

HERRAMIENTA DE MODELADO Y SIMULACIÓN UTILIZANDO ANSYS MAXWELL PARA CONVERSIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Sebastian Acero León

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2023



HERRAMIENTA DE MODELADO Y SIMULACIÓN UTILIZANDO ANSYS MAXWELL PARA CONVERSIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Sebastian Acero León

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Edwin Francisco Forero García.

Codirector:

Dario Alejandro Segura Torres.

Grupo de Investigación MEM
Línea de Investigación:
Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2023

Autoridades de la universidad

RECTOR GENERAL

R.P. FRAY JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

R.P. FRAY LUIS FRANCISCO SASTOQUE POVEDA, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

R.P. FRAY EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O.P.

SECRETARIO GENERAL

Dra. INGRID LORENA CAMPOS VARGAS

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

R.P. FRAY ÉRICO JUAN MACCI CÉSPEDES, O.P.

SECRETARIA DE DIVISIÓN

E.C. LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ING. CARLOS ENRIQUE MONTENEGRO NARVÁEZ

Nota de aceptación

Firma del tutor

Firma del jurado

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C. _____ DE 2023

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo de grado a mi familia. Principalmente a mi mamá quien me estuvo acompañando en todo el proceso de formación, quien actualmente merece toda mi gratitud, dedicación y orgullo, gracias a ella estoy cumpliendo uno de mis más grandes sueños, te amo mamá. Gracias a mi hermana por siempre escucharme, mi padrastro por sus consejos sabios, mis tíos Oscar y Kelly quienes siempre tuvieron las palabras correctas de apoyo para mí, a mi primo hermano Alejo quien espero se convierta al igual que yo en todo un profesional.

Le agradezco a la mujer que no dejaba de insistir en no rendirme, quien, aunque no comprendía lo que hacía se quedaba cada noche conmigo, la que sostuvo mi mano cuando era necesario. Gracias por estar a mi lado y elegirme día a día, por alentarme, por tus dichos y cada regaño, me han hecho llegar más lejos de lo que había soñado.

Finalmente le agradezco a mi abuelo Luis quien fue la primera persona que confió en mí y a quien le prometí que sería un gran profesional, hoy abuelo cumplo mi promesa, lo siento, tardé un poco más de lo esperado y fue un camino difícil. Gracias a ti y a Don Ortiz por enseñarme que existía la Ingeniería Electrónica y por el amor que me brindaste de pequeño.

Dedico profundamente este logro a mi abuela y mi abuelo, donde quiera que se encuentren espero se sientan orgullosos, yo siempre los llevo en mi corazón.

Gracias a todos.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor Edwin Francisco Forero gracias por confiar en mí, por su asistencia en cada obstáculo y su constante firmeza de poder generar este logro. Agradezco a todos los profesores de ingeniería electrónica de la Universidad Santo Tomás, todos aportaron un papel fundamental al formarme profesionalmente.

A todos muchas gracias.

Contenido

Contenido	8
Resumen	11
Abstract	12
Lista de Figuras	13
Lista de Tablas	17
Glosario	18
1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	2
3. Objetivos	3
3.1. Objetivo General	3
3.2. Objetivos Específicos	3
4. Justificación	4
5. Impacto Social	5
6. Estado del Arte	6
6.1. Principios de las metodologías.....	6
6.2. Principios de los manuales.....	6
6.3. Historia de Ansys Maxwell	6
6.4. Proyectos relacionados	8
7. Marco Teórico	9
7.1. Metodología	9
7.2. Máquinas eléctricas.....	10
7.2.1. Tipos de máquinas eléctricas	10
7.2.2. Devanados	10
7.2.3. Campo magnético.....	11
7.2.4. Principios de funcionamiento	11
7.2.5. Circuito equivalente	12
7.2.6. Eficiencia	13
7.3. Transformador.....	13
7.3.1. Ley de Faraday-Lenz.....	13
7.3.2. Número de espiras en un embobinado.....	14

7.3.3.	Diferencia de flujo	14
7.3.4.	Tensión inducida.....	15
7.4.	Motor ¡Error! Marcador no definido.	
7.4.1.	Principio de la sincronización	16
7.4.2.	Estator	16
7.4.3.	Rotor.....	16
7.4.4.	Torque y velocidad	17
7.5.	Generador síncrono	17
7.5.1.	Estator	18
7.5.2.	Rotor.....	18
7.5.3.	Voltaje generado.....	19
7.6.	Ansys Maxwell	19
7.6.1.	Elementos finitos	19
7.6.2.	Región y condiciones de borde.....	20
7.6.3.	Geometría y mallado	21
8.	Diseño Metodológico	22
8.1.	Fases y Metodología	22
8.2.	Cronograma	24
9.	Desarrollo Conceptual	26
9.1.	Metodología propuesta (MaxwellCraft).....	26
9.2.	Metodología MaxwellCraft aplicada en Ansys Maxwell	29
9.2.1.	Practica de laboratorio transformador.....	30
9.2.2.	Practica de laboratorio Motor.....	36
9.2.3.	Práctica de laboratorio Generador síncrono	43
10.	Resultados y Discusión.....	52
10.1.	Comparación del Transformador vs Montaje experimental	52
10.1.1.	Resultados obtenidos	52
10.1.2.	Interpretación de los resultados obtenidos	54
10.2.	Comparación del motor vs Montaje experimental	54
10.2.1.	Resultados obtenidos.....	55
10.2.2.	Interpretación de los resultados obtenidos	57
10.3.	Comparación del generador síncrono vs Montaje experimental	58
10.3.1.	Resultados obtenidos.....	58
10.3.2.	Interpretación de los resultados obtenidos	60

11. Conclusiones y Trabajos futuros	62
11.1. Conclusiones.....	62
11.2. Trabajos futuros	63
12. Anexos	65
12.1. Guía de instalación Ansys Maxwell (Estudiantes).....	65
12.2. Guías de laboratorio.....	70
12.2.1. Guía de laboratorio Transformador	70
12.2.2. Guía de laboratorio Motor.....	83
12.2.3. Guía de laboratorio Generador síncrono	93
12.3. Prácticas de laboratorio.....	103
12.3.1. Practica de laboratorio Transformador	103
12.3.2. Practica de laboratorio Motor	106
12.3.3. Practica de laboratorio Generador síncrono.....	109
13. Referencias Bibliográficas	114

Resumen

En este proyecto de grado se generó una metodología de simulación para las prácticas de laboratorio en la asignatura conversión electromagnética mediante la plataforma Ansys Maxwell, confiriendo que los estudiantes de ingeniería electrónica tengan mayores recursos de estudio mediante simulaciones de transformadores, motores y generadores para el estudio y entendimiento de fenómenos electromagnéticos en la asignatura a cursar. Se les otorga a los estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Santo Tomás simulaciones del comportamiento de máquinas eléctricas y una metodología para la creación de prácticas de laboratorio mediante la plataforma Ansys Maxwell. En este proyecto de grado se exponen las bases teóricas, construcción y diseño de simulaciones para la obtención de resultados de máquinas eléctricas y los comportamientos de los fenómenos electromagnéticos presentes en base a la metodología expuesta.

Gracias a la herramienta de simulación Ansys Maxwell se generó el diseño de varias máquinas eléctricas para la observación de los fenómenos electromagnéticos presentes, así mismo, obteniendo resultados de error, comparativas con montajes experimentales relacionados con las temáticas del curso conversión electromagnética, pérdidas de los diferentes diseños y entre otros. El software Ansys Maxwell evidencia ser la herramienta de simulación básica para el desarrollo de los estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Santo Tomás que están cursando la asignatura conversión electromagnética para el entendimiento de los fenómenos electromagnéticos y el desarrollo de nuevos diseños de máquinas eléctricas.

Palabras clave: Simulación, fenómenos electromagnéticos, diseño, metodología, conversión electromagnética, máquinas eléctricas, estudiantes.

Abstract

In this undergraduate project, a simulation methodology was developed for laboratory practices in the subject of electromagnetic conversion using the Ansys Maxwell platform. This methodology provides electronic engineering students with greater study resources through simulations of solids, transformers, motors, and generators for the study and understanding of electromagnetic phenomena in the course. Electronic engineering students at Santo Tomas University are provided with simulations of the behavior of electric machines.

This undergraduate project presents the theoretical foundations, construction, and design of simulations to obtain results of electric machines and the behaviors of electromagnetic phenomena present in them.

Thanks to the simulation tool Ansys Maxwell, the design of various electric machines was obtained to observe the electromagnetic phenomena present. Additionally, error results, comparisons with experimental setups related to the topics of the electromagnetic conversion course, losses of different designs, and others were obtained. Ansys Maxwell software proves to be the fundamental simulation tool for the development of electronic engineering students at Santo Tomas University who are taking the electromagnetic conversion course for understanding electromagnetic phenomena and the development of new electric machine designs.

Keywords: Simulation, electromagnetic phenomena, design, methodology, electromagnetic conversion, electrical machines, students.

Lista de Figuras

Ilustración 8.1. Metodología de la simulación	23
Ilustración 8.2. Cronograma	25
Ilustración 9.1. Metodología MaxwellCraft para prácticas de laboratorio.	27
Ilustración 9.2. Transformador trifásico y monofásico.	30
Ilustración 9.3. Creación del núcleo de un transformador, guía de laboratorio.	32
Ilustración 9.4. Creación del embobinado, guía de laboratorio.	33
Ilustración 9.5. Resultados obtenidos de la creación del transformador, guía de laboratorio.	34
Ilustración 9.6. Resultado térmico del transformador, guía de laboratorio. ...	35
Ilustración 9.7. Práctica de laboratorio Transformador.	36
Ilustración 9.8. Tipos de motores síncronos.	37
Ilustración 9.9. Parámetros de la máquina, guía de laboratorio.	39
Ilustración 9.10. Parámetros del estator, guía de laboratorio.	39
Ilustración 9.11. Parámetros del rotor, guía de laboratorio.	40
Ilustración 9.12. Resultados obtenidos de motor, guía de laboratorio.	41
Ilustración 9.13. Resultados electromagnéticos motor, guía de laboratorio.	42
Ilustración 9.14. Practica de laboratorio motor.	43
Ilustración 9.15. Generador síncrono.	44
Ilustración 9.16. Parámetros de la máquina, guía de laboratorio generador síncrono.	46
Ilustración 9.17. Parámetros del estator, guía de laboratorio generador síncrono.	46
Ilustración 9.18. Parámetros de conexión del embobinado del motor, guía de laboratorio generador síncrono.	47
Ilustración 9.19. Parámetros del rotor, guía de laboratorio generador síncrono.	48
Ilustración 9.20. Resultados obtenidos de la guía de laboratorio generador síncrono.	49
Ilustración 9.21. Resultados electromagnéticos obtenidos por la guía de laboratorio generador síncrono.	50
Ilustración 9.22. Practica de laboratorio generador síncrono.	51
Ilustración 10.1. Transformador monofásico, montaje experimental.	53
Ilustración 10.2. Resultado transformador monofásico (entrada de 156 V pico a pico y salida 288 V pico a pico), montaje experimental.	53
Ilustración 10.3. Transformador monofásico, simulación Ansys Maxwell.	53
Ilustración 10.4. Resultado transformador monofásico (entrada de 150 V pico a pico y salida 251 V pico a pico), simulación Ansys Maxwell.	54
Ilustración 10.5. Montaje experimental Motor.	55
Ilustración 10.6. Resultado de torque motor (Punto máximo del torque 2.400 Nm), montaje experimental.	55
Ilustración 10.7. Resultado velocidad Motor (1776 Rpm), montaje experimental.	56

Ilustración 10.8. Motor, simulación Ansys Maxwell.	56
Ilustración 10.9. Resultado velocidad Motor (2832.4100 Rpm), simulación Ansys Maxwell.	56
Ilustración 10.10. Resultado de torque Motor (4.0199Nm), simulación Ansys Maxwell.	57
Ilustración 10.11. Montaje experimental generador síncrono.	58
Ilustración 10.12. Gráfico caracterización máquina síncrona o generador síncrono.	59
Ilustración 10.13. Generador síncrono, simulación Ansys Maxwell.	60
Ilustración 10.14. Resultado caracterización Generador síncrono, simulación Ansys Maxwell.	60
Ilustración 12.1. Portada guía de instalación software Ansys Maxwell.	65
Ilustración 12.2. Índice guía de instalación del software Ansys Maxwell.	66
Ilustración 12.3. Introducción guía de instalación del software Ansys Maxwell.	66
Ilustración 12.4. Link de descarga del software Ansys Maxwell.	67
Ilustración 12.5. Sección de versiones del software Ansys Maxwell.	67
Ilustración 12.6. Pre requisitos para la instalación del software Ansys Maxwell.	68
Ilustración 12.7. instalación del software Ansys Maxwell.	68
Ilustración 12.8. Aspecto del software Ansys Maxwell.	69
Ilustración 12.9. Portada guía de laboratorio creación de un transformador en 3D.	70
Ilustración 12.10. Índice guía de laboratorio creación de un transformador en 3D.	71
Ilustración 12.11. Creación proyecto, transformador en 3D.	71
Ilustración 12.12. Creación del sólido, transformador en 3D.	72
Ilustración 12.13. Propiedades del sólido, transformador en 3D.	72
Ilustración 12.14. Creación del embobinado, transformador en 3D.	73
Ilustración 12.15. Propiedades del embobinado, transformador en 3D.	73
Ilustración 12.16. Separación de los embobinados, transformador en 3D.	74
Ilustración 12.17. Creación del embobinado secundario, transformador en 3D.	74
Ilustración 12.18. Separación de todos los embobinados, transformador en 3D.	75
Ilustración 12.19. Enumeración del embobinado, transformador en 3D.	75
Ilustración 12.20. Separación del embobinado mediante el eje, transformador en 3D.	76
Ilustración 12.21. Creación del terminal y eliminación de terminales innecesarios, transformador en 3D.	76
Ilustración 12.22. Enumeración de los terminales del embobinado, transformador en 3D.	77
Ilustración 12.23. Número de vueltas terminal primario, transformador en 3D.	77
Ilustración 12.24. Número de vueltas terminal secundario, transformador en 3D.	78
Ilustración 12.25. Asignación entrada, transformador en 3D.	78

Ilustración 12.26. Asignación salida, transformador en 3D.....	79
Ilustración 12.27. Creación y selección de las fases, transformador en 3D. .	79
Ilustración 12.28. Creación de la región, transformador en 3D.....	80
Ilustración 12.29. Compilación de la solución, transformador en 3D.....	80
Ilustración 12.30. Propiedades de la compilación, transformador en 3D.....	81
Ilustración 12.31. Compilación exitosa, transformador en 3D.	81
Ilustración 12.32. Selección de reporte, transformador en 3D.....	82
Ilustración 12.33. Resultados, transformador en 3D.....	82
Ilustración 12.34. Generación para la visualización de fenómenos electromagnéticos, transformador en 3D.....	83
Ilustración 12.35. Visualización de temperatura, transformador en 3D.....	83
Ilustración 12.36. Portada Guía de laboratorio creación de un motor en 2D y 3D.....	84
Ilustración 12.37. Índice guía de laboratorio creación de un motor en 2D y 3D.	84
Ilustración 12.38. Creación del proyecto, motor.....	85
Ilustración 12.39. Compilación de la solución, motor.....	85
Ilustración 12.40. Parámetros de la máquina, motor.....	86
Ilustración 12.41. Parámetros del estator, motor.	86
Ilustración 12.42. Parámetros del Slot del estator, motor.....	87
Ilustración 12.43. Parámetros del embobinado del estator, motor.....	87
Ilustración 12.44. Parámetros del rotor, motor.....	88
Ilustración 12.45. Parámetros del Slot del rotor, motor.	88
Ilustración 12.46. Parámetros del embobinado del rotor, motor.....	89
Ilustración 12.47. Creación del proyecto en 2D, motor.....	89
Ilustración 12.48. visualización del proyecto en 2D, motor.....	90
Ilustración 12.49. visualización de los resultados en 2D de torque y velocidad en el motor.....	90
Ilustración 12.50. visualización de los resultados en 2D de los fenómenos electromagnéticos, motor.....	91
Ilustración 12.51. Creación del proyecto en 3D, motor.....	91
Ilustración 12.52. visualización del proyecto en 3D, motor.....	92
Ilustración 12.53. visualización de los resultados en 3D de torque y velocidad en el motor.....	92
Ilustración 12.54. visualización de los resultados en 3D de los fenómenos electromagnéticos, motor.....	93
Ilustración 12.55. Portada guía de laboratorio creación de un generador síncrono.	93
Ilustración 12.56. Índice guía de laboratorio generador síncrono.	94
Ilustración 12.57. Creación del proyecto guía de laboratorio generador síncrono.....	94
Ilustración 12.58. Compilación de la solución de la guía de laboratorio generador síncrono.....	95
Ilustración 12.59. Parámetros de la máquina, generador síncrono.	95
Ilustración 12.60. Parámetros del estator, generador síncrono.....	96
Ilustración 12.61. Parámetros del Slot del estator, generador síncrono.	96

Ilustración 12.62. Parámetros del embobinado del estator, generador síncrono.	97
Ilustración 12.63. Unión de los embobinados, generador síncrono.	97
Ilustración 12.64. Parámetros del rotor, generador síncrono.	98
Ilustración 12.65. Parámetros de polos del Rotor, generador síncrono.	98
Ilustración 12.66. Creación del proyecto en 2D, generador síncrono.	99
Ilustración 12.67. Visualización del generador síncrono en 2D.	99
Ilustración 12.68. Resultados en 2D del generador síncrono.	100
Ilustración 12.69. Resultados en 2D de los fenómenos electromagnéticos del generador síncrono.	100
Ilustración 12.70. Creación del proyecto en 3D, generador síncrono.	101
Ilustración 12.71. Visualización del generador síncrono en 3D.	101
Ilustración 12.72. Resultados en 3D del generador síncrono.	102
Ilustración 12.73. Resultados en 3D de los fenómenos electromagnéticos del generador síncrono.	102
Ilustración 12.74. Portada practica de laboratorio Transformador.	103
Ilustración 12.75. Índice de la práctica de laboratorio Transformador.	103
Ilustración 12.76. Objetivo general práctica de laboratorio Transformador.	104
Ilustración 12.77. Objetivos específicos práctica de laboratorio Transformador.	104
Ilustración 12.78. Introducción a la práctica de laboratorio Transformador.	105
Ilustración 12.79. Introducción de cómo crear un transformador, práctica de laboratorio Transformador.	105
Ilustración 12.80. Práctica de laboratorio Transformador.	106
Ilustración 12.81. Portada práctica de laboratorio Motor.	106
Ilustración 12.82. Índice de la práctica de laboratorio Motor.	107
Ilustración 12.83. Objetivo general práctica de laboratorio Motor.	107
Ilustración 12.84. Objetivos específicos práctica de laboratorio Motor.	108
Ilustración 12.85. Introducción a la práctica de laboratorio Motor.	108
Ilustración 12.86. Introducción a como crear un motor.	109
Ilustración 12.87. Práctica de laboratorio Motor.	109
Ilustración 12.88. Portada práctica de laboratorio Generador síncrono.	110
Ilustración 12.89. Índice de la práctica de laboratorio Generador síncrono.	110
Ilustración 12.90. Objetivo general de la práctica de laboratorio Generador síncrono.	111
Ilustración 12.91. Objetivo específico de la práctica de laboratorio Generador síncrono.	111
Ilustración 12.92. Introducción a la práctica de laboratorio Generador síncrono.	112
Ilustración 12.93. Introducción a la creación de un generador síncrono.	112
Ilustración 12.94. Práctica de laboratorio Generador síncrono.	113

Lista de Tablas

Tabla 10.1. Caracterización del generador síncrono, corriente de entrada (Amp) contra voltaje de salida (V).....	58
---	-----------

Glosario

Ansys Maxwell – Análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnética, campos acoplados.

ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software.

1. Introducción

Ansys Maxwell es una herramienta de simulación electromagnética que permite analizar y predecir el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos alojados en dispositivos eléctricos, con su análisis en elementos finitos (FEM) puede generar resultados de simulación en 2D y 3D.

Parte fundamental de una práctica de laboratorio es diseñar, simular, construir y confrontar los resultados de simulación con los conseguidos en la práctica real, cuando el estudiante obtiene los conocimientos teóricos y un acercamiento simulado, adquiere menos probabilidades de fallar en la construcción de la práctica de laboratorio, sin embargo, en la asignatura conversión electromagnética son pocos los aplicativos que pueden llegar a simular de forma real un motor y sus componentes, no obstante, Ansys Maxwell permite simular el comportamiento de un motor generando resultados reales y además de su simulación poder mejorar el rendimiento de este.

En esta tesis se desea generar una metodología de simulación para las prácticas de laboratorio en la asignatura conversión electromagnética mediante la plataforma Ansys Maxwell, lo que hará que los estudiantes de ingeniería electrónica tengan mayores recursos de estudio y entendimiento en la asignatura a cursar. El proyecto de grado será organizado mediante la metodología de la simulación, que consta de unos pasos que se podrán ver en el recorrido de este proyecto.

Para finalizar, el proyecto de grado se implementará mediante una parte teórica en la cual se describen fórmulas y resultados esperados, definición del sistema a crear, alcance del proyecto, formulación del modelo a simular, simulación del modelo, colección de datos obtenidos por la simulación, interpretación y comparación de resultados y documentación paso a paso para la simulación de un motor en el software Ansys Maxwell, así evidenciando que la herramienta de simulación es fundamental para el desarrollo y entendimiento de la asignatura conversión electromagnética.

2. Planteamiento del Problema

La implementación de laboratorios sin la aplicación de modelos de simulación conlleva a una mala práctica de laboratorio, dejando atrás la importancia del aprendizaje y generando un experimento sin bases, por otro lado, no tendrán las cualidades para determinar sus fallos o mejoras en actividades académicas. Las grandes empresas generan modelos de simulación, en los cuales promedian la efectividad del producto, si es beneficioso para la empresa y su fabricación, pasando por una lista de filtros para ser aprobado, sin los modelos de simulación sería imposible evaluar todos los componentes que contiene un desarrollo de un componente. Actualmente cada software creado debe contar con la documentación de funcionamiento y creación, sin embargo, no todos los manuales creados son totalmente entendibles o enfocados en temas puntuales, las guías son muy abiertas lo que causa que sean confusas al área que se va a enfocar.

Al presente no se cuentan con modelos de simulación que se adapten a las necesidades de la asignatura conversión electromagnética, ya que no se maneja un software que modele máquinas eléctricas para determinar el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos de forma real.

En consecuencia, el uso de aplicativos computacionales son necesarios para poder desarrollar, estudiar y recrear sistemas para el aprendizaje de los estudiantes. En este trabajo investigativo se elaborará una herramienta de modelos de simulación enfocados en el aprendizaje de los fenómenos electromagnéticos fundamentales para el estudio de máquinas eléctricas a través de la herramienta computacional Ansys Maxwell, debido a que en la actualidad es el único software capaz de modelar y simular máquinas eléctricas con resultados reales para determinar el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos.

Lo que hace surgir la siguiente pregunta, ¿Cómo la plataforma de simulación Ansys Maxwell puede servir de herramienta para modelar y simular máquinas eléctricas con el fin de estudiar los fenómenos electromagnéticos en el espacio académico de conversión electromagnética?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Generar una metodología para el diseño de prácticas de laboratorio en el espacio académico conversión electromagnética mediante la plataforma Ansys Maxwell.

3.2. Objetivos Específicos

- Analizar las funcionalidades que posee la plataforma Ansys Maxwell y su implementación en conversión electromagnética, para el estudio de fenómenos electromagnéticos presentes en máquinas eléctricas.
- Diseñar tres prácticas de simulación en el software Ansys Maxwell como herramienta de apoyo para el estudio de los fenómenos electromagnéticos presentes en máquinas eléctricas.
- Validar los resultados obtenidos de las simulaciones de máquinas eléctricas en Ansys Maxwell haciendo una comparativa con datos reales mediante montajes experimentales relacionados con las temáticas del curso conversión electromagnética para el estudio de fenómenos electromagnéticos.

4. Justificación

La tecnología obtuvo un gran avance en los modelos de simulación de dispositivos electrónicos, mecánicos, automotriz etc. Sin duda todas las herramientas computacionales han tenido un impacto positivo para la medición y obtención de datos dependiendo del estudio que se requiere enfocar. En la modernidad se realizan diversos escenarios generados por softwares de modelos de simulación, los cuales son usados diariamente en las prácticas de laboratorio y de igual manera, son usados diariamente en las empresas que cuentan con la innovación o creación de nuevos productos.

El software Ansys Maxwell ha contribuido con millones de diseños, modelos y simulaciones de alternativas de trabajo, especializado en la comprensión y aprendizaje de creación de prototipos, para la disminución de riesgos y acelerando la innovación mundial. Ansys Maxwell ha contribuido a grandes empresas gracias a su herramienta de cómputo, un ejemplo es la empresa Vale, productora de hierro, generó un rendimiento positivo aumentando sus ganancias con ayuda de las simulaciones en el software y con el estudio de fenómenos físicos en partículas.

Ante la eficiencia del software Ansys Maxwell y sus resultados en el mundo laboral, como se ve reflejado en varias compañías exitosas, se justifica la elaboración de modelos y simulaciones para el entendimiento de fenómenos electromagnéticos que intervienen en el estudio de máquinas eléctricas mediante el software Ansys Maxwell, así, generando estudiantes de la Facultad de Ingeniería Electrónica con más habilidades fundamentales para el buen desarrollo en el mundo laboral.

5. Impacto Social

Impacta directamente en la orientación académica de los estudiantes de la facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás. La universidad debe contar con los elementos indispensables para el desarrollo de tareas y/o laboratorios para una buena enseñanza y desempeño del estudiante, enfocándose en la educación continua. Facilitar el entendimiento de una actividad académica es primordial para los docentes, pues de esto se basa el conocimiento que van a adquirir en el recorrido de su formación profesional. La creación de un manual de software hará de forma más amigable con el estudiante comprender las composiciones de una herramienta de trabajo como lo es el software Ansys Maxwell. [1]

El manual ayudará a entender la composición del software, las herramientas que posee y los alcances que esta tiene, dando una visión a los estudiantes de todos los conocimientos que puede otorgar para futuros trabajos.

El desarrollo de una guía tiene un impacto para los estudiantes y demás personal involucrado que utiliza el software Ansys Maxwell como lo pueden ser docentes u otro personal de la Universidad, dado que es una herramienta de simulación para la solución a problemas complejos en el área a trabajar, un manual de usuario cuenta con las características informativas para llevar a cabo un buen uso de la herramienta.

6. Estado del Arte

El propósito de esta investigación consiste en examinar y explorar el estado actual de las simulaciones electromagnéticas utilizando el software Ansys Maxwell en el campo de la ingeniería electrónica. Las herramientas de simulación se han vuelto esenciales con el fin de adquirir conocimiento y pronosticar el comportamiento de sistemas electromagnéticos complejos. Ansys Maxwell, como una herramienta potente de simulación electromagnética, se ha establecido como una opción confiable y eficiente para llevar a cabo estas simulaciones. [1]

En este estudio, se analizarán los avances más recientes en el uso de Ansys Maxwell en diversas áreas de la ingeniería eléctrica y electrónica. Se explorarán las aplicaciones más comunes, como el análisis de campos magnéticos en dispositivos eléctricos y la simulación de sistemas de energía, así como los enfoques innovadores que aprovechan las capacidades avanzadas del software. Además, se investigaron los desafíos actuales y las limitaciones asociadas con el uso de Ansys Maxwell en las simulaciones electromagnéticas. Se abordarán aspectos como la precisión de los resultados, la eficiencia computacional y las posibles mejoras y optimizaciones que podrían implementarse para superar estas limitaciones.

6.1. Principios de las metodologías

Se remonta a los tiempos en donde se crean los primeros manuales o guías para la capacitación de uso de elementos quirúrgicos, se remonta a la segunda guerra mundial en donde los manuales de procedimientos fueron uno de los implementos más importantes para la capacitación de médicos y enfermeras para el manejo de utensilios quirúrgicos, por falta de personal se realizaron capacitaciones. [1]

6.2. Principios de los manuales

Siendo estos los primeros manuales en crearse por una necesidad de aprendizaje, acompañados de una serie de pasos ordenados para la ejecución de algún trabajo o herramienta, como se expone en los documentos al definirse como un documento que se escribe de forma ordenada, para la realización de una acción o implementación de un utensilio, para la ejecución de un trabajo posterior [2]

6.3. Historia de Ansys Maxwell

La empresa Ansys Maxwell, Inc. fue fundada en 1970 por Swanson Analysis Systems, Inc. La herramienta de cómputo ha sido guiada en la ingeniería con temas basados en la dinámica de fluidos, temperatura y diseños mecánicos, sin embargo, la empresa a lo largo del tiempo ha llevado un gran proceso de actualización y mejora. Actualmente el software Ansys Maxwell ha sido de utilidad para muchas empresas que se fundamentan en diseños de simulación para la producción activa de diferentes elementos o suministros, [3] como lo han sido:

- La compañía Vale, proveedor de hierro, alcanzó una reducción económica, con la ejecución de diseños y simulaciones en la herramienta Ansys Maxwell, enfocados en proyectos de optimización de procesos en la obtención del material.
- Con la herramienta Ansys Maxwell, se pudo obtener el fenómeno físico con la simulación en partículas esféricas y no esféricas, con el que se calculó la fuerza que impacta en el equipamiento de los trabajadores y así poder saber con certeza el ciclo de mantenimiento en la red eléctrica, materiales utilizados en la obtención de minerales, monitores, limpieza de materiales genéricos. Las compañías que optaron por simular el desgaste de los componentes generaron una reducción económica en gastos de nuevos componentes y aumentando el periodo de uso de las herramientas usadas diariamente. [3]

La herramienta de simulación Ansys Maxwell genera una parte fundamental en la minería y construcción, con la determinación de fenómenos mecánicos que pueden presentarse como se presenta en la página principal de ESSS:

- Con la implementación de simulaciones RESEMIN, empresa dedicada a la minería subterránea, generó más de 10 modelos y simulaciones de prototipos de perforadoras para la minería. Gracias al software Ansys Maxwell se diseñó un prototipo ideal considerado por la compañía. [4]
- La empresa Fundición Ferrosa encargada de fundir los materiales obtenidos de la minería, optó en generar simulaciones de ingeniería en la herramienta Ansys Maxwell para obtener los diseños de piezas mejoradas a equipos de fundición. Con los diseños realizados la empresa redujo tiempos y costos de mantenimientos, al ser capaces de fabricar sus piezas de desgaste recurrente. [4]
- Ansys Maxwell HFSS, un módulo orientado a la ingeniería de telecomunicaciones para el estudio de ondas terrestres y diseño de antenas con su simulación en determinados posicionamientos para el aumento de la precisión en un área delimitada. [4]
- Ansys Maxwell SIwave es un ayudante de diseño, en el cual la herramienta evalúa los posibles problemas en la etapa de diseño. Las simulaciones evaluadas aumentan un resultado exitoso del sistema. [4]
- En los últimos años Ansys Maxwell ha empezado a generar un nuevo acompañamiento a la Ingeniería, realizando una actualización y creación de un nuevo modelo de simulación en componentes electrónicos, para el estudio de los diferentes fenómenos electromagnéticos que componen máquinas eléctricas. Dicha herramienta aparece con el nombre de Ansys Maxwell en el año 2020, el cual es definido por la página de Ansys Maxwell Inc, como:
- Ansys Maxwell permite el acoplamiento de la fuerza armónica para el diseño de mejoras en elementos electromagnéticos como los son los transformadores, turbomáquinas y otras máquinas eléctricas. [4]
- Con su alto impacto en la ingeniería electrónica y eléctrica, se da paso a Ansys Maxwell Electronics Desktop, en el cual se incluyen simulaciones

térmicas, PCB y otros componentes, enfocándose en la aplicación de elementos que trabajen con baja o altas frecuencias.

6.4. Proyectos relacionados

Para culminar con el estado de arte, se obtiene documentación basada en la investigación de sistemas de detección de objetos enterrados en el suelo, realizado por un alumno de Ingeniería Electrónica de la Universidad de los Andes, usando la simulación en la herramienta Ansys Maxwell para la detección de metales incluso evaluando la efectividad de búsqueda de elementos metálicos que abarcan los metros de profundidad, en la tesis de grado “diseño y validación de un sistema de bobinas para la detección de metales por medio de Ansys Maxwell”.

Introduce su investigación mediante los aspectos de detección de objetos metálicos en profundidades mayores a un metro de distancia. El objetivo principal del proyecto de grado se encuentra enfocada en proporcionar información de material, proporción del objeto y su forma, determinado mediante bobinas de detección de metales y por medio del aplicativo computacional Ansys Maxwell generar diseños y simulación de bobinas de detección de metales para los fenómenos físicos para la obtención de resultados reales del proyecto de grado en mención. [5]

7. Marco Teórico

El propósito principal de esta tesis consiste en explorar y analizar la simulación de máquinas eléctricas, enfocándose en su diseño y comportamiento tanto en condiciones normales como anormales. Para lograrlo, se emplearán herramientas de simulación avanzadas que posibilitan el estudio de los fenómenos electromagnéticos tales como el campo magnético, líneas de flujo, la eficiencia y el comportamiento dinámico. [6]

En esta investigación se abordarán conceptos fundamentales relacionados con las tres máquinas eléctricas determinadas en este proyecto de grado, como los principios de las máquinas eléctricas, los modelos matemáticos que describen su comportamiento, técnicas de simulación utilizadas para representar su funcionamiento y fenómenos electromagnéticos presentes en las tres máquinas eléctricas.

7.1. Metodología

Crear una metodología nueva implica seguir ciertos pasos fundamentales. En primer lugar, se debe identificar el problema o área que requiere mejoras. Luego, se realiza una investigación exhaustiva sobre el tema en cuestión. A continuación, se desarrolla un marco teórico o conceptual que servirá como base para la metodología. Posteriormente, se definen los pasos y procedimientos concretos a seguir en la implementación. Por último, es esencial probar y ajustar la metodología en función de la retroalimentación y los resultados obtenidos.

Una metodología es un conjunto de principios, prácticas, técnicas y herramientas con el fin de realizar una tarea específica o alcanzar un objetivo determinado. En el ámbito de la investigación de la simulación en este proyecto de grado, se refiere a los pasos, las técnicas a utilizar, planificación, diseño, implementación, recolección de datos y enfoques sistemáticos seguidos para llevar a cabo un nuevo diseño de prácticas de laboratorio. [7]

Una metodología de simulación proporciona un marco estructurado para realizar simulaciones de manera efectiva y precisa. Suele incluir los siguientes elementos:

1. Definición de objetivos.
2. Identificación del sistema.
3. Recopilación de datos.
4. Modelado.
5. Validación.
6. Diseño del experimento.
7. Ejecución de la simulación.
8. Análisis de resultados.
9. Validación de los resultados.

10. Comunicación y documentación.

Una metodología de simulación proporciona un enfoque sistemático y estructurado para llevar a cabo simulaciones. Define los pasos a seguir, desde la definición de los objetivos hasta la comunicación de los resultados, garantizando que la simulación sea precisa, fiable y útil para comprender y analizar sistemas complejos.

7.2. Máquinas eléctricas

En esta sección se explorarán los principios de las máquinas eléctricas, estas máquinas desempeñan un papel esencial en numerosas aplicaciones, como motores y generadores, al aprovechar la reacción entre campos magnéticos y las corrientes eléctricas. A través de las simulaciones en Ansys Maxwell, se analizará el comportamiento de las máquinas eléctricas, investigando aspectos como el flujo magnético, la distribución de corriente y las fuerzas electromagnéticas. El objetivo es mejorar el rendimiento y la eficiencia de estas máquinas en una variedad de contextos de aplicación. [8]

7.2.1. Tipos de máquinas eléctricas

Existen diversos tipos de máquinas eléctricas que representan un papel crucial en la generación y conversión de energía eléctrica. El proyecto de grado sobre la creación de una metodología para prácticas de laboratorio en Ansys Maxwell, es fundamental comprender estos tipos de máquinas.

Uno de los tipos más comunes es el generador síncrono, utilizado para la generación de energía eléctrica. Este tipo de máquina consta de un rotor y un estator, y produce voltaje mediante la rotación del rotor en un campo magnético. Otro tipo de máquina eléctrica es el motor, el cual transforma la energía eléctrica en energía cinética. Al igual que el generador síncrono, posee un rotor y un estator, pero en este caso, el movimiento del rotor es impulsado por la corriente eléctrica. [9]

Además, también se pueden encontrar los motores de inducción, ampliamente empleado en aplicaciones industriales. Estos motores tienen un rotor de jaula de ardilla y basados en la inducción electromagnética para generar movimiento. [9]

7.2.2. Devanados

Los devanados desempeñan un papel fundamental en las máquinas eléctricas, consistiendo en bobinas de alambre conductor colocadas de manera específica para generar campos magnéticos o realizar la transformación de energía eléctrica a energía cinética, y viceversa. Se encuentran presentes en distintos tipos de máquinas eléctricas, como motores y generadores. [10]

En motores eléctricos, los devanados del estator generan un campo magnético rotatorio al aplicar corriente eléctrica, siguiendo las leyes de Ampère y Faraday. Este campo magnético interactúa con los devanados del rotor para producir el movimiento mecánico.

En generadores eléctricos, los devanados del estator, también conocidos como devanados de armadura, están conectados a una carga externa. Al girar el rotor en el estator, se estimula una corriente eléctrica en los devanados de la armadura, siguiendo las leyes de Faraday y Lenz, generando así energía eléctrica. [10]

En resumen, el diseño y disposición específica aseguran el funcionamiento adecuado de motores y generadores, permitiendo un rendimiento eficiente en diversas aplicaciones.

7.2.3. Campo magnético

Es una propiedad esencial en el estudio de los fenómenos electromagnéticos y el magnetismo, se puede caracterizar mediante ecuaciones físicas como la ley de Ampère y la ley de Biot-Savart.

Según la ley de Ampère, la cantidad de flujo magnético alrededor de una ruta cerrada está directamente relacionada con la corriente eléctrica que atraviesa dicha ruta. [11] Matemáticamente, se expresa como la integral de línea de:

$$B \cdot dl = \mu_0 I$$

En esta ecuación, B simboliza el campo magnético, dl es un segmento diferencial de longitud a lo largo de la trayectoria, y μ_0 representa la permeabilidad magnética del vacío. [11]

Por su parte, la ley de Biot-Savart relaciona el campo de fuerza magnética Generado por un flujo de corriente eléctrica en una ubicación específica del espacio, esta ley establece que el campo magnético en un punto P, debido a un segmento de corriente, puede ser determinado utilizando la expresión:

$$B = (\mu_0/4\pi) * (I dl \times r) / r^3$$

Siendo r el vector posición del elemento de corriente hasta la ubicación P. [11]

El campo magnético se describe mediante ecuaciones como la ley de Ampère y la ley de Biot-Savart, que relacionan el campo de fuerza magnética con la corriente eléctrica y la distancia. Estas ecuaciones son fundamentales para comprender y calcular el comportamiento del campo magnético. [11]

7.2.4. Principios de funcionamiento

La ley de Ohm y la ley de Ampère son dos principios fundamentales en el ámbito de la electricidad y el magnetismo, expresados mediante ecuaciones establecen relaciones entre corriente eléctrica, voltaje y resistencia.

La ley de Ohm afirma que la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de un conductor es directamente proporcional al voltaje aplicado y es inversamente proporcional a la resistencia del conductor. La ecuación correspondiente a esta ley es:

$$I = V/R$$

Relacionando corriente, voltaje y resistencia. [12]

En contraste, la ley de Ampère establece que la cantidad de flujo magnético alrededor de una ruta cerrada está relacionada de manera proporcional con la corriente eléctrica que atraviesa esa ruta. Su ecuación, la integral de línea de:

$$B \cdot dl = \mu_0 I$$

describe la relación entre el campo de fuerza magnética (B), un componente diferencial de longitud (dl), la permeabilidad magnética del vacío (μ_0) y la corriente eléctrica (I). La ley de Ohm relaciona la corriente, el voltaje y la resistencia, mientras que la ley de Ampère establece la conexión entre el campo magnético y la corriente eléctrica se manifiesta en forma de una relación intrínseca. Estas ecuaciones son esenciales para percibir la conducta de los circuitos eléctricos y los fenómenos magnéticos. [12]

7.2.5. Circuito equivalente

La representación simplificada llamado circuito equivalente es una representación simplificada de su comportamiento eléctrico. Este modelo utiliza elementos como resistencias, inductancias y fuentes de voltaje para describir las características y el rendimiento de la máquina.

En un motor eléctrico, el circuito equivalente incluye componentes que representan la resistencia del devanado, la reactancia de dispersión, la reactancia de magnetización y la fuerza electromotriz (fem) inducida. Estas ecuaciones permiten calcular corrientes, voltajes y potencias en diferentes situaciones de funcionamiento. [13]

Por otro lado, en un generador eléctrico, el circuito equivalente utiliza resistencias, inductancias y fuentes de voltaje para representar la resistencia del devanado, la reactancia de dispersión, la reactancia de la armadura y la fem inducida. Estas ecuaciones permiten determinar la corriente de carga, la tensión de salida generada y la potencia en relación a los parámetros del generador y la carga conectada. [13]

7.2.6. Eficiencia

La eficiencia de las máquinas eléctricas se determina mediante la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, expresada como un porcentaje. La potencia de salida representa la energía útil generada por la máquina, mientras que la potencia de entrada es la energía total suministrada a la máquina. Se puede calcular utilizando la ecuación:

$$\text{Eficiencia (\%)} = (\text{Potencia de salida} / \text{Potencia de entrada}) * 100$$

Es importante destacar que una mayor eficiencia implica una conversión más efectiva de la energía suministrada, con una menor pérdida de energía en forma de calor u otras pérdidas. Mejorar la eficiencia de las máquinas eléctricas puede lograrse mediante el diseño adecuado de materiales, la reducción de pérdidas eléctricas y mecánicas, y la optimización de funcionamiento. [14]

El rendimiento de las máquinas eléctricas se computariza comparando la tensión de salida y la potencia de entrada. Lograr una alta eficiencia es clave para maximizar la utilización de la energía suministrada y minimizar las pérdidas, lo que contribuye a un mejor rendimiento y ahorro de recursos.

7.3. Transformador

Los principios del transformador son fundamentales para comprender el funcionamiento de esta máquina eléctrica. Estos principios guían la manera en que el transformador opera y permite la transferencia eficiente de energía eléctrica. A continuación, se presentan los principios principales en los cuales se basa el funcionamiento del transformador. [15]

7.3.1. Ley de Faraday-Lenz

La ley de Faraday-Lenz afirma que la cantidad de fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es proporcional a la velocidad con la que el flujo magnético a través del circuito está cambiando. Además, esta fuerza electromotriz inducida se genera en una dirección que se opone al cambio del flujo magnético responsable de su generación. [16]

La ley de Faraday-Lenz se representa con la fórmula

$$\varepsilon = -d\Phi/dt$$

Siendo ε la fuerza electromotriz generada en el circuito cerrado (medida en voltios) y $d\Phi/dt$ es la medida de variación del flujo magnético a lo largo del área del circuito (medida en webers por segundo o voltios por segundo). El signo negativo indica que la fuerza electromotriz inducida se actúa en dirección opuesta al cambio del flujo magnético. [16]

Cuando hay una variación en el flujo magnético a través de un circuito cerrado, se produce una fuerza electromotriz en el circuito que actúa en sentido contrario a dicha variación. Esta ley es de gran importancia en el estudio de fenómenos electromagnéticos y tiene diversas aplicaciones prácticas, como en la generación de electricidad en generadores y transformadores.

7.3.2. Número de espiras en un embobinado

En un embobinado, el número de espiras se refiere a la cantidad de veces que un conductor ha sido enrollado en forma de espiral alrededor de un núcleo o bobina. Esta cantidad determina la cantidad de vueltas completas que se han dado alrededor del núcleo.

El número de espiras en un embobinado se representa mediante la siguiente fórmula:

$$N = L / d$$

Donde:

- N es el número de espiras del embobinado.
- L es la longitud del conductor utilizado del embobinado.
- d es el largo de una sola espira.

El número de espiras en un embobinado depende de diversos factores, como lo pueden ser requisitos de diseño y características eléctricas que se desean obtener. El número de espiras en un embobinado determina la cantidad de vueltas completas que hay alrededor de un núcleo. Este número puede variar en función de los requisitos de diseño y las características eléctricas específicas que se desean obtener para la aplicación en particular. [17]

7.3.3. Diferencia de flujo

La discrepancia entre el flujo magnético en el devanado primario y el flujo magnético en el devanado secundario dentro del núcleo del transformador se conoce como diferencia de flujo. Esta diferencia se produce debido a la corriente alterna que fluye en el devanado primario, lo que genera un campo magnético que atraviesa el núcleo y se induce en el devanado secundario, resultando en la generación de corriente en el circuito secundario. [18]

La discrepancia de flujo en un transformador se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\Phi = N * (V1 - V2) / f$$

Donde:

- $\Delta\Phi$ es la diferencia de flujo de campo magnético en el núcleo del transformador,
- N es el número de espiras del transformador,
- V1 es el voltaje aplicado al devanado primario,
- V2 es el voltaje en el terminal secundario.
- f es la frecuencia de la corriente alterna aplicada al transformador.

La diferencia de flujo surge debido a la resistencia y la reactancia del transformador. En un transformador se mide la variación del flujo magnético en su núcleo debido a los cambios en la carga del devanado secundario. Una mayor diferencia de flujo indica una mayor variación en el flujo magnético, lo cual puede afectar el rendimiento del transformador, incluyendo la eficiencia y la estabilidad de la tensión de salida. Por lo tanto, es importante diseñar y elegir un transformador con una diferencia de flujo baja para asegurar su óptimo funcionamiento en diferentes condiciones de carga.

7.3.4. Tensión inducida

La tensión inducida en un transformador se refiere al voltaje generado en el devanado secundario como resultado de la inducción electromagnética. Al aplicar corriente alterna al terminal primario, se crea un campo magnético variable en el núcleo. Este flujo atraviesa el terminal secundario, lo que a su vez produce una tensión en dicho devanado. [19]

La tensión inducida en un transformador se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$V2 = (N2 / N1) * V1$$

Donde:

- V2 es la tensión inducida para el devanado secundario.
- N2 es el número de espiras para terminal secundario.
- N1 es el número de espiras para devanado primario.
- V1 es el voltaje aplicado al devanado primario.

La tensión inducida es de vital importancia en los transformadores, ya que permite transferir la energía eléctrica de un devanado a otro. Esto facilita el ajuste y la transformación de los niveles de tensión para acomodar a las necesidades específicas de las cargas conectadas al devanado secundario del transformador. De esta manera, se puede obtener una tensión de salida adecuada y asegurar para su uso en distintas aplicaciones.

7.4. Motor

El motor opera mediante la interacción entre un campo magnético giratorio y una corriente alterna para generar movimiento. Su capacidad para mantener una velocidad constante y su alta eficiencia lo convierten en una opción común en aplicaciones industriales. A través de las simulaciones en Ansys Maxwell, se investigará el comportamiento del motor, analizando factores como el flujo magnético, la corriente y el par, con el objetivo de mejorar su diseño y rendimiento en diversas aplicaciones. [20]

7.4.1. Principio de la sincronización

El principio de la sincronización implica coordinar los eventos y procesos en un sistema o dispositivo para asegurar que ocurran de manera armoniosa y en el momento adecuado. En el contexto de las simulaciones en Ansys Maxwell, la sincronización desempeña un papel fundamental para obtener resultados confiables y precisos.

Para lograr la sincronización, se emplean diversas técnicas como la adecuada discretización temporal, la selección correcta de los pasos de tiempo y la consideración de los retardos inherentes en el sistema. Además, se utilizan fórmulas y algoritmos específicos para establecer una sincronización precisa de los componentes involucrados, como la evolución temporal de los campos electromagnéticos, las condiciones de excitación y las propiedades de los materiales. [21]

En las simulaciones en Ansys Maxwell, la sincronización juega un papel esencial para garantizar resultados precisos y confiables. Esto se logra coordinando adecuadamente los diferentes aspectos del sistema y utilizando métodos y fórmulas específicas para asegurar la precisión temporal de los eventos y procesos involucrados. [21]

7.4.2. Estator

El estator de un motor desempeña un papel crucial en su funcionamiento. Es una parte fija del motor que alberga las bobinas y su objetivo es generar un campo magnético rotatorio. El flujo magnético conecta con el rotor, produciendo el movimiento y la sincronización del motor.

En la simulación del estator utilizando Ansys Maxwell, se emplean diversas fórmulas y ecuaciones para modelar su comportamiento. Entre ellas se encuentran la ley de Faraday y la ley de Ampère, que explican la conexión entre los flujos magnéticos y las corrientes eléctricas. [22]

7.4.3. Rotor

El rotor de un motor tiene un papel fundamental en el funcionamiento al interactuar con el estator para generar movimiento. Es una parte giratoria que contiene imanes

permanentes o devanados de campo. El flujo magnético del rotor se alinea con la Intensidad del campo magnético giratorio del estator, generando el torque necesario para el motor. [23]

En las simulaciones en Ansys Maxwell, se pueden utilizar ecuaciones adicionales para modelar la inductancia y resistencia del rotor, lo que permite evaluar su comportamiento eléctrico y estimar la respuesta electromagnética del motor.

En las simulaciones en Ansys Maxwell del rotor de un motor, se utilizan fórmulas y ecuaciones como la ley de Lorentz para modelar su comportamiento magnético y eléctrico para obtener resultados precisos y confiables en las simulaciones y comprender cómo afecta el rotor al rendimiento general del motor.

7.4.4. Torque y velocidad

El torque y la velocidad son dos características esenciales en el análisis y diseño de motores síncronos. El torque se refiere a la fuerza rotacional generada por el motor, mientras que la velocidad representa la rapidez de giro del rotor.

La fórmula del torque en un motor es:

$$T = K * I * B * \text{sen}(\theta)$$

Donde: T es el torque, K es una constante, I es la corriente en el rotor, B es la densidad de campo magnético y θ el ángulo de desplazamiento. [24]

La rapidez del motor se calcula mediante la fórmula de la velocidad sincrónica, que relaciona la frecuencia de la tensión de entrada con el número de polos del motor. La fórmula de la velocidad sincrónica es:

$$N = (120 * f) / P$$

Siendo N la ligereza en revoluciones por minuto, f la frecuencia de la fuente de tensión de entrada y P la cifra de polos del motor. Se emplean fórmulas y ecuaciones como la ley de Lorentz para calcular el torque y la fórmula de la velocidad sincrónica para determinar la velocidad del motor. Estas ecuaciones son cruciales para analizar y diseñar motores síncronos con precisión y comprender su comportamiento en diversas condiciones de funcionamiento. [24]

7.5. Generador síncrono

El generador desempeña un papel crucial en la obtención de energía eléctrica. Al igual que el motor, se basa en la interacción de un campo magnético giratorio y una corriente alterna para convertir la energía cinética en eléctrica. Destaca por su capacidad de mantener una frecuencia constante y su gran eficiencia. En el proyecto de grado de simulaciones en Ansys Maxwell, se explorará, a través de

modelados y análisis computacionales, los principios y características del generador síncrono con el objetivo de mejorar su rendimiento y optimizar su diseño. [25]

7.5.1. Estator

El estator de un generador síncrono es una parte fundamental en la obtención de energía eléctrica, siendo responsable de generar el campo magnético rotativo necesario para inducir corriente en el rotor. En las simulaciones realizadas en Ansys Maxwell, se emplean fórmulas y ecuaciones para modelar y analizar el comportamiento del estator.

Los principios fundamentales aplicados incluyen la ley de Faraday y la ley de Ampère. Según la ley de Faraday, cualquier alteración en el flujo magnético a través de una superficie cerrada provoca la inducción de una fuerza electromotriz en un conductor. Esta propiedad permite calcular las tensiones inducidas en las bobinas del estator. [22]

Por otro lado, la ley de Ampère relaciona el transporte de un flujo magnético junto de una trayectoria cerrada con la corriente que lo atraviesa. Con dicha ley, es posible determinar las corrientes presentes en el estator en función de la distribución del flujo magnético.

En las simulaciones en Ansys Maxwell del estator de un generador síncrono, se aplican fórmulas y ecuaciones como la ley de Faraday y la ley de Ampère para modelar el comportamiento magnético y eléctrico. Estos principios son esenciales para obtener resultados precisos y confiables en las simulaciones y comprender cómo el estator contribuye en la generación de energía eléctrica.

7.5.2. Rotor

El componente rotativo de un generador síncrono se encarga de interactuar con el flujo magnético del estator para generar corriente.

Una de las fórmulas clave utilizadas es la ley de Lorentz, que refiere la fuerza magnética experimentada por una carga en movimiento en presencia de un flujo magnético. Esta ley permite calcular el torque generado por el rotor y estudiar su respuesta dinámica. [23]

Además, se pueden considerar ecuaciones adicionales para modelar la inductancia y resistencia del rotor, lo que ayuda a comprender su comportamiento eléctrico y estimar su respuesta electromagnética en el generador.

En las simulaciones en Ansys Maxwell del rotor de un generador síncrono, se emplean fórmulas y ecuaciones, como la ley de Lorentz, para modelar su comportamiento magnético y eléctrico. Estas fórmulas son esenciales para obtener

resultados precisos y confiables en las simulaciones y para comprender cómo el rotor contribuye al rendimiento general del generador.

7.5.3. Voltaje generado

El voltaje generado en un generador síncrono representa la energía eléctrica producida por dicho generador.

La fórmula principal se basa en la ley de Faraday, la cual establece que un cambio en el flujo magnético a través de una superficie cerrada induce una fuerza electromotriz en un conductor. En el caso del generador síncrono, esta fuerza electromotriz se traduce en el voltaje generado. La fórmula para el voltaje generado es:

$$V = K * N * A * df/dt$$

Donde: V representa el voltaje generado, K es una constante, N es el número de giros hechos en el bobinado, A es el área de las bobinas y df/dt es la variación de cambio del campo magnético.[26]

7.6. Ansys Maxwell

Ansys Maxwell es un software de simulación electromagnética considerablemente manejado en el campo de la ingeniería. Su objetivo principal es analizar y predecir el comportamiento de sistemas electromagnéticos, como motores, generadores y dispositivos electrónicos. A través de la implementación de modelos y simulaciones, se investigarán los fundamentos de Ansys Maxwell para obtener conocimiento del comportamiento del flujo magnético, la distribución de corriente y las fuerzas electromagnéticas, con el fin de mejorar el diseño y la eficiencia de los sistemas expuestos. [27]

7.6.1. Elementos finitos

La simulación de elementos finitos en Ansys Maxwell emplea la metodología de elementos finitos para el análisis electromagnético de sistemas. Esta técnica divide el dominio de análisis en elementos geométricos más pequeños, donde se aplican ecuaciones matemáticas que representan las propiedades electromagnéticas.

En el contexto de Ansys Maxwell, se utilizan diversas fórmulas fundamentales para realizar las simulaciones. Estas fórmulas incluyen la ley de Ampère, la ley de Faraday y la ley de Ohm, que describen las relaciones entre los flujos magnéticos, las corrientes y las fuerzas electromotrices. Asimismo, se emplean ecuaciones para calcular parámetros como la inductancia y la resistencia, que resultan importantes en el análisis de dispositivos electromagnéticos. [28]

Ley de Ampère:

$$\nabla \times H = J$$

Donde: $\nabla \times H$ es el rotacional del campo magnético H y J representa la cantidad de corriente.

Ley de Faraday:

$$\nabla \times E = -\partial B/\partial t$$

donde $\nabla \times E$ es el rotacional del campo eléctrico E y $\partial B/\partial t$ es la derivada parcial del campo magnético B relación al tiempo.

Ley de Ohm:

$$J = \sigma E$$

En la ecuación mencionada, J denota la densidad de corriente eléctrica, σ representa la conductividad eléctrica y E es la intensidad del campo eléctrico. [28]

Al combinar las ecuaciones electromagnéticas con los elementos finitos en Ansys Maxwell, es posible obtener resultados precisos sobre el comportamiento electromagnético de distintos sistemas. Esto permite a los usuarios diseñar y optimizar dispositivos como motores eléctricos, generadores y sensores, mejorando su eficiencia y rendimiento.

7.6.2. Región y condiciones de borde

En Ansys Maxwell, la región y las condiciones de borde desempeñan un papel fundamental al definir el entorno y los límites de la simulación electromagnética. La región establece la geometría y los materiales del sistema, mientras que las condiciones de borde definen los comportamientos específicos en los límites de la región.

Las condiciones de borde, por su parte, indican cómo se comporta el campo electromagnético en los límites del sistema. Pueden incluir la prescripción de campos magnéticos, superficies conductoras, interfaces entre materiales o simetrías, y se aplican mediante ecuaciones o expresiones matemáticas correspondientes a cada caso. [29]

1. Condición de borde de campo magnético prescrito:

$$B = B_0$$

Donde: B representa el campo magnético y B_0 es el valor prescrito del campo magnético.

2. Condición de borde de área conductora:

$$n \times H = 0$$

Donde: n es el vector normal del área y H es el flujo magnético. Esta ecuación indica que no hay flujo a través en la superficie conductora.

3. Condición de borde de interfaz entre materiales:

$$n \times (H_1 - H_2) = J_s$$

Donde: n es el vector normal a la interfaz, H_1 y H_2 son los campos magnéticos en los lados opuestos de la interfaz, y J_s es la densidad de corriente frívola en la interfaz. [29]

Al establecer adecuadamente la región y las condiciones de borde en Ansys Maxwell, se crea un marco completo para la simulación electromagnética. Esto permite obtener resultados precisos y realistas al considerar las interacciones entre el sistema y su entorno electromagnético, lo cual resulta beneficioso para el diseño y la optimización de dispositivos y sistemas electromagnéticos en diversas aplicaciones.

7.6.3. Geometría y mallado

En Ansys Maxwell, la geometría y el mallado son elementos esenciales en las simulaciones electromagnéticas. La geometría define la forma y dimensiones del sistema a simular, mientras que el mallado implica la división de la geometría en elementos más pequeños para su análisis numérico.

El mallado se realiza mediante la discretización de la geometría en elementos finitos, que pueden ser tetraedros, hexaedros o poligonales, según la forma y características del problema. Un mallado adecuado y una densidad de elementos óptima son importantes para obtener resultados confiables y eficientes.

En términos de fórmulas, Ansys Maxwell utiliza algoritmos y métodos de discretización. Estos métodos se basan en ecuaciones matemáticas y técnicas de interpolación para aproximar las soluciones de campo electromagnético en cada elemento del mallado. [30]

La geometría precisa y el mallado adecuado en Ansys Maxwell permiten una representación precisa del sistema, lo que facilita el análisis de campos magnéticos, distribuciones de flujo magnético y otros parámetros relevantes en diversas aplicaciones electromagnéticas.

8. Diseño Metodológico

El foco de esta investigación reside en la creación de un diseño metodológico para llevar a cabo simulaciones mediante el software Ansys Maxwell. La importancia del diseño metodológico radica en su papel fundamental dentro de los proyectos de ingeniería, ya que provee una estructura y guía sistemática para ejecutar las simulaciones de forma eficiente y efectiva.

En el contexto de este proyecto de grado, el diseño metodológico se concentra en desarrollar un proceso organizado y claro que permita una implementación adecuada de las simulaciones electromagnéticas utilizando Ansys Maxwell. El objetivo principal consiste en asegurar la obtención de resultados confiables y precisos que sean coherentes con los objetivos planteados. [31]

El diseño metodológico de este proyecto de grado se fundamenta en una revisión exhaustiva de la literatura existente, una clara definición de los objetivos de simulación, un detallado diseño del modelo en Ansys Maxwell, la implementación práctica de las simulaciones y la observación de los resultados. Mediante este enfoque metodológico riguroso, se busca garantizar la validez y confiabilidad de las simulaciones electromagnéticas realizadas con el software Ansys Maxwell.

8.1. Fases y Metodología

Para la ejecución de esta tesis se propone como guía la metodología de la simulación, asentado en el desarrollo metodológico de una simulación. Dicha metodología está compuesta por un seguimiento de procesos, los cuales conllevan a una exitosa elaboración del sistema, con los datos esperados, que son interpretados por las validaciones, la colección de datos y experimentación, ya que según estos datos se otorga la aceptación del sistema simulado. [31]

La metodología planteada con anterioridad se acopla perfectamente al proyecto de grado presentado, el cual consta de la creación de modelos de simulación de máquinas eléctricas en la herramienta Ansys Maxwell para determinar si el software seleccionado ayuda en el estudio de los fenómenos electromagnéticos.



Ilustración 8.1. Metodología de la simulación

Es importante aclarar que la metodología de la simulación contiene una serie de pasos estrictos, sin embargo, en este proyecto de grado se ajustan algunos ciclos de la metodología, adaptando los ciclos al proyecto propuesto para cumplir con los objetivos planteados.

Las etapas son las siguientes:

1. **Definición del sistema:** Se define exactamente el sistema que se desea simular, realizando primeramente un análisis de lo que se desea obtener en la simulación. Se establecen parámetros de estudio con la determinación del fenómeno a determinar.
2. **Alcance:** Se determina la interacción con otros sistemas, las restricciones de uso y funcionalidad, variables que se utilizarán y el modelo a recrear. Generación de medidas para la efectividad de definición, estudio y obtención de datos del sistema.
3. **Formulación del modelo:** Una vez concluido la definición y alcance de la simulación obtenidos del estudio de este, se construye un diseño ideal con el cual en la formación del sistema se obtengan los resultados deseados. En esta fase se determinan las variables, teniendo en cuenta todos los

parámetros y generando diagramas de flujo pertinentes que complementen el modelo.

4. Implementación del modelo: Con el diseño ya definido, en esta fase se procede a efectuar en la herramienta Ansys Maxwell el modelo construido, para ser procesado por la herramienta seleccionada.
5. Colección de datos: Con el alcance definido y la implementación del sistema, se obtienen los resultados de la simulación y se caracterizan con el fin de realizar validaciones del sistema y entregar un resultado final.
6. Interpretación: En esta etapa se debe dar una valoración del sistema creado, basado en los alcances del sistema, el diseño y la simulación, se interpreta la funcionalidad de la simulación y otorgando una respuesta al planteamiento del proyecto.
7. Documentación: Para el uso y constancia de lo desarrollado, se debe realizar una documentación técnica con el cual se dejará estipulado como se crea el modelo simulado y su funcionamiento. [31]

Dado que es una metodología que se realiza por ciclos y que se encuentra planteada con los puntos anteriores, se debe trabajar llevando el orden ya parametrizado para obtener resultados exitosos en el proyecto presentado. En este proyecto de grado se maneja el ciclo de trabajo planteado por la metodología para la construcción de modelos y simulaciones y en la herramienta Ansys Maxwell, para la comprensión de los fenómenos electromagnéticos en máquinas eléctricas.

Teniendo en cuenta las fases y flujos de la metodología establecida, se determina que es el adecuado para realizar el proyecto dado que se adapta a cada uno de los objetivos planteados.

8.2. Cronograma

El cronograma desempeña un papel esencial en la programación y organización efectiva de proyectos de investigación. En este proyecto, el cronograma se presenta como una herramienta temporal que establece las diversas etapas y actividades necesarias para llevar a cabo las simulaciones en Ansys Maxwell de manera sistemática y organizada.

Para este proyecto de grado se estableció un plan de trabajo lineal, acordado con el director de proyecto para la optimización de tiempo, ya que se contaba con un tiempo límite para la implementación del proyecto y anteproyecto de grado. En el cronograma se encontrará en la primera columna los objetivos generales que se desean cumplir, en la segunda columna se encontrarán las tareas que se ejecutarán para lograr los propósitos planteados y en las siguientes columnas se encontrarán

segmentados por meses y semanas la duración de cada actividad, representadas por un color que definirá la semana y mes que se realizó la actividad. [32]

El cronograma se inicia con una fase inicial de planificación y diseño, donde se definen los objetivos específicos, se realiza una revisión bibliográfica exhaustiva y se establecen los parámetros fundamentales del proyecto. Esta etapa resulta fundamental para establecer una base sólida que oriente el desarrollo del proyecto en las etapas posteriores.

OBJETIVOS		ACTIVIDADES	Meses	ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO			
			Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Creación anteproyecto		Planteamiento del problema																					
		Planteamiento de objetivos																					
		Busqueda de antecedentes																					
		Planteamiento de metodología																					
		Elaboracion del documento																					
Objetivo específico 1 Analizar las funcionalidades que posee la plataforma ANSYS MAXWELL y su implementación en conversión electromagnética	Instalación del software																						
	Inicio de cursos como aprendizaje																						
	Replica de simulaciones del curso																						
	Simulación de un solido																						
	Documentación de lo realizado -Teorico																						
Objetivo específico 2 Diseñar prácticas de simulación en el software ANSYS MAXWELL como herramienta de apoyo para el estudio de los fenómenos electromagnéticos presentes en máquinas eléctricas.	Simulación de un transformador																						
	Simulación de un motor																						
	Simulación de un generador																						
	Generación de Guías practicas																						
	Documentación de lo realizado - Diseño																						
Objetivo específico 3 Validar los resultados obtenidos de las simulaciones, haciendo una comparativa con datos reales generados en las prácticas de laboratorio.	Generacion de practica de laboratorio																						
	Comparación simulación vs laboratorio																						
	Recoleccion de datos aprendidos por estudiantes																						
	Finalización de guías practicas																						
		Documentación de lo realizado- Resultados																					

Ilustración 8.2. Cronograma

El cronograma de este proyecto de grado proporciona una estructura temporal que guía las diferentes etapas del proceso de simulación en Ansys Maxwell. Desde la planificación inicial hasta la presentación final, este cronograma busca asegurar una gestión eficiente del proyecto, cumpliendo con los plazos establecidos y garantizando la calidad de los resultados obtenidos

9. Desarrollo Conceptual

El enfoque principal de este proyecto de grado se basa en la generación de una metodología específica para las prácticas de laboratorio utilizando Ansys Maxwell. El objetivo principal de esta tesis es ofrecer a los estudiantes una guía práctica y efectiva para utilizar Ansys Maxwell que les permita aprovechar al máximo esta poderosa herramienta de simulación electromagnética, en la simulación y análisis de sistemas electromagnéticos.

Ansys Maxwell es ampliamente reconocido y utilizado en la industria y la investigación como una herramienta de simulación electromagnética poderosa. Sin embargo, debido a su complejidad, los estudiantes pueden encontrar dificultades al utilizarlo en el entorno de laboratorio. Por lo tanto, es esencial desarrollar una metodología estructurada y clara que facilite a los estudiantes comprender y utilizar eficientemente esta herramienta.

La metodología propuesta tiene como fundamento una estructura y técnicas que guiarán a los estudiantes desde la configuración inicial del modelo hasta la interpretación de los resultados. Se abordarán aspectos como la creación de geometrías, la asignación de materiales y la interpretación de los resultados.

9.1. Metodología propuesta (MaxwellCraft)

La creación de prácticas de laboratorio efectivas y atractivas es fundamental para fomentar el aprendizaje y el desarrollo de los estudiantes. Con este objetivo en mente, se presenta una metodología innovadora llamada 'Metodología MaxwellCraft para prácticas de laboratorio' y consta de las siguientes etapas:

1. Objetivo de aprendizaje.
2. Análisis de los sistemas candidatos.
3. Selección del sistema.
4. Alcance.
5. Implementación del sistema.
6. Validación del sistema.
7. Interpretación de los resultados.
8. Documentación.

La metodología involucra a los alumnos y educadores en el proceso de creación de prácticas de laboratorio, reconociendo su experiencia y perspectivas únicas. A través de un enfoque colaborativo y participativo, esta metodología busca garantizar que las prácticas sean relevantes, significativas y emocionantes para los estudiantes. Como se demuestra en la siguiente ilustración.

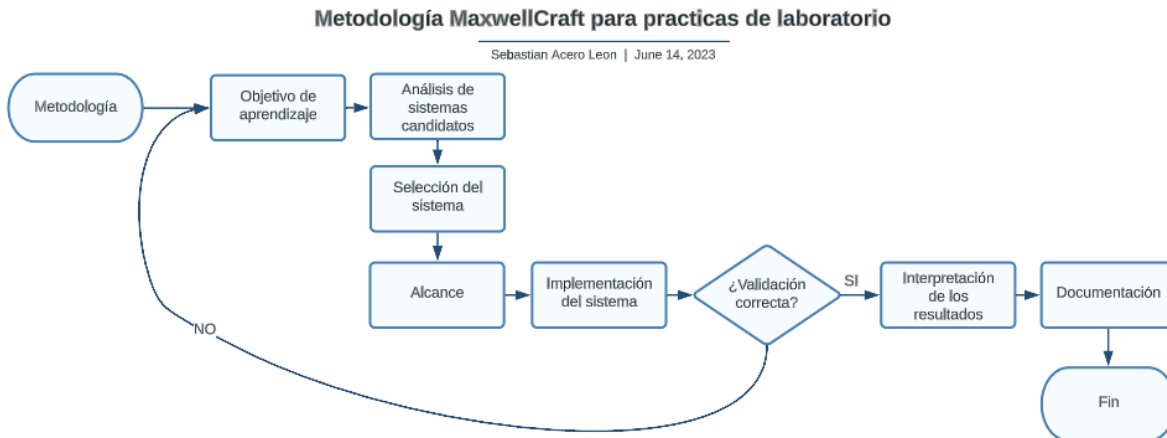


Ilustración 9.1. Metodología MaxwellCraft para prácticas de laboratorio.

En la metodología MaxwellCraft para prácticas del laboratorio, se fomenta la retroalimentación constante y la iteración, permitiendo que los estudiantes y educadores aportan ideas y sugerencias para mejorar continuamente las prácticas de laboratorio. Además, se integran elementos de gamificación y tecnología educativa para aumentar la interactividad y el compromiso de los estudiantes durante las actividades de laboratorio. La metodología MaxwellCraft para prácticas del laboratorio define las etapas de la siguiente manera:

- 1. Objetivo de aprendizaje:** El objetivo de aprendizaje representa la meta que se persigue alcanzar a través de la adquisición de conocimientos. Puede referirse a la adquisición de habilidades específicas, la comprensión de ciertos conceptos o competencias particulares. Los propósitos de aprendizaje son formulados de manera clara y concisa para orientar y dirigir la educación.

En el ámbito educativo, los objetivos de aprendizaje son fundamentales para establecer el plan de estudios, guiar la enseñanza y evaluar el progreso de los estudiantes. Estos objetivos proporcionan una estructura para el aprendizaje y brindan claridad sobre lo que se espera lograr tanto para profesores como para estudiantes.

- 2. Análisis de los sistemas candidatos:** El análisis de sistemas candidatos se refiere a la evaluación de diferentes sistemas o soluciones tecnológicas que puedan cumplir con los requerimientos de un sistema informático. Durante este proceso, se examinan y comparan diversas opciones con el fin de encontrar la solución más apropiada para satisfacer los objetivos y necesidades específicas requeridas.

El análisis de sistemas candidatos implica recopilar información sobre las distintas alternativas disponibles y realizar evaluaciones detalladas de cada una. Se consideran aspectos como funcionalidad, costo, escalabilidad, compatibilidad, seguridad y soporte técnico de los sistemas candidatos.

Además, se pueden revisar casos de estudio, consultar a expertos y realizar pruebas o prototipos.

- 3. Selección del sistema:** La selección del sistema candidato se refiere al proceso de elección de la solución tecnológica más apropiada entre los sistemas analizados para cumplir con los requisitos propuestos. Durante esta etapa, se realiza una evaluación detallada de los sistemas candidatos y se toma una decisión informada basada en los criterios establecidos.

El objetivo de la selección del sistema candidato es tomar una decisión fundamentada y considerar todos los aspectos relevantes. Se elige el sistema candidato que mejor se adapte a las necesidades y requisitos, considerando tanto los beneficios como las limitaciones de cada opción.

- 4. Alcance:** El alcance propuesto en la metodología se desarrolla al identificar y definir de manera clara las actividades, tareas y resultados que serán incluidos en el proyecto. Esto implica determinar qué se va a realizar, qué no se va a realizar y qué se espera lograr con el proyecto.

Al establecer el alcance propuesto, se deben tener en cuenta los recursos disponibles, los plazos y las restricciones. Además, es importante definir los límites para evitar cambios y desviaciones no deseadas durante la ejecución del proyecto.

- 5. Implementación del sistema:** La implementación del sistema en la metodología refiere al proceso de poner en práctica y ejecutar el sistema seleccionado previamente. Es una etapa crucial que implica elaborar y poner en funcionamiento el sistema pensado.

Durante la implementación del sistema, se realiza la codificación y desarrollo de los componentes necesarios, así como la integración de los diferentes módulos y funcionalidades. Se llevan a cabo pruebas exhaustivas para certificar que el sistema cumpla con los planes establecidos y ande de manera óptima.

- 6. Validación del sistema:** La validación del sistema en la metodología se refiere al proceso de evaluación y verificación del sistema para determinar si cumple con los requisitos y expectativas establecidos. Es una etapa esencial que tiene como objetivo garantizar el funcionamiento correcto del sistema.

Durante la validación del sistema, se realizan pruebas exhaustivas y se confronta lo obtenido con la teoría definida previamente. Se verifica la funcionalidad, usabilidad, rendimiento, seguridad y compatibilidad con el entorno operativo.

- 7. Interpretación de los resultados:** La interpretación de los resultados en la metodología se refiere al análisis y comprensión de los datos recolectados

durante la ejecución del proyecto. Durante la interpretación de los resultados, se examinan los datos en busca de patrones, tendencias y relaciones significativas. Se aplican métodos estadísticos u otros enfoques analíticos para analizar la información y obtener una comprensión más profunda de los hallazgos.

La interpretación de los resultados también implica contrastar los datos con los objetivos y las hipótesis planteadas al comienzo del proyecto. Se evalúa si los resultados respaldan las afirmaciones establecidas o si se requiere una revisión del enfoque.

- 8. Documentación:** se refiere a la creación de registros escritos y visuales relacionados con el proyecto. Es una actividad esencial que permite registrar y comunicar de manera clara y organizada toda la información relevante, los pasos seguidos, los resultados obtenidos y las decisiones tomadas durante el proyecto.

Durante la documentación, se elaboran diversos tipos de documentos, como manuales de usuario, guías de instalación, informes técnicos, diagramas de flujo y prácticas de laboratorio. La documentación permite que otras personas comprendan el trabajo realizado y puedan dar continuidad al proyecto en caso de cambios o futuras actualizaciones.

9.2. Metodología MaxwellCraft aplicada en Ansys Maxwell

Esta metodología se compone de etapas claramente definidas que permiten acoplarse perfectamente a realizar una práctica de laboratorio con Ansys Maxwell, los estudiantes aplicarán de manera práctica y efectiva los conceptos de la ingeniería electrónica mediante Ansys Maxwell.

En primer lugar, se encuentra la etapa del objetivo de aprendizaje y alcance, donde se establecen los objetivos y requisitos de cada práctica. Los estudiantes aprenderán a planificar y configurar adecuadamente sus proyectos en Ansys Maxwell. A continuación, se presenta la etapa de selección del sistema y simulación, en la cual los estudiantes realizan simulaciones electromagnéticas utilizando Ansys Maxwell. Se les brindará una guía detallada sobre cómo interpretar y analizar los resultados obtenidos.

Por último, se aborda la etapa de validación y documentación, donde se fomenta la observación crítica de los resultados. En las secciones posteriores, se describirán tres prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas las cuales se implementarán utilizando la metodología MaxwellCraft. Cada práctica abordará diferentes aspectos de la simulación de sistemas y permitirá aplicar sus conocimientos en un contexto práctico y realista.

9.2.1. Practica de laboratorio transformador

La práctica de laboratorio sobre transformadores en Ansys Maxwell destaca la relevancia de investigar y analizar el comportamiento electromagnético de estos dispositivos. Ansys Maxwell, ofrece herramientas que permiten estudiar el rendimiento y la eficiencia de los transformadores, facilitando así la optimización de su diseño y operación. En esta práctica, se busca examinar aspectos como la distribución del campo magnético, las pérdidas y la respuesta en frecuencia del transformador, aspectos esenciales para comprender su funcionamiento y mejorar su eficiencia energética.

9.2.1.1. Objetivo de aprendizaje.

El objetivo de aprendizaje de la práctica de laboratorio en Ansys Maxwell es brindar a los estudiantes la oportunidad de familiarizarse con el software de simulación electromagnética y su estudio en el análisis de transformadores. El propósito principal es permitir que los estudiantes adquieran habilidades prácticas en la modelización y simulación de transformadores utilizando Ansys Maxwell.

Al completar esta práctica, los estudiantes habrán adquirido conocimientos de los principios fundamentales de los transformadores y habrán desarrollado habilidades valiosas en el uso de software de simulación electromagnética para el diseño y análisis de sistemas eléctricos.

9.2.1.2. Análisis de los sistemas candidatos.

Un tipo común es el transformador de distribución, utilizado en sistemas eléctricos de baja tensión para entregar energía a hogares, edificios y áreas residenciales. Estos transformadores reducen el voltaje de la red de distribución a niveles seguros y utilizables.



Ilustración 9.2. Transformador trifásico y monofásico.

Fuente: <http://www.sabersl.com/project/transformadores-monofasicos-de-seguridad-y-separacion/>

Otro tipo es el transformador de potencia, empleado en sistemas de transmisión de alta tensión para transferir grandes cantidades de energía eléctrica a largas distancias con pérdidas mínimas. Estos transformadores aumentan o disminuyen el voltaje según las necesidades de transmisión.

Los transformadores de instrumento se utilizan para medir voltajes y corrientes en sistemas eléctricos. Proporcionan una salida proporcional y aislada de la señal de entrante, permitiendo mediciones precisas y seguras.

9.2.1.3. Selección del sistema.

Es seleccionado el transformador monofásico debido a su aplicabilidad en diversas situaciones y su capacidad para adaptarse a las necesidades específicas de los usuarios. Este tipo de transformador es particularmente adecuado para uso en entornos de laboratorio, ya que permite convertir la corriente eléctrica de un nivel de voltaje a otro, facilitando así la experimentación y el desarrollo de proyectos.

La elección de un transformador monofásico se basa en varias consideraciones. En primer lugar, estos transformadores son altamente eficientes y confiables, lo que garantiza la precisión y la estabilidad de las mediciones y los experimentos realizados en los laboratorios. Además, su diseño compacto y portátil los hace fáciles de transportar y de instalar en diferentes áreas de trabajo.

9.2.1.4. Alcance.

La simulación de una máquina eléctrica en Ansys Maxwell ofrece diversos alcances y posibilidades para el análisis y validación de sistemas electromagnéticos. Los alcances clave de la simulación de una máquina eléctrica en Ansys Maxwell son:

- **Comportamiento electromagnético:** Permite analizar y comprender la distribución del campo magnético en la máquina eléctrica, incluyendo el flujo de campo en el estator y el rotor, así como la interacción entre los devanados y el núcleo magnético.
- **Eficiencia:** Permite evaluar el rendimiento de la máquina eléctrica, como la generación de voltaje, la producción de torque y la eficiencia, bajo diferentes condiciones de carga y velocidades de operación.
- **Estudio de pérdidas:** Permite analizar las pérdidas de la máquina eléctrica, como las pérdidas en el cobre de los devanados, las pérdidas en el núcleo magnético y las pérdidas mecánicas, lo que ayuda a evaluar su eficiencia y a optimizar el diseño para reducir las pérdidas.
- **Estudio térmico:** Permite evaluar la distribución de temperatura en los componentes de la máquina eléctrica, lo que es esencial para garantizar su confiabilidad y vida útil, y para diseñar sistemas de enfriamiento adecuados.

9.2.1.5. Implementación del sistema.

La simulación del transformador se realiza en el software Ansys Maxwell 2020 R1. Para este apartado se realizó una guía de laboratorio con el fin de enseñar tanto a profesores como estudiantes a utilizar la plataforma Ansys Maxwell y en paralelo aprender los fenómenos electromagnéticos presentes en máquinas eléctricas. En esta sección de la metodología se insertan evidencias de la implementación del

sistema seleccionado como se demuestra en la siguiente imagen el índice de la guía.

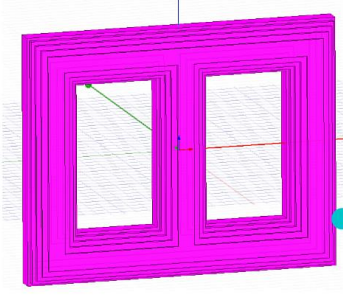
Se crea un camino para la elaboración del transformador, este camino está formado por las etapas anteriores y su fundamento principal es el análisis de sistemas candidatos, pues en esta sección se da un mayor alcance a las características de un transformador y sus propiedades, basados en estas se genera un set de pasos para lograr la construcción del transformador.


3. Creación del sólido

- Seleccionar el núcleo para cambiar sus propiedades:

- Name: **Núcleo.**
- Material: **M15_29G.**
- Color: **Gris.**

Name	Value	Unit	Evaluated ..
Name	Núcleo		
Material	"M15_29G"		"M15_29G"
Solve Inside	<input checked="" type="checkbox"/>		
Orientation	Global		
Model	<input checked="" type="checkbox"/>		
Group	Model		
Display Wireframe	<input type="checkbox"/>		
Material Appearance	<input type="checkbox"/>		
Color			
Transparent	0		



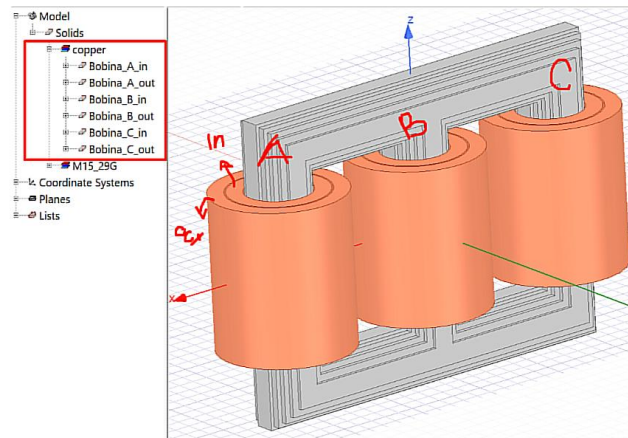


9 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 9.3. Creación del núcleo de un transformador, guía de laboratorio.

Como paso principal se encuentra la creación del núcleo y sus propiedades físicas, en este caso se genera un sólido de diez centímetros de alto y once centímetros de ancho, con un material M15_29G, que representa el aluminio con un estándar básico y como propiedad del material se implementa un núcleo laminado que corresponde a pequeñas capas de aluminio unidas entre sí para la formación del núcleo.

4. Creación del embobinado



15 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 9.4. Creación del embobinado, guía de laboratorio.

Para la creación del embobinado se elige el tipo de bobina deseado, en este caso se elige uno acoplado al núcleo, además, se seleccionan los parámetros como el número de vueltas, orden de los embobinados y la tensión de entrada del sistema. Si desea ver toda la implementación del sistema dirigirse al apartado de anexo “guías de laboratorio, guía de laboratorio Transformador” en el cual se encuentra todo el proceso paso a paso del sistema.

Si desea ver toda la implementación del sistema dirigirse al apartado de anexo “guías de laboratorio, guía de laboratorio Transformador” en el cual se encuentra todo el proceso paso a paso del sistema.

9.2.1.6. Validación del sistema.

Basado en la implementación del transformador y referenciando la guía de laboratorio la cual brinda todo el entendimiento y paso a paso de la creación de un transformador, se obtiene una respuesta positiva de este, ya que los resultados esperados son respuestas sinusoidales como se visualiza en la ilustración 9.6, de igual manera, que el devanado con mayor número de vueltas será el actor principal para el crecimiento o decrecimiento de la señal saliente. Aplicando una tensión sinusoidal de entrada se observa una salida correspondiente a un transformador y como el número de vueltas en el embobinado influye en la salida.

1. Simulación 3D

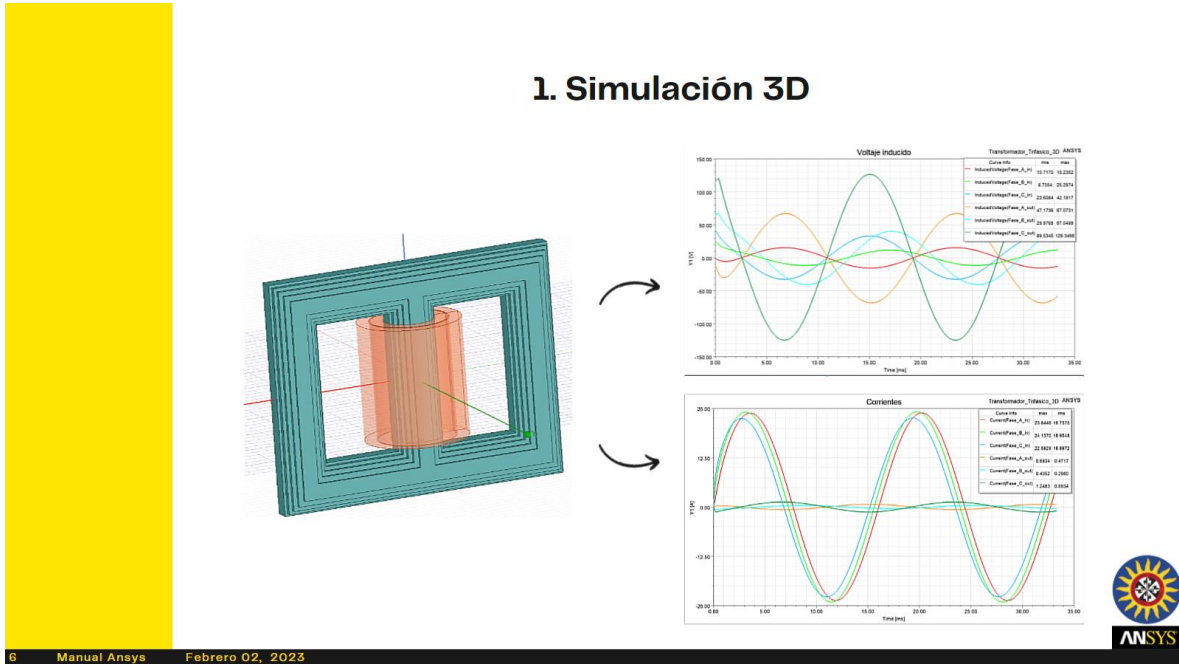


Ilustración 9.5. Resultados obtenidos de la creación del transformador, guía de laboratorio.

Se valida la interpretación del resultado térmico, líneas de flujo y campo magnético obteniendo resultados lógicos comparados con las bases teóricas.

Por último, se decide si la máquina eléctrica construida es lo esperado y con lo observado y construido en la guía de laboratorio se da una referencia clara que el transformador implementado en la herramienta informática Ansys Maxwell es correcta.

9.2.1.7. Interpretación de los resultados.

Con base a la guía de laboratorio implementada y como se observa en la ilustración 9.7, se interpreta como dato principal un avance en el manejo de del programa Ansys Maxwell, como primer alcance a esta herramienta, obtiene una interface grafica intuitiva, sin embargo, no contiene referencias muy claras a el momento de realizar simulaciones, el software permite el desarrollo sin involucrar el diseño seleccionado.

7. Resultados

• Información de resultados

- Doble clic en **Time**.
- Seleccionar el tiempo de muestra.

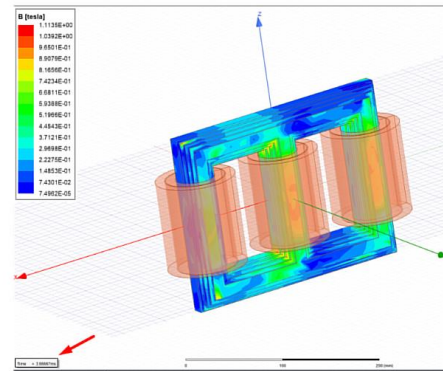
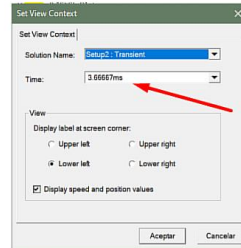


Ilustración 9.6. Resultado térmico del transformador, guía de laboratorio.

La ilustración 9.7 demuestra un aporte muy importante como lo es el resultado térmico, un fenómeno electromagnético que no es visible para el ojo humano, este fenómeno puede ser medido, sin embargo, en el programa Ansys Maxwell es posible visualizar los cambios térmicos que posee el transformador cuando este se encuentra en funcionamiento cumpliendo así el objetivo de la práctica, el cual consiste en obtener un mayor entendimiento en el manejo del software Ansys Maxwell, complementado con la visualización de los fenómenos electromagnéticos presentes en máquinas eléctricas.

9.2.1.8. Documentación.

Este apartado extrae la información de cada paso anterior, para la elaboración de la práctica de laboratorio la cual se encuentra completa en el anexo 12.3.1. Denotando el alcance de la herramienta computacional Ansys Maxwell. Se elabora un documento en el cual se establece un objetivo a la práctica, una introducción que establece los parámetros de la práctica y para finalizar la práctica de laboratorio cumpliendo el objetivo de la metodología.

2. Practica laboratorio

Con el material anterior relajar los siguientes ejercicios:

1. Crear un transformador monofásico en Ansys Maxwell.
2. Replicar el transformador existente de los laboratorios en Ansys Maxwell.
3. Cambiar los parámetros de salida del transformador, variando la salida de voltaje.

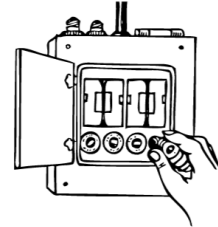


Ilustración 9.7. Práctica de laboratorio Transformador.

Con la guía de laboratorio y la práctica de laboratorio reúne toda la información relevante, permitiendo comunicar de manera clara la elaboración de un transformador y así mismo la creación de la práctica de laboratorio, en base a lo encontrado en la guía, pues sin la elaboración de un prototipo de simulación, no sería posible crear una práctica de laboratorio sin saber el funcionamiento de este en la herramienta Ansys Maxwell.

Para finalizar, la práctica de laboratorio de un transformador no habría sido posible sin las etapas anteriores, cada método otorgó información fundamental lo cual hizo posible una documentación comprensible para cualquier persona.

9.2.2. Practica de laboratorio Motor

En la práctica de laboratorio de un motor en Ansys Maxwell destaca la relevancia de explorar y examinar el comportamiento electromagnético de estos motores. Ansys Maxwell, una avanzada herramienta de simulación, provee recursos eficaces para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los motores síncronos, permitiendo optimizar su diseño y operación. En esta práctica, se busca analizar aspectos cruciales como la distribución del campo magnético, las pérdidas y la respuesta en frecuencia del motor, elementos fundamentales para comprender su funcionamiento y mejorar su eficiencia energética.

9.2.2.1. Objetivo de aprendizaje.

El objetivo se centra en proporcionar a los estudiantes una comprensión profunda de los motores síncronos y desarrollar habilidades prácticas en el uso del software de simulación electromagnética para analizar y simular motores síncronos.

Al completar esta práctica, los estudiantes adquirirán conocimientos sólidos sobre los motores síncronos y desarrollarán habilidades prácticas en el uso de software de simulación electromagnética para el análisis de sistemas eléctricos.

9.2.2.2. Análisis de los sistemas candidatos.

Hay varios tipos de motores síncronos que se utilizan en diferentes aplicaciones. Uno de ellos es el motor de imán permanente, que utiliza imanes permanentes en el rotor para generar el campo magnético. Este tipo de motor es altamente eficiente y se utiliza comúnmente en aplicaciones que requieren un control preciso de velocidad, como en máquinas herramienta y sistemas de posicionamiento.

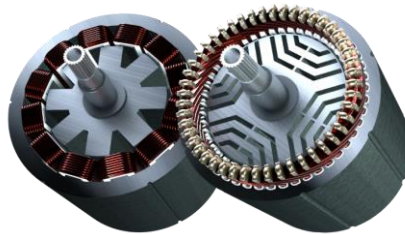


Ilustración 9.8. Tipos de motores síncronos.

Fuente: <https://oswos.com/es/motor-reluctancia/>
<https://oswos.com/wp-content/uploads/2022/03/motor-de-reluctancia.webp>

Otro tipo es el motor de reluctancia variable, que utiliza un rotor cuya reluctancia puede variar. Mediante la modificación de la geometría del rotor, se controla el campo magnético, lo que permite un control preciso de la velocidad y una alta capacidad de arranque. Estos motores son utilizados en aplicaciones que necesitan un rendimiento óptimo a velocidades variables, como compresores y bombas.

Asimismo, se encuentran los motores de jaula de ardilla, que tienen un rotor similar al utilizado en los motores asíncronos. Estos motores son altamente eficientes y se emplean comúnmente en aplicaciones industriales donde se necesita un funcionamiento confiable y un mantenimiento mínimo.

9.2.2.3. Selección del sistema.

El motor de referencia 4a80a4 es una elección idónea para simular en Ansys Maxwell gracias a su diseño y especificaciones bien conocidas. Al utilizar este motor como referencia, los estudiantes y profesores pueden obtener resultados precisos y confiables al modelar y analizar motores sincrónicos en el software.

La inclusión de este motor en las simulaciones permite una mejor comprensión de los principios de funcionamiento de los motores sincrónicos, así como la exploración de diversas configuraciones y parámetros. Además, al estar disponible como equipo de préstamo en los laboratorios de la universidad, los estudiantes pueden acceder fácilmente a este componente sin tener que adquirirlo individualmente.

9.2.2.4. Alcance.

La simulación de una máquina eléctrica como lo es el motor en Ansys Maxwell ofrece diversos alcances y posibilidades para el análisis de sistemas electromagnéticos.

Estos alcances comprenden los mismos que el transformador lo cuales son: Comportamiento electromagnético, eficiencia, estudio de pérdidas, Análisis de transitorios y estudio térmico. Sin embargo, no se van a observar de la misma manera, ya que el motor posee una máquina, estator y rotor, los parámetros mencionados comprenden un alcance diferente, en esta máquina también se va a comprender un alcance para la salida del motor, ya que se implementará un motor con unas características establecidas por el fabricante.

Obtener resultados similares del montaje experimental y la información recolectada en la selección del sistema.

9.2.2.5. Implementación del sistema.

Para la creación del motor seleccionado, se utilizan las dimensiones, características y propiedades específicas para iniciar la simulación.

Para esta etapa, se ha elaborado una guía de laboratorio con el objetivo de proporcionar instrucciones tanto para profesores como para estudiantes sobre el uso de la plataforma Ansys Maxwell y, al mismo tiempo, aprender sobre los fenómenos electromagnéticos presentes en las máquinas eléctricas. En esta sección de la metodología, se incluyen pruebas de la implementación del sistema seleccionado, como se muestra en la siguiente imagen del índice de la guía.

Las características principales de un motor son tipo de máquina, estator y rotor, cada una de estas contiene unos parámetros que al ser ajustados en su forma correcta otorgan la creación de un motor estable y con unas características de uso determinadas por la creación y datos que se analizaron en los pasos anteriores.

8. Parámetros del rotor

- Doble click en **Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Stacking Factor:** 0.95
- **Number of Slots:** 28
- **Outer Diameter:** 76
- **Inner Diameter:** 32
- **length:** 250
- **Steel Type:** D21_50
- **Cast Rotor:** check

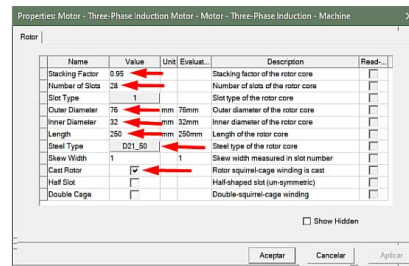
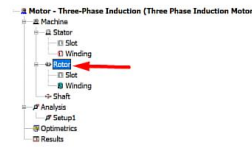


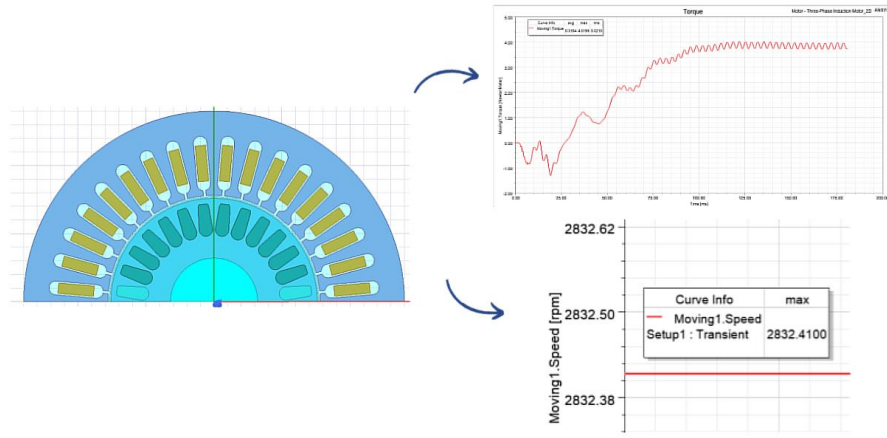
Ilustración 9.11. Parámetros del rotor, guía de laboratorio.

Si desea ver toda la implementación del sistema dirigirse al apartado de anexo “guía de laboratorio, guía de laboratorio Motor” en el cual se encuentra todo el proceso paso a paso del sistema.

9.2.2.6. Validación del sistema.

Basado en la implementación del motor y consultando la guía de laboratorio que proporciona una comprensión completa y paso a paso para crear un motor, se obtiene una respuesta positiva. Los resultados esperados son respuestas de torque y velocidad, como se observa en la ilustración 9.15. Al aplicar una tensión sinusoidal de entrada, se observa una salida correspondiente a un motor y cómo este puede interferir en el funcionamiento del motor.

12. Resultados del proyecto en 2D



17 Manual Ansys Febrero 02, 2023



Ilustración 9.12. Resultados obtenidos de motor, guía de laboratorio.

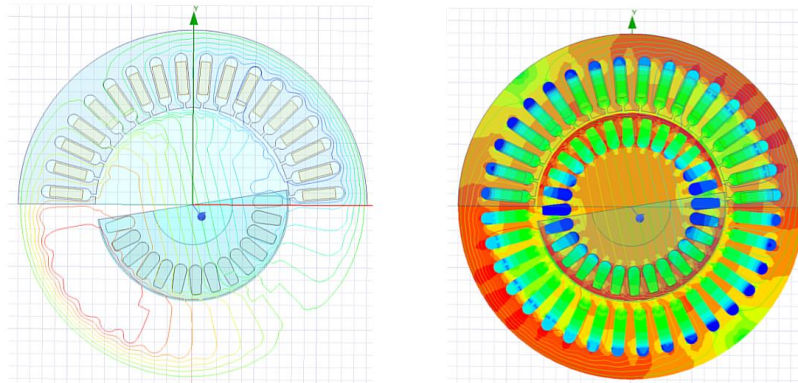
Se verifica la interpretación del resultado térmico, las líneas de flujo y el campo magnético, obteniendo resultados coherentes en comparación con los fundamentos teóricos.

Finalmente, se determina si la máquina eléctrica construida cumple con las expectativas y, con base en las observaciones y construcciones realizadas en la guía de laboratorio, se establece claramente que la implementación del motor en la herramienta informática Ansys Maxwell es correcta.

9.2.2.7. Interpretación de los resultados.

Basado en la implementación del motor y haciendo referencia a la guía de laboratorio que proporciona una comprensión completa y paso a paso de la creación de un motor, se obtiene un resultado positivo. Los resultados esperados son respuestas sinusoidales, como se observa en la ilustración 9.16. Además, el devanado con mayor número de vueltas desempeñará un papel crucial en el aumento o disminución de la señal de salida. Al aplicar una tensión sinusoidal de entrada, se observa una salida correspondiente a un motor y cómo el número de vueltas en el embobinado afecta dicha salida.

12. Resultados del proyecto en 2D



17 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 9.13. Resultados electromagnéticos motor, guía de laboratorio.

La ilustración 9.16 presenta un aporte significativo en términos del resultado térmico y línea de flujo, fenómenos electromagnéticos que no son perceptibles a simple vista. El fenómeno térmico puede ser cuantificado, pero a través del software Ansys Maxwell es posible visualizar los cambios térmicos que experimenta el motor durante su funcionamiento. Esto cumple con el objetivo de la práctica, obteniendo un mayor entendimiento en el manejo del software Ansys Maxwell y perfeccionar con el estudio de los fenómenos electromagnéticos presentes en las máquinas eléctricas.

9.2.2.8. Documentación.

Este apartado recopila la información obtenida en cada paso previo para la elaboración de la práctica de laboratorio. Se destaca el alcance de la herramienta computacional Ansys Maxwell y se crea un documento que establece el objetivo de la práctica, proporciona una introducción sobre lo que se realizará y finalmente detalla la práctica de laboratorio en cumplimiento del objetivo de la metodología.

3. Practica laboratorio

Con el material anterior relajar los siguientes ejercicios:

1. Simular un motor síncrono en Ansys Maxwell.
2. Replicar el motor síncrono existente de los laboratorios en Ansys Maxwell.
3. Cambiar los parámetros de salida del motor síncrono
4. Documentar los resultados obtenidos.



Ilustración 9.14. Practica de laboratorio motor.

La guía de laboratorio y la práctica de laboratorio combinan toda la información relevante, permitiendo comunicar de manera clara la elaboración de un motor y la creación de la práctica de laboratorio en función de lo descubierto en la guía. Sin la creación de un prototipo de simulación, no sería posible desarrollar una práctica de laboratorio sin un conocimiento previo sobre el funcionamiento del motor en la herramienta Ansys Maxwell.

9.2.3. Práctica de laboratorio Generador síncrono

La práctica de laboratorio de un generador síncrono en Ansys Maxwell destaca la relevancia de investigar y analizar el comportamiento electromagnético de estos dispositivos para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los generadores síncronos, permitiendo optimizar su diseño y operación. En esta práctica, se busca examinar aspectos como la distribución del campo magnético, las pérdidas, entradas y salidas del generador síncrono, elementos esenciales para comprender su funcionamiento y mejorar su eficiencia energética. El uso de Ansys Maxwell proporciona una plataforma virtual para llevar a cabo experimentos virtuales y obtener resultados precisos y detallados en el análisis de generadores síncronos.

9.2.3.1. Objetivo de aprendizaje.

El objetivo de aprendizaje es proveer a los estudiantes una comprensión profunda de los generadores síncronos y desarrollar habilidades prácticas en el uso del software de simulación electromagnética para analizar y diseñar generadores síncronos.

Al finalizar la práctica, los estudiantes habrán adquirido conocimientos sólidos sobre los generadores síncronos y desarrollado habilidades prácticas en el uso del software de simulación electromagnética. Esto les permitirá aplicar su conocimiento en el diseño y análisis de sistemas eléctricos, contribuyendo al desarrollo de generadores más eficientes y confiables en diversos ámbitos industriales.

9.2.3.2. Análisis de los sistemas candidatos.

Hay distintos tipos de generadores síncronos uno de ellos es el generador de imán permanente, el cual utiliza imanes permanentes en el rotor para generar el campo magnético. Estos generadores son altamente eficientes y se emplean comúnmente en sistemas de energía renovable, como parques eólicos y plantas solares, donde se requiere una producción estable de energía.



Ilustración 9.15. Generador síncrono.

Fuente: <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-7-seleccion-del-generator-electrico-parte-i/>

Otro tipo es el generador de excitación independiente, que utiliza una fuente externa para suministrar la corriente de excitación al rotor. Estos generadores ofrecen flexibilidad y se utilizan en aplicaciones que necesitan un control preciso de la frecuencia y el voltaje, como sistemas de respaldo de energía y plantas de cogeneración.

Además, se encuentran los generadores de jaula de ardilla, que poseen un rotor similar al de los motores de inducción. Estos generadores son robustos y se emplean en aplicaciones industriales donde se requiere alta confiabilidad y bajo mantenimiento, como en plantas de generación de energía y sistemas de emergencia.

9.2.3.3. Selección del sistema.

El generador síncrono de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás proporciona una fuente de energía eléctrica estable y constante, lo cual lo convierte en una opción adecuada para simular en Ansys Maxwell. Al utilizar este generador en las simulaciones, tanto estudiantes como profesores tienen la oportunidad de analizar y comprender mejor los principios de funcionamiento de los generadores síncronos, así como explorar diferentes configuraciones y parámetros.

La disponibilidad del generador síncrono como equipo de préstamo en los laboratorios de la universidad facilita su acceso sin necesidad de adquirir uno propio, lo que elimina barreras económicas y permite a los estudiantes experimentar con la simulación de generadores síncronos de manera más accesible.

9.2.3.4. Alcance.

Los alcances de esta simulación incluyen el comportamiento electromagnético, la eficiencia, el estudio de pérdidas, el análisis de transitorios y el estudio térmico.

A diferencia del transformador y motor, el generador síncrono consta de un estator y un rotor, lo que implica que los parámetros mencionados tienen un alcance distinto. En este caso, se busca comprender la entrada y salida del motor, ya que se implementará un motor con características predefinidas por el fabricante, sin modificar sus parámetros de funcionamiento. El objetivo es recrear una máquina eléctrica de un montaje experimental utilizando la herramienta de simulación Ansys Maxwell.

Se espera obtener resultados similares a los obtenidos en el montaje experimental y en la información recopilada durante la selección del sistema.

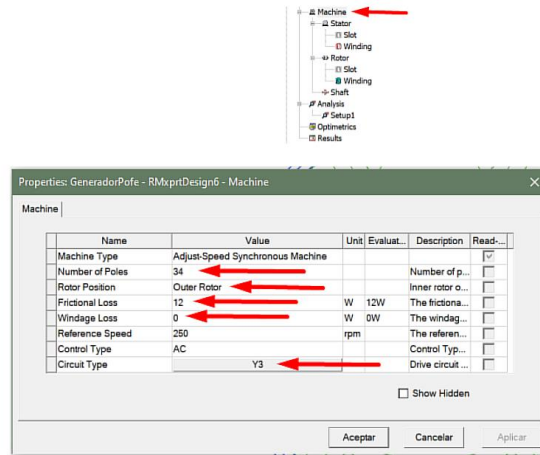
9.2.3.5. Implementación del sistema.

Para esta etapa, se ha elaborado una guía de laboratorio con el objetivo de proporcionar instrucciones tanto para profesores como para estudiantes sobre el uso de la plataforma Ansys Maxwell y, al mismo tiempo, aprender sobre los fenómenos electromagnéticos presentes en las máquinas eléctricas. En esta sección de la metodología, se incluyen pruebas de la implementación del sistema seleccionado, como se muestra en las siguientes ilustraciones.

4. Parámetros de la máquina

- Doble click en **Machine**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Number of poles:** 34
- **Rotor Position:** Outer Rotor
- **Frictional Loss:** 12
- **Windage Loss:** 0
- **Reference Speed:** 250



8 Manual Ansys Febrero 02, 2023

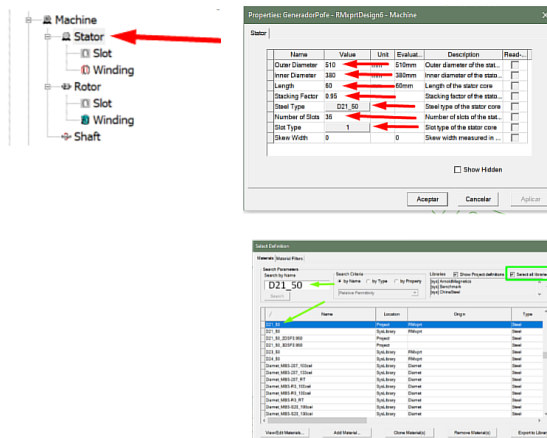
Ilustración 9.16. Parámetros de la máquina, guía de laboratorio generador síncrono.

En esta sección, se profundiza en las características y propiedades de un motor, y con base en ellas se desarrolla un conjunto de pasos para construir el generador síncrono.

5. Parámetros del estator

- Doble click en **Stator**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Outer Diameter:** 510
- **Inner Diameter:** 380
- **Length:** 60
- **Stracking Factor:** 0.95
- **Steel Type:** D21_50
- **Number of Slots:** 36
- **Slot Type:** 1
- **Skew Width:** 0



9 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 9.17. Parámetros del estator, guía de laboratorio generador síncrono.

Las características principales de un generador síncrono son tipo de máquina, estator y rotor, cada una de estas contiene unos parámetros que al ser ajustados en su forma correcta otorgan la creación de un generador síncrono estable y con unas características de uso determinadas por la creación y datos que se analizaron en los pasos anteriores.

7. Parámetros del embobinado del estator

- Click derecho en el la imagen del **Winding del Stator** y seleccionamos -> **Connect all coils**

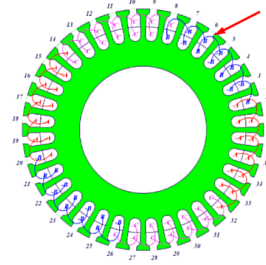
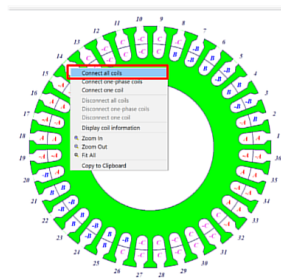
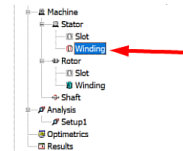


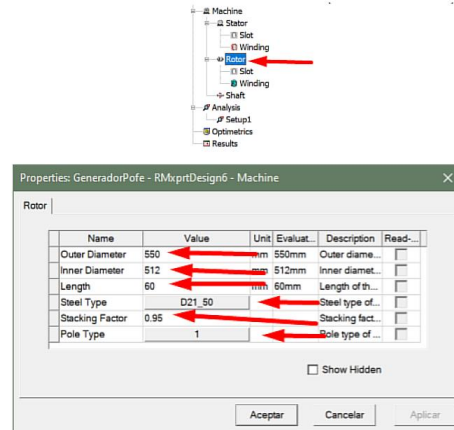
Ilustración 9.18. Parámetros de conexión del embobinado del motor, guía de laboratorio generador síncrono.

El generador síncrono contiene un embobinado diferente, ya que estos van a estar unidos entre sí, para la comunicación de energía que este va a entregar. El devanado como se muestra en la ilustración 9.18, muestra como se encuentra conectado el embobinado de un generador síncrono.

8. Parámetros del rotor

- Doble click en **Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Outer Diameter:** 550
- **Inner Diameter:** 512
- **Length:** 60
- **Steel Type:** D21_50
- **Stacking Factor:** 0.95
- **Pole Type:** 1



13 Manual Ansys Febrero 02, 2023

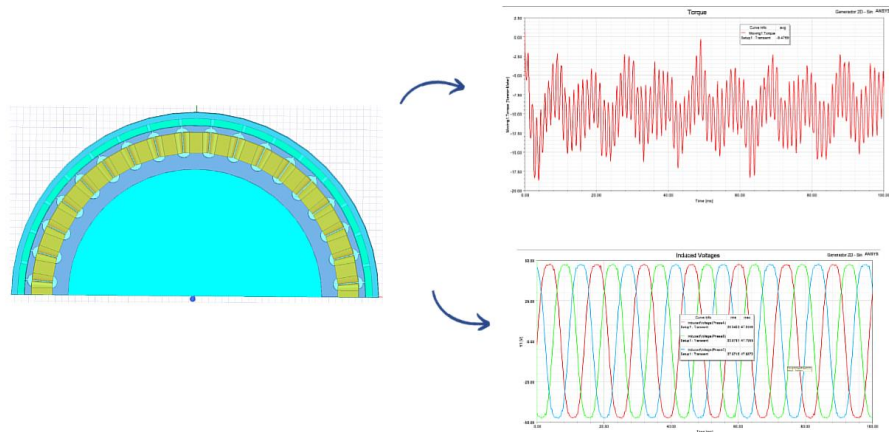
Ilustración 9.19. Parámetros del rotor, guía de laboratorio generador síncrono.

Si desea ver toda la implementación del sistema dirigirse al apartado de anexo “guía de laboratorio, guía de laboratorio Generador síncrono” en el cual se encuentra todo el proceso paso a paso del sistema.

9.2.3.6. Validación del sistema.

Basado en la implementación del motor y consultando la guía de laboratorio que proporciona una comprensión completa y paso a paso para crear un generador síncrono, se obtiene una respuesta positiva. Los resultados esperados son respuestas de torque y salidas de voltaje, como se observa en la ilustración 9.24. Al aplicar un torque de entrada, se observa una salida correspondiente a un generador síncrono.

14. Resultados del proyecto en 3D



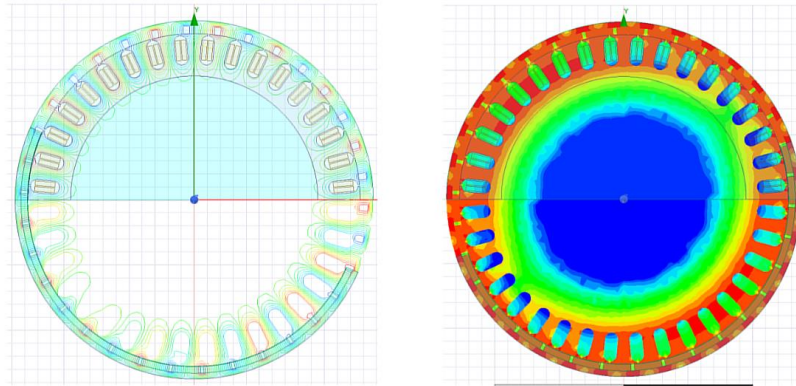
20 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 9.20. Resultados obtenidos de la guía de laboratorio generador síncrono.

9.2.3.7. Interpretación de los resultados.

Basado en la guía de laboratorio del generador síncrono y siguiendo las especificaciones que proporciona Ansys Maxwell, instrucciones detalladas sobre la creación de un generador síncrono, se logra obtener un resultado positivo. Los resultados esperados son respuestas sinusoidales, como se puede apreciar en la ilustración 9.24. La señal de salida del generador contiene tres señales desfasadas con respecto al torque de entrada implementado. Además, se observa que la construcción del generador y sus parámetros tienen un papel crucial en el incremento o decremento de la señal de salida. Se observa una salida correspondiente al generador síncrono y cómo el torque de entrada afecta dicha salida. Este experimento permite comprender la relación entre el torque de entrada y la respuesta del generador síncrono.

12. Resultados del proyecto en 2D



17 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 9.21. Resultados electromagnéticos obtenidos por la guía de laboratorio generador síncrono.

La ilustración 9.25 representa una contribución significativa en cuanto al rendimiento térmico y al flujo de energía, así como a los fenómenos electromagnéticos que no son visibles a simple vista. Aunque el fenómeno térmico puede ser medido, gracias al software Ansys Maxwell se pueden visualizar de manera más detallada los cambios de temperatura experimentados por el generador síncrono durante su funcionamiento. Esto resulta fundamental para lograr los objetivos de la práctica, que incluyen el desarrollo de un mayor entendimiento en el manejo del software Ansys Maxwell, así como el perfeccionamiento en el estudio de los fenómenos electromagnéticos presentes en las máquinas eléctricas.

9.2.3.8. Documentación.

Este apartado recopila la información obtenida en cada paso previo para la elaboración de la práctica de laboratorio. Se destaca el alcance de la herramienta computacional Ansys Maxwell y se crea un documento que establece el objetivo de la práctica, proporciona una introducción sobre lo que se realizará y finalmente detalla la práctica de laboratorio en cumplimiento del objetivo de la metodología.

3. Practica laboratorio

Con el material anterior relazar los siguientes ejercicios:

- 1.Simular un Generador síncrono en Ansys Maxwell.
- 2.Replicar el Generador síncrono existente de los laboratorios en Ansys Maxwell.
- 3.Cambiar los parámetros de salida del Generador síncrono.
- 4.Documentar los resultados obtenidos.



Ilustración 9.22. Practica de laboratorio generador síncrono.

La guía de laboratorio y la práctica de laboratorio combinan toda la información relevante, permitiendo comunicar de manera clara la elaboración de un generador síncrono y la creación de la práctica de laboratorio en función de lo descubierto en la guía. Sin la creación de un prototipo de simulación, no sería posible desarrollar una práctica de laboratorio sin un conocimiento previo sobre el funcionamiento del generador en la herramienta Ansys Maxwell.

En conclusión, la práctica de laboratorio sobre el generador síncrono no habría sido posible sin las etapas previas. Cada método proporcionó información fundamental que permitió una documentación comprensible para cualquier persona.

10. Resultados y Discusión

La sección de Resultados y Discusión examina en detalle los descubrimientos obtenidos al implementar la metodología propuesta para prácticas de laboratorio en Ansys Maxwell. Los datos recopilados revelan que la metodología es altamente efectiva para lograr los objetivos establecidos. Se observó una mejora significativa tanto en la eficiencia de las prácticas de laboratorio como en la calidad de los resultados obtenidos. Además, se redujo considerablemente el tiempo necesario para completar cada práctica, lo que aumenta la productividad.

En resumen, los resultados respaldan la eficacia de la metodología propuesta y proporcionan una base sólida para su aplicación en entornos de laboratorio utilizando Ansys Maxwell. Estos hallazgos tienen un impacto significativo en el avance de la enseñanza y la investigación. Esta sección examina los datos recopilados y presenta los resultados obtenidos durante la implementación y evaluación de la metodología propuesta.

10.1. Comparación del Transformador vs Montaje experimental

En esta investigación se realiza una comparación entre la simulación de un transformador utilizando Ansys Maxwell y un montaje experimental, con el propósito de evaluar la efectividad y la exactitud de la simulación en relación a los resultados obtenidos experimentalmente. El objetivo principal es establecer una metodología para prácticas de laboratorio en Ansys Maxwell, que brinde a los estudiantes una experiencia integral y combinada de aprendizaje teórico y práctico en el campo de los transformadores eléctricos. Esta comparación permitirá establecer las ventajas y limitaciones de cada uno de los sistemas evaluados.

10.1.1. Resultados obtenidos

10.1.1.1. Montaje Experimental:

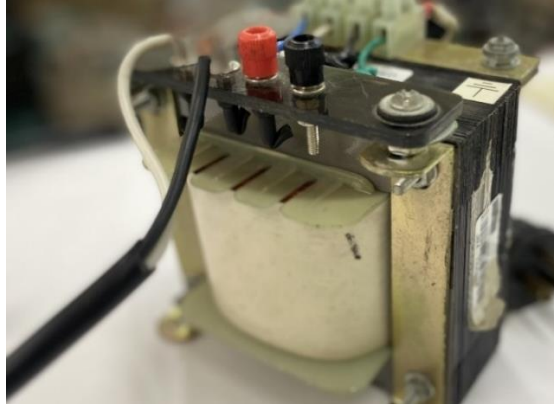


Ilustración 10.1. Transformador monofásico, montaje experimental.



Ilustración 10.2. Resultado transformador monofásico (entrada de 156 V pico a pico y salida 288 V pico a pico), montaje experimental.

10.1.1.2. Simulación Transformador:

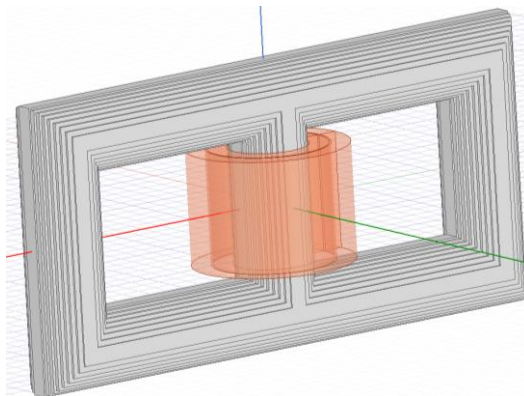


Ilustración 10.3. Transformador monofásico, simulación Ansys Maxwell.

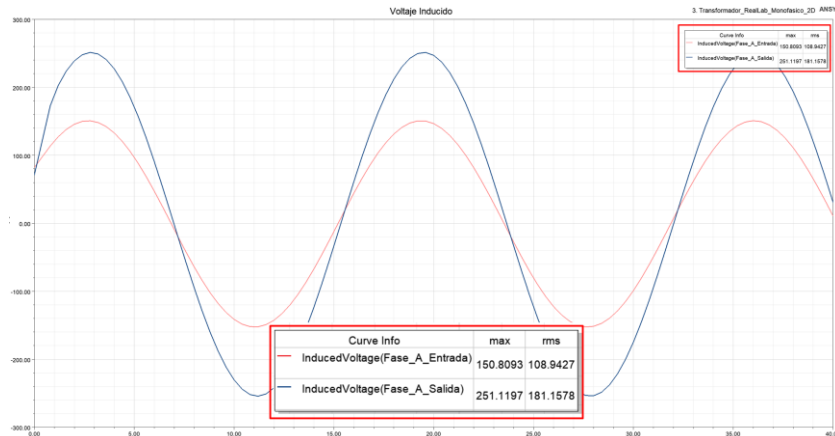


Ilustración 10.4. Resultado transformador monofásico (entrada de 150 V pico a pico y salida 251 V pico a pico), simulación Ansys Maxwell.

10.1.1.3. Interpretación de los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en ambos enfoques, simulación y montaje experimental, mostraron una estrecha concordancia y coincidencia. Las predicciones de la simulación se alinearon de manera consistente con los datos recopilados en el montaje experimental, lo que indica que el modelo utilizado en la simulación fue altamente preciso y confiable para representar el comportamiento del transformador.

En este caso, el valor experimental es de 288 V y el valor simulado es de 251 V. Sustituyendo estos valores en la fórmula, obtenemos:

$$\text{Porcentaje de error} = | (288 - 251) / 288 | * 100 \approx 13.19\%$$

Por lo tanto, el porcentaje de error de la simulación en Ansys Maxwell en comparación con el montaje experimental es de aproximadamente 13.19%. Esto indica que la simulación tiene un error del 13.19% en relación con los resultados experimentales obtenidos.

Estos resultados comparados respaldan la validez y utilidad de la simulación en Ansys Maxwell como una herramienta efectiva para el diseño y análisis de transformadores. El uso de simulaciones virtuales para predecir y validar el rendimiento de los transformadores ofrece una alternativa más rápida, económica y segura para el desarrollo y optimización de estos dispositivos electromagnéticos.

10.2. Comparación del motor vs Montaje experimental

Se realiza una comparación entre la simulación de un motor mediante Ansys Maxwell y un montaje experimental, con el propósito de evaluar la efectividad y precisión de la simulación en relación a los resultados obtenidos

experimentalmente. El objetivo principal es establecer una metodología para prácticas de laboratorio en Ansys Maxwell. Esta comparación permitirá identificar las ventajas y limitaciones de cada enfoque, proporcionando una enseñanza para la generación de actividades de laboratorio centradas en la simulación de motores síncronos utilizando Ansys Maxwell.

10.2.1. Resultados obtenidos

10.2.1.1. Montaje Experimental:

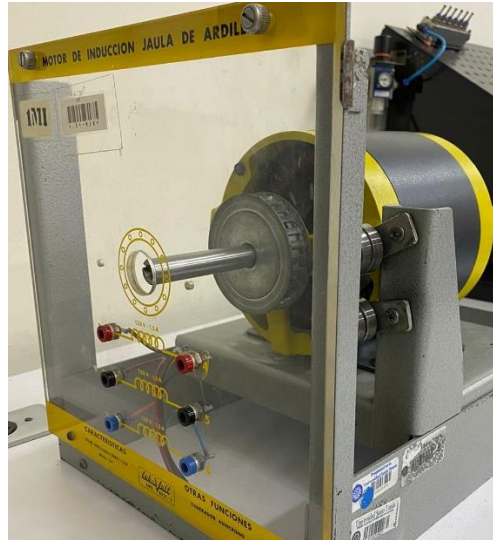


Ilustración 10.5. Montaje experimental Motor.

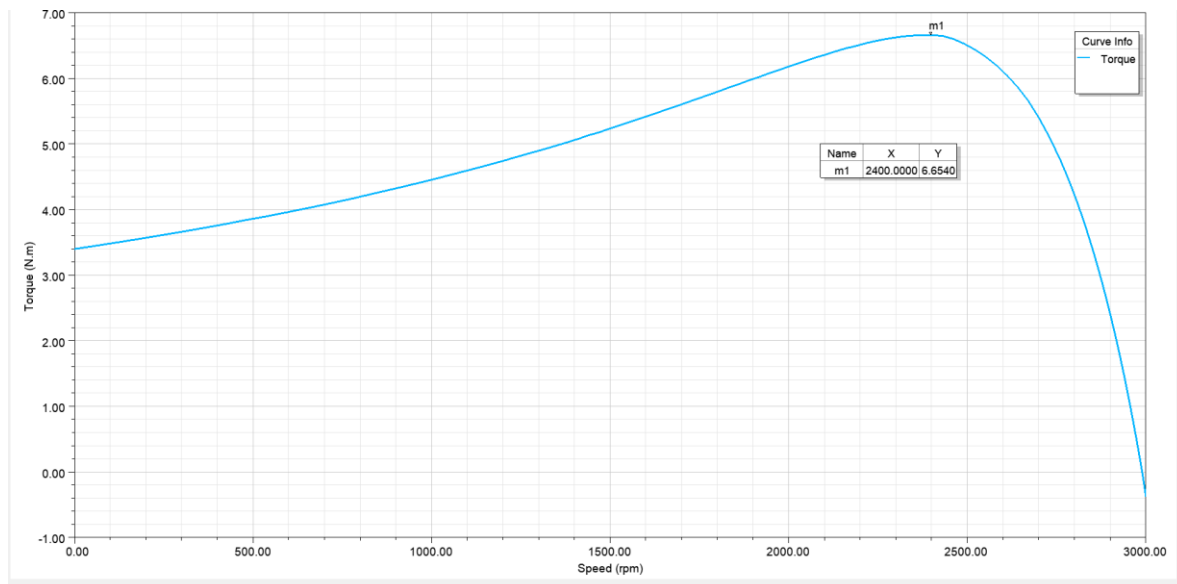


Ilustración 10.6. Resultado de torque motor (Punto máximo del torque 2.400 Nm), montaje experimental.



Ilustración 10.7. Resultado velocidad Motor (1776 Rpm), montaje experimental.

10.2.1.2. Simulación Motor:

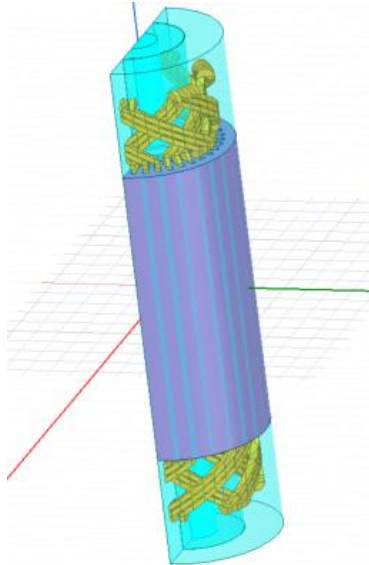


Ilustración 10.8. Motor, simulación Ansys Maxwell.

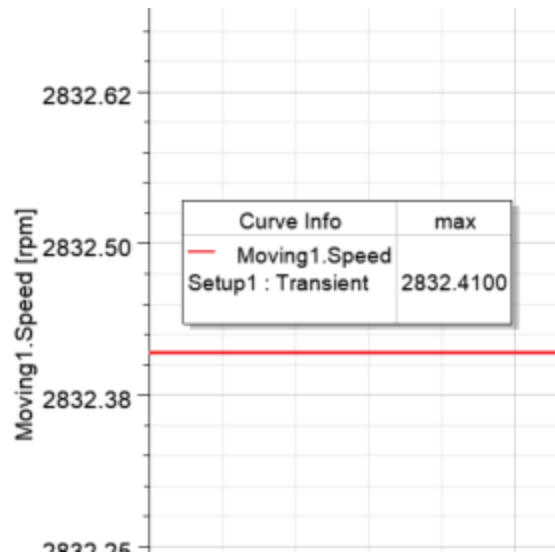


Ilustración 10.9. Resultado velocidad Motor (2832.4100 Rpm), simulación Ansys Maxwell.

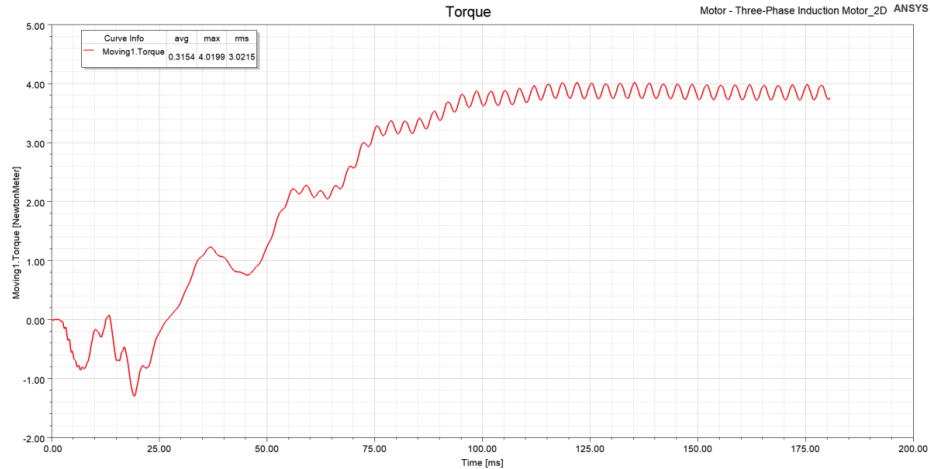


Ilustración 10.10. Resultado de torque Motor (4.0199Nm), simulación Ansys Maxwell.

10.2.1.3. Interpretación de los resultados obtenidos

La simulación en Ansys Maxwell como el montaje experimental de un motor demostraron resultados exitosos y comparables entre sí. En la simulación, se utilizó el software Ansys Maxwell para modelar y analizar virtualmente el comportamiento del motor, calculando de manera precisa sus propiedades electromagnéticas, flujo de corriente y rendimiento. Por otro lado, en el montaje experimental se construyó y probó físicamente un motor, midiendo variables como el par motor, la eficiencia y la velocidad de rotación.

Los resultados obtenidos en ambos enfoques, simulación y montaje experimental, mostraron una estrecha correspondencia y concordancia. Las predicciones de la simulación se alinearon de manera consistente con los datos obtenidos en el montaje experimental, lo que demuestra la alta precisión y confiabilidad del modelo utilizado en la simulación para representar el comportamiento del motor.

En este caso, el valor experimental es de 1776 Rpm y el valor simulado es de 1450 Rpm. Sustituyendo estos valores en la fórmula, obtenemos:

$$\text{Porcentaje de error} = |(1450 - 1776) / 1776| * 100 \approx 18.35\%$$

Por lo tanto, el porcentaje de error de la simulación en Ansys Maxwell en comparación con el montaje experimental es de aproximadamente 18.35%. Esto indica que la simulación tiene un error del 18.35% en relación con los resultados experimentales obtenidos.

Estos resultados comparados respaldan la validez y utilidad de la simulación en Ansys Maxwell como una herramienta efectiva para el diseño y análisis de motores síncronos. El uso de simulaciones virtuales para predecir y validar el rendimiento de

los motores ofrece una alternativa más rápida, económica y segura para el desarrollo y optimización de estos dispositivos electromecánicos.

10.3. Comparación del generador síncrono vs Montaje experimental

En este apartado se realiza una comparación entre la simulación de un generador síncrono utilizando Ansys Maxwell y un montaje experimental. El objetivo es evaluar la efectividad y precisión de la simulación en relación a los resultados obtenidos experimentalmente. El propósito principal es brindar a los estudiantes una experiencia completa y práctica en el campo de los generadores síncronos, mejorando su comprensión teórica y aplicada. Esta comparación permitirá identificar las fortalezas y limitaciones de cada enfoque.

10.3.1. Resultados obtenidos

10.3.1.1. Montaje Experimental:



Ilustración 10.11. Montaje experimental generador síncrono.

Tabla 10.1. Caracterización del generador síncrono, corriente de entrada (Amp) contra voltaje de salida (V).

N°	Corriente (Amp)	VOLTAJE (V)
1	0,02	7,1
2	0,04	14,3
3	0,07	21,1
4	0,09	28,1
5	0,12	35,2
6	0,14	42,2
7	0,17	49,2

8	0,2	56,1
9	0,23	63,2
10	0,26	70
11	0,29	77,1
12	0,33	84
13	0,37	91,2
14	0,41	98,2
15	0,45	105,1
16	0,51	112,2
17	0,57	119,1
18	0,64	126
19	0,74	133,2
20	0,84	140

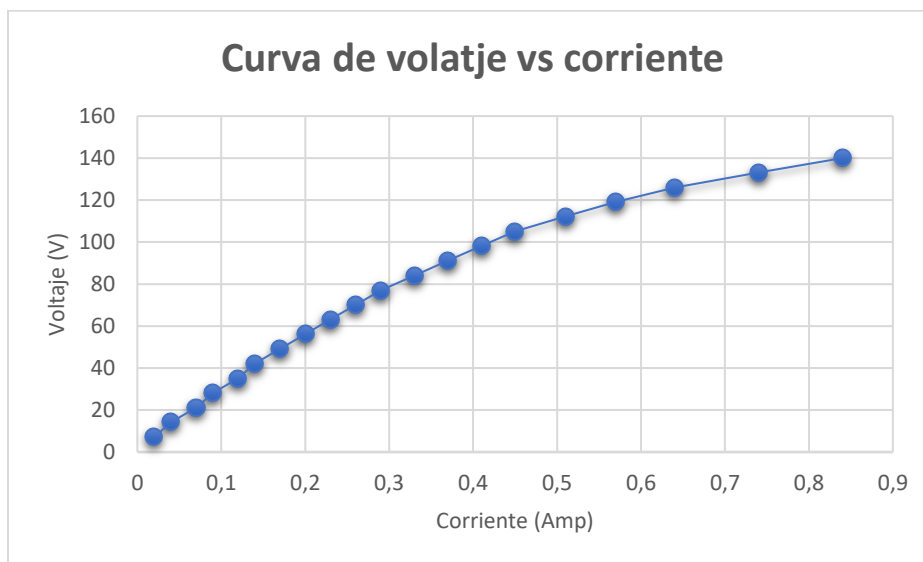


Ilustración 10.12. Gráfico caracterización máquina síncrona o generador síncrono.

10.3.1.2. Simulación Generador síncrono:

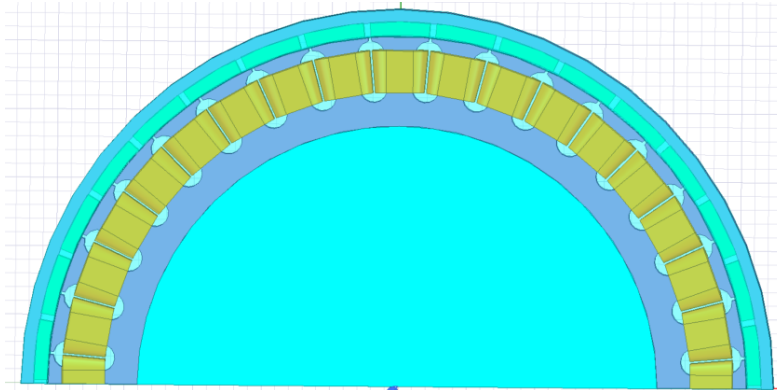


Ilustración 10.13. Generador síncrono, simulación Ansys Maxwell.

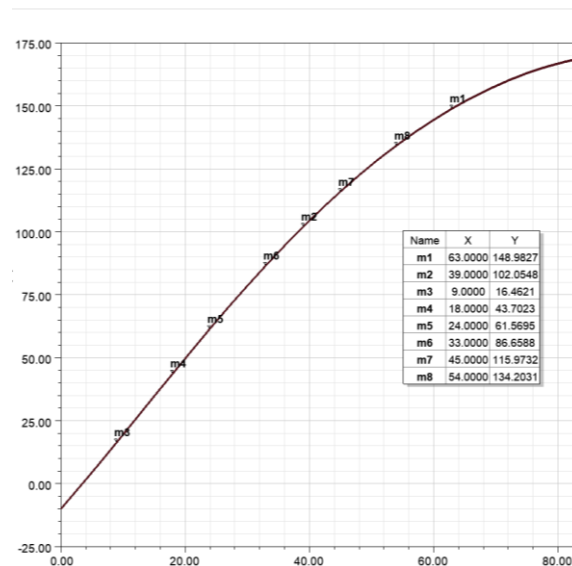


Ilustración 10.14. Resultado caracterización Generador síncrono, simulación Ansys Maxwell.

10.3.1.3. Interpretación de los resultados obtenidos

La simulación en Ansys Maxwell como el montaje experimental de un generador síncrono mostraron resultados exitosos y comparables entre sí. En la simulación, se utilizó el software Ansys Maxwell para modelar y analizar virtualmente el comportamiento del generador, calculando con precisión las propiedades electromagnéticas, el flujo de corriente y el rendimiento del generador síncrono. Por otro lado, en el montaje experimental se construyó un generador síncrono físico y se llevaron a cabo mediciones y pruebas prácticas para evaluar su rendimiento, incluyendo la potencia generada, la eficiencia y la respuesta a cargas variables.

En este caso, el valor experimental es de 0.63 V y el valor simulado es de 0.8 V. Sustituyendo estos valores en la fórmula, obtenemos:

$$\text{Porcentaje de error} = | (0.8 - 0.63) / 0.63 | * 100 \approx 26.984\%$$

Por lo tanto, el porcentaje de error de la simulación en Ansys Maxwell en comparación con el montaje experimental es de aproximadamente 26.984%. Esto indica que la simulación tiene un error del 26.984% en relación con los resultados experimentales obtenidos.

Los resultados obtenidos en ambos enfoques, simulación y montaje experimental, mostraron una estrecha correspondencia y coincidencia. Las predicciones de la simulación se alinearon consistentemente con los datos obtenidos en el montaje experimental, lo que demuestra la alta precisión y confiabilidad del modelo utilizado en la simulación para representar el comportamiento del generador síncrono.

Estos resultados comparados respaldan la validez y utilidad de la simulación en Ansys Maxwell como una herramienta efectiva para el diseño y análisis de generadores síncronos. El uso de simulaciones virtuales para predecir y validar el rendimiento de los generadores ofrece una alternativa más rápida, económica y segura para el desarrollo y optimización de estos dispositivos electromecánicos.

11. Conclusiones y Trabajos futuros

La metodología obtuvo una gran importancia en la ingeniería electrónica, ya que brinda a los estudiantes de la Universidad Santo Tomás una experiencia de laboratorio más enriquecedora y efectiva. La metodología es un instrumento valioso en el aprendizaje de los conceptos teóricos en un entorno práctico.

En relación a los trabajos futuros, se proponen diversas líneas de investigación. Entre ellas se encuentra explorar la adaptación de la metodología a otras herramientas de simulación electromagnética o a diferentes áreas de ingeniería. Asimismo, resulta interesante evaluar la implementación de la metodología en entornos educativos más amplios y analizar su impacto en el rendimiento y la comprensión de los estudiantes.

En resumen, la metodología desarrollada para prácticas de laboratorio en Ansys Maxwell ha demostrado ser altamente efectiva y beneficiosa. Resaltando los logros obtenidos y sugieren futuras investigaciones prometedoras que amplíen y mejoren aún más la metodología.

11.1. Conclusiones

En la simulación 2D de un transformador según su núcleo tendrá efectos diferentes en el estudio de fenómenos electromagnéticos, ya que se realiza una prueba de un transformador con un núcleo cortado a la mitad y su salida no tiene como garantía una amplificación o disminución de voltaje, si no la pérdida de material con respecto a los embobinados construidos.

Ansys Maxwell proporciona libertad de construcción referente a las máquinas eléctricas, sin embargo, si contiene unas validaciones en la construcción por coherencia y por tiempos de ejecución de la simulación.

Ansys Maxwell identifica problemas de diseño, como puntos de sobrecalentamiento, zonas con alto campo magnético y puntos críticos de tensión. La herramienta posee un manejo intuitivo con el usuario, lo que permitió evaluar el impacto del rendimiento de máquinas eléctricas en simulación con mayor facilidad, con parámetros ajustables como variable y generando varios posibles eventos que pueden llegarse a presentar en una práctica de laboratorio, en un solo proyecto.

Las tres simulaciones de máquinas eléctricas permitieron medir la distribución de los fenómenos electromagnéticos presentes en estas, no obstante, la visualización por animación que contiene el software Ansys Maxwell otorgó el entendimiento y recreación real del comportamiento de los fenómenos electromagnéticos como lo son las líneas de flujo, campo magnético, eficiencia y temperatura en las tres máquinas eléctricas recreadas.

Actualmente no ha sido posible recrear en su totalidad una máquina eléctrica contenida en los laboratorios de ingeniería electrónica de la universidad Santo Tomás, ya que Ansys Maxwell posee sus propias características de diseño y simulación. La recreación exacta de una máquina eléctrica del laboratorio de la universidad Santo Tomás debería generarse en un supercomputador.

La comparación entre los diseños de simulación realizados en el programa Ansys Maxwell y los montajes experimentales contienen un desfase ideal, lo que quiere decir que el software a pesar de presentarse como una plataforma donde recrear máquinas eléctricas de forma real no deja de ser un software de simulación que genera parámetros ideales.

11.2. Trabajos futuros

La culminación de este proyecto de grado abre el camino hacia nuevas oportunidades de investigación de las simulaciones en Ansys Maxwell. A pesar de los progresos notables que se han alcanzado en el entendimiento y aplicación de las simulaciones electromagnéticas con este software, todavía hay varios aspectos y enfoques que pueden ser explorados en trabajos futuros para ampliar el conocimiento y abordar desafíos adicionales.

Uno de los caminos a seguir es la mejora y perfeccionamiento de los modelos de simulación utilizados en este proyecto. A medida que surjan nuevas investigaciones y se desarrollen tecnologías más avanzadas, es necesario actualizar y adaptar los modelos existentes para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados.

Es importante explorar la aplicación de Ansys Maxwell en las diferentes áreas de la ingeniería electrónica. Este proyecto de grado se ha centrado en la asignatura conversión electromagnética, existen numerosas aplicaciones en otras ramas de la ingeniería electrónica que podrían beneficiarse del uso de simulaciones en Ansys Maxwell. Los trabajos futuros podrían investigar la modelización de sistemas de potencia, la simulación de dispositivos electrónicos de alta frecuencia o la optimización de componentes electromagnéticos.

Asimismo, sería interesante realizar estudios comparativos entre Ansys Maxwell y otros softwares de simulación electromagnética disponibles en el mercado. Esto permitiría evaluar y comparar las capacidades, eficiencia y precisión de diferentes herramientas, proporcionando información valiosa para profesionales e investigadores que buscan seleccionar la mejor opción para sus aplicaciones específicas.

Dado que el proyecto de grado actual tiene un alcance limitado, existen varios proyectos a futuro con Ansys Maxwell, no solo enfocado a la ingeniería electrónica también es aplicable a otras ingenierías que consten de resultados de simulación para fenómenos físicos.

- Realización de simulación de sensores y actuadores, para corroborar las pérdidas de material, cálculos de error, aplicaciones de control y automatización industrial. Todo enfocado a oportunidades laborales.
- Diseño de simulación de transformadores para generar especialistas en análisis de sistemas eléctricos.
- Elaboración de nuevas simulaciones en programas similares para la corroboración de veracidad y calidad de Ansys Maxwell.
- Simulación de circuitos eléctricos, para el uso cotidiano en las prácticas de laboratorio.
- Diseño de dispositivos médicos, lo que se enfoca en la ingeniería biomédica e ingenieros especialistas en sistemas de diagnóstico y tratamiento.

La finalización de este proyecto de grado abre diversas oportunidades para futuras investigaciones en las simulaciones en Ansys Maxwell. Los trabajos futuros pueden incluir la mejora de modelos de simulación, la exploración de nuevas aplicaciones, comparaciones con otros softwares y la integración multidisciplinaria. Estas líneas de investigación prometen contribuir al avance de la ingeniería eléctrica y electrónica, y aprovechar al máximo las capacidades de este poderoso software de simulación electromagnética.

12. Anexos

En el apartado de Anexos se encuentran insertadas las imágenes de la guía de instalación del software, guías de laboratorio de las tres máquinas eléctricas y las tres prácticas de laboratorio propuestas.

12.1. Guía de instalación Ansys Maxwell (Estudiantes)

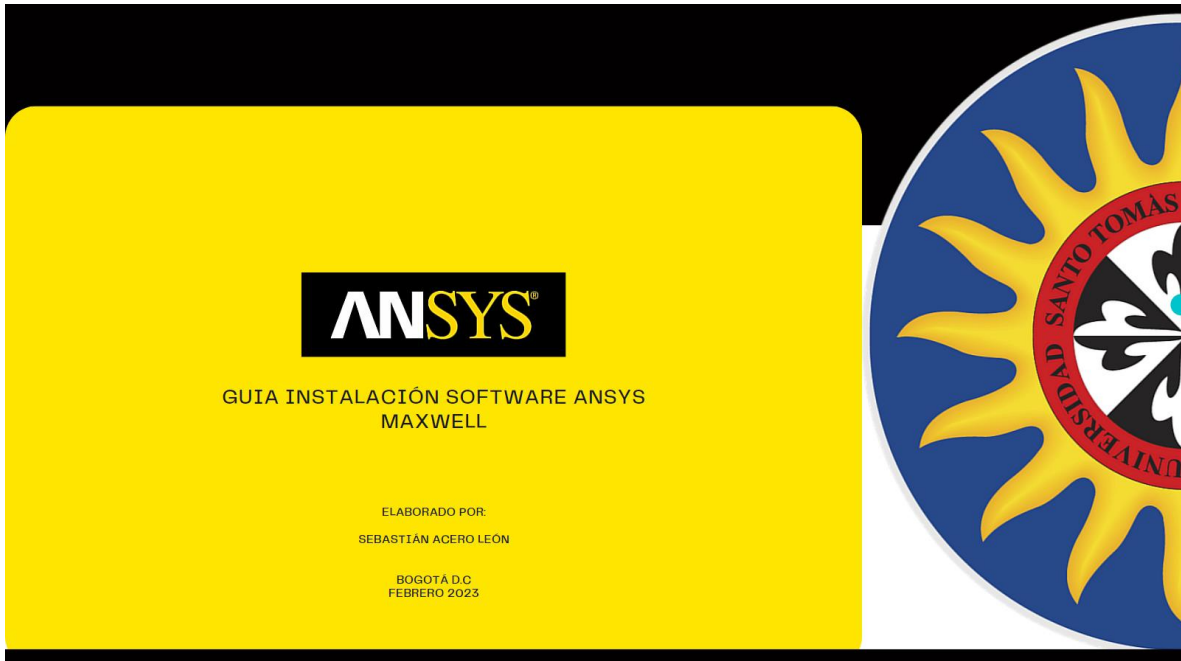


Ilustración 12.1. Portada guía de instalación software Ansys Maxwell.

Índice

1. Introducción.
2. Descarga.
3. Instalación.
4. Ansys Electronics Students



Ilustración 12.2. Índice guía de instalación del software Ansys Maxwell.

1. Introducción

- En esta guía se encontrará la información necesaria para poder realizar la correcta instalación del software ANSYS Maxwell, el cual se va a necesitar para realizar las simulaciones de las clases posteriores hasta llegar a la simulación de un motor.

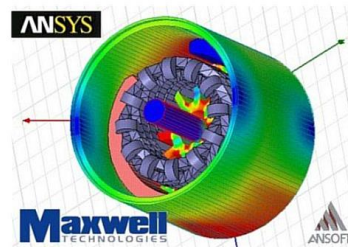


Ilustración 12.3. Introducción guía de instalación del software Ansys Maxwell.

2. Descarga

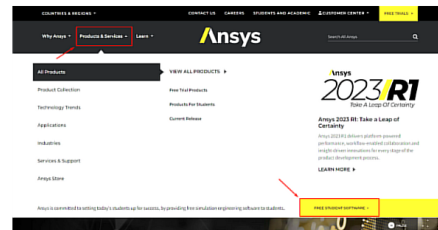
- **Link pagina principal**

- Ingresar a la pagina principal de Ansys <https://www.ansys.com>.



- **Instalación**

- Seleccionar "Products & Services"
- Hacer Click en el cuadro "FREE STUDENT SOFTWARE"



6 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.4. Link de descarga del software Ansys Maxwell.

3. Instalación

- **Sección de versión**

- Seleccionar "Ansys Electronics Desktop Student"
- Click en "FREE DOWNLOAD NOW"

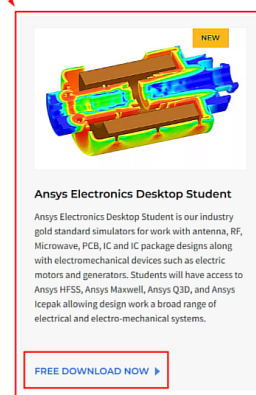
Ansys Electronics Desktop Student - Free Software Download

Ansys Electronics Desktop Student offers free access to the industry gold-standard Ansys simulators for work with antenna, RF, microwave, PCB, IC and IC package designs, along with electromechanical devices such as electric motors and generators. Students will have access to Ansys HFSS, Ansys Maxwell, Ansys Q3D, and Ansys Icepak, allowing design work on a broad range of electrical and electromechanical systems. Ansys HFSS is a multipurpose, full-wave 3D electromagnetic (EM) simulation software. Ansys Maxwell is a 3D electromagnetic simulation solver for electric machines and electromechanical devices. Ansys Q3D Extractor calculates the parasitic parameters of resistance, inductance, capacitance and conductance (RLCG) for electronics designs. Ansys Icepak is a computational fluid dynamics (CFD) solver for electronics thermal management.

Terms of Use: Free student downloads are for educational use only and may only be used for self-learning, student instruction, student projects, and student demonstrations.

[DOWNLOAD ANSYS ELECTRONICS DESKTOP STUDENT 2022 R2](#)

(Built-in license valid until 07/31/23)



7 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.5. Sección de versiones del software Ansys Maxwell.

3. Instalación

- Crear una carpeta ya que se van a descomprimir todos los archivos en dicha carpeta.
- Dentro de la carpeta Ansys, descomprimir el archivo descargado.
- Finalizado los pasos anteriores, entrar a la carpeta "Prerequisites", se visualizan 4 carpetas más, entrar a cada una y ejecutar la instalación de cada framework. (Nota: Si ya se tiene una versión posterior de los frameworks no devolver versión de estos).

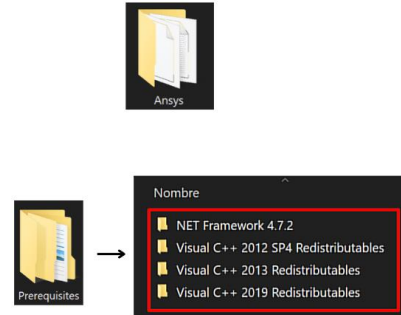


Ilustración 12.6. Pre requisitos para la instalación del software Ansys Maxwell.

3. Instalación

- Seleccionar la carpeta "AnsysEMSV" en la cual se encuentra el instalador del software Ansys.
- Ejecutar el archivo "Setup.exe".
- Empezará la descarga del programa en una ventana emergente, seleccionar next y esperamos que se instale el software Ansys Electronic Students.

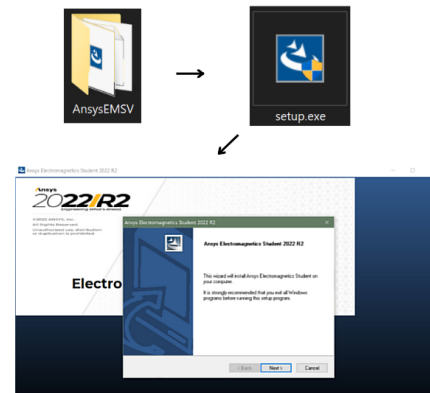


Ilustración 12.7. instalación del software Ansys Maxwell.

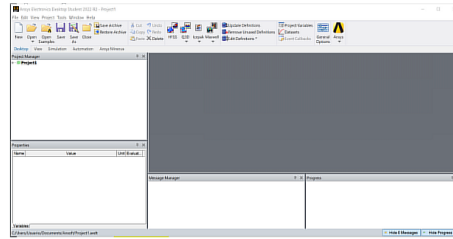
4. Ansys Electronics Students

- **Ansys Electronics Student**

– En el buscador escribir "Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2" y ejecutar el programa.



– Aspecto de la herramienta ANSYS Maxwell cuando es ejecutada.



12.2. Guías de laboratorio

En este apartado se encuentran las guías de laboratorio implementadas para el desarrollo de las prácticas.

12.2.1. Guía de laboratorio Transformador



Ilustración 12.9. Portada guía de laboratorio creación de un transformador en 3D.

Índice

1. Elaboración de un Transformador 3D – Ansys Maxwell.
2. Simulación en 3D.
3. Creación proyecto.
4. Creación de sólido.
5. Creación del embobinado.
6. Creación de la región.
7. Resultados.



Ilustración 12.10. Índice guía de laboratorio creación de un transformador en 3D.

2. Creación proyecto

• Nuevo proyecto

- Nuevo proyecto en **New**.
- Seleccionar en el **menú Maxwell** y elegir **"Maxwell 3D"** para este proyecto. Generará un proyecto nuevo.

• Selección del plano cartesiano

- Seleccionar en el menú el ítem **Maxwell 3D -> Solution Type**.
- En la ventana emergente seleccionar:
 1. Magnetic: **Transient**.
- Clic en **"OK"**

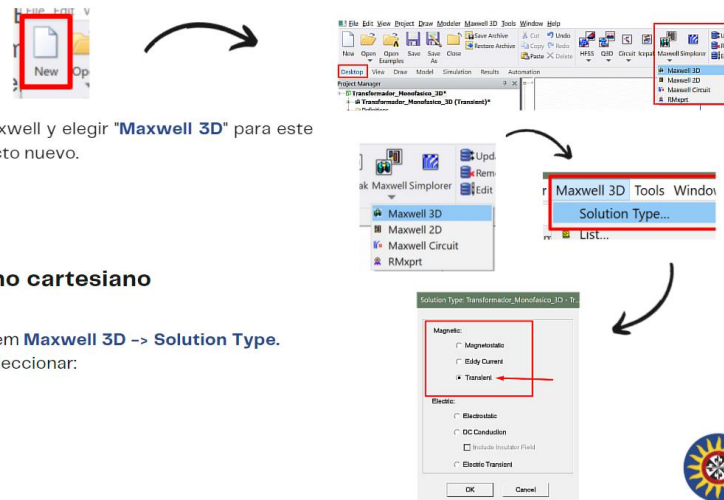


Ilustración 12.11. Creación proyecto, transformador en 3D.

3. Creación del sólido

- Seleccionar en el menú **Draw** -> **Use Defined Primitive** -> **RMrpt** -> **TransCore**
- En la ventana emergente dejar los parámetros por defecto.
- Clic en **"OK"**

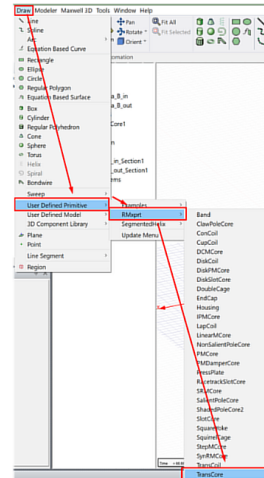
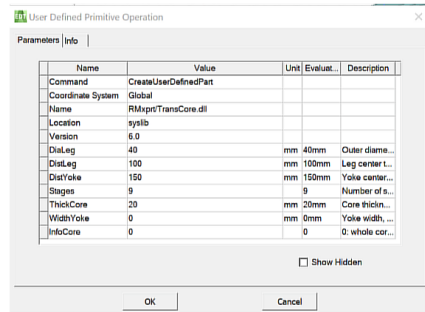


Ilustración 12.12. Creación del sólido, transformador en 3D.

3. Creación del sólido

- Seleccionar el núcleo para cambiar sus propiedades:
 - Name: **Núcleo**.
 - Material: **M15_29G**.
 - Color: **Gris**.

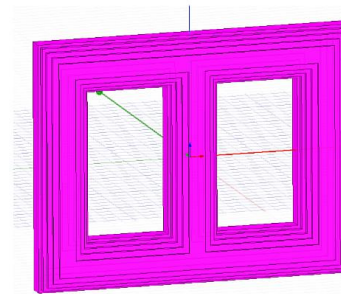
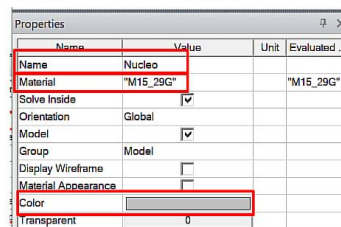
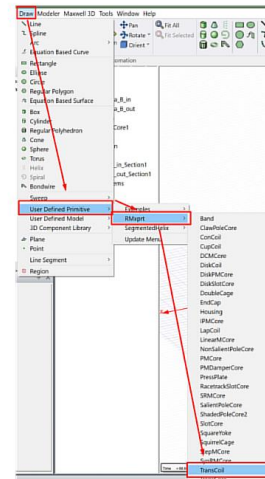
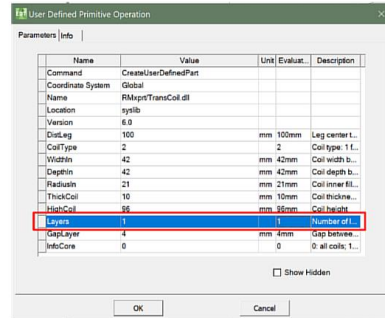


Ilustración 12.13. Propiedades del sólido, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Crear el embobinado en la opción **Draw** -> **Use Defined Primitive** -> **RMPrpt** -> **TransCoil**.
- Se cambia el parámetro **Layers** -> **1**



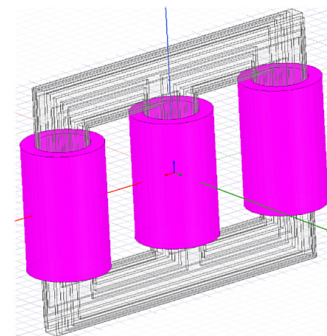
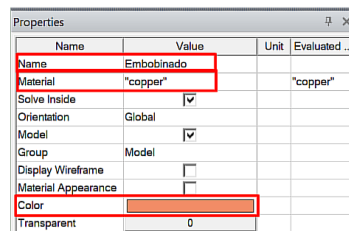
10 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.14. Creación del embobinado, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar el embobinado para cambiar las propiedades:

- Name: **Embobinado**.
- Material: **Copper**.
- Color: **Naranja**.



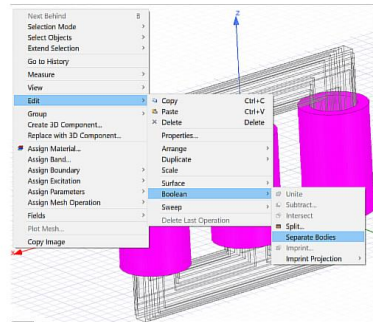
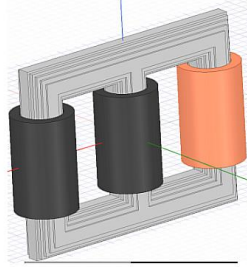
11 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.15. Propiedades del embobinado, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar los embobinados y realizar la separación de estos.
- Click derecho **Edit** -> **Boolean** -> **Separate Bodies**.
- Seleccionar las propiedades de los nuevos cuerpos que aparecen en color negro y renombrar de izquierda a derecha con el nombre:

- 1.Bobina_A_in
- 2.Bobina_B_in
- 3.Bobina_C_in



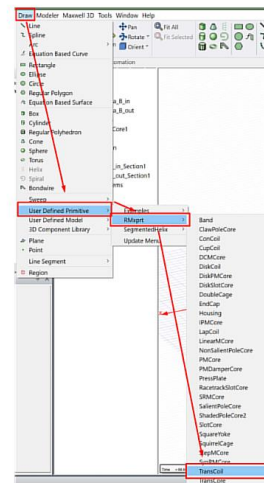
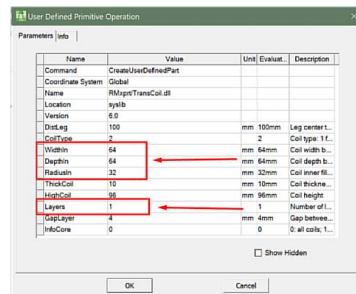
12 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.16. Separación de los embobinados, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar crear un **TransCoil** y otorgar las siguientes propiedades:

- 1.Widthin: **64**
- 2.Depthin: **64**
- 3.Radiusin: **32**



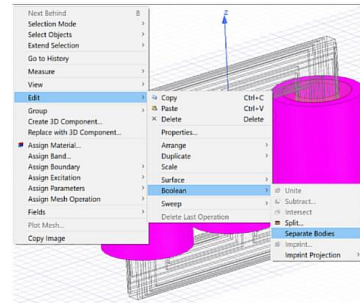
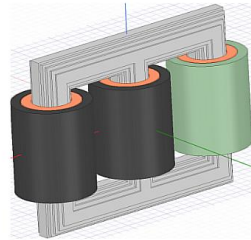
13 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.17. Creación del embobinado secundario, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar los embobinados para la separación de cuerpos.
- Clic derecho **Edit** -> **Boolean** -> **Separate Bodies**.
- Nuevamente dar las propiedades de embobinado a los cuerpos que aparecen de color negro y renómbrales de izquierda a derecha con el nombre:

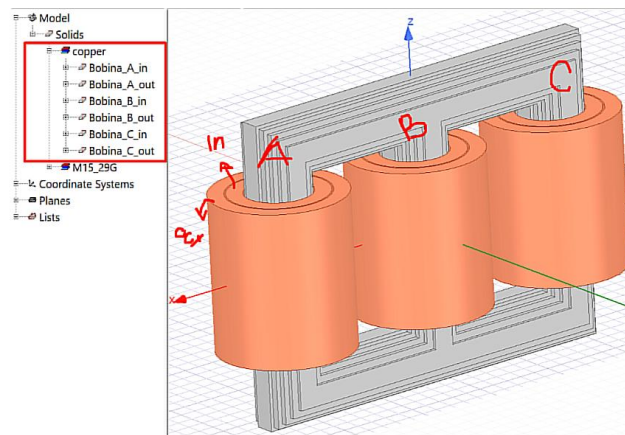
1. Bobina_A_out
2. Bobina_B_out
3. Bobina_C_out



14 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.18. Separación de todos los embobinados, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

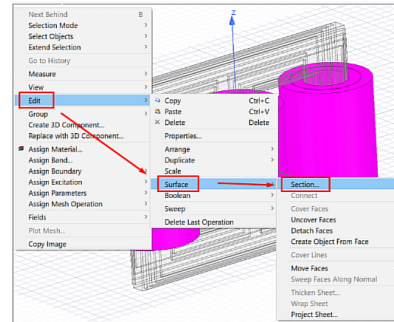
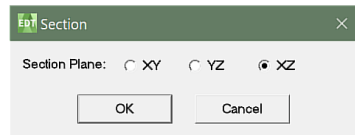


15 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.19. Enumeración del embobinado, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar los embobinados y realizar la separación de cuerpos.
- Clic derecho **Edit** -> **Surface** -> **Section**.
- En la ventana emergente marcar la opción **XZ**

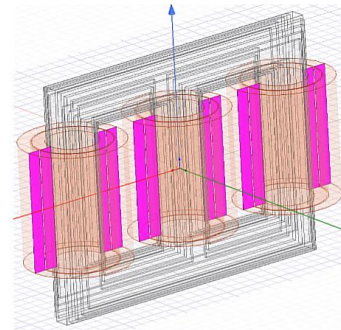
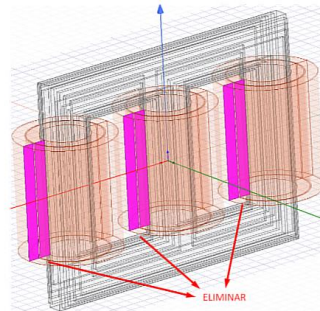


16 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.20. Separación del embobinado mediante el eje, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

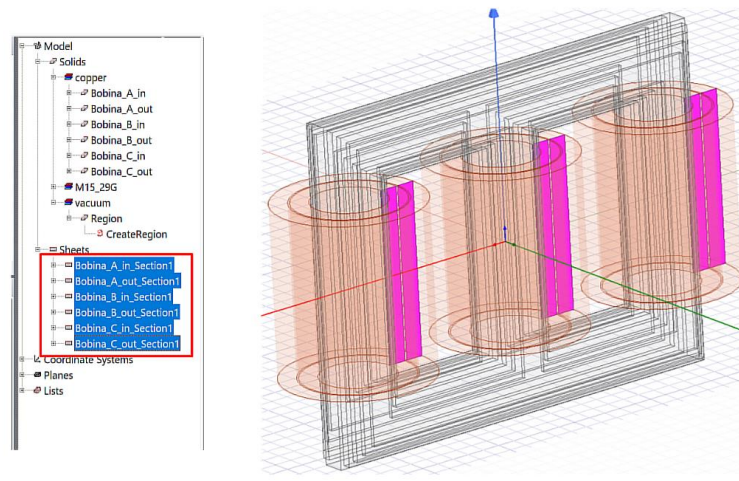
- Con los terminales seleccionados se vuelve a realizar la separación de cuerpos.
- Clic derecho **Edit** -> **Surface** -> **Section**.
- Eliminar con la letra "supr" los terminales restantes.



17 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.21. Creación del terminal y eliminación de terminales innecesarios, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

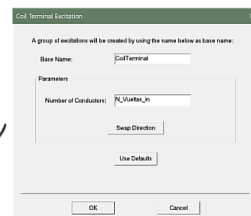
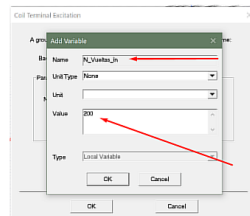
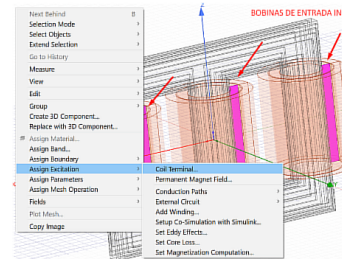


18 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.22. Enumeración de los terminales del embobinado, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar únicamente los terminales de entrada como se muestra en la imagen derecha.
- Seleccionar en el menú **Assign Excitation** -> **Coil Terminal**.
- Number of conductors -> **N_Vueltas_in** -> 400.
- OK.

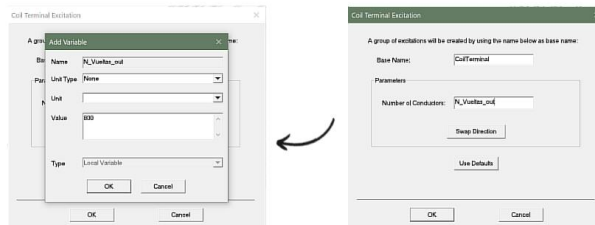
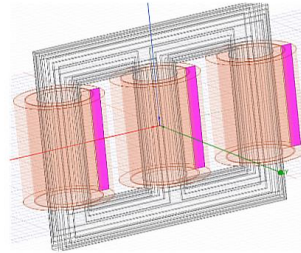


19 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.23. Número de vueltas terminal primario, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar únicamente los terminales de salida como se muestra en la imagen derecha.
- Seleccionar en el menú **Assign Excitation** -> **Coil Terminal**.
- Number of conductors -> **N_Vueltas_out** -> **800**.
- OK.



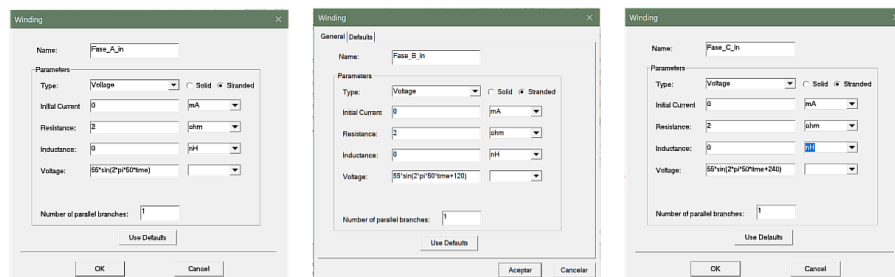
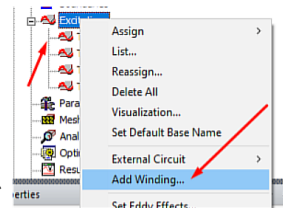
20 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.24. Número de vueltas terminal secundario, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Clic derecho en **Excitations** y seleccionar -> **Add Winding**.
- En la ventana emergente dar los siguientes valores a las fases de entrada:

- **Type:** Voltage -> Stranded
- **Resistance:** 3 ohm
- **Voltage:** $55 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time}) + 120$ Fase B + 240 Fase C
- **Phase:** 120 para la fase B

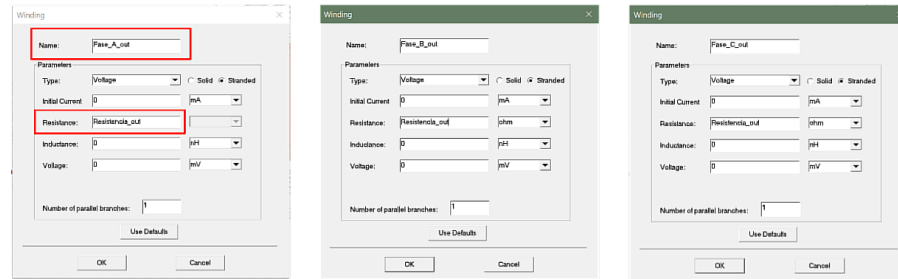


23 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.25. Asignación entrada, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Clic derecho en **Excitations** y seleccionar -> **Add Winding**.
- En la ventana emergente dar los siguientes valores a las fases de salida:
 - **Type:** Voltage -> Stranded
 - **Resistance:** Resistencia_out -> 2
 - **Voltage:** 0
 - **Phase:** 0



24 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.26. Asignación salida, transformador en 3D.

4. Creación del embobinado

- Seleccionar la Fase creada y dar clic derecho en **Add Coils**.
- Seleccionar el terminal correspondiente a la Fase y se añade.

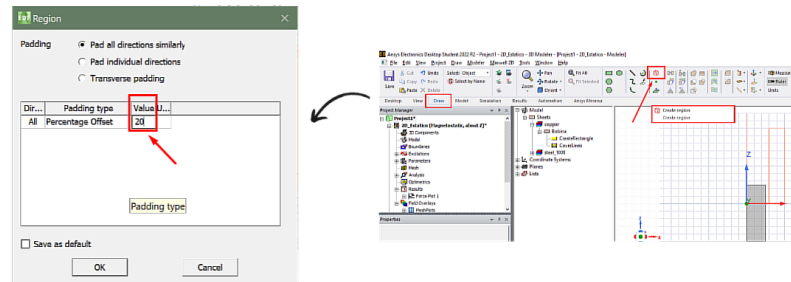


25 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.27. Creación y selección de las fases, transformador en 3D.

5. Creación de la región

- Clic en el botón "Create Region" en el modulo Draw.
- En la ventana emergente cambiamos el **offset** -> **20**.
- Damos clic en "OK".



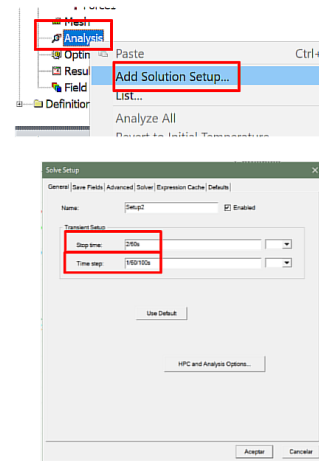
26 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.28. Creación de la región, transformador en 3D.

6. Compilación de la solución

• Asignación de parámetros.

- Clic derecho a **Analysis** -> **Add solution Setup**.
- En la ventana emergente cambiar los siguientes parámetros:
 1. Stop time: **2/60 Dos periodos**.
 2. Time step: **1/60/100 Frecuencia**.
- Aceptamos con el botón "OK".



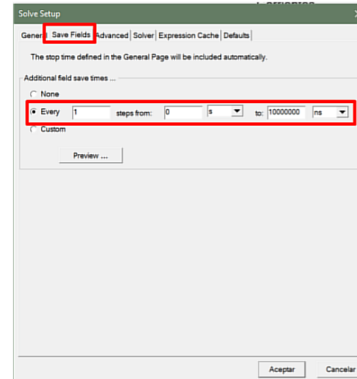
27 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.29. Compilación de la solución, transformador en 3D.

6. Compilación de la solución

• Asignación de parámetros.

- Clic en el modulo **Save Fields**.
- Marcar **Every**.



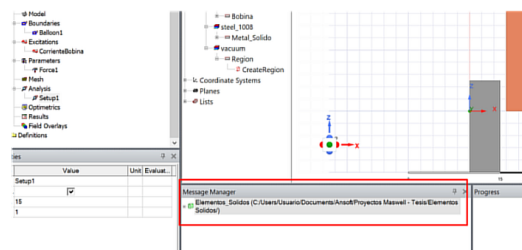
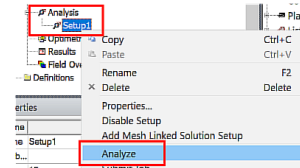
28 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.30. Propiedades de la compilación, transformador en 3D.

6. Compilación de la solución

• Depuración de la solución

- Clic derecho a **Setup** -> **Analyze**.
- En la ventana inferior de nombre "**Message Manager**" se visualiza depuración de la solución.



29 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.31. Compilación exitosa, transformador en 3D.

7. Resultados

• Información de resultados

- Clic derecho a **Result** -> **Create Transient Report** -> **Rectangular Plot**.
- En la ventana emergente clic en **Winding**.
- Seleccionar el reporte necesario.
- Clic en **New Report**

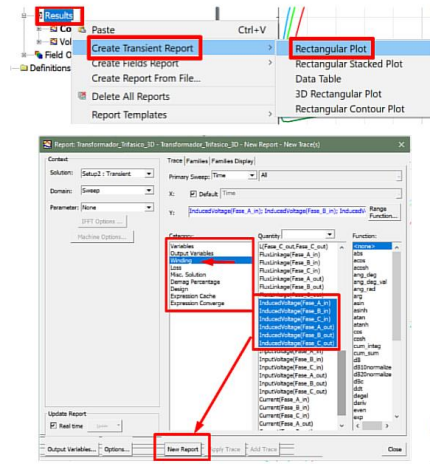
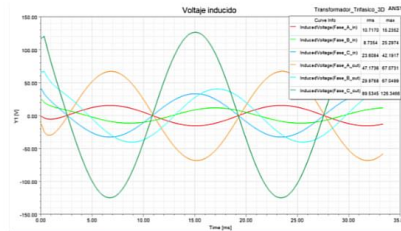


Ilustración 12.32. Selección de reporte, transformador en 3D.

7. Resultados

• Voltaje



• Corriente

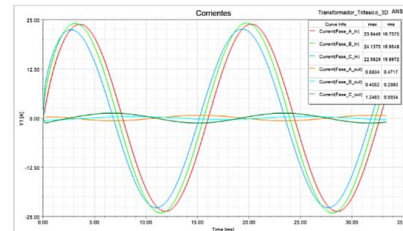


Ilustración 12.33. Resultados, transformador en 3D.

7. Resultados

• Información de resultados

- En el modulo Planes clic en **Global: XZ**.
- 1. Seleccionar en el menú **Maswell 3D -> Field -> Fields -> B -> Mag_B**.
- 2. En la ventana emergente seleccionar **"Done"**.



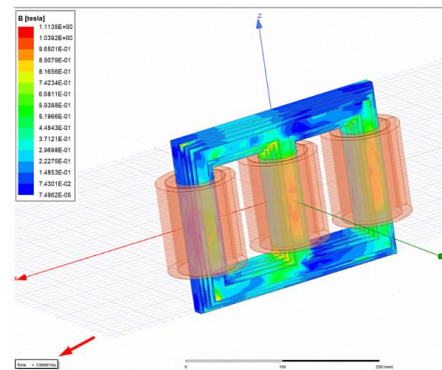
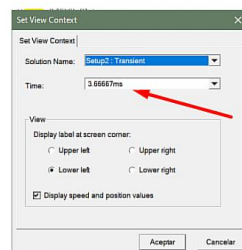
32 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.34. Generación para la visualización de fenómenos electromagnéticos, transformador en 3D.

7. Resultados

• Información de resultados

- Doble clic en **Time**.
- Seleccionar el tiempo de muestra.



33 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.35. Visualización de temperatura, transformador en 3D.

12.2.2. Guía de laboratorio Motor



Ilustración 12.36. Portada Guía de laboratorio creación de un motor en 2D y 3D

• Índice

1. Introducción a la Elaboración de un motor – Ansys Maxwell.
2. Creación del proyecto.
3. Compilación de la solución.
4. Parámetros de la máquina.
5. Parámetros del estator.
6. Parámetros del Slot del estator.
7. Parámetros del embobinado del estator.
8. Parámetros del rotor.
9. Parámetros del Slot del rotor.
10. Parámetros del embobinado del rotor.
11. Creación del proyecto en 2D.
12. Resultados del proyecto en 2D.
13. Creación del proyecto en 3D.
14. Resultados del proyecto en 3D

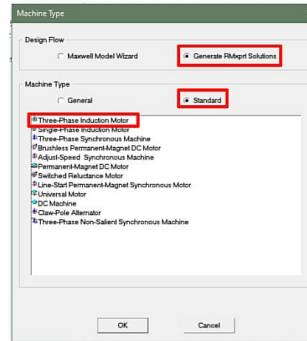
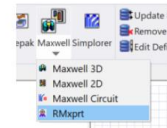


Ilustración 12.37. Índice guía de laboratorio creación de un motor en 2D y 3D.

2. Creación del proyecto

- **Nuevo proyecto**

- Nuevo proyecto se selecciona en el menú -> **RMxpert**.
- Seleccionamos **Generate RMxpert** -> **Standar**.
- klik en **Three-Phase Induction Motor**.



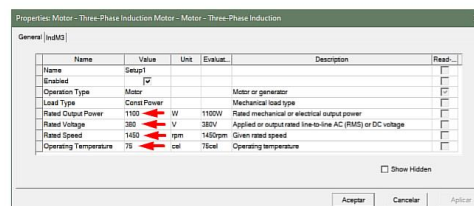
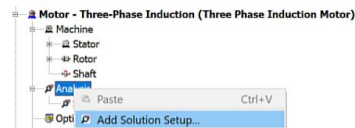
6 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.38. Creación del proyecto, motor.

3. Compilación de la solución.

- Seleccionar en **Analysis** -> **Add Solution Setup**.
- Seleccionar en el menú:

- **Rated Output Power:** 1100
- **Rated Voltage:** 380
- **Rated Speed:** 1450
- **Operating Temperature:** 75



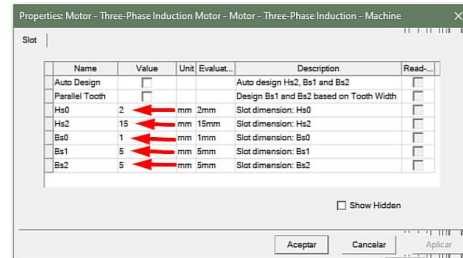
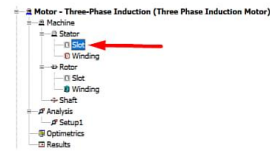
7 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.39. Compilación de la solución, motor.

6. Parámetros del Slot del estator

- Doble click en **Slot del Stator**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Hs0:** 2
- **Hs2:** 15
- **Bs0:** 1
- **Bs1:** 5
- **Bs2:** 5



10 Manual Ansys Febrero 02, 2023

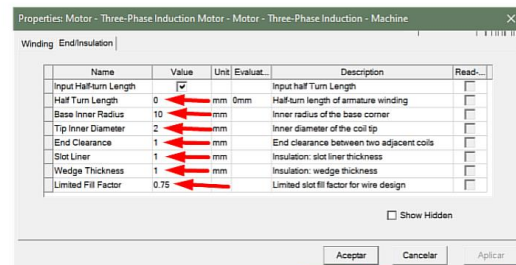
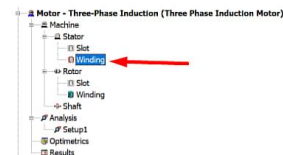


Ilustración 12.42. Parámetros del Slot del estator, motor.

7. Parámetros del embobinado del estator

- Doble click en **Winding del Stator**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Half Turn Length:** 0
- **Base Inner Radius:** 10
- **Tip Inner Diameter:** 2
- **End Clearance:** 1
- **Slot Liner:** 1
- **Wedge Thickness:** 1
- **Limited Fill Factor:** 0.75



11 Manual Ansys Febrero 02, 2023

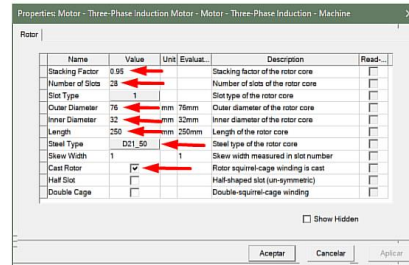
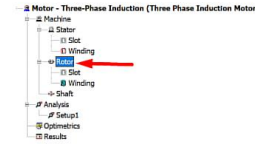


Ilustración 12.43. Parámetros del embobinado del estator, motor.

8. Parámetros del rotor

- Doble click en **Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Stracking Factor:** 0.95
- **Number of Slots:** 28
- **Outer Diameter:** 76
- **Inner Diameter:** 32
- **length:** 250
- **Steel Type:** D21_50
- **Cast Rotor:** check



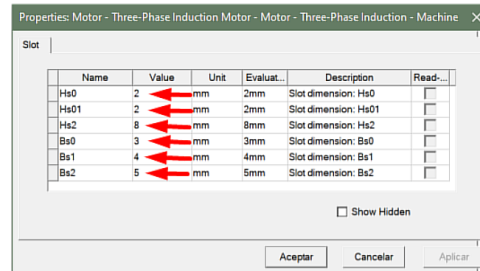
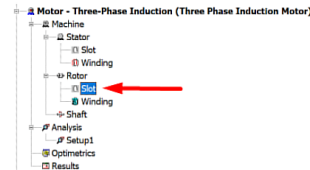
12 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.44. Parámetros del rotor, motor.

9. Parámetros del Slot del rotor

- Doble click en **Slot del Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Hs0:** 2
- **Hs01:** 2
- **Hs2:** 8
- **Bs0:** 3
- **Bs1:** 4
- **Bs2:** 5



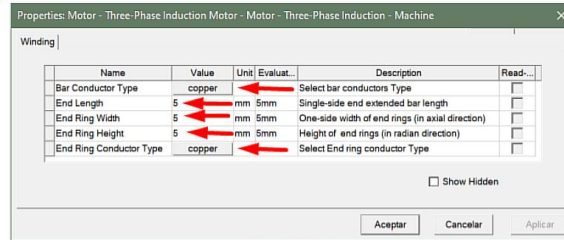
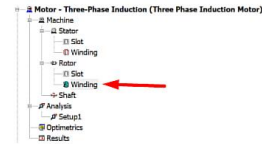
13 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.45. Parámetros del Slot del rotor, motor.

10. Parámetros del embobinado del Rotor

- Doble click en **Winding del Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Bar Conductor Type:** Copper
- **End Length:** 5
- **End Ring Width:** 5
- **End Ring Height:** 5
- **End Ring Conductor Type:** Copper



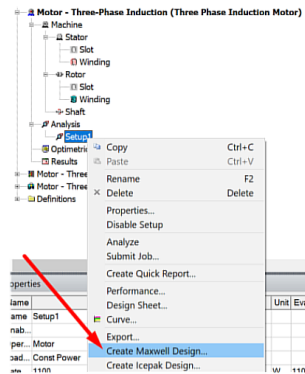
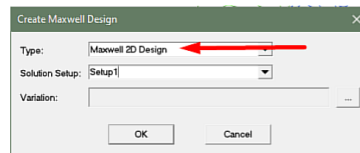
14 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.46. Parámetros del embobinado del rotor, motor.

11. Creación del proyecto en 2D

- Doble click en **Setup -> Create Maxwell Desing**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Type:** Maxwell 2D Desing
- **Solution Setup:** Setup1



15 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.47. Creación del proyecto en 2D, motor.

11. Creación del proyecto en 2D

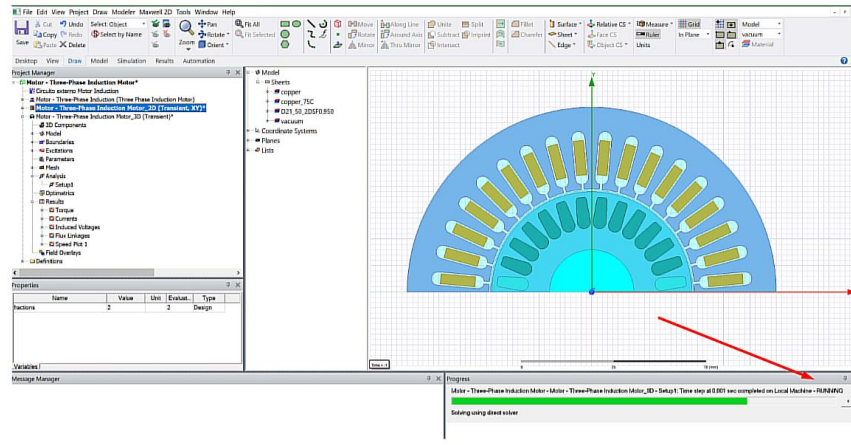


Ilustración 12.48. visualización del proyecto en 2D, motor.

12. Resultados del proyecto en 2D

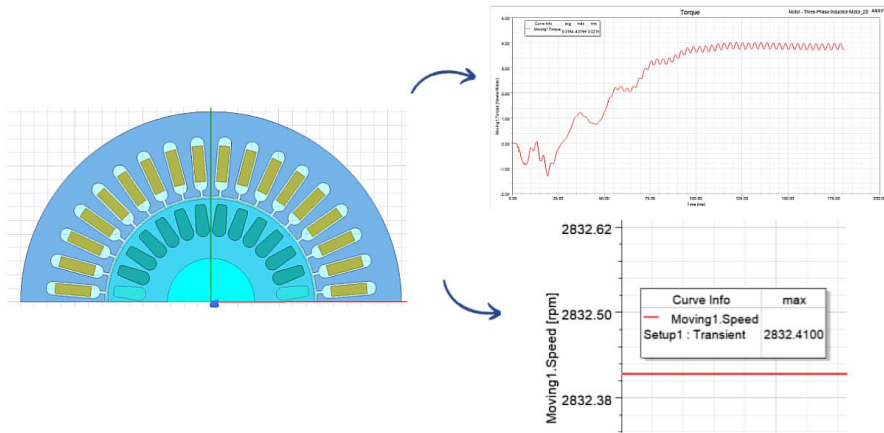
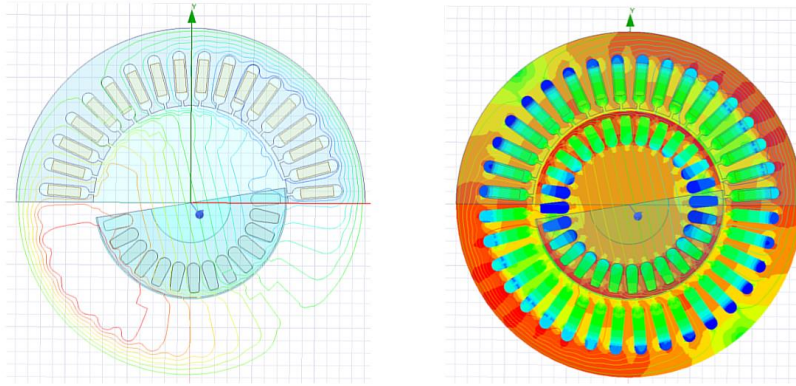


Ilustración 12.49. visualización de los resultados en 2D de torque y velocidad en el motor.

12. Resultados del proyecto en 2D



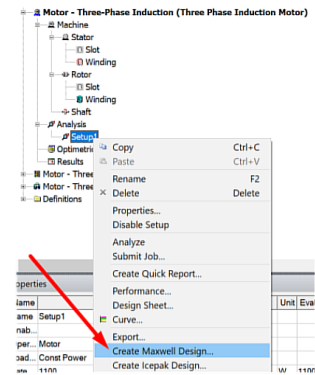
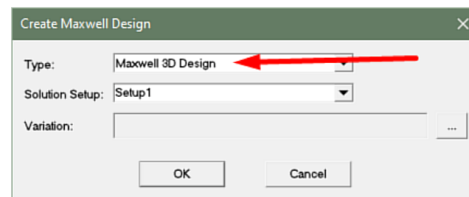
17 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.50. visualización de los resultados en 2D de los fenómenos electromagnéticos, motor.

13. Creación del proyecto en 3D

- Doble click en **Setup** -> **Create Maxwell Desing**.
- Seleccionar en el menú:

- **Type:** Maxwell 3D Desing
- **Solution Setup:** Setup1



18 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.51. Creación del proyecto en 3D, motor.

13. Creación del proyecto en 3D

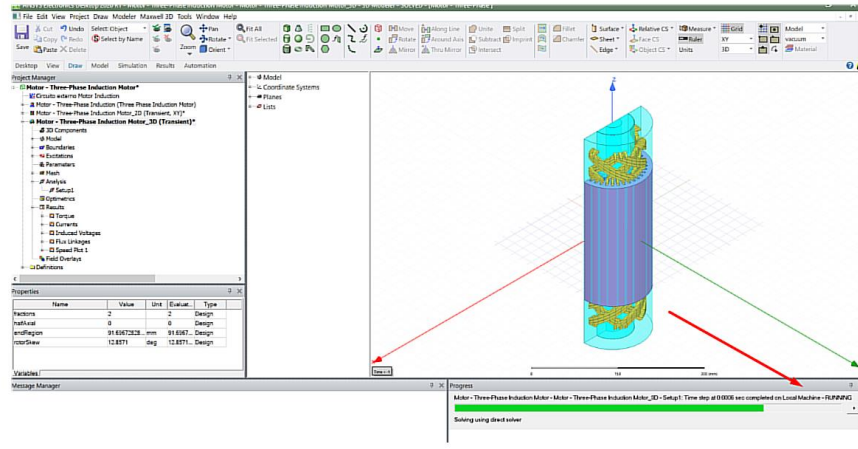


Ilustración 12.52. visualización del proyecto en 3D, motor.

14. Resultados del proyecto en 3D

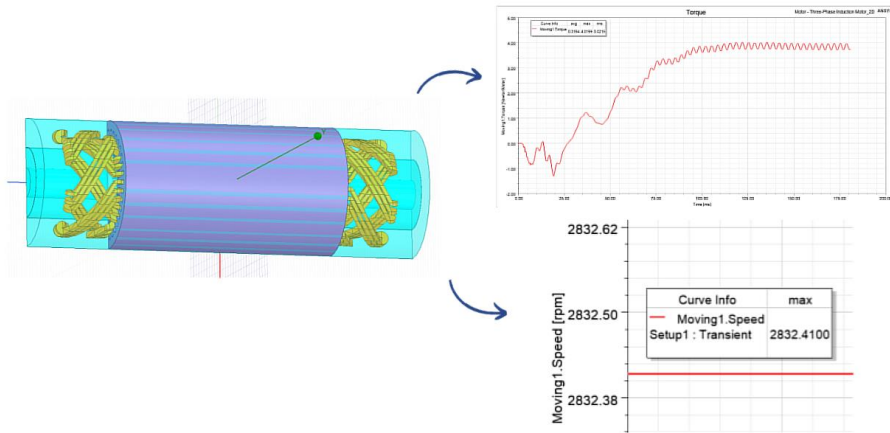
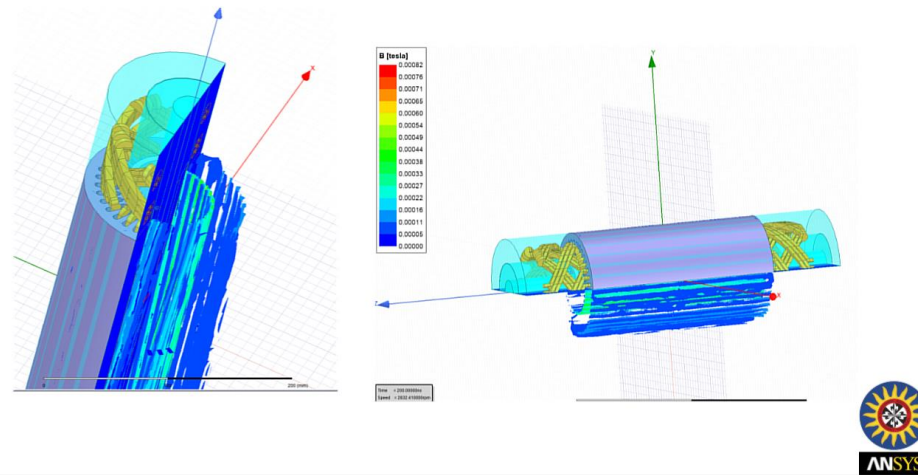


Ilustración 12.53. visualización de los resultados en 3D de torque y velocidad en el motor.

14. Resultados del proyecto en 3D



20 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.54. visualización de los resultados en 3D de los fenómenos electromagnéticos, motor.

12.2.3. Guía de laboratorio Generador síncrono



Ilustración 12.55. Portada guía de laboratorio creación de un generador síncrono.

• Índice

1. Introducción a la Elaboración de un motor – Ansys Maxwell.
2. Creación del proyecto.
3. Compilación de la solución.
4. Parámetros de la máquina.
5. Parámetros del estator.
6. Parámetros del Slot del estator.
7. Parámetros del embobinado del estator.
8. Parámetros del rotor.
9. Parámetros del Slot del rotor.
10. Parámetros del embobinado del rotor.
11. Creación del proyecto en 2D.
12. Resultados del proyecto en 2D.
13. Creación del proyecto en 3D.
14. Resultados del proyecto en 3D



Ilustración 12.56. Índice guía de laboratorio generador síncrono.

2. Creación del proyecto

• Nuevo proyecto

- Nuevo proyecto se selecciona en el **menú** -> **RMxpvt**.
- Seleccionamos **Generate RMxpvt** -> **Standar**.
- cliK en **Adjust-Speed Synchronous rachine**.

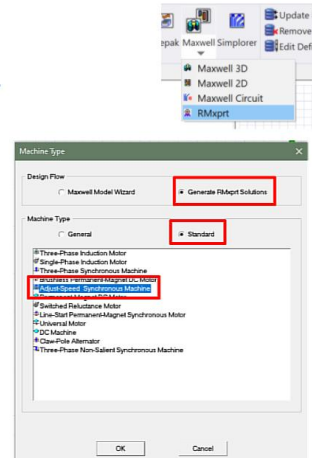
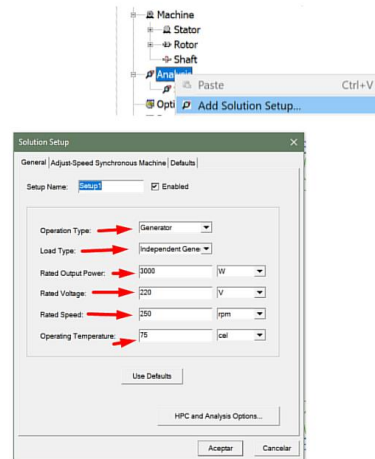


Ilustración 12.57. Creación del proyecto guía de laboratorio generador síncrono.

3. Compilación de la solución.

- Seleccionar en **Analysis** -> **Add Solution Setup**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Operation Type:** 1Generator
- **Load Type:** Independent Generator
- **Rated Output Power:** 3000
- **Rated Voltage:** 220
- **Rated Speed:** 250
- **Operating Temperature:** 75



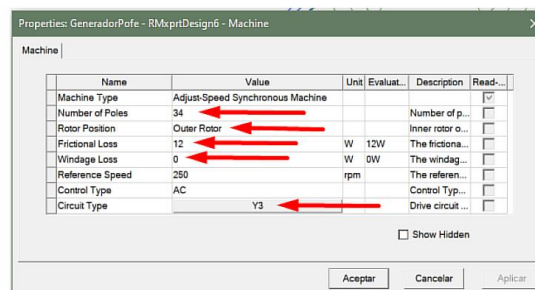
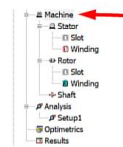
7 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.58. Compilación de la solución de la guía de laboratorio generador síncrono.

4. Parámetros de la máquina

- Doble click en **Machine**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Number of poles:** 34
- **Rotor Position:** Outer Rotor
- **Frictional Loss:** 12
- **Windage Loss:** 0
- **Reference Speed:** 250



8 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.59. Parámetros de la máquina, generador síncrono.

5. Parámetros del estator

- Doble click en **Stator**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Outer Diameter:** 510
- **Inner Diameter:** 380
- **Length:** 60
- **Stracking Factor:** 0.95
- **Steel Type:** D21_50
- **Number of Slots:** 36
- **Slot Type:** 1
- **Skew Width:** 0

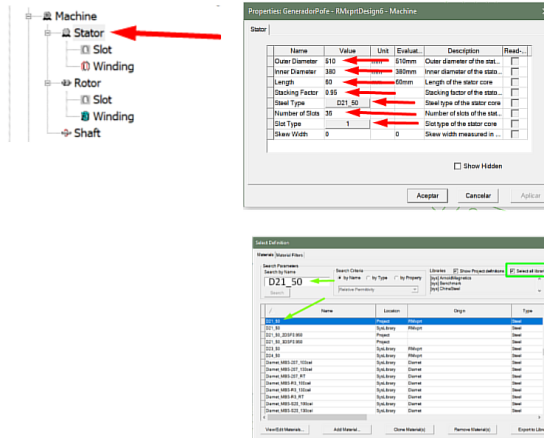


Ilustración 12.60. Parámetros del estator, generador síncrono.

6. Parámetros del Slot del estator

- Doble click en **Slot del Stator**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Hs0:** 2.5
- **Hs2:** 25
- **Bs0:** 2.5
- **Bs1:** 20
- **Bs2:** 20

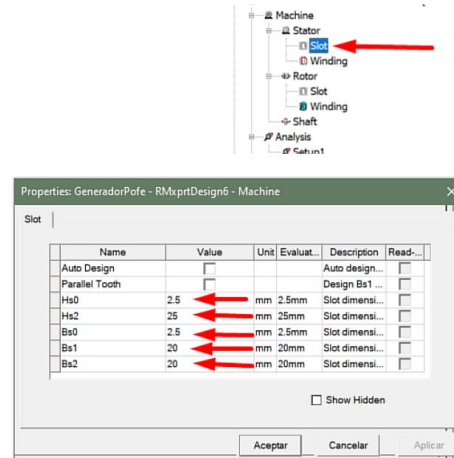


Ilustración 12.61. Parámetros del Slot del estator, generador síncrono.

7. Parámetros del embobinado del estator



- Doble click en **Winding del Stator**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Winding Layers:** 2
- **Winding Type:** Whole-Coiled
- **Parallel Branches:** 2
- **Conductors per Slot:** 24
- **Coil Pitch:** 1
- **Number of Strands:** 1

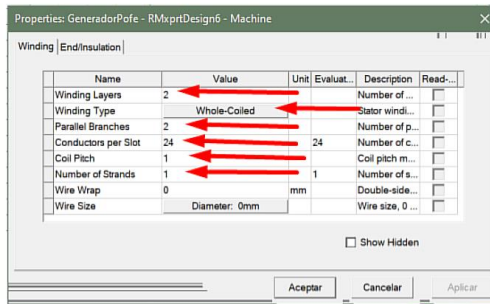


Ilustración 12.62. Parámetros del embobinado del estator, generador síncrono.

7. Parámetros del embobinado del estator

- Click derecho en el la imagen del **Winding del Stator** y seleccionamos -> **Connect all coils**

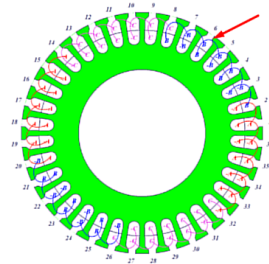
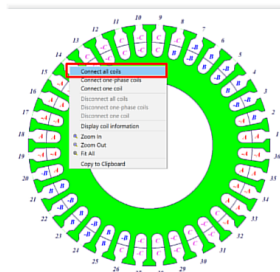
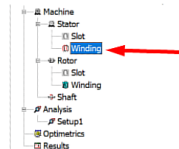
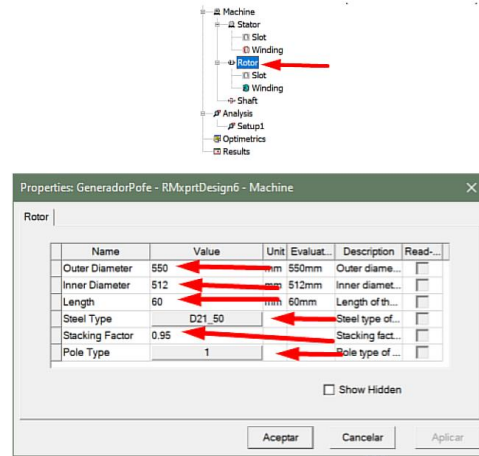


Ilustración 12.63. Unión de los embobinados, generador síncrono.

8. Parámetros del rotor

- Doble click en **Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Outer Diameter:** 550
- **Inner Diameter:** 512
- **Length:** 60
- **Steel Type:** D21_50
- **Stacking Factor:** 0.95
- **Pole Type:** 1



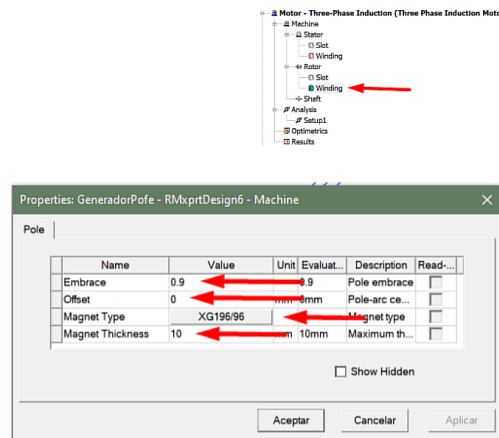
13 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.64. Parámetros del rotor, generador síncrono.

10. Parámetros del polos del Rotor

- Doble click en **Winding del Rotor**.
- Seleccionar en el **menú**:

- **Embrace:** 0.9
- **Offset:** 0
- **Magnet Type:** XG196/96
- **Magnet Thickness:** 10



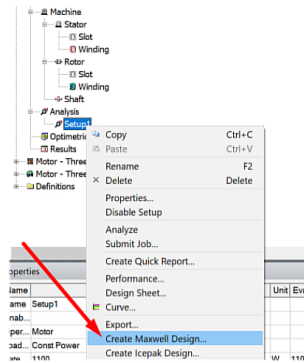
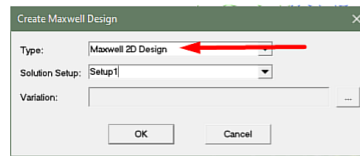
14 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.65. Parámetros de polos del Rotor, generador síncrono.

11. Creación del proyecto en 2D

- Doble click en **Setup** -> **Create Maxwell Desing.**
- Seleccionar en el **menú:**

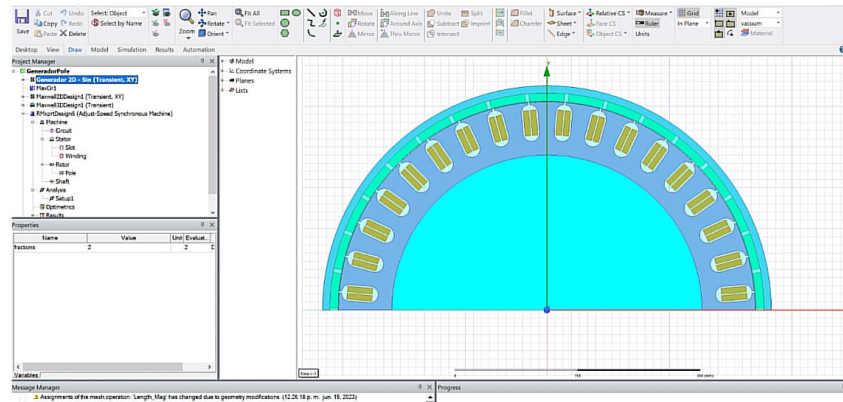
- **Type:** Maxwell 2D Desing
- **Solution Setup:** Setup1



15 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.66. Creación del proyecto en 2D, generador síncrono.

11. Creación del proyecto en 2D



16 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.67. Visualización del generador síncrono en 2D.

12. Resultados del proyecto en 2D

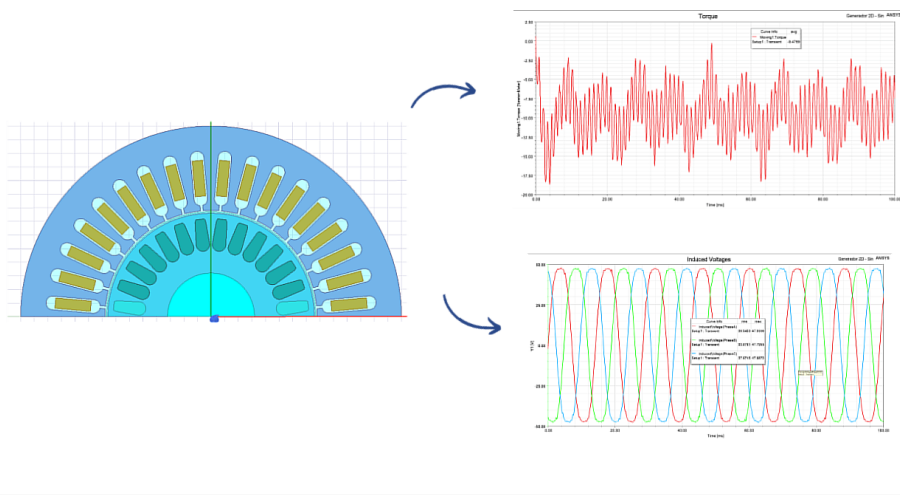


Ilustración 12.68. Resultados en 2D del generador síncrono.

12. Resultados del proyecto en 2D

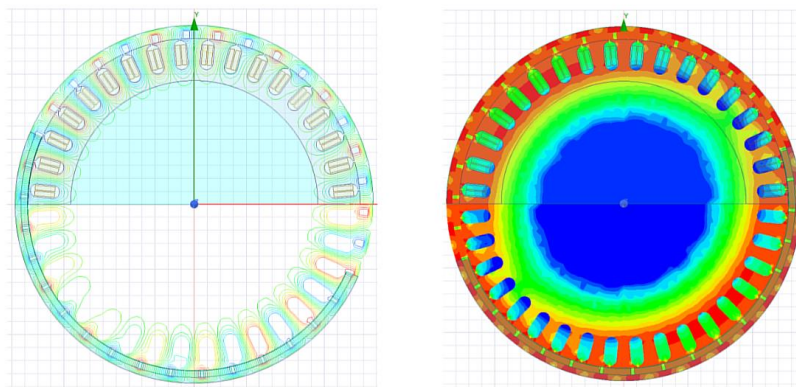


Ilustración 12.69. Resultados en 2D de los fenómenos electromagnéticos del generador síncrono.

13. Creación del proyecto en 3D

- Doble click en **Setup** -> **Create Maxwell Desing.**
- Seleccionar en el **menú:**

- **Type:** Maxwell 3D Desing
- **Solution Setup:** Setup1

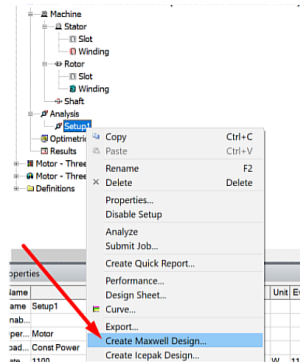
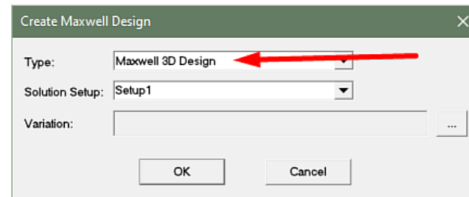


Ilustración 12.70. Creación del proyecto en 3D, generador síncrono.

13. Creación del proyecto en 3D

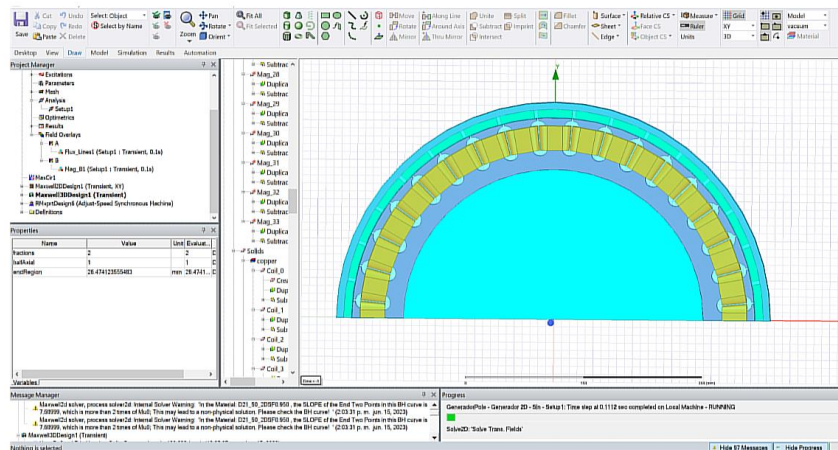
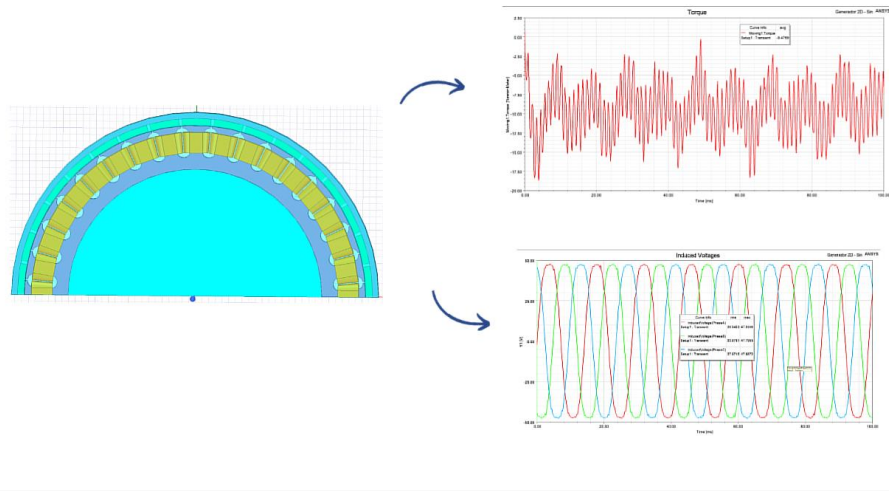


Ilustración 12.71. Visualización del generador síncrono en 3D.

14. Resultados del proyecto en 3D



20 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.72. Resultados en 3D del generador síncrono.

14. Resultados del proyecto en 3D



20 Manual Ansys Febrero 02, 2023

Ilustración 12.73. Resultados en 3D de los fenómenos electromagnéticos del generador síncrono.

12.3. Prácticas de laboratorio

En este apartado se encuentran las prácticas de laboratorio realizadas con la metodología MaxwellCraft.

12.3.1. Practica de laboratorio Transformador

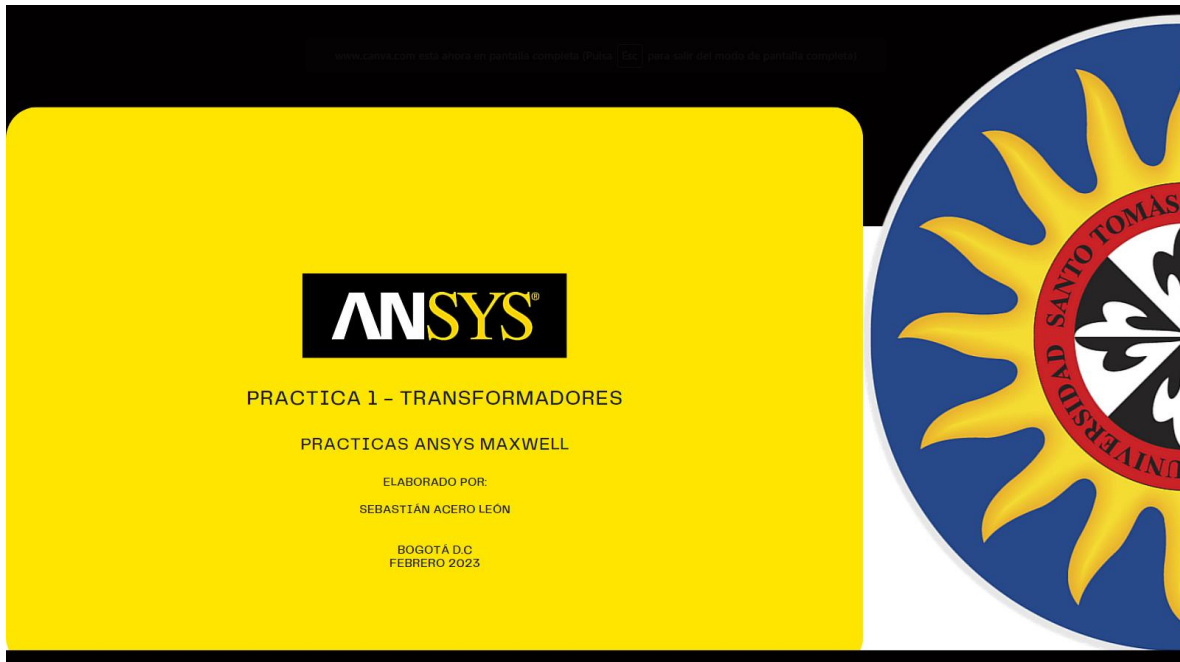


Ilustración 12.74. Portada practica de laboratorio Transformador.

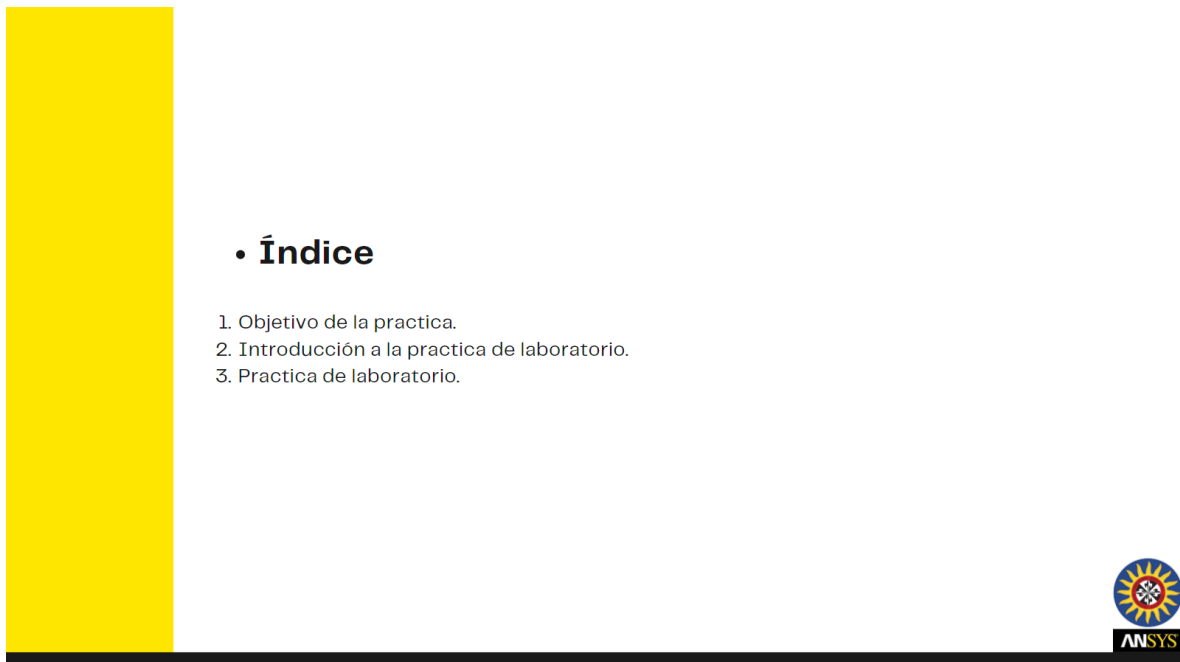


Ilustración 12.75. Índice de la práctica de laboratorio Transformador.

1. Objetivo de la practica

- Objetivo general

Aplicar los conocimientos teóricos adquiridos sobre transformadores monofásicos para simular y analizar el comportamiento electromagnético de un transformador utilizando Ansys Maxwell, a fin de comprender los principios fundamentales de funcionamiento y adquirir habilidades prácticas en la simulación de sistemas electromagnéticos complejos. Para explorar y profundizar en los diferentes aspectos de la simulación del transformador y su comportamiento electromagnético, obteniendo una comprensión práctica de los conceptos teóricos estudiados previamente.



Ilustración 12.76. Objetivo general práctica de laboratorio Transformador.

1. Objetivo de la practica

- Objetivos específicos

1. Familiarización con el software: Obtener un conocimiento básico de la interfaz de Ansys Maxwell y familiarizarse con las herramientas y funciones utilizadas para el diseño y simulación de transformadores.
2. Simulación electromagnética: Realizar una simulación electromagnética del transformador en Ansys Maxwell para analizar el comportamiento del flujo magnético, la distribución de corriente, la inductancia y otras características electromagnéticas del sistema, definiendo las dimensiones y características físicas, como el núcleo magnético, los devanados primario y secundario, y las conexiones eléctricas.
3. Comparación con resultados teóricos: Comparar los resultados obtenidos en la simulación con los cálculos teóricos o modelos analíticos.
4. Documentación y presentación de resultados: Elaborar un informe técnico que detalle los procedimientos seguidos, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas durante la práctica de laboratorio.

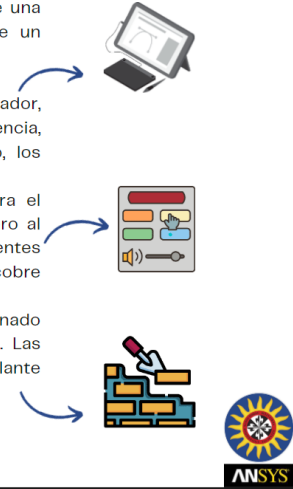


Ilustración 12.77. Objetivos específicos práctica de laboratorio Transformador.

2. Introducción a la Practica

- La construcción de un transformador implica varios pasos y requiere conocimientos técnicos especializados. A continuación, te proporcionaré una descripción general de los pasos involucrados en la construcción de un transformador:

- **Diseño y especificaciones:** Determina los requisitos del transformador, como la potencia, la tensión primaria y secundaria, la corriente, la frecuencia, etc. Estos parámetros son importantes para el diseño del núcleo, los devanados y otros componentes.
- **Selección de materiales:** Selecciona los materiales adecuados para el núcleo y los devanados. El núcleo generalmente está hecho de acero al silicio laminado para minimizar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Los devanados suelen estar hechos de alambre de cobre esmaltado o aluminio, dependiendo de los requisitos del transformador.
- **Construcción del núcleo:** Ensambla las láminas de acero al silicio laminado en una estructura apilada para formar el núcleo del transformador. Las láminas se aíslan entre sí con una capa delgada de barniz o papel aislante para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.



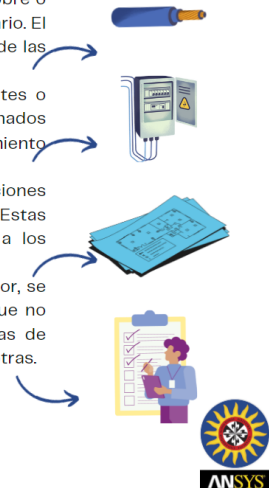
7 Manual Ansys Febrero 02, 2023

ANSYS

Ilustración 12.78. Introducción a la práctica de laboratorio Transformador.

2. Introducción a la Practica

- **Bobinado del devanado primario y secundario:** Envuelve el alambre de cobre o aluminio alrededor del núcleo para formar los devanados primario y secundario. El número de vueltas y la forma en que se enrollan los devanados dependen de las especificaciones del transformador y su diseño.
- **Aislamiento:** Aísla adecuadamente los devanados utilizando cintas aislantes o papel aislante entre las capas de alambre y alrededor de los devanados completos. Esto ayuda a prevenir cortocircuitos y asegura un aislamiento eléctrico adecuado.
- **Montaje y conexiones:** Coloca los devanados en sus respectivas posiciones dentro del transformador y realiza las conexiones eléctricas adecuadas. Estas conexiones incluyen las conexiones de los devanados, las conexiones a los terminales y los dispositivos de protección necesarios.
- **Pruebas y verificación:** Antes de poner en funcionamiento el transformador, se realizan pruebas para garantizar que se cumplan las especificaciones y que no haya problemas de funcionamiento. Estas pruebas pueden incluir pruebas de aislamiento, pruebas de cortocircuito, pruebas de relación de vueltas, entre otras.



8 Manual Ansys Febrero 02, 2023

ANSYS

Ilustración 12.79. Introducción de cómo crear un transformador, práctica de laboratorio Transformador.

2. Practica laboratorio

Con el material anterior relajar los siguientes ejercicios:

1. Crear un transformador monofásico en Ansys Maxwell.
2. Replicar el transformador existente de los laboratorios en Ansys Maxwell.
3. Cambiar los parámetros de salida del transformador, variando la salida de voltaje.

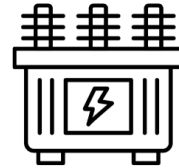


Ilustración 12.80. Práctica de laboratorio Transformador.

12.3.2. Practica de laboratorio Motor

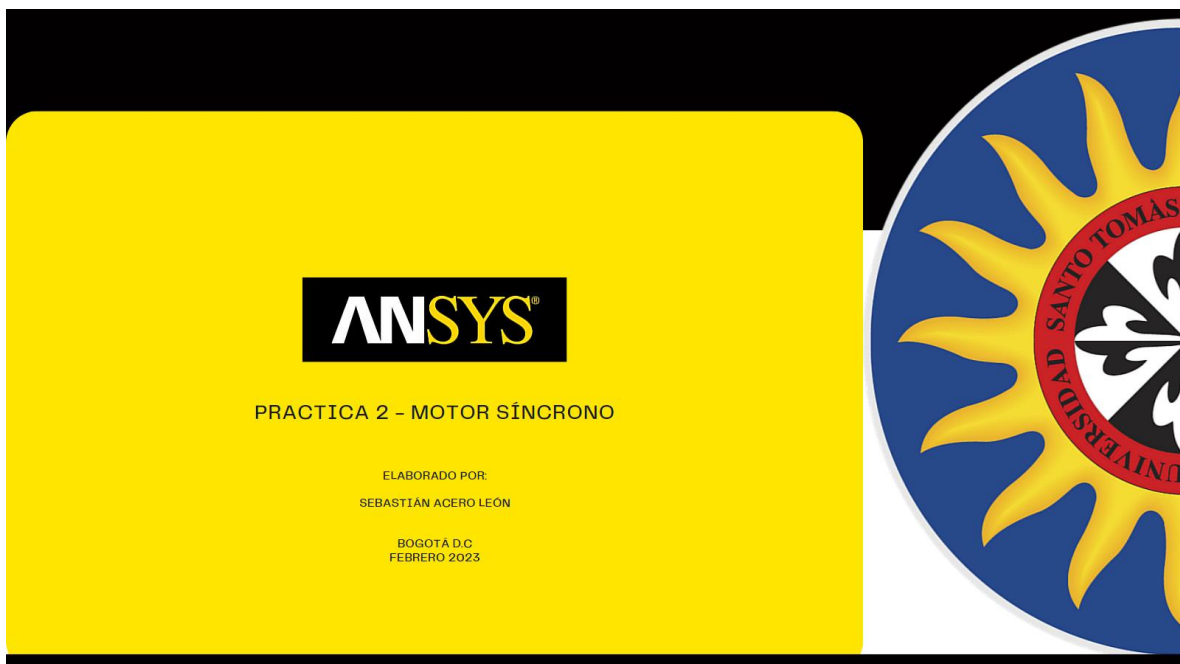


Ilustración 12.81. Portada práctica de laboratorio Motor.

• Índice

1. Objetivo de la practica.
2. Introducción a la practica de laboratorio.
3. Practica de laboratorio.



Ilustración 12.82. Índice de la práctica de laboratorio Motor.

1. Objetivo de la practica

- Objetivo general

Aplicar los conocimientos teóricos de motores síncronos para simular y analizar el comportamiento electromagnético de un motor síncrono utilizando Ansys Maxwell, con el fin de comprender los principios fundamentales de funcionamiento y adquirir habilidades prácticas en la simulación de sistemas electromagnéticos complejos. Para explorar y profundizar en el diseño, la simulación y el análisis del motor síncrono, adquiriendo una comprensión práctica de los conceptos teóricos estudiados previamente. Siendo capaces de diseñar y simular un motor síncrono en Ansys Maxwell, y analizar su comportamiento electromagnético, incluyendo aspectos como la distribución del flujo magnético, las corrientes, las pérdidas y la eficiencia.



Ilustración 12.83. Objetivo general práctica de laboratorio Motor.

1. Objetivo de la practica

- Objetivos específicos

- **Familiarización con el software:** Obtener un conocimiento básico de la interfaz de Ansys Maxwell y familiarizarse con las herramientas y funciones utilizadas para el diseño y simulación de motores síncronos.
- **Simulación electromagnética:** Realizar una simulación electromagnética del motor síncrono en Ansys Maxwell para analizar el comportamiento del flujo magnético, la distribución de corriente, la inductancia y otras características electromagnéticas del sistema, definiendo las dimensiones y características físicas, como el núcleo magnético, los devanados y las conexiones eléctricas.
- **Comparación con resultados teóricos:** Comparar los resultados obtenidos en la simulación con los cálculos teóricos o modelos analíticos.
- **Documentación y presentación de resultados:** Elaborar un informe técnico que detalle los procedimientos seguidos, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas durante la práctica de laboratorio.



Ilustración 12.84. Objetivos específicos práctica de laboratorio Motor.

2. Introducción a la Practica

- En la construcción de un motor síncrono, se siguen varios pasos para ensamblar las diferentes partes y lograr su funcionamiento adecuado. A continuación, se describen los pasos generales involucrados en la construcción de un motor síncrono:

- **Diseño del motor síncrono:** En esta etapa, un equipo de ingenieros diseña y planifica el motor síncrono, teniendo en cuenta los requisitos específicos de la aplicación, como la potencia requerida, la velocidad y el voltaje. Se determinan las dimensiones y las especificaciones técnicas del motor.
- **Adquisición de los componentes:** Se adquieren los componentes necesarios para construir el motor síncrono, como el rotor, el estator, los devanados, los imanes permanentes, los cojinetes, las partes estructurales y otros elementos. Estos componentes se seleccionan de acuerdo con las especificaciones del diseño.
- **Ensamblaje del estator:** El estator es la parte fija del motor y se compone de un núcleo de hierro laminado y bobinas de cobre. En este paso, se ensamblan las bobinas de cobre en los ranurados del estator y se aseguran en su posición correcta.



Ilustración 12.85. Introducción a la práctica de laboratorio Motor.

2. Introducción a la Practica

- **Ensamblaje del rotor:** El rotor es la parte móvil del motor y puede estar compuesto por imanes permanentes o por un electroimán alimentado por una corriente continua. En esta etapa, se colocan los imanes permanentes o se enrollan los devanados del electroimán en el rotor según el diseño específico.
- **Montaje del motor:** Se ensamblan las partes principales del motor, incluido el estator y el rotor, junto con los cojinetes que permiten el giro suave del rotor. Se aseguran las conexiones eléctricas y se ajustan los elementos mecánicos para garantizar el alineamiento adecuado.
- **Pruebas y ajustes:** Una vez que el motor está completamente ensamblado, se somete a pruebas para verificar su funcionamiento y rendimiento. Estas pruebas incluyen la verificación de la resistencia y la continuidad de los devanados, la medición de la inductancia y la resistencia de los circuitos magnéticos, entre otras pruebas eléctricas y mecánicas. Si es necesario, se realizan ajustes para optimizar el rendimiento del motor.
- **Finalización y embalaje:** Una vez que se completan las pruebas y los ajustes, el motor síncrono se considera listo para su uso. Se realiza la limpieza final, se aplican los acabados necesarios y se empaqueta adecuadamente para su transporte y entrega.



Ilustración 12.86. Introducción a como crear un motor.

3. Practica laboratorio

Con el material anterior relajar los siguientes ejercicios:

1. Simular un motor síncrono en Ansys Maxwell.
2. Replicar el motor síncrono existente de los laboratorios en Ansys Maxwell.
3. Cambiar los parámetros de salida del motor síncrono
4. Documentar los resultados obtenidos.



Ilustración 12.87. Práctica de laboratorio Motor.

1.1.1. Practica de laboratorio Generador síncrono

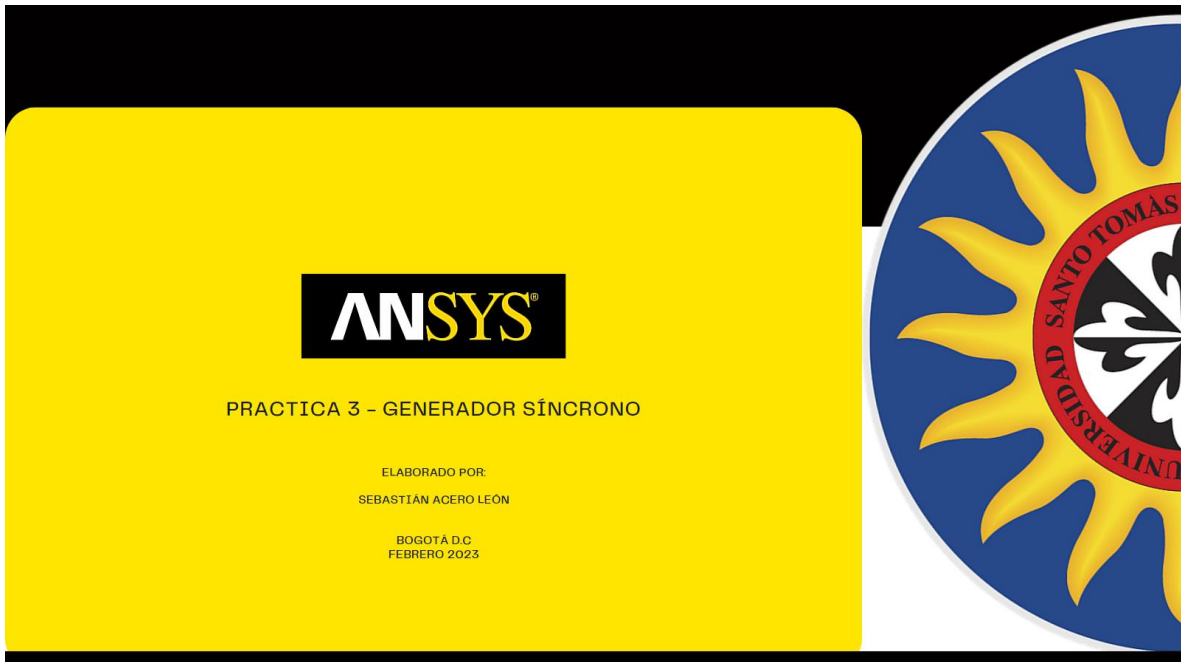


Ilustración 12.88. Portada práctica de laboratorio Generador síncrono.

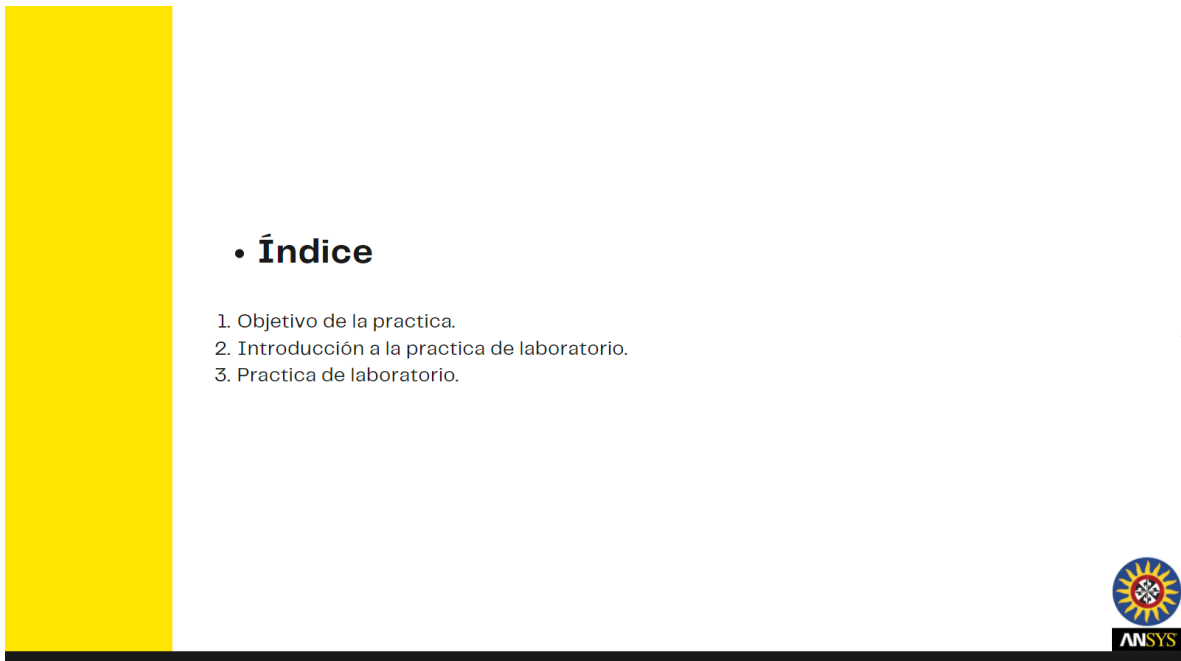


Ilustración 12.89. Índice de la práctica de laboratorio Generador síncrono.

1. Objetivo de la practica

- Objetivo general

Aplicar los conocimientos teóricos de generadores síncronos para simular y analizar el comportamiento electromagnético de un generador síncrono utilizando Ansys Maxwell, comprender los principios fundamentales de funcionamiento y adquirir habilidades prácticas en la simulación de sistemas electromagnéticos complejos, específicamente en relación con los generadores síncronos. Para explorar y profundizar en el diseño, la simulación y el análisis del generador síncrono, adquiriendo una comprensión práctica de los conceptos teóricos estudiados. Obteniendo la capacidad de diseñar y simular un generador síncrono en Ansys Maxwell, y analizar su comportamiento electromagnético, incluyendo aspectos como la distribución del flujo magnético, las corrientes, las pérdidas y la eficiencia.



Ilustración 12.90. Objetivo general de la práctica de laboratorio Generador síncrono.

1. Objetivo de la practica

- Objetivos específicos

- **Familiarización con el software:** Obtener un conocimiento básico de la interfaz de Ansys Maxwell y familiarizarse con las herramientas y funciones utilizadas para el diseño y simulación de generadores síncronos.
- **Simulación electromagnética:** Realizar una simulación electromagnética del generador síncrono en Ansys Maxwell para analizar el comportamiento del flujo magnético, la distribución de corriente, la inductancia y otras características electromagnéticas del sistema, definiendo las dimensiones y características físicas, como el núcleo magnético, los devanados y las conexiones eléctricas.
- **Comparación con resultados teóricos:** Comparar los resultados obtenidos en la simulación con los cálculos teóricos o modelos analíticos.
- **Documentación y presentación de resultados:** Elaborar un informe técnico que detalle los procedimientos seguidos, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas durante la práctica de laboratorio.



Ilustración 12.91. Objetivo específico de la práctica de laboratorio Generador síncrono.

2. Introducción a la Practica

– El siguiente es un resumen de los pasos para la construcción de un motor síncrono en tercera persona:

- **Diseño y selección de componentes:** El proceso comienza con el diseño del motor síncrono, que incluye la selección de los materiales adecuados, el tamaño y la forma del núcleo magnético, y la elección del tipo de devanado. Estos componentes deben estar diseñados de acuerdo con los requisitos de potencia, voltaje y frecuencia del motor.
- **Fabricación del estator:** El estator es la parte fija del motor y está compuesto por un núcleo magnético y bobinas de alambre enrolladas alrededor de él. Para fabricar el estator, se corta y forma el núcleo magnético, y luego se enrolla el alambre de cobre esmaltado alrededor de las ranuras del núcleo de manera precisa.
- **Fabricación del rotor:** El rotor es la parte móvil del motor y está compuesto por un núcleo magnético y un conjunto de polos magnéticos. Para fabricar el rotor, se corta y forma el núcleo magnético según el diseño, y se colocan los polos magnéticos en su lugar. Los polos pueden ser imanes permanentes o electroimanes, dependiendo del tipo de motor síncrono.



Ilustración 12.92. Introducción a la práctica de laboratorio Generador síncrono.

2. Introducción a la Practica

- **Bobinado del devanado primario y secundario:** Envuelve el alambre de cobre o aluminio alrededor del núcleo para formar los devanados primario y secundario. El número de vueltas y la forma en que se enrollan los devanados dependen de las especificaciones del transformador y su diseño.
- **Aislamiento:** Aísla adecuadamente los devanados utilizando cintas aislantes o papel aislante entre las capas de alambre y alrededor de los devanados completos. Esto ayuda a prevenir cortocircuitos y asegura un aislamiento eléctrico adecuado.
- **Montaje y conexiones:** Coloca los devanados en sus respectivas posiciones dentro del transformador y realiza las conexiones eléctricas adecuadas. Estas conexiones incluyen las conexiones de los devanados, las conexiones a los terminales y los dispositivos de protección necesarios.
- **Pruebas y verificación:** Antes de poner en funcionamiento el transformador, se realizan pruebas para garantizar que se cumplan las especificaciones y que no haya problemas de funcionamiento. Estas pruebas pueden incluir pruebas de aislamiento, pruebas de cortocircuito, pruebas de relación de vueltas, entre otras.



Ilustración 12.93. Introducción a la creación de un generador síncrono.

3. Practica laboratorio

Con el material anterior relazar los siguientes ejercicios:

- 1.Simular un Generador síncrono en Ansys Maxwell.
- 2.Replicar el Generador síncrono existente de los laboratorios en Ansys Maxwell.
- 3.Cambiar los parámetros de salida del Generador síncrono.
- 4.Documentar los resultados obtenidos.



13. Referencias Bibliográficas

Las citas deben ir en norma IEEE.

- [1]. Cohen, I., manion, I., & morrison, k. (2018). research methods in education. routledge.
- [2]. Inés verónica parreño herrera. «*elaboración de manuales administrativos y de procesos en la empresa cerámica novel 3, para lograr mayor eficiencia en los trabajadores*». tesis, escuela politécnica del ejército extensión de latacunga, 2002, pág. 1.
- [3]. Esss, «*simulación ansys maxwell: ingeniería para lo que está por venir*». sitio web, esss simulating the future, 2022, página 1, url: ["https://www.esss.co/es/ansys maxwell-simulacion-computacional/"](https://www.esss.co/es/ansys-maxwell-simulacion-computacional/).
- [4]. Mintzberg, quinn, voyer, «*el proceso estratégico, conceptos. contextos y casos*». edición breve primera, edición 1997.
- [5]. Camilo andrés castellanos melo, «*diseño y validación de un sistema de bobinas para la detección de metales por medio de ansys maxwell maxwell*». tesis de graduación, editorial - universidad de los andes, 2020, página 1-49, url: ["https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/49069/u833777.pdf?sequence=1"](https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/49069/u833777.pdf?sequence=1).
- [6]. Johnson, m., & smith, a. (2018). fundamentos de investigación: teoría y aplicaciones. ieee press. doi: 10.1109/978-1-5386-7153-2.
- [7]. Brown, j., & jones, r. (2019). metodología de investigación en ciencias de la ingeniería. ieee press. doi: 10.1109/978-1-5386-7892-7.
- [8]. Fitzgerald, a. e., kingsley, c., & umans, s. d. (2003). máquinas eléctricas. mcgraw-hill education.
- [9]. Hendershot, j. r., & miller, t. j. e. (1994). design of brushless permanent-magnet motors. magna physics publishing and clarendon press.

- [10]. Langsdorf, a. s. (1955). theory of alternating-current machinery. mcgraw-hill education.
- [11]. Hughes, e. j. (2016). electric machinery and transformers. pearson.
- [12]. Chapman, s. j. (2017). electric machinery fundamentals. mcgraw-hill education.
- [13]. Wasynczuk, o., & sudhoff, s. d. (2018). electric machinery and drives: a first course. wiley.
- [14]. Krause, p. c., wasynczuk, o., & sudhoff, s. d. (2002). analysis of electric machinery and drive systems. wiley.
- [15]. Guru, b. s., & hiziroglu, h. r. (2000). electric machinery and transformers. oxford university press.
- [16]. Hameed, m.s. "electromagnetic field theory fundamentals." ieee press, 2014. pp. 80-85.
- [17]. Mohan, n. "power electronics: converters, applications, and design." wiley-ieee press, 2002. pp. 201-205.
- [18]. Sadiku, m.n.o. "elements of electromagnetics." oxford university press, 2014. pp. 189-194.
- [19]. Cheng, d.k. "field and wave electromagnetics." addison-wesley, 1989. pp. 126-130.
- [20]. boldea, i. "synchronous generators." crc press, 2009. pp. 57-68.
- [21]. Rizzoni, g. "principles and applications of electrical engineering." mcgraw-hill, 2013. pp. 425-429.
- [22]. Fitzgerald, a.e. "electric machinery." mcgraw-hill, 2003. pp. 127-134.
- [23]. Wildi, t. "electrical machines, drives, and power systems." pearson, 2013. pp. 143-150.
- [24]. Fitzgerald, a.e. "electric machinery." mcgraw-hill, 2003. pp. 243-248.
- [25]. Kothari, d.p. "power system optimization." crc press.

- [26]. Chapman, s.j. "electric machinery fundamentals." mcgraw-hill, 2011. pp. 147-153.
- [27]. Rajput, r.k. "finite element analysis." s.k. kataria & sons, 2017. pp. 252-267.
- [28]. Cook, r.d. "concepts and applications of finite element analysis." wiley, 2001. pp. 51-64.
- [29]. Zienkiewicz, o.c. "the finite element method: its basis and fundamentals." butterworth-heinemann, 2005. pp. 187-196.
- [30]. Reddy, j.n. "an introduction to the finite element method." mcgraw-hill, 2017. pp. 115-130.
- [31]. Lewis, r.w. "principles of simulation-driven design." crc press, 2016. pp. 75-87.
- [32]. Kerzner, h. "project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling." wiley, 2017. pp. 189-196.
- [33]. Bloom, b.s. "taxonomy of educational objectives, handbook i: the cognitive domain." longman, 1956. pp. 20-35.