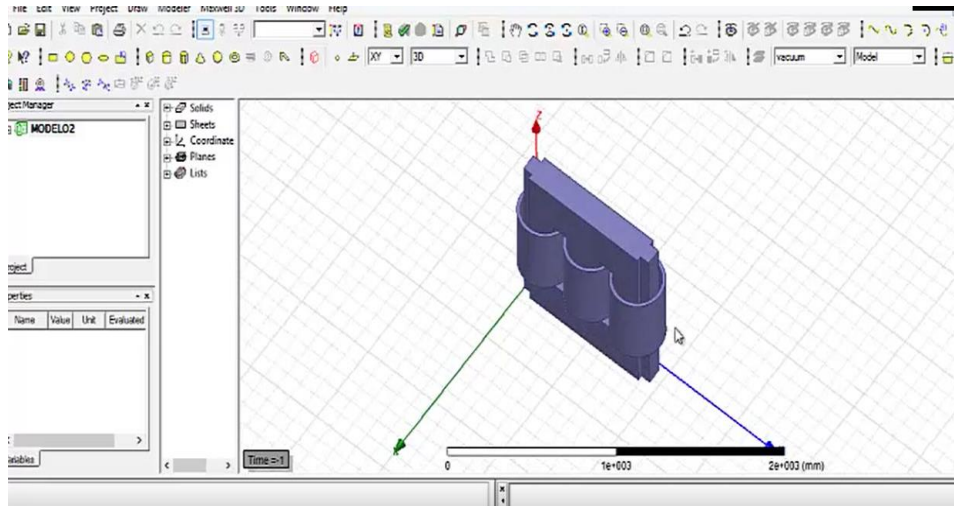


Figura 36. Construcción del segundo modelo cruciforme

En la figura 36 se puede observar la parte del diseño con tres bobinas y una morfología cruciforme todo ello ya integrada en el simulador Ansys, cada dimensión previamente establecida en el análisis matemático.

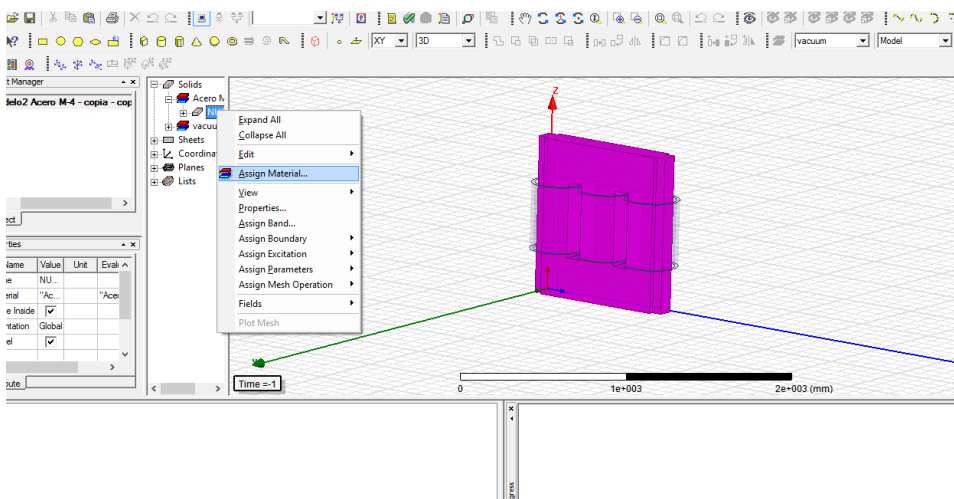


Figura 37. Construcción del segundo modelo cruciforme

En la figura 37, al igual que en la morfología rectangular, en esta también se le integran los valores para poder integrar la simulación y los valores previamente calculados.

5.1.3. Fase 3

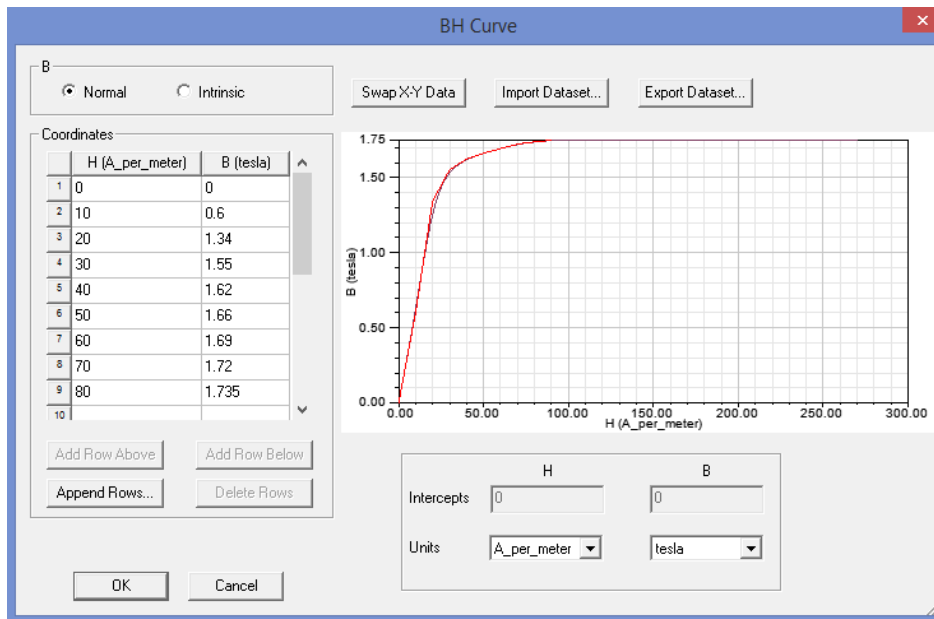


Figura 38. Integración de valores para la curva H-B para el Acero M-4

Esta es la fase de la integración de datos de cada material, es este caso del Acero M-4 para proceder a la simulación que muestra la relación entre el flujo magnético y la fuerza respectiva del campo magnético.

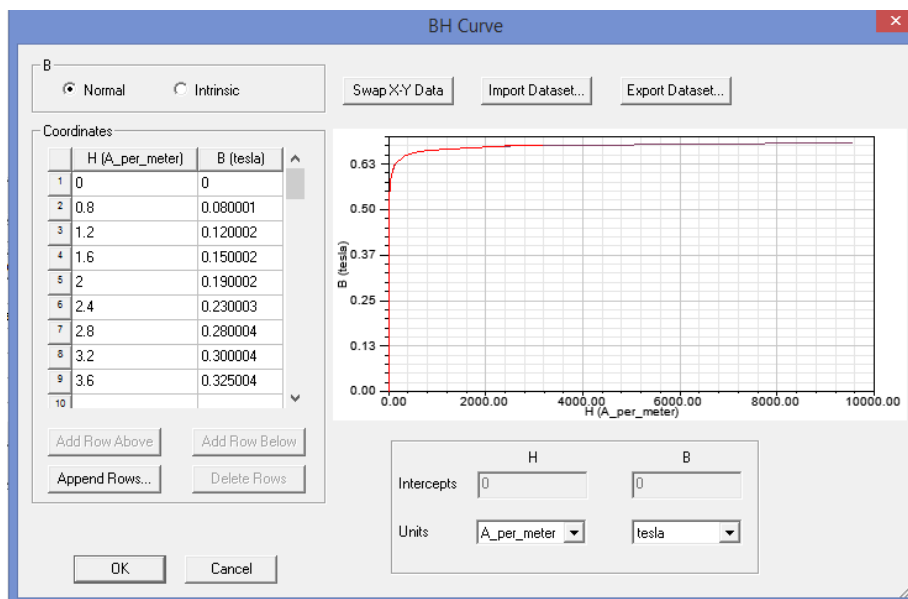


Figura 39. Integración de valores para la curva H-B para el Mu_metal

Esta es la fase de la integración de datos de cada material, es este caso del Mu_metal para proceder a la simulación que muestra la relación entre el flujo magnético y la fuerza respectiva del campo magnético.

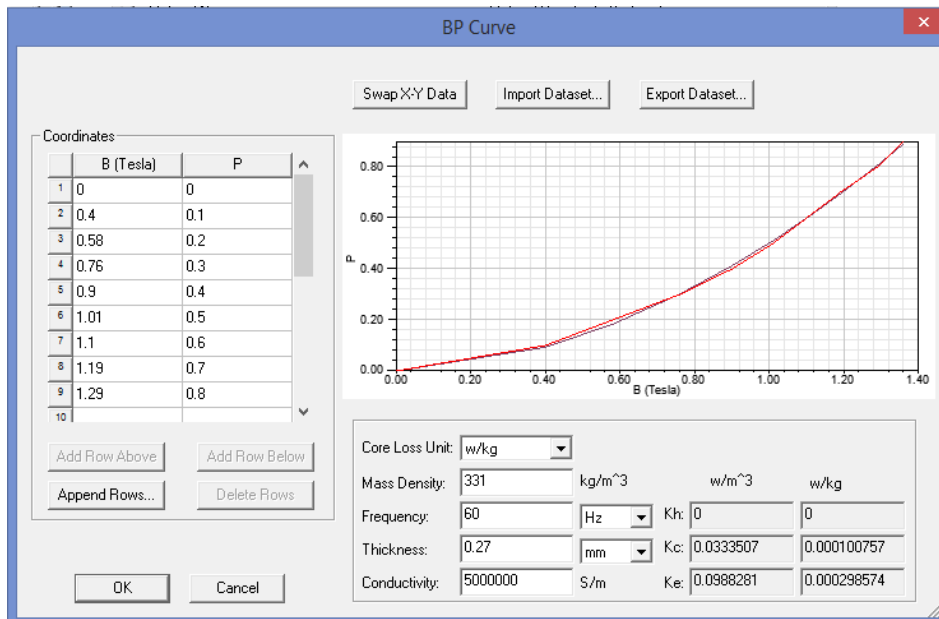


Figura 40. Integración de valores para la curva B-P para el Acero M-4

Esta es la fase de la integración de datos de cada material, es este caso del Acero M-4 para proceder a la simulación que muestra la relación entre el flujo magnético y la potencia.

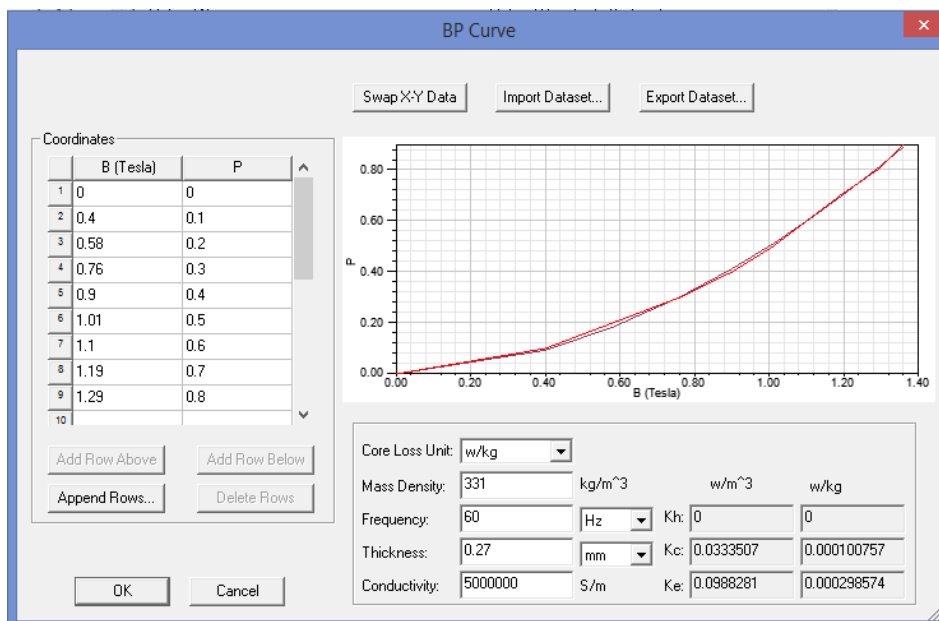


Figura 41. Integración de valores para la curva B-P para el Mu_metal

Esta es la fase de la integración de datos de cada material, es este caso del Mu_metal para proceder a la simulación que muestra la relación entre el flujo magnético y la potencia.

5.1.4. Fase 4

En esta fase se muestran los resultados de las combinaciones.

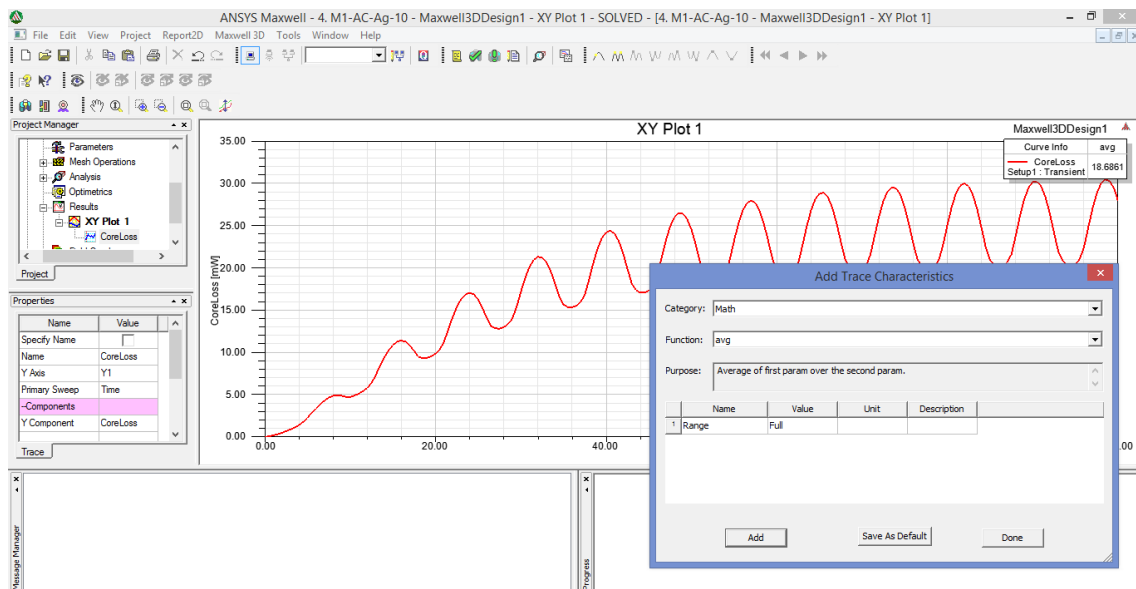


Figura 42. Primera combinación

La primera combinación muestra la morfología rectangular, el acero M-4 del conductor de la bobina es la plata a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 18.6861 W.

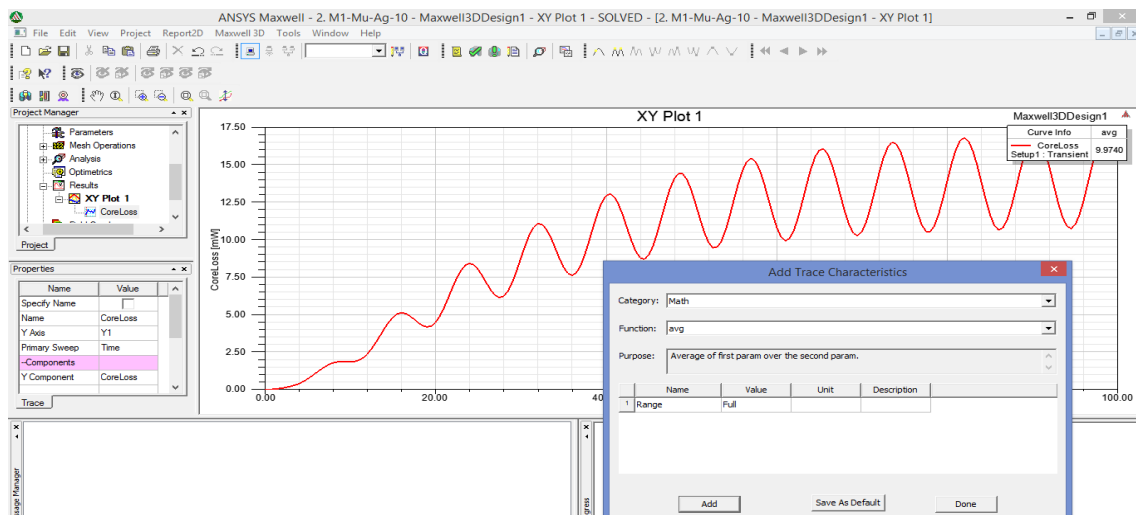


Figura 43. Segunda combinación

La segunda combinación muestra la morfología rectangular, del Mu_metal el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 9.974 W.

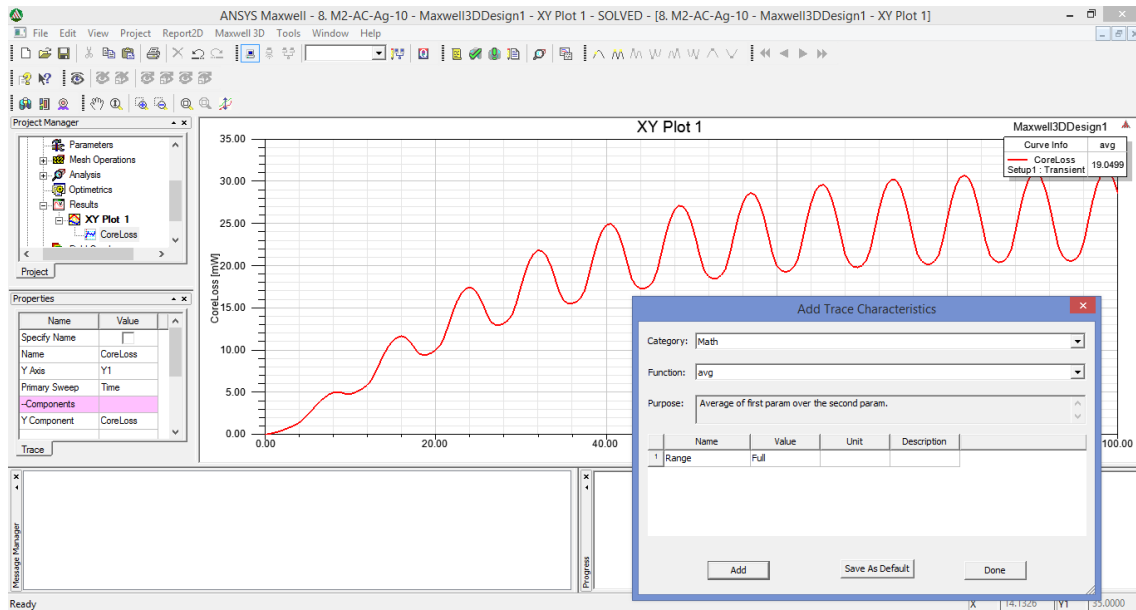


Figura 44. Tercera combinación

La tercera combinación muestra la morfología cruciforme, del acero M-4, el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 19.0499 W.

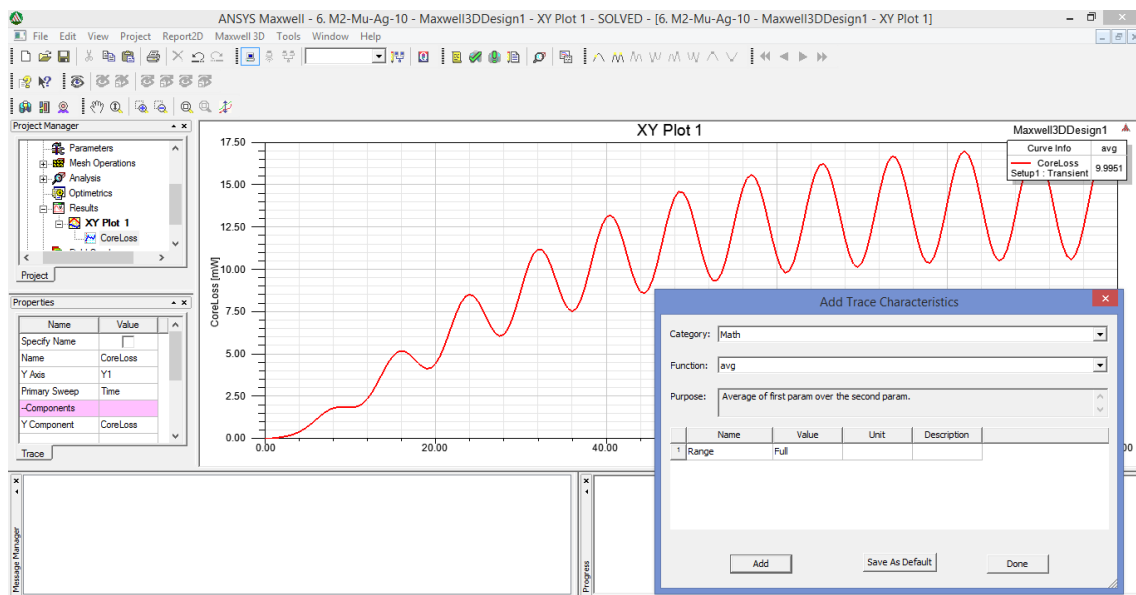


Figura 45. Cuarta combinación

La cuarta combinación muestra la morfología cruciforme, del Mu_metal, el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 9.9951 W.

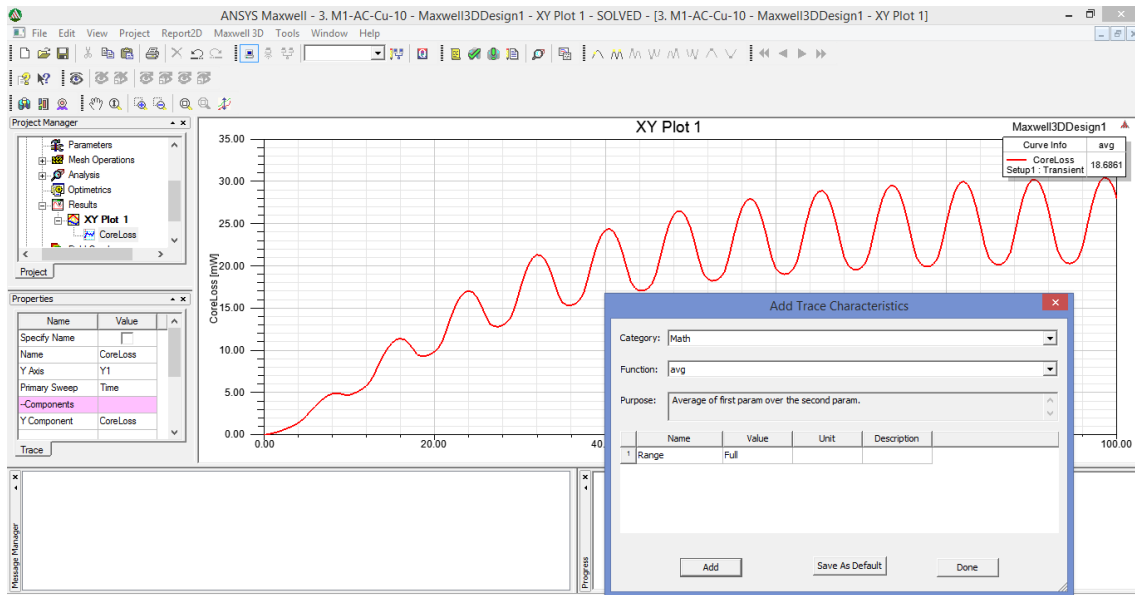


Figura 46. Quinta combinación.

La quinta combinación muestra la morfología rectangular, del acero M-4, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 18.6861 W.

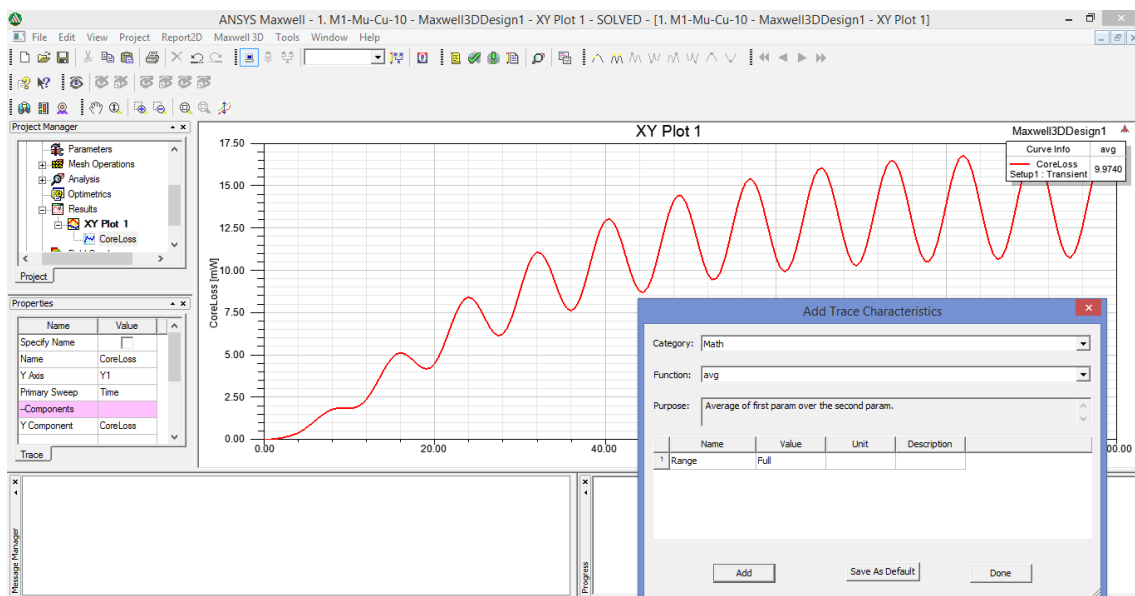


Figura 47. Sexta combinación

La sexta combinación muestra la morfología rectangular, del Mu_metal, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 9.974 W.

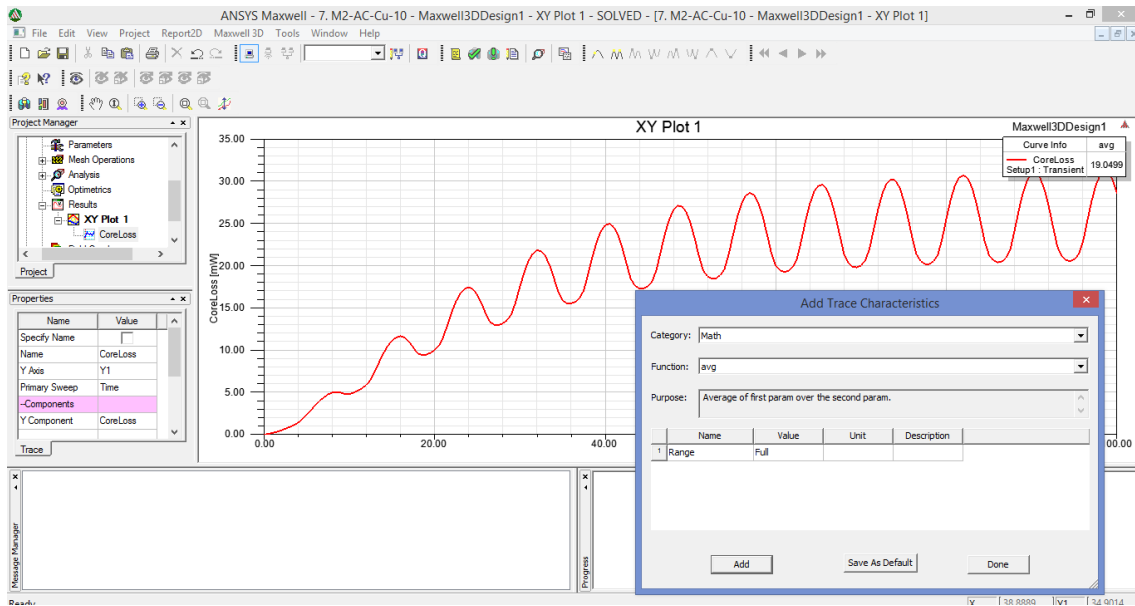


Figura 48. Séptima combinación

La séptima combinación muestra la morfología cruciforme, del acero M-4, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 19.0499 W.

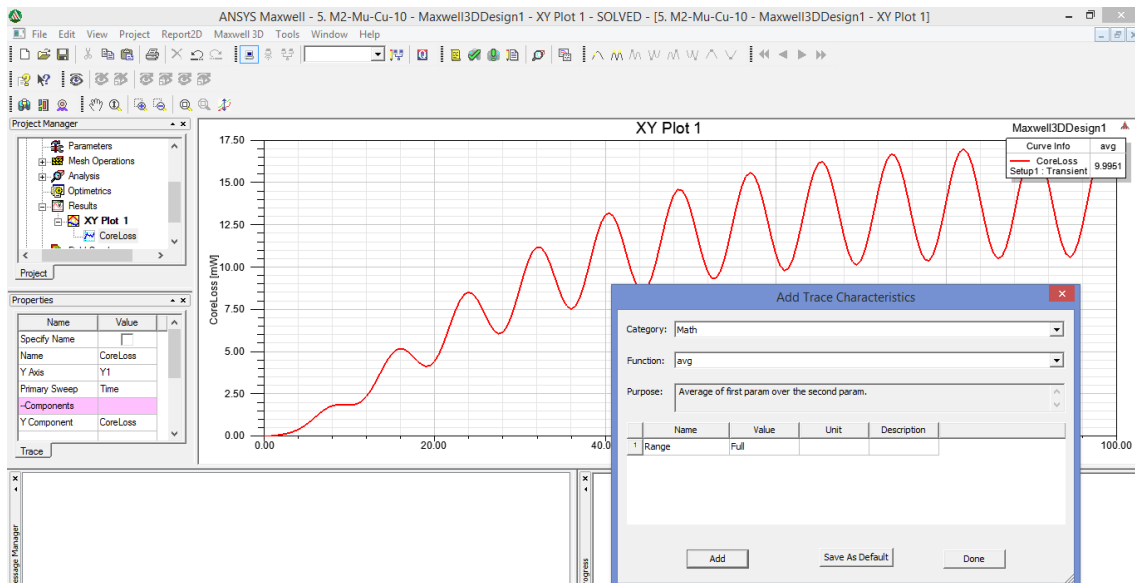


Figura 49. Octava combinación

La octava combinación muestra la morfología cruciforme, del Mu_metal, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 10 kV el cual muestra una pérdida de 9.9951 W.

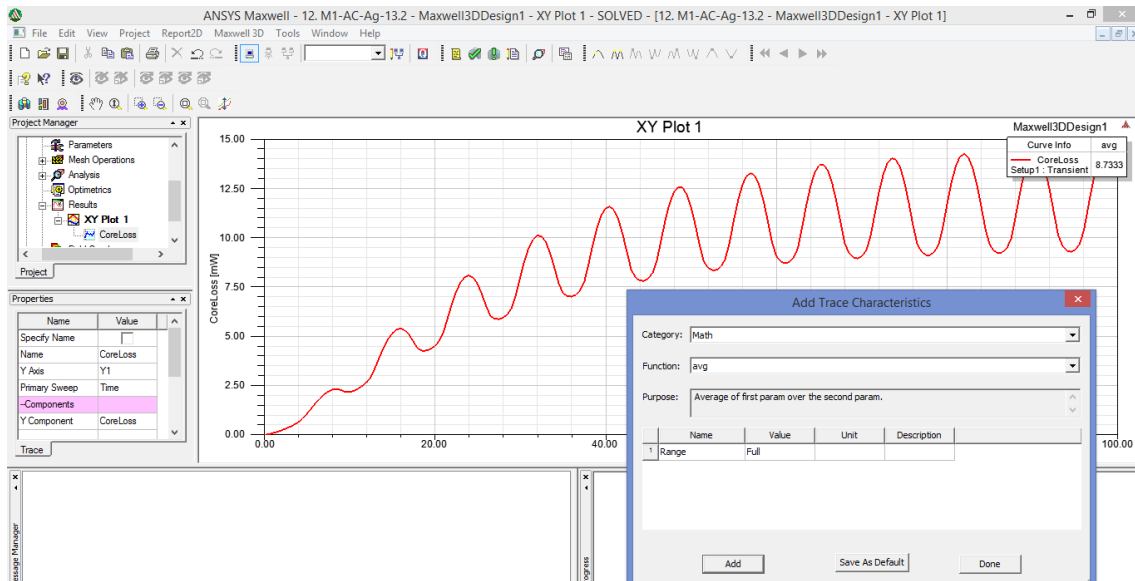


Figura 50. Novena combinación

La novena combinación muestra la morfología rectangular, del acero M-4, el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 8.7333 W.

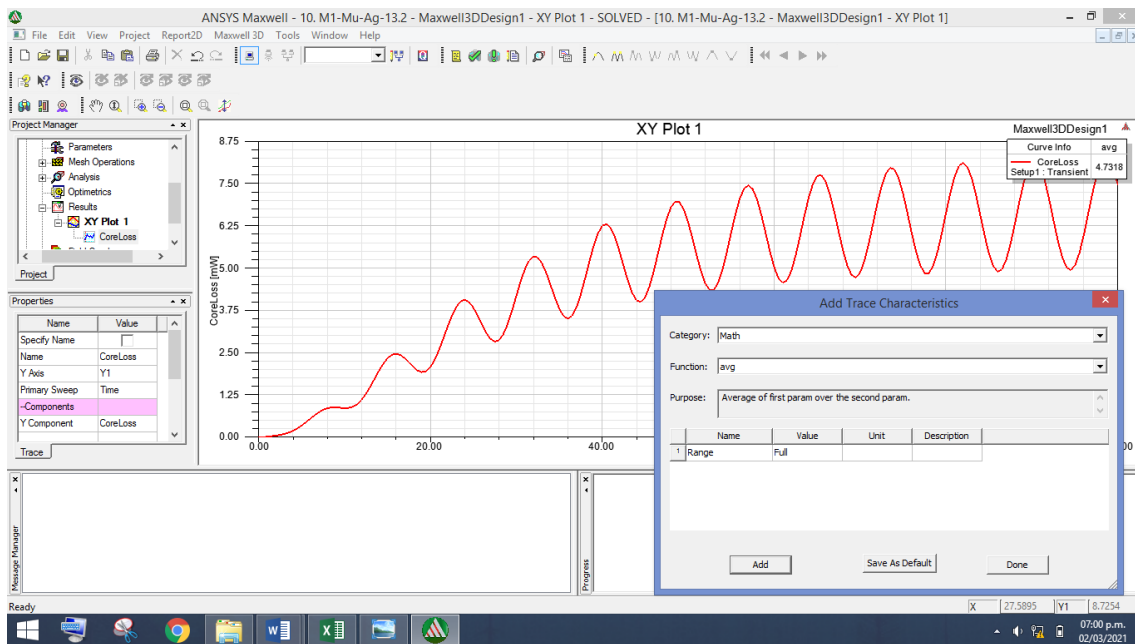


Figura 51. Décima combinación

La décima combinación muestra la morfología rectangular, del Mu_ metal, el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 4.7318 W.

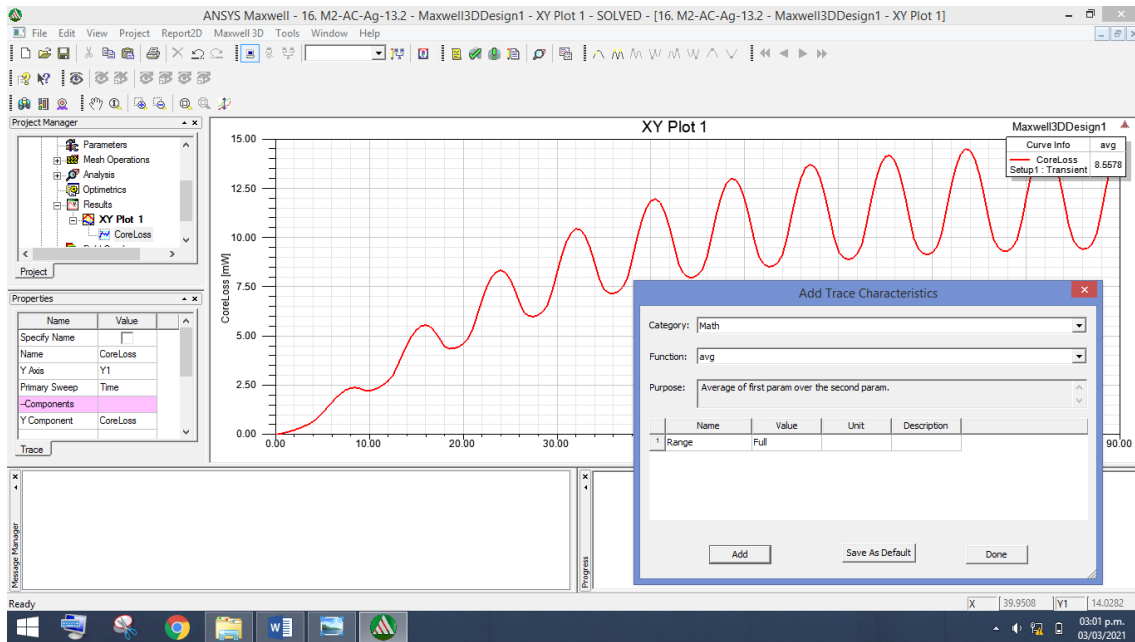


Figura 52. Décima primera combinación

La décima primera combinación muestra la morfología cruciforme, del acero M-4, el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 8.5578 W.

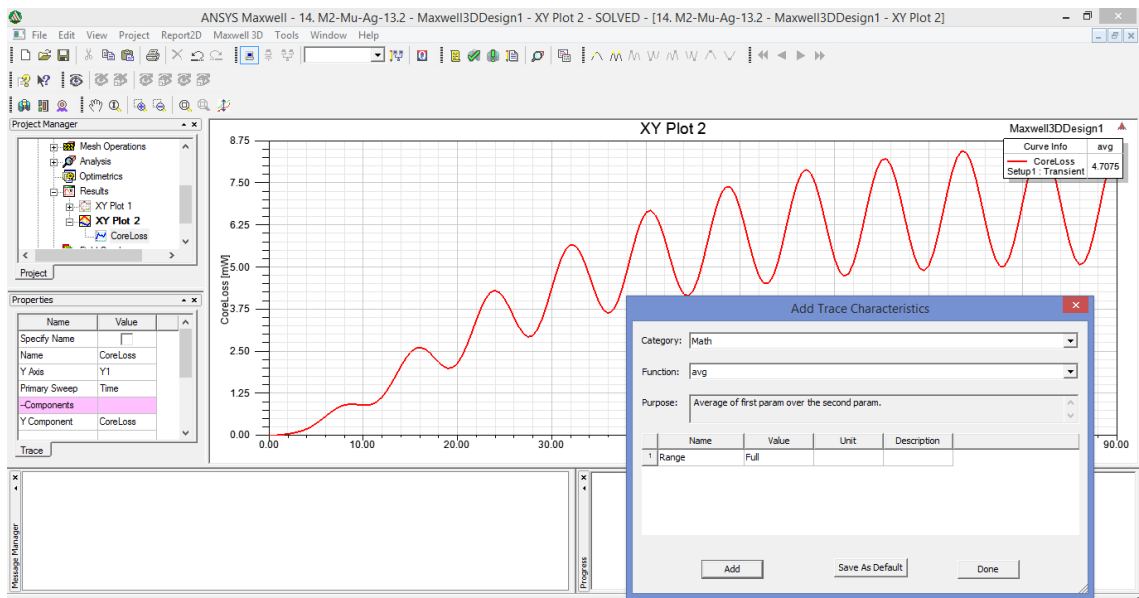


Figura 53. Décima segunda combinación

La décima segunda combinación muestra la morfología cruciforme, del Mu_metal, el conductor de la bobina es la plata a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 4.7075 W.

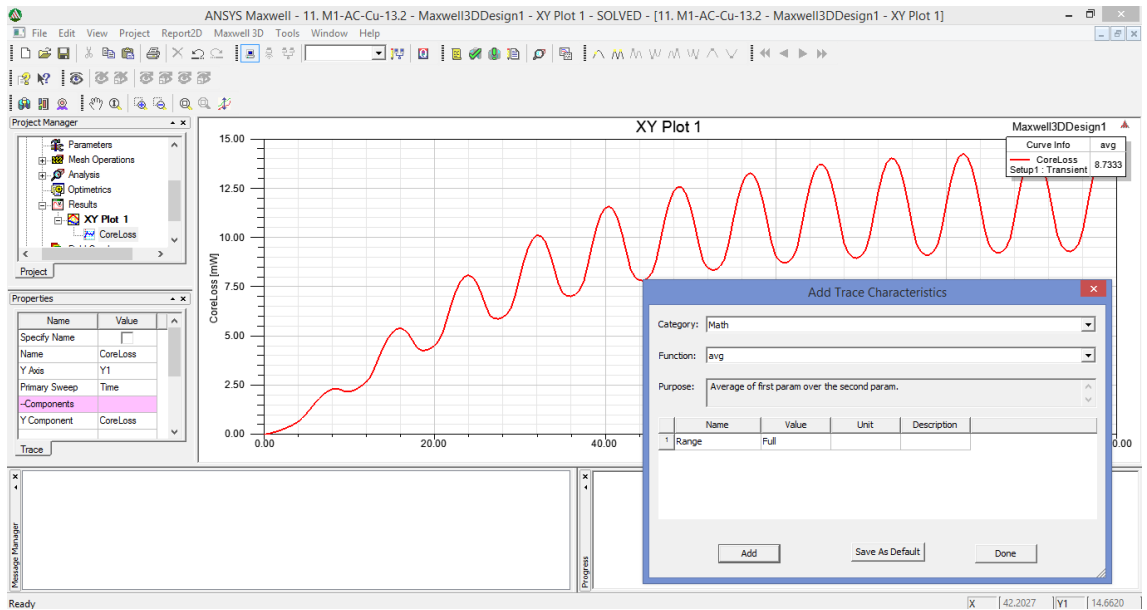


Figura 54. Décima tercera combinación

La décima tercera combinación muestra la morfología rectangular, del acero M-4, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 8.7333 W.

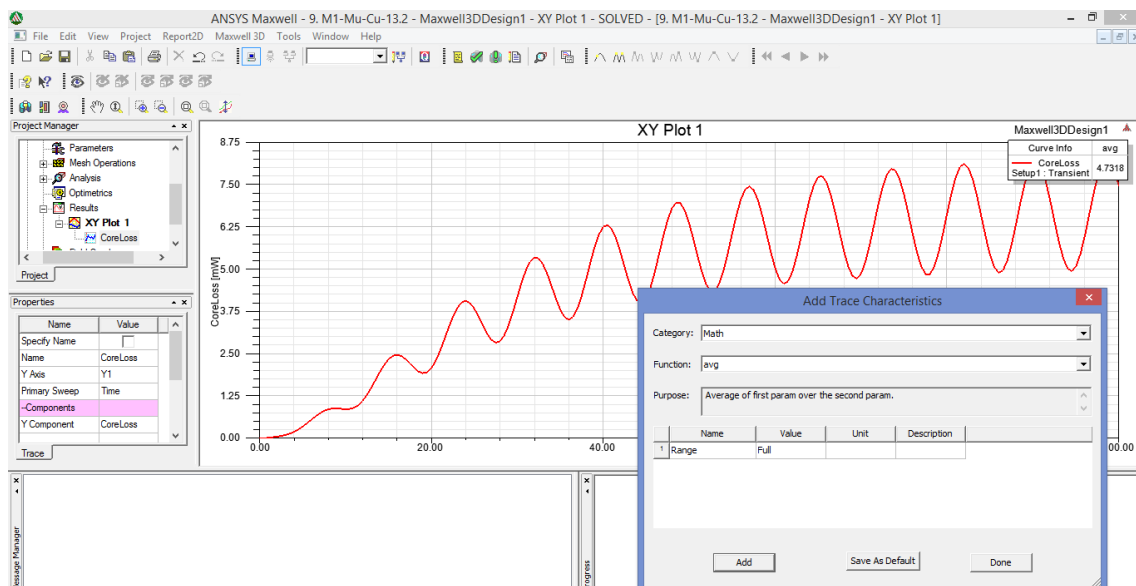


Figura 55. Décima cuarta combinación

La décima cuarta combinación muestra la morfología rectangular, del Mu_metal, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 4.7318 W.

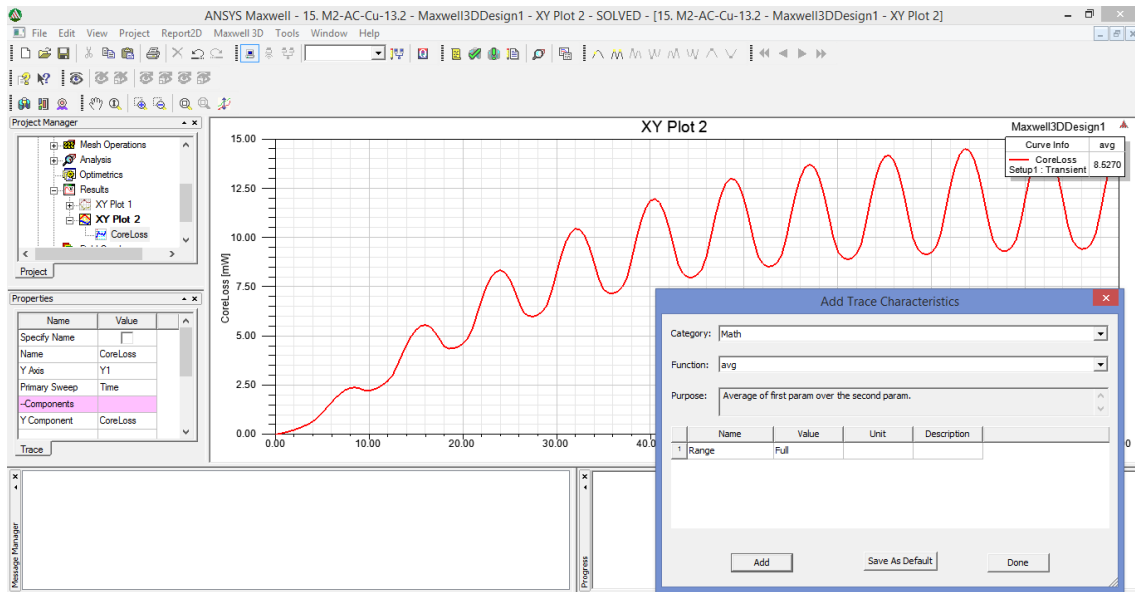


Figura 56. Décima quinta combinación

La décimo quinta combinación muestra la morfología cruciforme, del acero M-4, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 8.527 W.

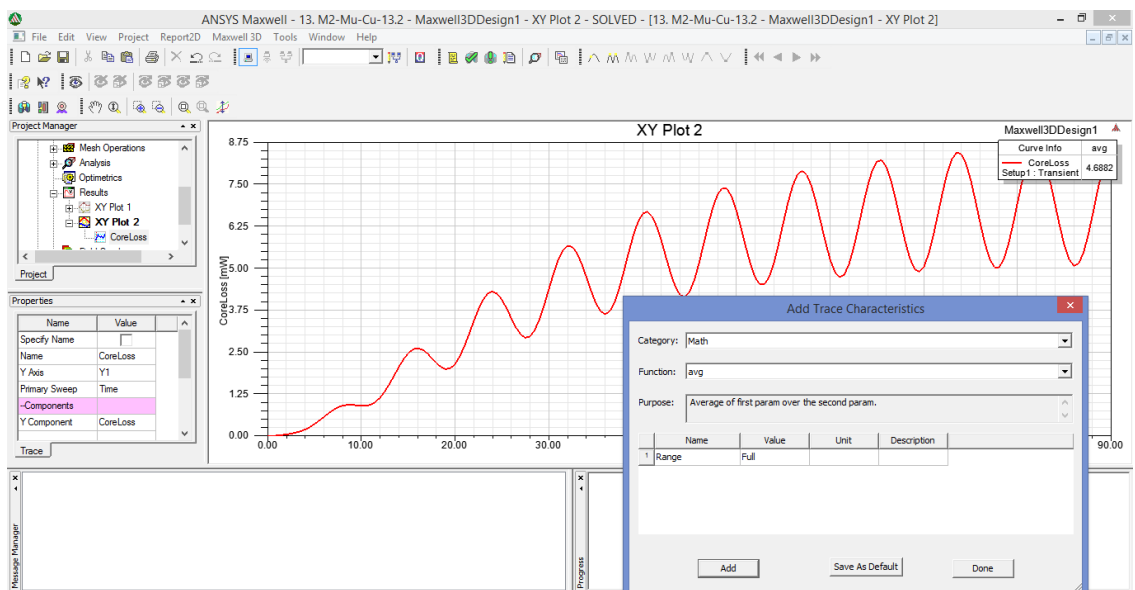


Figura 57. Décima sexta combinación

La décimo sexta combinación muestra la morfología cruciforme, del Mu_metal, el conductor de la bobina es el cobre a una tensión de 13.2 kV el cual muestra una pérdida de 4.6882 W.

5.2. Pruebas y resultados

Tabla 15.

Diseño factorial (datos)

Letra	Factor	Bajo(-1)	Alto (1)
A	Material de núcleo	Acero M-4	Mu_Metal
B	Morfología	Sección rectangular	Sección cruciforme
C	Material de bobina	Plata	Cobre
D	Nivel de tensión	10 kV	13.2 kV

Obtenido los resultados de acuerdo a las variables del cual se expresan en la tabla 15 con los niveles especificados, se realiza el análisis en el software minitab, de los resultados de las 16 combinaciones.

5.3. Diseño factorial completa

Tabla 16.

Resumen del diseño

Factores:	4	Diseño de la base	4, 16
Corridas:	16	Réplicas:	1
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Todos los términos están libres de estructuras alias.

En la tabla 16, se muestran los datos y los factores integrados de la tabla 15.

5.3.1. Regresión factorial pérdidas (W) vs. A, B, C, D

Tabla 17.

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	429.028	53.629	745300.13	0.000
Lineal	4	404.258	101.065	1404540.95	0.000
A	1	164.006	164.006	2279263.11	0.000
2 B	1	0.006	0.006	89.00	0.000
C	1	0.000	0.000	2.18	0.183
D	1	240.246	240.246	3338809.51	0.000
Interacciones de 2 términos	3	24.707	8.236	114456.61	0.000
A*B	1	0.009	0.009	119.88	0.000
A*D	1	24.606	24.606	341958.20	0.000
B*D	1	0.093	0.093	1291.75	0.000
Interacciones de 3 términos	1	0.062	0.062	867.38	0.000
A*B*D	1	0.062	0.062	867.38	0.000
Error	7	0.001	0.000		
Total	15	429.029			

Interpretación:

- Nivel de significancia: 0.05
- P valor < nivel de significancia ($\alpha = 0,05$)
- Las combinaciones mostradas en el análisis de varianza son significativas, menos el factor C, del cual no es significativo, como también las combinaciones que incluyen al factor C, por lo tanto, se anulan aquellas combinaciones que no son significativas.

Tabla 18.
Resumen de modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0084827	100.00%	100.00%	100.00%

Interpretación:

S: desviación estándar o varianza

R-CUAD.: coeficientes de determinación

- Debe ser cercano a 1 o 100%
- Nos indica si la **calidad de modelo** para replicar los resultados
- En este caso es 100% (**alto**): los datos insertados son de buena calidad R-cuad. (Ajustado)
- Debe ser cercano a 1 o 100%
- Está relacionado al **tamaño de la muestra** y la cantidad de factores
- En nuestro caso es 100% (alto): se tiene una muestra grande R-cuad (pred)
- Debe ser cercano a 1 o 100%
- Indica el **poder de predicción** del modelo
- En el diagrama de Pareto, todos los componentes son significativos
- En nuestro caso es 100% (alto): todos los componentes son significativos

Tabla 19.
Coeficientes codificado

Término	Efecto	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		10.5513	0.0021	4975.47	0.000	
A	- 6.40324	-3.20162	0.00212	-1509.72	0.000	1.00
B	0.04001	0.02001	0.00212	9.43	0.000	1.00
C	- 0.00626	-0.00313	0.00212	-1.48	0.183	1.00
D	- 7.74994	-3.87497	0.00212	-1827.24	0.000	1.00
A*B	- 0.04644	-0.02322	0.00212	-10.95	0.000	1.00
A*D	2.48021	1.24011	0.00212	584.77	0.000	1.00
B*D	- 0.15244	-0.07622	0.00212	-35.94	0.000	1.00
A*B*D	0.12491	0.06246	0.00212	29.45	0.000	1.00

Interpretación:

A, B, C, D, AB, AD, BD y ABD son los coeficientes de la formula.

5.3.2. Modelo matemático

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

<p>Pérdidas = 10.5513 - 3.20162 A + 0.02001 B - 0.00313 C - 3.87497 D (W) - 0.02322 A*B + 1.24011 A*D - 0.07622 B*D + 0.06246 A*B*D</p>

Interpretación:

La siguiente función muestra el promedio de pérdidas que existe en un núcleo de un transformador trifásico, hasta el punto de que alcance al estado de saturación.

Permite predecir la respuesta en función a los factores: A, B, C, D, AB, AD, BD y ABD, por lo que todas son significativas, menos el factor C, sin embargo, se considera a este último porque forma parte de los factores de las combinaciones.

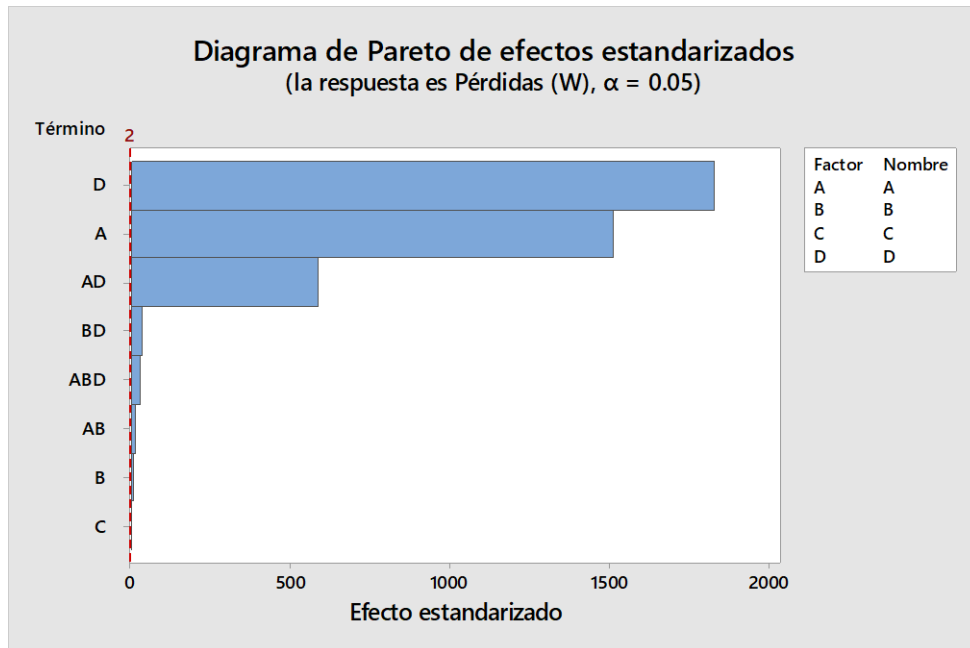
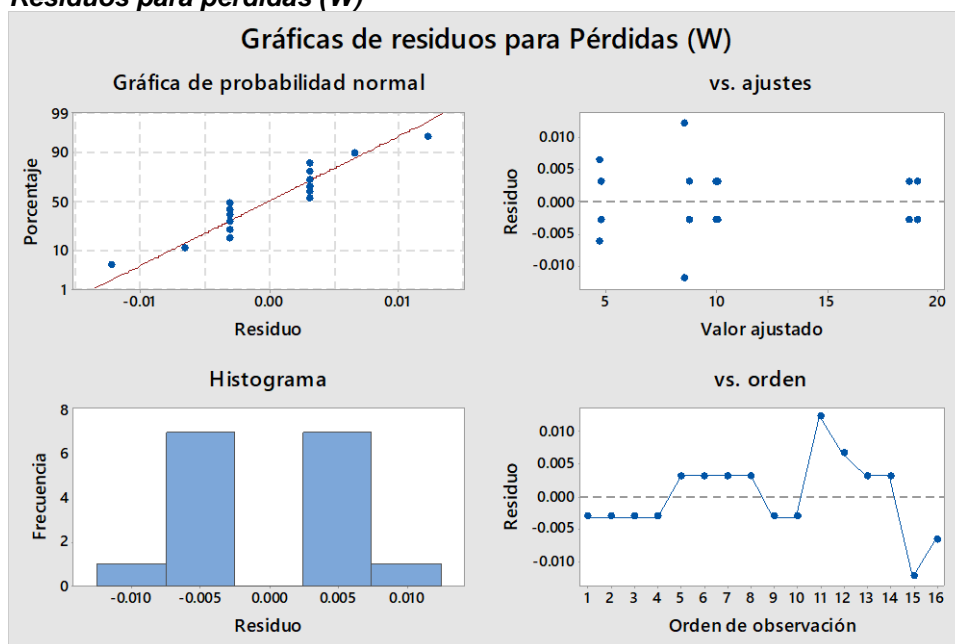


Figura 58. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

Interpretación:

- Margen de error: 2
- Nivel de significancia: 0.05
- Los valores que sobrepasen el margen de error de 2 son significativos; por lo que se puede observar: A, B, D, AB, AD, BD y ABD son significativos
- C no es significativo

**Tabla 20.
Residuos para pérdidas (W)**



Interpretación:

Existe una distribución Normal, sin embargo, hay datos atípicos.

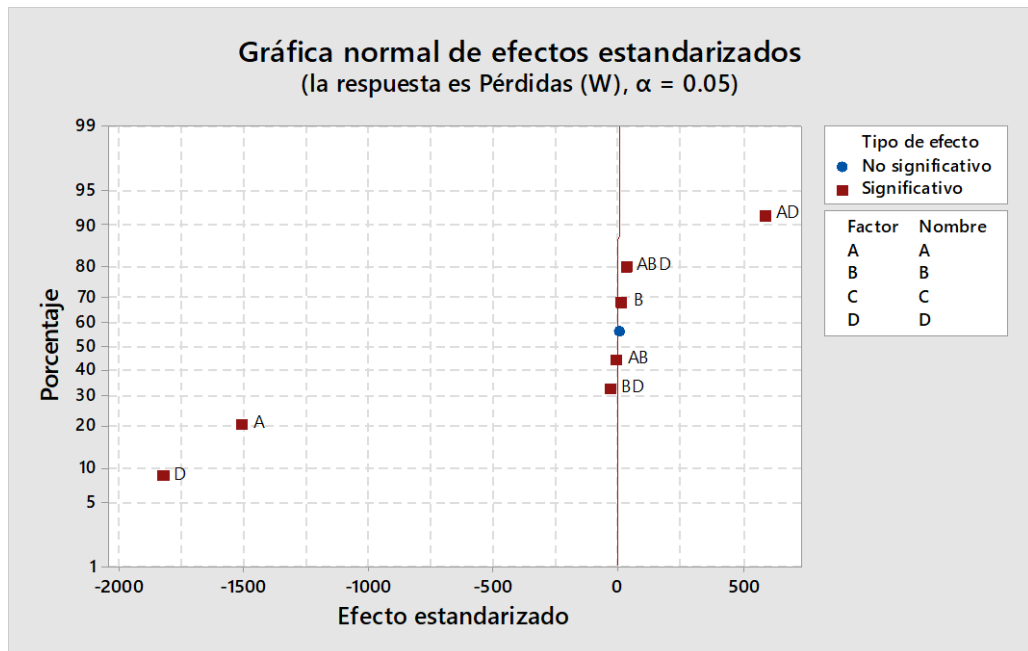


Figura 59. Gráfica normal de efectos estandarizados

Interpretación:

- Este cuadro corrobora en el análisis de varianza, todos los factores son significativos o influyente en la respuesta
- C no es significativo

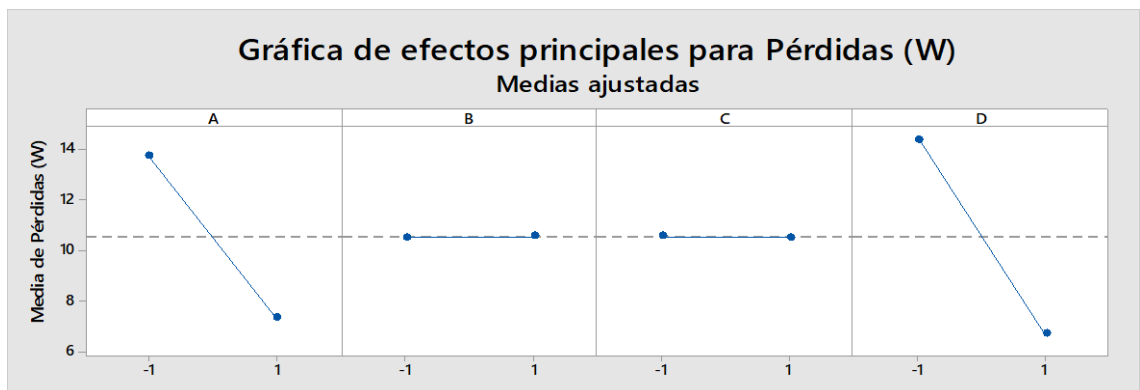


Figura 60. Efectos principales de las pérdidas

Interpretación:

- Cuando A pasa de un nivel bajo a un nivel alto, la respuesta **disminuye**.
- Cuando B pasa de un nivel bajo a un nivel alto, la respuesta es **neutro**.
- Cuando C pasa de un nivel bajo a un nivel alto, la respuesta se **neutro**.

- Cuando D pasa de un nivel bajo a un nivel alto, la respuesta **disminuye**.

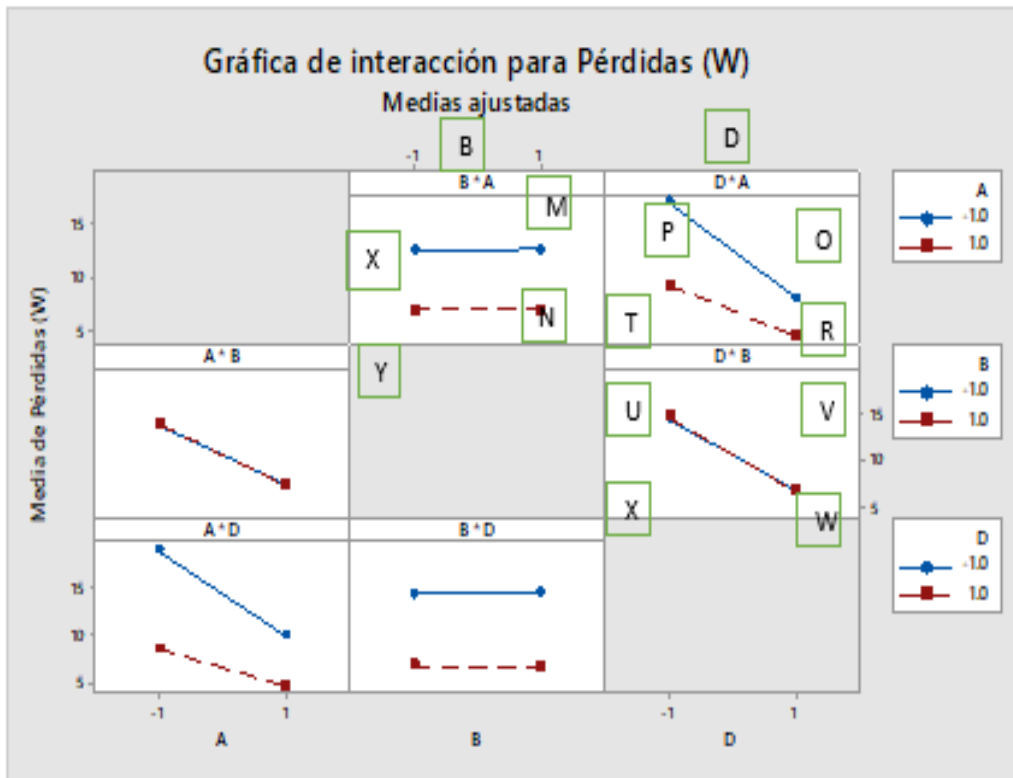


Figura 61. Interacción de pérdidas (W)

Interpretación:

Respuesta (pérdidas (W))

B*A	B	A
X (disminuye)	Bajo	Bajo
N (aumenta)	Alto	Alto
Y (disminuye)	Bajo	Alto
M (aumenta)	Alto	Bajo

Respuesta (energía eléctrica)

D*A	D	A
P (disminuye)	Bajo	Bajo
R (disminuye)	Alto	Alto
T (disminuye)	Bajo	Alto
O (disminuye)	Alto	Bajo

Respuesta (energía eléctrica)

D*B	D	B
U (disminuye)	Bajo	Alto
V (disminuye)	Alto	Alto
X (disminuye)	Bajo	Bajo
W (disminuye)	Alto	Bajo

5.3.3. Optimización

Tabla 21.

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Pérdidas (W)	Mínimo		4.6882	19.0499	1	1

En la tabla 21 se muestra se observa que la meta es buscar el mínimo valor, de tal manera el parámetro va desde 4.6882 W hasta 19.0499 W.

Tabla 22.

Solución

Solución	A	B	C	D	Pérdidas (W) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	1	1	1	1	4.69472	0.999546

El valor ajustado de acuerdo a deseabilidad compuesta del 0.999546 es 4.69472, del cual se ajusta al valor objetivo de la tabla 21.

Tabla 23.

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
A	1
B	1
C	1
D	1

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Pérdidas (W)	4.69472	0.00636	(4.67968, 4.70976)	(4.66965, 4.71979)

IC de 95%, en un intervalo de confianza el promedio de ajuste puede oscilar dentro del intervalo de confianza.

IP de 95%, en el intervalo de predicción siempre que se realicen diferentes mediciones los valores estarán dentro de este rango.

La predicción de respuestas múltiples, el óptimo se da cuando todas las variables están en niveles alto.

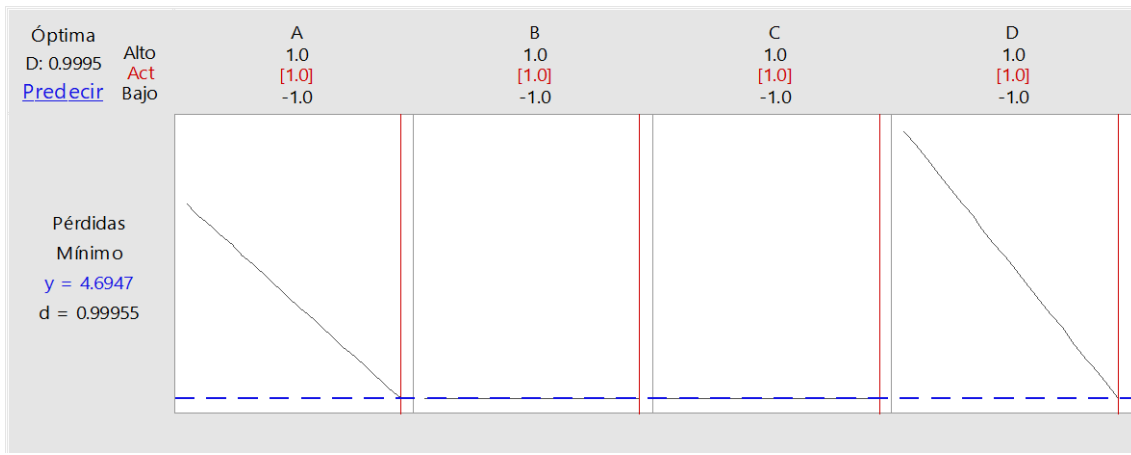


Figura 62. Optimización en cada variable

Interpretación:

- El **valor mínimo** se obtiene cuando:
 - A: está en un nivel **alto**
 - B: está en un nivel **alto**
 - C: está en un nivel **alto**
 - D: está en un nivel **alto**

- El **resultado** en promedio (pérdidas (w)): 4.6947W con deseabilidad de 0.99955.

- En la gráfica de cubo se puede visualizar, de la misma manera, el resultado óptimo se da cuando todas las variables están en nivel alto.

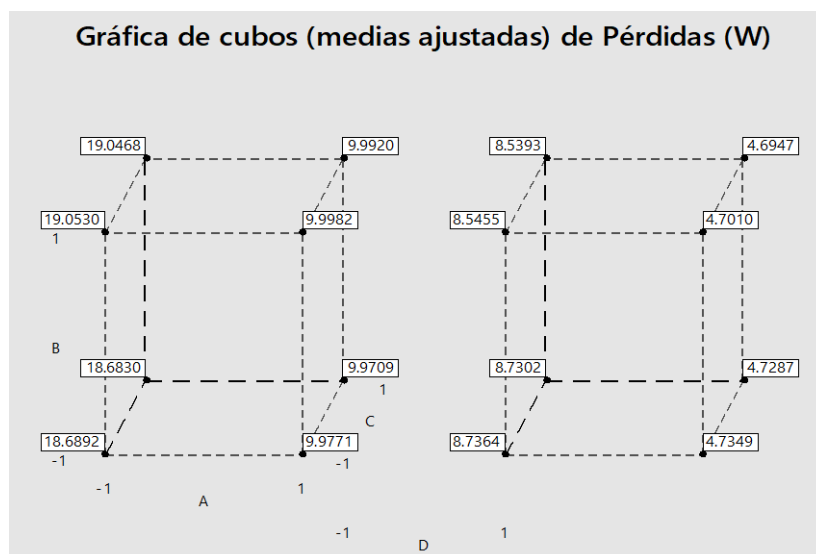


Figura 63. Cubos de medidas ajustadas de pérdidas (W)

5.3.4. Predicción de las pérdidas de las combinaciones 14, 12 y 10 por tener las menores pérdidas seguidas de la combinación optimizada

Predicción para pérdidas (W)

Tabla 24.

Predicción de respuesta múltiple combinación 14

Variable	Valor de configuración
A	1
B	-1
C	1
D	1

Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
4.72867	0.0063620	(4.71363, 4.74371)	(4.70360, 4.75374)

Tabla 25.

Predicción de respuesta múltiple combinación 12

Variable	Valor de configuración
A	1
B	1
C	-1
D	1

Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
4.70098	0.0063620	(4.68594, 4.71602)	(4.67591, 4.72605)

Tabla 26.

Predicción de respuesta múltiple combinación 10

Variable	Valor de configuración
A	1
B	-1
C	-1
D	1

Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
4.73493	0.0063620	(4.71989, 4.74997)	(4.70986, 4.76000)

Se analizaron estas tres combinaciones, combinación número: 10, 12 y 14; porque muestran menores pérdidas en promedio de la simulación, esto seguido de la respuesta optimizada de 4.6947 W.

Gráficas de contorno de Pérdidas (W)

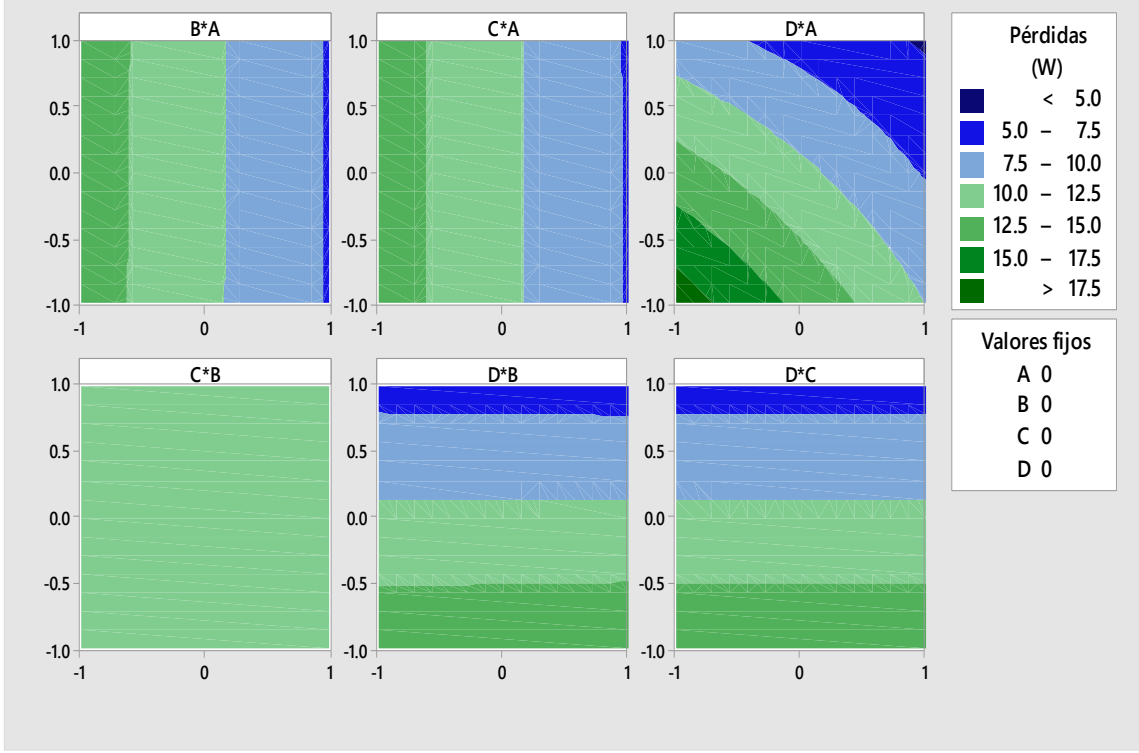


Figura 64. Gráfica de contorno de pérdidas (W)

Interpretación:

- El **valor mínimo** se obtiene cuando:
 - A: está en un nivel **alto**
 - B: está en un nivel **alto**
 - C: está en un nivel **alto**
 - D: está en un nivel **alto**

Por lo tanto, de acuerdo al gráfico de contorno se puede observar que en la gráfica D*A se muestra el valor mínimo promedio de las pérdidas de 4.6947 W.

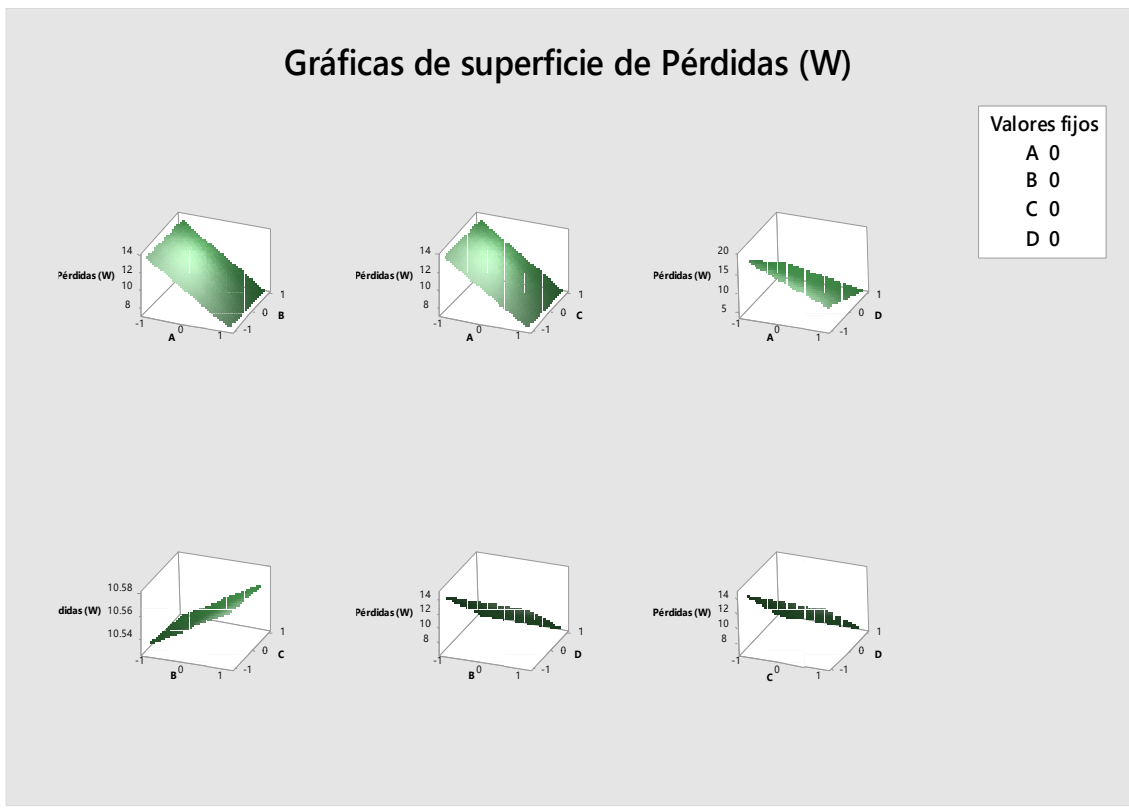


Figura 65. Gráfica de superficie de pérdidas (W)

Interpretación:

- El **valor mínimo** se obtiene cuando:
 - A: está en un nivel **alto**
 - B: está en un nivel **alto**
 - C: está en un nivel **alto**
 - D: está en un nivel **alto**

Por lo tanto, de acuerdo al gráfico de superficie se puede observar que en la gráfica Pérdidas vs D*A se muestra el valor mínimo promedio de las pérdidas de 4.6947 W.

5.4. Contrastación de resultados

En esta sección se analizan los resultados en comparación con los antecedentes:

5.4.1. Artículos científicos:

En primer lugar, en el artículo científico **Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal (6)**,

presenta como resultado el modelo del cual fue comprobado, para las cargas agrícolas, mineras e industriales; por lo que los contenidos armónicos presentes afectan en las pérdidas de los transformadores, esto respecto al factor K. El estudio aporta en la investigación tener claro un factor de pérdidas en los núcleos de los transformadores (6). En este primer caso la investigación muestra un total de pérdidas menor al 3% estableciéndolo con un factor considerable dentro de la estandarización de un diseño.

En segundo lugar, el artículo científico **Análisis de falla en la chapa de acero al silicio en transformadores de distribución. Efecto de la zona de precedencia de los transformadores** (7), aporta en temas de materiales para el núcleo y diseño, para ello el estudio muestra unos ensayos descartando transformadores fallados (7), a través de este estudio se pudo establecer dos posibles materiales para el diseño, los cuales fueron el Acero M-4 y el Mu_ metal de los cuales se pudo establecer como más estable al Mu_ metal.

En tercer lugar, en el artículo científico **Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por barrido de frecuencia** (8) se tiene como resultados simulaciones aplicadas a transformadores, por lo que la espectroscopía es una herramienta importante para manejo de datos y posibles causas de fallas. El aporte que entrega el artículo es, el análisis, metodología en las pruebas de transformadores (8). En la investigación se optó por la metodología VDI 2221 para poder desarrollar todo el proceso de análisis.

En cuarto lugar, en el artículo científico **Estimación temprana de la pérdida de vida útil de transformadores de distribución** (9) que menciona como resultado que el artículo científico tiene la comparación de los transformadores considerados en riesgo con los dañados, como también con los fallados. El estudio tiene características importantes que se considera en la investigación como es la estimación de las pérdidas utilizando las facturaciones mensuales (9). Referido a la estimación de pérdidas mensuales aún no se realiza ese análisis a profundidad, pero se establece la cifra de 4 W en pérdidas.

5.4.2. Tesis

En primer lugar, en la tesis de posgrado **Evaluación de las pérdidas en transformadores de distribución bajo condiciones de operación** (10), la investigación finaliza con las siguientes conclusiones, las pérdidas en los transformadores son influenciados por el tipo de carga, según a los resultados de la investigación, el factor C, expresado en el material del núcleo no es significativo para el análisis; por lo tanto, en una prueba en vacío será irrelevante considerar este factor. Sin embargo, cuando existe carga, esto al momento de iniciación del transformador, el núcleo necesariamente realiza cambios a un estado de saturación. Por lo tanto, ante la variación de la carga, existirá trabajo en el transformador constantemente llevando al núcleo a un estado de saturación.

En segundo lugar, en la tesis **Cálculo de pérdidas en el diseño del núcleo de un transformador de distribución aplicado el método de los elementos finitos** (12), termina con la conclusión que utilizando el método de los elementos finitos se puede diseñar núcleos para transformadores de diferentes potencias y materiales. De esta manera, la investigación en sus resultados analizó los materiales, Acero M-4 y Mu-metal, de tal manera la mejor optimización para reducir pérdidas en el núcleo se toma en cuenta Mu-metal, este material tiene propiedades importantes como facilidad en saturarse magnéticamente. El software Ansys, permitió analizar 16 combinaciones, entregando 16 potencias diferentes en Watts expresando el promedio de pérdidas.

En tercer lugar, en el informe de suficiencia con la investigación **Cálculos y pruebas en la reparación de transformadores de distribución** (13), la investigación termina con la conclusión que, ante el diseño de transformadores, la experiencia y los diseños previos se apoyan en tablas y diagramas experimentales. Los resultados de pérdidas de potencia en los núcleos, están bajo un rango considerado y aceptado según la normativa de Ansys e IEEE, el resultado optimizado en promedio se concluye de 4.69 W.

En cuarto lugar, en la tesis de posgrado, **Transformadores de distribución con núcleo de metal amorfo: Investigación y diseño** (14), la investigación concluye que, la aplicación de las aleaciones amorfas en transformadores es conveniente en tres aspectos importantes, el valor relativo de la energía, costo y ejecución del material, diseño económicamente factible de fabricar. Según los resultados, el factor A, material del núcleo, μ -metal es el más significativo y que optimiza las pérdidas, de tal manera este material tiene una permeabilidad bastante elevada (14).

En quinto lugar, en la tesis de posgrado **Cálculos eléctricos para diseño de transformador trifásico reductor de tensión de 75kVA, 208_20V para instalación galvánica de la empresa Zintepec Ltda.** (15). La investigación termina concluyendo que, al llevar a cabo los cálculos de transformadores, necesariamente se tiene en cuenta tomar aspectos ambientales. En la investigación los resultados entregados están dentro de los parámetros establecidos de acuerdo a normativas, así mismo la respuesta optimizada es de 4.69 W, esto no ocasiona impacto ambiental.

En sexto lugar, en la tesis de posgrado, **Cálculos detallados de pérdidas en sistemas eléctricos de distribución aplicado al alimentador "Universidad" perteneciente a la empresa eléctrica Ambato regional centro norte S. A.** (3), la investigación concluyó que el análisis realizado para mejorar el funcionamiento de la red permitirá el diagnóstico de la tasa de pérdida y la pérdida técnica en cada componente de la red. Para el análisis de la investigación, se eligió dos niveles de tensión, 10 kV y 13.2 kV, estos comunes en tanto en zona urbana como en zonas rurales; de esta manera se concluye que a un nivel de 13.2 kV las pérdidas son menores.

En séptimo lugar, en la tesis de posgrado **Desarrollo de un software didáctico para simulación por computadora de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito a transformadores de distribución en los laboratorios de máquinas eléctricas UTE 2009** (16), la investigación concluye que, la utilización de simulaciones permite tener mejoras óptimas de comportamiento de las pruebas de los transformadores, así mismo ayuda en la

comprensión de la intervención de cada elemento sometidos a niveles de corriente. La investigación utilizó el software Ansys, lo cual explica las pérdidas durante un intervalo de tiempo, para la investigación se considera el promedio que existe hasta el momento de saturación.

En octavo lugar, en la tesis **Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11 kV Dyn 11** (17), la investigación concluye en la selección de causas sobre la pérdida más importante y es una de ellas, se encuentra en el núcleo del transformador, para poder solucionar aún más este problema, el núcleo debe diseñarse en forma circular para reducir la pérdida en el transformador. Para la investigación se analiza dos tipos morfológicos de secciones de núcleos, rectangular y cruciforme, para ello la optimización de pérdidas se da cuando se diseña con un modelo de sección cruciforme.

En noveno lugar, en la tesis **Modelo para el diseño térmico hidráulico de un transformador de distribución eléctrica** (18), se finaliza la investigación desarrollando el modelo térmico de los devanados refrigerados por aceite de baja tensión que corresponde a un transformador de distribución monofásica. Para la investigación se realizó el análisis de un transformador trifásico, esto porque es común en zonas urbanas, del cual existe mayor interacción y trabajo del transformador, para ello, respecto al bobinado el material es poco significativo; sin embargo, la utilización de cobre reduce las pérdidas en el núcleo del transformador.

Y por último, en la tesis **Diseño para la construcción de los transformadores de distribución monofásicos tipo tanque** (19), se trata de la investigación de diseño y construcción de transformadores de distribución monofásicos tipo tanque con capacidades de 5, 10, 15 y 50 kVA (autoprotección). Programar la aplicación en formato Java para visualizar los resultados del cálculo mediante el método de enseñanza de las matemáticas con el fin de analizar los parámetros técnicos utilizados para construirlos. La investigación se encarga del análisis de un transformador trifásico de distribución, esto entregando resultados dentro de los parámetros eléctricos, como son 4.69 W.

CONCLUSIONES

Este trabajo estuvo enfocado en un tema de gran importancia que vienen a ser las pérdidas técnicas en el transformador de distribución y las implicancias de que estas sean muy altas, ya que afecta a los costos y la vida útil del transformador que alimenta las redes eléctricas. Además, este estudio se enfocó en una posible solución al problema mediante el desarrollo del diseño de núcleo del transformador trifásico establecido en este estudio, todo esto lleva a las siguientes conclusiones:

1. El diseño que se determinó con la menor pérdida según las pruebas realizadas es el de morfología cruciforme, con el material ferromagnético de μ_{metal} , con un devanado de cobre y un nivel de tensión de 13.2 kV.
2. Se determinó el material μ_{metal} que tiene mayor magnetismo y menor pérdida que el Acero M-4.
3. Se diseñaron dos modelos de transformadores en cuanto a la morfología, la rectangular y la cruciforme, de la cual esta segunda morfología fue la que tiene mayor eficiencia, debido a que en todas las combinaciones con los materiales tiene menores pérdidas en relación a la morfología rectangular.
4. El devanado con mayor eficiencia es el del cobre, a pesar de que la plata tiene una mayor conductividad en relación al cobre, este en combinación con los demás factores resulta eficiente, claro con un nivel de pureza de 99.9%
5. El nivel de tensión en las pruebas es el mayor, en este caso 13.2 kV, esto se le atribuye al principio que menciona que a mayor voltaje menor nivel de pérdidas.
6. Se determinó, de acuerdo al gráfico de superficie, que en la gráfica Pérdidas vs D^*A se muestra el valor mínimo promedio de las pérdidas de 4.6882 W, que se encuentra dentro del intervalo establecido por la IEEE C57-12-2015, que establece el +/- 3.0% de pérdidas admisible a su potencia nominal.
7. Se logró un diseño matemático que generaliza el diseño del transformador trifásico.

RECOMENDACIONES

1. El simulador Ansys Maxwell es un paquete para construcción de uso de elementos infinitos, lo cual es muy práctico, como también tiene múltiples funciones. La investigación obtuvo un óptimo diseño del cual las pérdidas son mínimas, de tal manera se recomienda utilizar las dimensiones y variables para la construcción de núcleo de transformador trifásico de distribución.
2. Para un diseño de sistema de distribución en zonas urbanas se recomienda el nivel de tensión 13.2 kV; por lo que a comparación con la tensión 10 kV el más eficiente en reducir pérdidas técnicas es la primera tensión. Por lo tanto, se recomienda el uso general en zonas urbanas como en zonas rurales, la tensión en los transformadores de distribución debería ser de 13.2 kV.
3. La morfología del núcleo de un transformador trifásico de distribución es muy importante de elegir a la hora de construir. Se recomienda utilizar una sección cruciforme, de esta manera se reducen pérdidas técnicas.
4. La investigación tuvo como herramienta de diseño de investigación, el diseño factorial 2^4 , del cual su uso es eficiente, porque muestra combinaciones y resultados, por lo que se puede elegir el óptimo, de esa manera se recomienda utilizar el diseño factorial en investigaciones tecnológicas.

TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo de investigación se tomará como referencia en el desarrollo de un futuro trabajo sobre el diseño de un transformador trifásico, teniendo en cuenta el tipo de refrigerante y todos los aspectos que en este trabajo no se abarcaron. Se utilizará el modelo matemático establecido y todos los resultados presentados a lo largo de la investigación.

Por otro lado, también se piensa complementar este estudio con otro acerca de aceites refrigerantes no contaminantes para el medio ambiente, y así seguir fortaleciendo el diseño para complementar todo un transformador y no solo partes de este.

LISTA DE REFERENCIAS

1. **LACALLE, Daniel y PARRILLA MERINO, Daniel.** *La madre de todas las batallas.* España : Planeta, 2014. 978-84-234-1932-6.
2. **JUÁREZ CERVANTES, José Dolores.** *Sistemas de distribución.* México : Universidad Autónoma Metropolitana, 1995. 970-620-734-1.
3. **CAÑAR OLMEDO, Santiago Patricio.** *Cálculo detallado de pérdidas en sistemas eléctricos de distribución aplicado al alimentador "Universidad" perteneciente a la empresa eléctrica Ambato regional centro norte S. A.* Quito - Ecuador : Escuela Politécnica Nacional, 2007.
4. **ALCALDE SAN MIGUEL, Pablo.** *Electrotecnia.* España : Parafino, 2015. ISBN: 978-84-283-9877-0.
5. *Aplicacion de tecnologías de medición avanzada (AMI) como instrumento para reducción de pérdidas.* **GÓMEZ LÓPEZ, José Martín, y otros.** 4, Cuernavaca, México : Departamento de Difusión del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), 2015, Vol. 39. ISSN185-0059.
6. *Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal.* **ASTORGA GÓMEZ, Juan Miguel, ARÓSTICA CÓRDOVA, Rodrigo Alfonso y IRIARTE SALINAS, Yuri Antonio.** Antofagasta - Chile : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
7. *Análisis de falla en la chapa de acero al silicio en transformadores de distribución. efecto de la zona de precedencia de los transformadores.* **MAGO, María Gabriel, y otros.** Bogotá - Colombia : Universidad Nacional de Colombia, 2017.
8. *Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por barrido de frecuencia.* **MAYA IZURIETA, Néstor Xavier y VÁSQUEZ RESTREPO, Luis Alberto.** 5, s.l. : Ingenius, 2011.
9. *Estimación temprana de la pérdida de vida útil de transformadores de distribución.* **SIERRA GIL, Eduardo, BASULTO ESPINOSA, Alfredo y PLANOS REYES, Juan Miguel.** Colombia : Universidad Nacional de Colombia, 2016.

10. **YUPANQUI HURTADO, Joel.** *Evaluación de las pérdidas en transformadores de distribución bajo condiciones de operación.* Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2010.
11. **HURTADO GONZÁLES, Víctor Luis.** *Análisis comparativo de transformadores monofásicos con núcleo circular acorazado con respecto a los convencionales.* Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017.
12. **ZÚÑIGA BUSTAMANTE, Jorge Bruno.** *Cálculo de pérdidas en el diseño del núcleo de un transformador de distribución aplicando el método de los elementos finitos.* Arequipa : Universidad Nacional de San Agustín, 2016.
13. **CAPCHA CAQUI, Sayed.** *Cálculos y pruebas en la reparación de transformadores de distribución.* Lima : s.n., 2010. TESIS.
14. **NAJLE ORMAZÁBAL, Basilio Andrés.** *Transformadores de distribución con núcleo metal amorfo: investigación y diseño teórico.* Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2013.
15. **ALLVIS OTAVO, Gildardo Antonio.** *Cálculos eléctricos para diseño de transformador trifásico reductor de tensión de 75 kVA, 208-20 V para instalación galvánica de la empresa Zintepec Ltda.* Bogotá DC : Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, 2019.
16. **ESTRADA ORTIZ, César René.** *Desarrollo de un software didáctico para simulación por computadora de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito a transformadores de distribución en los laboratorios de máquinas eléctricas, UTE 2009.* Santo Domingo - Ecuador : Universidad Tecnológica Equinoccial, 2011.
17. **SÁNCHEZ BLAZQUEZ, Francisco Ignacio.** *Diseño de un transformador de 5MVA.* Madrid : s.n., 2009. Proyecto de fin carrera.
18. **TELLO CAMPOS, Alejandro Roberto.** *Modelo para el diseño térmico-hidráulico de un transformador de distribución eléctrica.* México : s.n., 2009. Para la obtención del grado de doctor en ciencias.
19. **RODAS HERRERA, Jesús Alejandro.** *Diseño para la construcción de los transformadores de distribución monofásicos tipo tanque.* Guayaquil : s.n., 2015. Tesis Magistral.
20. **UNIVERSIDAD Autónoma de Mexico.** *Sistema eléctrico de potencia.* México : UNAM, 2019.

21. **DAMMERT LIRA, Alfredo, MOLINELLI ARISTONDO, Fiorella y CARBAJAL NAVARO, Max Arturo.** *Fundamentos técnicos y económicos del sector eléctrico peruano.* Lima : Osinergmin, 2011. ISBN: 978-612-46124-0-4.
22. **NÚÑEZ FORESTIERI, Juan.** *Mantenimiento de transformadores de potencia.* Guayaquil : s.n., 2004. para obtención del título profesional.
23. **CÓRCOLES LÓPEZ, Felipe, PEDRA I DURÁN, Joaquim y SALICHS I VIVANCOS, Miquel.** *Transformadores.* Barcelona : Universidad Politécnica de Catalunya, 1996.
24. **RAS OLIVA, Enrique.** *Transformadores. 7.* Barcelona : Universidad Politécnica de Barcelona, 1994.
25. **DE GRACIA NAVARRO, Rafael.** *La eficiencia en las redes: niveles de pérdidas y reducción de fraude energético.* Madrid, España : Asociación iberoamericana de entidades reguladoras de la energía, 2019.
26. **Iparragurre Vasquez, Luis Ely.** *Diseño de un transformador de distribución de 800 KVA de mínimo precio financiero.* Lima : s.n., 1986. título profesional.
27. **RODRÍGUEZ POZUELA, Miguel Angel.** *Transformadores.* España : Universidad de Cantabria, 2012.
28. **GÓMEZ, Pedro y GONZÁLES, Esteban.** *Las ecuaciones de Maxwell.* España : s.n., 2012.
29. **BELTRÁN, Francisco.** *Teoría general del método de los elementos finitos.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
30. **GELIGUETA LIZARZA, Juan Tomás.** *Método de los elementos finitos para análisis estructural.* España : Unicopia C. B., 2000.
31. **VENTOSA, M. y LALOUX, Damián.** *Sistemas trifásicos.* Madrid : Universidad Pontificia Comillas, 2003.
32. *Requisitos generales para el estándar IEEE distribución Inmerso-Líquido, de potencia y transformadores de regulación.* **IEEE Power Engineering Society.** Nueva York EE.UU. : IEEE, 2020. ISBN 0-7381-1981- 4 SS94832.
33. **MARTÍMEZ, Aurora.** Concepto Definición. *Concepto Definición.* [En línea] 31 de Enero de 2021. [Citado el: 07 de Febrero de 2021.] <https://conceptodefinicion.de/electromagnetismo/>.

34. **QUISPE ANCCASI, Carlos y CAMAYO HUAMANCULI, Kevin.** *Metodología de investigación tecnológica para ingenierías.* Huancayo : Presscom, 2020. 978-612-00-5244-0.
35. **ESPINOZA MONTES, Ciro.** *Metodología de la investigación tecnológica.* Huancayo : Ciro Espinoza Montes, 2014. 978-612-00-1667-1.
36. **HERRERA GARCÍA, Sergio, MAHL PÉREZ, Rodolfo y MARTÍNEZ VEGA, Gustavo.** *Comparación y análisis de los distintos tipos de acero en el diseño del transformador de distribución obteniendo pérdidas y eficiencia.* México : s.n., 2013.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de coherencia

Planteamiento del problema	Marco teórico	Metodología
Formulación del problema	Antecedentes	Variables
¿Cuál será el diseño que reducirá las pérdidas técnicas del núcleo de un transformador trifásico de distribución?	<ul style="list-style-type: none"> • En el artículo científico “Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal” (6) • En el artículo científico “Análisis de falla en la chapa de acero al silicio en transformadores de distribución. Efecto de la zona de precedencia de los transformadores” (7) • En el artículo científico “Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por barrido de frecuencia” (8) • En el artículo científico “Estimación temprana de la pérdida de vida útil de transformadores de distribución” (9) • En la tesis de posgrado “Evaluación de las pérdidas en transformadores de distribución bajo condiciones de operación” (10) • En la tesis de posgrado “Análisis comparativo de transformadores monofásicos con núcleo circular acorazado con respecto a los convencionales” (11) • En la tesis de posgrado “Cálculo de pérdidas en el diseño del núcleo de un transformador de distribución aplicado el método de los elementos finitos” (12) 	<p>Variable independiente: Núcleo del transformador trifásico -material -morfología -devanado -nivel de tensión</p> <p>Variable dependiente: Pérdidas técnicas -pérdidas</p>
Objetivo general		
Diseñar un transformador trifásico de distribución que minimice las pérdidas que se generan en el núcleo.		
Objetivos específicos		
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar el material ferromagnético para que disminuya las pérdidas en el núcleo de un transformador trifásico de distribución. • Determinar que la morfología es la más adecuada para la reducción de las corrientes de Foucault en un transformador trifásico de distribución. • Determinar las características del devanado del transformador trifásico de distribución. 		
	Teoría básica	
	<ul style="list-style-type: none"> • Transformador de distribución • Elementos finitos • Morfologías de un transformador • Pérdidas técnicas. 	
	Definición conceptual	
	<p>El núcleo del transformador: constituido por chapas magnéticas de alta permeabilidad, bajo campo coercitivo y baja resistencia óhmica, con el fin de reducir las pérdidas en los circuitos magnéticos (4)</p> <p>Pérdidas técnicas: constituyen una parte de la energía que no es aprovechada en el sistema de transporte de distribución del fluido eléctrico consume y requiere para su operación. Dicha energía no es facturada y es catalogada como pérdida (5)</p>	
	Definición operacional	
	<p>El núcleo del transformador: variable que expresa la combinación óptima de elementos de diseño.</p> <p>Pérdidas técnicas: variable que permitirá cuantificar el impacto del diseño en el sistema a analizar.</p>	