

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DE TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE CONTINUA ORIENTADO AL USO DE PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE CONVERSIÓN ELECTROMECAÁNICA DE ENERGÍA EN EL AMBIENTE MATLAB

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

AMAGUA RODRÍGUEZ DAYANA ELIZABETH

HERRERA JIMÉNEZ GISSELA BELÉN

DIRECTOR: Ing. Patricia Elizabeth Otero Valladares, MSc.

CODIRECTOR: PhD. Hugo Neptalí Arcos Martínez

Quito, Mayo 2021

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Dayana Elizabeth Amagua Rodríguez y Gissela Belén Herrera Jiménez, bajo nuestra supervisión.

Ing. Patricia Elizabeth Otero Valladares, MSc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

PhD. Hugo Neptalí Arcos Martínez
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotras, Dayana Elizabeth Amagua Rodríguez y Gissela Belén Herrera Jiménez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Dayana Elizabeth Amagua Rodríguez

Gissela Belén Herrera Jiménez

DEDICATORIA

A mis padres, quienes me han apoyado con su incondicional amor y cariño, pero en especial a mi Madre Ladis quien ha sido mi motor y fuerza para seguir adelante, este logro es para ti.

A mi hermano Rubén, quien jamás me dejó desfallecer y me brindó su apoyo.

A mi familia, por su amor y sus oraciones.

A mi mascota Hera quien fue mi compañera de largas noches de desvelo.

DAYANA

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios y a la Virgen por darme las fuerzas y bendiciones necesarias para salir adelante y cumplir con uno de mis objetivos de vida.

A mis padres, papito Ángel que desde el cielo está velando por mí, mamita Panchis que ha sido un gran ejemplo de madre y mujer, los dos que con sus principios y valores me han inculcado que la mejor herencia que me pueden dejar es la educación y la calidad de persona que puedo ser.

A mis hermanos Francis, Alexandra, Andrea y Ángel que siempre me daban la motivación para salir adelante cuando parecía que no podía más.

GISSELA

AGRADECIMIENTO

A Dios por ayudarme a culminar con éxito cada una de las metas que me he propuesto, por darme una familia y amigos increíbles.

A mi madre, por darme todo su cariño incondicional, por ser mi apoyo y por no dejarme caer, ni botar la toalla cuando el camino estaba difícil, eres mi inspiración para seguir adelante. Este logro va para ti TE AMO MAMI.

A mi padre que me ha acompañado a lo largo de este recorrido, a mi hermano que ha estado con su incondicional apoyo y palabras de aliento.

A mi familia que han estado en cada momento inspirándome a seguir adelante.

A mis amigos Cris, Ronnie, Kevin que hemos compartido los logros de cada uno como si fueran los propios, por siempre estar cuando los necesito.

A mis amigos Sandy, Joss, Katty, Johanna, Mauricio, Vinicio, Fernando, Jorge, César, Ronald, Oscar, y todos los demás que me falta mencionar, que hicieron que mi paso por la universidad sea más llevadero, gracias por ser ese apoyo porque sabemos que estudiar en la poli no es cosa fácil. Gracias por jamás dejarme sola.

A Gissela, mi compañera de tesis que, aunque fue arduo el camino lo logramos.

A mi directora la Ingeniera Patricia Otero y co-director Dr. Hugo Arcos, por sus consejos y brindarnos sus conocimientos a lo largo del desarrollo de este proyecto.

A cada uno de mis profesores que han sido faro guía y uno de los factores que han hecho posible que culmine con éxito mi carrera.

DAYANA

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen por no dejarme derrumbar y darme las fuerzas para acabar este trabajo de titulación.

A mi papito y mi mamita que con sus esfuerzos lograron darme la educación superior además brindándome su comprensión y amor infinito.

A mis hermanos Francis, Alexandra, Andrea y Ángel que me dieron su apoyo incondicional en mi vida estudiantil y siempre creyeron en mí.

A mis sobrinos Maite, Matias, Mayli y Juan Diego que son la alegría de la casa y con su sonrisa hacían que un día malo se convierta en uno bueno.

A mis cuñados Juan, Edison y José que se han convertido en amigos incondicionales.

A la Magister Patricia Otero que desde que la conocí más que una profesora ha sido una amiga, además de guiarnos en este trabajo de titulación.

Al PhD. Hugo Arcos que nos dio sus guías y ayuda en este trabajo de titulación siendo un gran ejemplo en el ámbito profesional y personal.

A mi compañera de tesis Dayana con la cual hemos venido desarrollado este trabajo de titulación y se ha convertido en una excelente amiga.

A mis amigos que han estado en las buenas y en las malas a lo largo de mi vida estudiantil y personal en especial a: Javier, Efraín, Carmita, Pamela, Jaime, Santiago, Paúl, Wilson, Gabriela, Rogger, Santo y Nancy. Los cuales me han demostrado el verdadero significado de la amistad.

A mis profesores de la facultad que me han impartido sus conocimientos con mucha paciencia y amor.

Y a todos mis demás familiares y compañeros que han estado a lo largo de la vida creyendo que podía conseguir este objetivo.

GISSELA

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| AVAL..... | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA..... | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTO | V |
| RESUMEN..... | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 1.1 OBJETIVOS | 5 |
| 1.2 ALCANCE | 6 |
| 1.3 MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 1.3.1 TRANSFORMADOR..... | 6 |
| 1.3.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA | 17 |
| 1.3.3 HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS MÓDULOS DIDÁCTICOS DE SOFTWARE | 26 |
| 1.3.4 TEORIA DE ERRORES EN LAS MEDIDAS..... | 28 |
| 2 MODELACIÓN MATEMÁTICA..... | 31 |
| 2.1 TRANSFORMADORES | 31 |
| 2.1.1 TRANSFORMADOR IDEAL [2]..... | 31 |
| 2.1.2 TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS [2]..... | 32 |
| 2.1.3 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO [2]..... | 40 |
| 2.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA..... | 41 |
| 2.2.1 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO MOTOR [2]..... | 41 |
| 2.2.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR [2]..... | 44 |
| 3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS MÁQUINAS | 47 |
| 3.1 TRANSFORMADOR | 47 |
| 3.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA..... | 50 |
| 4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DIDÁCTICOS DE SOFTWARE | 53 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | PRÁCTICA UNO: INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y USO DE LOS MÓDULOS DE SOFTWARE..... | 55 |
| 4.2 | PRÁCTICA DOS: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO..... | 57 |
| 4.3 | PRÁCTICA TRES: PRUEBAS CON TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS. 59 | |
| 4.4 | PRÁCTICA CUATRO: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO..... | 60 |
| 4.5 | PRÁCTICA CINCO: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO MOTOR 63 | |
| 4.6 | PRÁCTICA SEIS: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR..... | 66 |
| 5 | PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE | 68 |
| 5.1 | PRÁCTICA UNO: INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y USO DE LOS MÓDULOS DE SOFTWARE..... | 68 |
| 5.2 | PRÁCTICA DOS: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO..... | 69 |
| 5.3 | PRÁCTICA TRES: PRUEBAS CON TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS 70 | |
| 5.4 | PRÁCTICA CUATRO: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO..... | 72 |
| 5.5 | PRÁCTICA CINCO: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO MOTOR 75 | |
| 5.6 | PRÁCTICA SEIS: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR..... | 77 |
| 6 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 80 |
| 6.1 | CONCLUSIONES..... | 80 |
| 6.2 | RECOMENDACIONES | 82 |
| 7 | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 83 |
| | ANEXOS..... | 85 |

RESUMEN

En el presente estudio técnico se realizan seis módulos didácticos de software para el desarrollo de prácticas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional que contemplan los tópicos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua.

Para la realización de los módulos se utiliza la plataforma Matlab con sus prestaciones Simulink y App Designer, mismas que facilitan la realización de los modelos matemáticos necesarios para cada una de las prácticas y el diseño de las pantallas de usuario con la finalidad que el estudiante refuerce los conocimientos adquiridos en la asignatura.

Los modelos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua utilizados para realizar cada uno de los módulos se rigen a los parámetros de las máquinas que cuenta el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la facultad de Ingeniería Eléctrica Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

PALABRAS CLAVE: Transformador, máquina de corriente continua, modelo matemático, Simulink.

ABSTRACT

In this technical study six didactic software modules are carried out for the development of practices in the Electrical Machines Laboratory of the National Polytechnic School, these modules contemplate topics such as transformers and direct current electrical machines.

The modules are developed in the Matlab platform with the use of the features in Simulink and App Designer, which facilitate the use of the mathematical models necessary for each of the practices and the users screen design, which enables the students to reinforce the knowledge acquired in the classroom.

The transformers and direct current electrical machines models are used to develop each of the modules are restricted by the parameters of the real machines in the Electrical Machines Laboratory of the Faculty of Electrical and Electronic Engineering of the National Polytechnic School.

KEY WORDS: Transformer, direct current machine, mathematical model, Simulink

1 INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto técnico se desarrollan módulos didácticos de software para el Laboratorio Máquinas Eléctricas enfocados a la realización de las prácticas de la materia de Conversión Electromecánica de Energía. El proyecto abarca la teoría de construcción y operación del transformador y máquina de corriente continua. Los módulos se desarrollarán con el software de simulación MATLAB usando la prestación App Designer y Simulink.

Para la realización de los módulos de software didácticos, se desarrollarán los modelos matemáticos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua para su posterior simulación en Simulink, teniendo como resultado final los parámetros que rigen estas máquinas para posteriormente realizar pantallas de usuario por medio de la prestación App Designer de MATLAB, con las cuales el estudiante puede realizar las prácticas que contemplan estos tópicos. Además, el estudiante podrá observar de manera virtual el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Desarrollar herramientas de software para la simulación de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua, orientadas al uso de prácticas del Laboratorio de Conversión Electromecánica de Energía mediante el software Matlab.

Los objetivos específicos de este Proyecto Técnico son:

- Implementar modelos matemáticos para la simulación de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua.
- Estructurar prácticas del Laboratorio de Conversión Electromecánica de Energía que tengan como tópicos transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua.
- Implementar un software de simulación con interfaz gráfica que incluya módulos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua.
- Desarrollar un manual para la instalación del software y manejo de cada uno de los módulos.

1.2 ALCANCE

En el presente estudio técnico se diseñarán diferentes módulos didácticos mediante el uso del software MATLAB, en base a los modelos matemáticos de los transformadores y máquina de corriente continua, que se encuentran en el Laboratorio de Conversión Electromecánica de Energía de la Facultad de Ingeniería Eléctrica para que el estudiante pueda reforzar los conocimientos y familiarizarse con los equipos del laboratorio.

Se realizará la simulación de los módulos previamente diseñados con los modelos matemáticos de cada una de las máquinas, luego que se encuentren funcionales y cumplan con los parámetros de las máquinas que se encuentran en el laboratorio, se realizará una interfaz gráfica para cada módulo, con el fin de que el estudiante realice de manera adecuada cada una de las prácticas que abarcan estos tópicos.

Dentro del alcance se plantean la elaboración de una guía de laboratorio que contemplará los tópicos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua, que se encuentran establecidos en el sílabo, se desarrollarán una o dos prácticas por cada tópico, teniendo un estimado de 6 prácticas, las cuales incluirán las secciones que se han manejado previamente en el laboratorio, es decir, una parte teórica, coloquio, desarrollo y resultados, adicionalmente se redactará un manual de usuario para el instructor del laboratorio.

Con los resultados obtenidos en los módulos desarrollados, se contrastará con los de las prácticas del Laboratorio de Conversión Electromecánica de Energía de semestres anteriores.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 TRANSFORMADOR

Los transformadores son máquinas estáticas que transmiten energía mediante un campo electromagnético. La forma más simple de un transformador consiste en dos bobinas eléctricamente aisladas, pero devanadas sobre un mismo núcleo magnético, al pasar una corriente variable en el tiempo en una de las bobinas se genera un flujo magnético variable en el tiempo, que en su mayor parte es enlazado por la otra bobina, induciéndole una fuerza electromotriz (fem) variable en el tiempo (voltaje). La frecuencia de la fem inducida en la bobina secundaria es la misma que la presente en la bobina primaria. Si se coloca una carga en una bobina secundaria se establece una corriente, y en consecuencia se transfiere energía a través del flujo magnético que se generó en el núcleo.

1.3.1.1 Transformador ideal

En la Figura 1.1 se muestra un transformador ideal con dos devanados. Siendo N_1 y N_2 el número de vueltas en el primario y secundario, respectivamente [1].

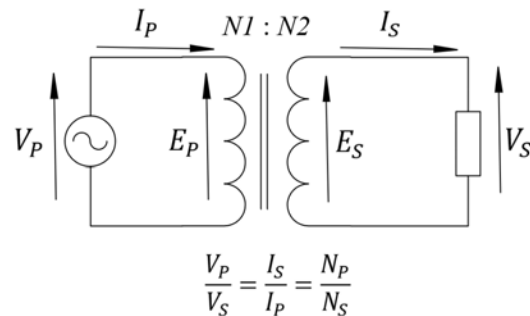


Figura 1.1 Transformador ideal

En el transformador ideal se tiene como supuestos que las pérdidas en el cobre de los bobinados, las pérdidas en el núcleo, los flujos dispersión y la reluctancia del material del núcleo son despreciables.

De acuerdo con la Ley de Faraday, el flujo magnético en el núcleo de un transformador induce una fem e_1 en el devanado primario que se opone al voltaje aplicado, teniendo:

$$e_1 = -N_1 * \frac{d\phi}{dt} \quad [V] \quad (1.1)$$

En forma semejante la fem inducida en el devanado secundario:

$$e_2 = -N_2 * \frac{d\phi}{dt} \quad [V] \quad (1.2)$$

Donde:

e_1 y e_2 : Fuerza electromotriz inducida en el primario y secundario respectivamente

N_1 y N_2 : Numero de vueltas del devanado primario y secundario respectivamente

ϕ : Flujo magnético en el núcleo

En el caso de un transformador ideal, las fem inducidas (e_1 y e_2), son iguales a los voltajes en sus respectivos terminales, de este supuesto se establece que, la relación de las fem inducidas entre el primario y el secundario, es igual a la relación de vueltas del primario y secundario [2].

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.3)$$

Si i_2 es la corriente que circula en el devanado secundario cuando se conecta una carga, su magnitud depende de la impedancia de la carga y su dirección tiende a debilitar el flujo magnético en el núcleo y a disminuir la fem inducida en el primario. La fuerza magnetomotriz (fmm) en el devanado primario ($N_1 \cdot i_1$) se iguala a la fmm producida en el devanado secundario ($N_2 \cdot i_2$) y por consiguiente, la relación de corrientes del primario y del secundario se transforma en una relación inversa al número de vueltas [3].

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.4)$$

Donde:

i_1 y i_2 : Son las corrientes de los bobinados primario y secundario respectivamente.

1.3.1.2 Transformador no ideal

En el transformador con saturación o real no se desprecian las pérdidas en el cobre de los bobinados, las pérdidas en el núcleo, los flujos dispersos y la reluctancia del material del núcleo.

Para modelar un transformador real se conecta en serie una resistencia en cada devanado como se puede apreciar en la Figura 1.2, estas son las que definen que la potencia de entrada y salida sean diferentes, los voltajes en terminales no son iguales a la fem inducida y su eficiencia es menor al 100%.

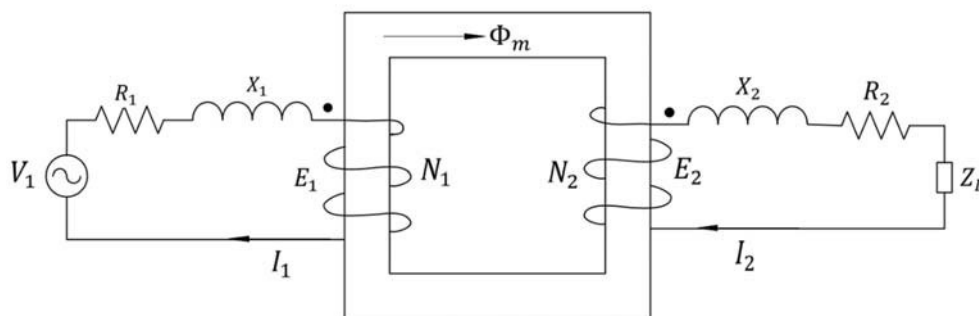


Figura 1.2 Transformador no ideal

Cada devanado del transformador crea un flujo que tiene dos componentes, uno que se denomina flujo de dispersión es la parte del flujo que circula por el aire y en propio

bobinado mientras que el otro es denominado flujo mutuo que es el que circula en el núcleo y ambos devanados [1].

El rendimiento que presenta un transformador está afectado por la caída de voltaje que tiene cada uno de los devanados, está directamente asociado con el flujo de dispersión presente en estos, se lo puede representar por medio de una reactancia de dispersión para el devanado primario y secundario, respectivamente [1].

En el caso de un transformador no ideal las ecuaciones que lo rigen son:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = a \quad (1.5)$$

$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_1)I_1 \quad [V] \quad (1.6)$$

$$V_2 = E_2 - (R_2 + jX_2)I_2 \quad [V] \quad (1.7)$$

Donde:

R_1 y R_2 : Resistencias del devanado primario y secundario, respectivamente

X_1 y X_2 : Reactancias del devanado primario y secundario, respectivamente

R_c : Resistencia del núcleo

X_m : Reactancia del núcleo

$V_1 \neq E_1$ y $V_2 \neq E_2$

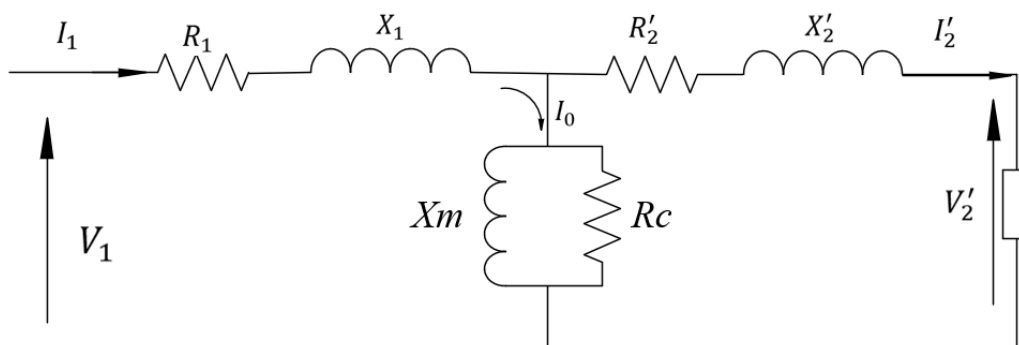


Figura 1.3 Circuito equivalente de un transformador no ideal

1.3.1.3 Pruebas en transformadores

Se realizan con la finalidad de conocer los parámetros del circuito equivalente del transformador, y posteriormente verificar el comportamiento del transformador bajo cualquier condición de trabajo.

1.3.1.3.1 Prueba de circuito abierto o sin carga

Esta prueba tiene como objetivo determinar las pérdidas en el núcleo del transformador (Pérdidas sin carga o en el hierro), y la corriente de excitación.

Para la realización de la prueba de circuito abierto se alimenta a voltaje y frecuencia nominales en el lado de bajo voltaje, mientras que el lado de alto voltaje se deja en circuito abierto [3].

Para realizar la prueba se coloca el amperímetro, vatímetro y voltímetro en el lado de bajo voltaje como se observa en la Figura 1.4; en condiciones sin carga las pérdidas de potencia en el devanado de alto voltaje son despreciables, con lo que se obtiene el circuito equivalente aproximado referido al lado de bajo voltaje como se observa en la Figura 1.5 [1].

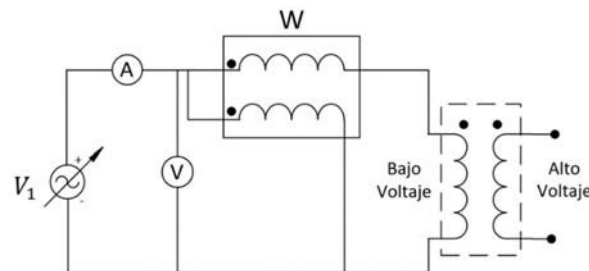


Figura 1.4 Ubicación de los instrumentos para la prueba de circuito abierto en un transformador.

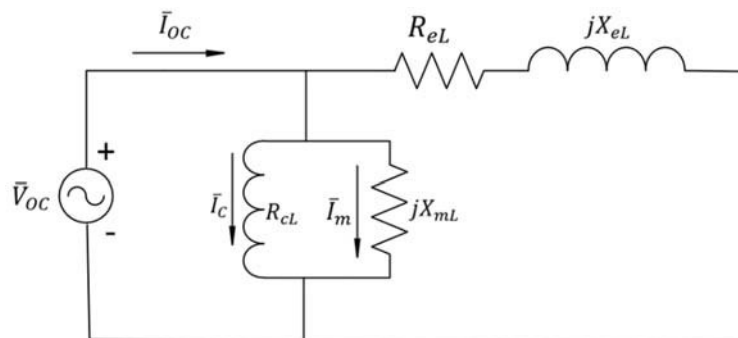


Figura 1.5 Transformador de dos devanados referido al lado de bajo voltaje sujeto a la prueba de circuito abierto

El vatímetro mide las pérdidas en el núcleo del transformador, la componente de pérdida de la corriente de excitación está en fase con el voltaje y la corriente de magnetización está 90° en atraso con respecto al voltaje, como se aprecia en la Figura 1.6 [1].

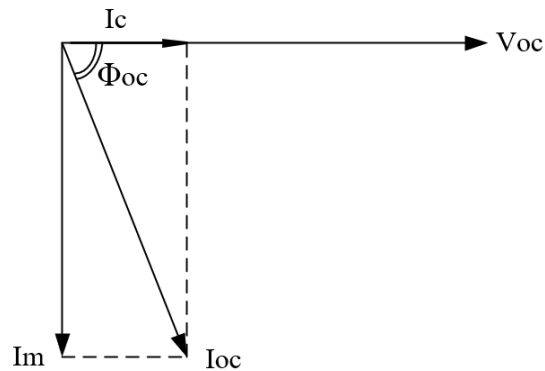


Figura 1.6 Diagrama fasorial de un transformador en prueba de circuito abierto.

Para encontrar la resistencia en el núcleo y la reactancia de magnetización vistas desde el lado de bajo voltaje se tiene las siguientes mediciones:

V_{oc} : Voltaje aplicado desde el lado de bajo voltaje

I_{oc} : Corriente de excitación medida por el amperímetro

P_{oc} : Potencia que registra el vatímetro, con un ángulo de factor de potencia en atraso.

Las ecuaciones que permiten encontrar los parámetros del transformador son:

$$S_{oc} = V_{oc} \cdot I_{oc} \quad [kVA] \quad (1.8)$$

$$\Phi_{oc} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{oc}}{S_{oc}}\right) \quad (1.9)$$

$$Q_{oc} = \sqrt{S_{oc}^2 - P_{oc}^2} \quad [kVAr] \quad (1.10)$$

$$I_c = I_{oc} \cos(\Phi_{oc}) \quad [A] \quad (1.11)$$

$$I_m = I_{oc} \sin(\Phi_{oc}) \quad [A] \quad (1.12)$$

$$R_{cL} = \frac{V_{oc}}{I_c} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad [\Omega] \quad (1.13)$$

$$X_{mL} = \frac{V_{oc}}{I_m} = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} \quad [\Omega] \quad (1.14)$$

1.3.1.3.2 Pruebas de corto circuito

El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia de los devanados y las reactancias de dispersión.

La prueba se realiza estableciendo un cortocircuito en uno de los devanados, normalmente se cortocircuita el de bajo voltaje y se alimenta el otro devanado con una fuente de voltaje alterno a frecuencia nominal, que se ajusta con cuidado para que se conduzca la corriente nominal especificada en cada devanado, por consiguiente, el voltaje aplicado es una fracción del voltaje especificado o nominal [1].

Al ser una fracción del voltaje especificado, la corriente que pasa por el núcleo como la de corriente de excitación son pequeñas y se las pueden despreciar, es decir la resistencia de pérdidas del núcleo y la reactancia de magnetización son muy grandes. En la Figura 1.7 se puede observar la forma de conexión de los instrumentos de medida del transformador visto desde el lado de alto voltaje donde el vatímetro mide las pérdidas en el cobre a plena carga [1].

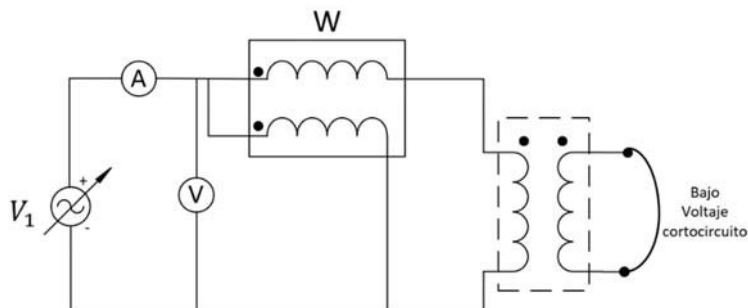


Figura 1.7 Diagrama de un transformador para la prueba de cortocircuito

Para el cálculo de los parámetros, en la prueba de cortocircuito se utiliza el circuito equivalente del transformador como se muestra en la Figura 1.8.

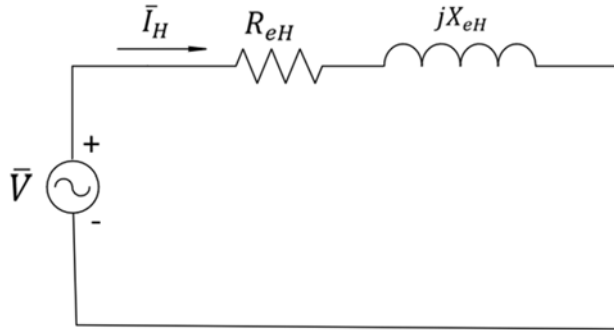


Figura 1.8 Circuito equivalente aproximado de un transformador de dos devanados en la prueba de cortocircuito

Donde:

V_{sc} : Voltaje medido por el voltímetro en la prueba de corto circuito

I_{sc} : Corriente medida en el amperímetro en la prueba de corto circuito

P_{sc} : Potencia medida por el vatímetro en la prueba de corto circuito.

R_{eH} : Resistencia de los dos devanados referida al lado de alto voltaje.

X_{eH} : Reactancia de los dos devanados referida al lado de alto voltaje.

a : Relación de transformación del transformador.

$$R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad [\Omega] \quad (1.15)$$

$$Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad [\Omega] \quad (1.16)$$

$$X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} \quad [\Omega] \quad (1.17)$$

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.18)$$

Si R_H es la resistencia del lado de alto voltaje, R_L la resistencia del devanado de bajo voltaje, X_H la reactancia de dispersión de lado de alto voltaje y X_L la reactancia de dispersión devanado de bajo voltaje se tiene que:

$$R_{eH} = R_H + a^2 R_L \quad [\Omega] \quad (1.19)$$

$$X_{eH} = X_H + a^2 X_L \quad [\Omega] \quad (1.20)$$

Para el cálculo de las resistencias y reactancias se tiene que tomar en cuenta el criterio de diseño óptimo, el cual supone que el transformador se diseñó de tal manera que las pérdidas de potencia de ambos devanados son iguales, donde se tiene:

$$I_H^2 R_H = I_L^2 R_L \quad [\Omega] \quad (1.21)$$

Se puede obtener:

$$R_H = a^2 R_L = 0.5 R_{eH} \quad [\Omega] \quad (1.22)$$

$$X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} \quad [\Omega] \quad (1.23)$$

1.3.1.4 Transformador trifásico

Un transformador trifásico se puede configurar utilizando tres transformadores monofásicos exactamente iguales o un transformador trifásico de un solo cuerpo. Por criterios económicos se diseñan para tener sus 6 devanados en un núcleo magnético, el cual puede ser del tipo núcleo o tipo acorazado como se puede apreciar en la Figura 1.9 y Figura 1.10 respectivamente [1].

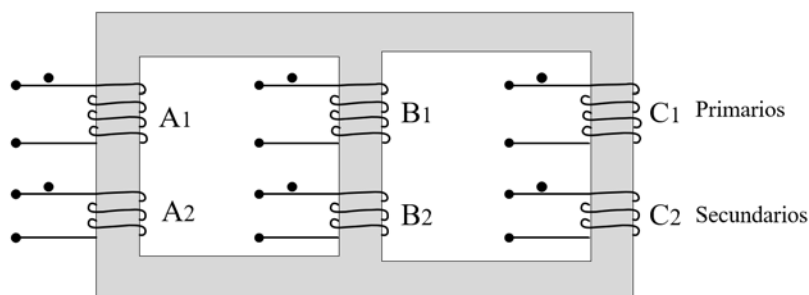


Figura 1.9 Transformador tipo núcleo

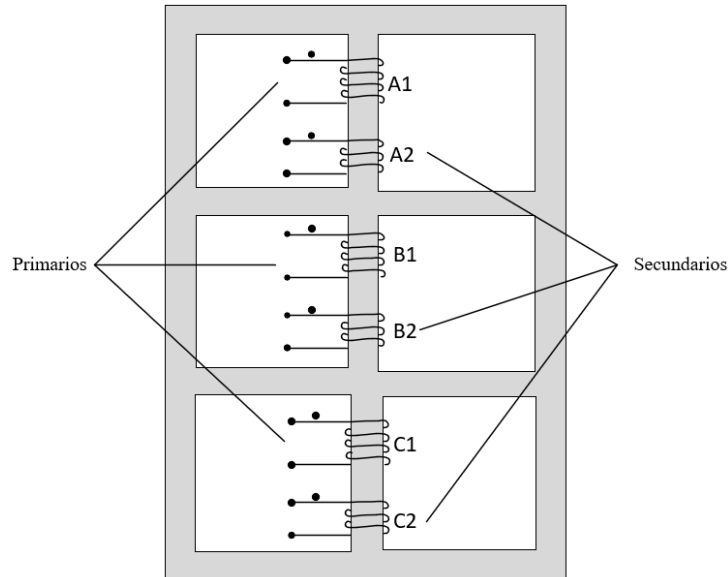


Figura 1.10 Transformador tipo acorazado

Los tres devanados en cada lado de un transformador trifásico pueden conectarse de diferente manera, estrella (Y) o en delta (Δ), por lo tanto, generalmente hay 4 formas de conexión las cuales son:

- Y/Y
- Y/ Δ
- Δ /Y
- Δ / Δ

Además, la conexión en zig zag. Para analizar un transformador trifásico se emplea un circuito equivalente por fase de un transformador, se tiene que usar las relaciones de transformación entre Y a Δ o viceversa, según como sea necesario, para la impedancia se utilizará la siguiente transformación [1]:

$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3} \quad [\Omega] \quad (1.24)$$

Donde:

Z_Y : Impedancia en configuración Y.

Z_Δ : Impedancia en configuración delta.

El voltaje de línea-línea del devanado que está conectado en Y, se puede expresar el voltaje línea-neutro. Mientras que, las corrientes de línea-línea y línea-neutro son iguales:

$$V_n = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad [V] \quad (1.25)$$

$$I_n = I_L \quad [A] \quad (1.26)$$

Donde:

V_n : Voltaje fase - neutro.

V_L : Voltaje de línea-línea.

I_n : Corriente fase - neutro.

I_L : Corriente de línea-línea

Los voltajes en el devanado que está conectado en delta son iguales, es decir, el voltaje de línea-línea es igual al voltaje de línea-neutro. Mientras que, la corriente de línea-línea se puede expresar con la la corriente línea-neutro.

$$V_n = V_L \quad [V] \quad (1.27)$$

$$I_n = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad [A] \quad (1.28)$$

Donde:

V_n : Voltaje fase - neutro.

V_L : Voltaje de línea-línea

I_n : Corriente fase - neutro.

I_L : Corriente de línea-línea.

Se tiene que analizar los transformadores trifásicos como equilibrados a menos que se especifique lo contrario.

1.3.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Es importante tener en cuenta que existen dos tipos de máquinas rotativas que se encargan de la conversión de energía eléctrica, las máquinas de corriente continua y las máquinas de corriente alterna, en este trabajo se estudia la máquina de corriente continua actuando como motor y como generador [1].

En las máquinas de corriente continua se tiene un flujo magnético uniforme que se establece por medio de polos fijos que se encuentran montados en el interior del elemento estacionario de la máquina, denomina estator, es posible usar imanes permanentes como polos o enrollar los devanados de campo alrededor de los polos [2].

Este tipo de máquina tienen mucha versatilidad, debido a que sus devanados de campo pueden conectarse de manera diferente.

Una máquina de corriente continua está conformada por las siguientes partes
Figura 1.11:

- **Estator:** Da un apoyo mecánico a la máquina, consta de dos partes que son el yugo y los polos.
- **Armadura:** Es la que está cubierta por los polos fijos en el estator, normalmente está construida con conductores de cobre, además tiene alta permeabilidad lo que asegura una trayectoria de baja reluctancia para el flujo magnético.
- **Conmutador:** Cumple la función de un rectificador, el cual cambia la fem alterna inducida en las bobinas de la armadura en un voltaje unidireccional, está formado por segmentos de cobre aislados entre sí por medio de láminas de mica, cada segmento de cobre del conmutador está eléctricamente conectado a uno de los extremos de las bobinas de armadura.
- **Escobillas:** Son de suma importancia porque permiten la conexión del circuito externo con las bobinas de armadura, además, están sujetas al conmutador por medio de porta escobillas, las que tienen que estar a una correcta presión para funcionar de manera adecuada.

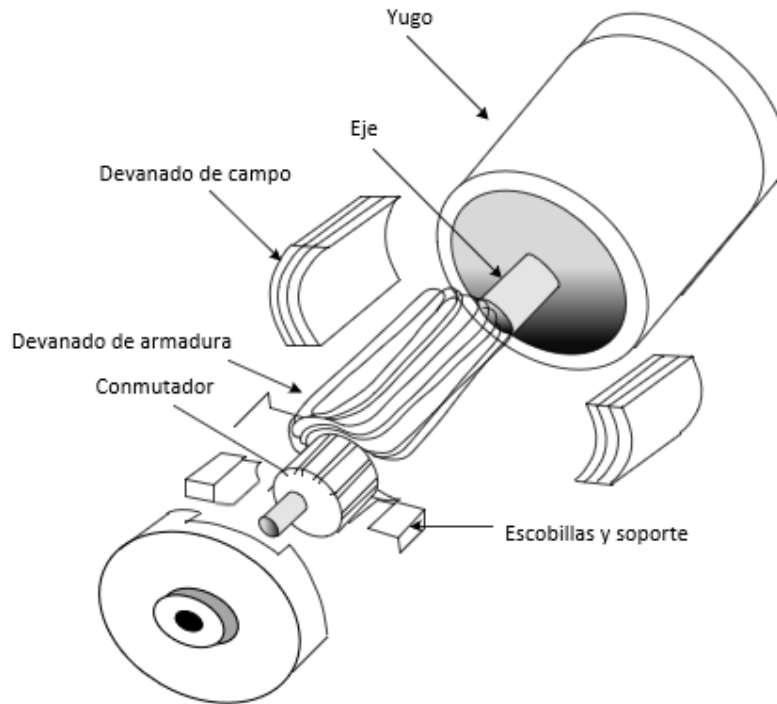


Figura 1.11 Partes de la máquina de corriente continua

1.3.2.1 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA - GENERADOR

La máquina de corriente continua operando como generador tiene diferentes clasificaciones, por el tipo de excitación, puede ser excitación independiente o autoexcitado, y por el método de conexión del devanado de campo, el generador de corriente continua autoexcitado tiene tres clasificaciones generador shunt o en derivación, generador en serie, y generador compuesto [1].

La operación de los generadores de corriente continua se puede describir analizando el voltaje en sus terminales y la corriente de carga.

1.3.2.1.1 Generador de corriente continua con excitación independiente [1]

El generador de corriente continua con excitación independiente requiere de fuentes de corriente continua externas para el devanado de campo, estas son utilizados para pruebas de laboratorio o conjuntos con regulación especial, la fuente externa que se utiliza puede ser otro generador de corriente continua, un rectificador controlado o una batería.

En estado estable no es necesario incluir la inductancia de cada devanado Figura 1.12 ni la inercia del sistema.

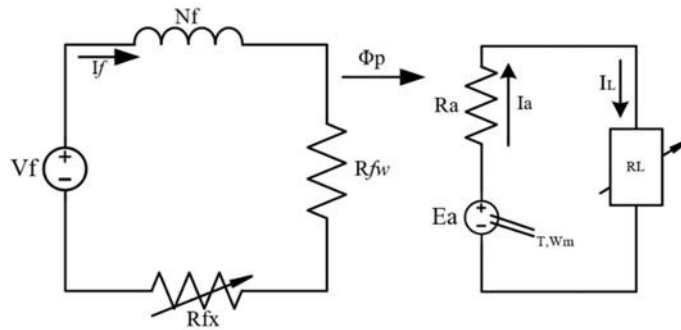


Figura 1.12 Circuito equivalente del generador de corriente continua con excitación independiente

Las ecuaciones que definen al generador de corriente continua con excitación independiente son las siguientes:

$$V_f = I_f (R_{fw} + R_{fx}) = I_f R_f \quad [V] \quad (1.29)$$

$$E_a = V_t + I_a R_a \quad [V] \quad (1.30)$$

$$I_L = I_a \quad [A] \quad (1.31)$$

Donde:

E_a : fem inducida en el devanado de armadura

R_a : Resistencia en el devanado de armadura

I_a : Corriente en el devanado de armadura

I_L : Corriente de carga

I_f : Corriente del devanado de campo

R_f : Resistencia en el devanado de campo

R_{fx} : Resistencia externa agregada en el devanado de campo

N_f : Numero de vueltas del devanado de campo

V_f : Voltaje de la fuente externa

$R_f = R_{fw} + R_{fx}$: Resistencia total del circuito del devanado de campo

$V_t = E_a - I_a R_a$: Voltaje en terminales

En la Figura 1.13 se puede ver la característica externa del generador de excitación independiente variando la carga desde 0 hasta el 150% de la carga especificada.

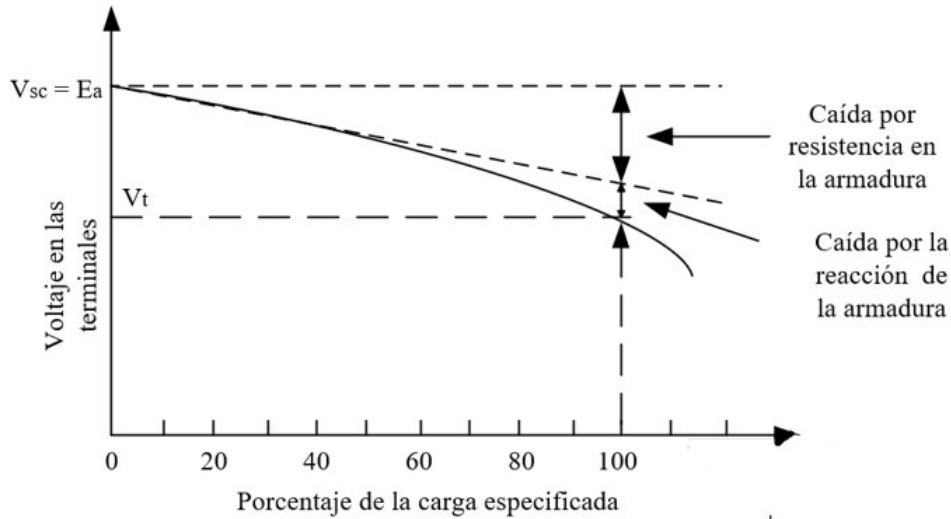


Figura 1.13 Curva característica externa del generador con excitación independiente

1.3.2.1.2 Generador de corriente continua shunt [1]

En el generador shunt el devanado de campo se conecta en paralelo con la armadura, en este tipo de máquina el voltaje en terminales es igual al voltaje del devanado de campo. Sin carga la corriente de campo es igual a la de armadura, mientras que con carga, la corriente de armadura suministra la corriente de carga y de campo. Este tipo de generadores tienen un voltaje en terminales muy alto por lo que es necesario que la resistencia del circuito de campo también sea alta para minimizar las pérdidas.

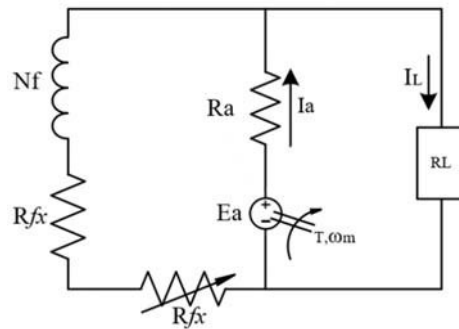


Figura 1.14 Circuito equivalente de un generador de corriente continua shunt o en derivación

En un generador shunt el voltaje en terminales es capaz de crecer mientras exista un flujo residual en los polos del campo.

Las ecuaciones que rigen a un generador shunt en estado estable son las siguientes:

$$I_a = I_L + I_f \quad [A] \quad (1.32)$$

$$V_t = I_f (R_{fw} + R_{fx}) = I_f R_f \quad [V] \quad (1.33)$$

$$V_t = I_L R_L = E_a - I_a R_a \quad [V] \quad (1.34)$$

Donde:

E_a : fem inducida en el devanado de armadura

R_a : Resistencia en el devanado de armadura

I_a : Corriente en el devanado de armadura

I_L : Corriente de carga

I_f : Corriente del devanado de campo

R_f : Resistencia en el devanado de campo

R_{fx} : Resistencia externa agregada en el devanado de campo

$R_f = R_{fw} + R_{fx}$: Resistencia total del circuito del devanado de campo shunt

Mientras aumenta la corriente de carga, el voltaje en terminales disminuye debido a:

1. El aumento en la caída de voltaje $I_a R_a$
2. El efecto desmagnetizante de la reacción de la armadura
3. La disminución en la corriente del campo.

Para que este generador funcione de manera correcta tiene que operar en la región saturada, caso contrario podría caer hasta cero el voltaje en terminales.

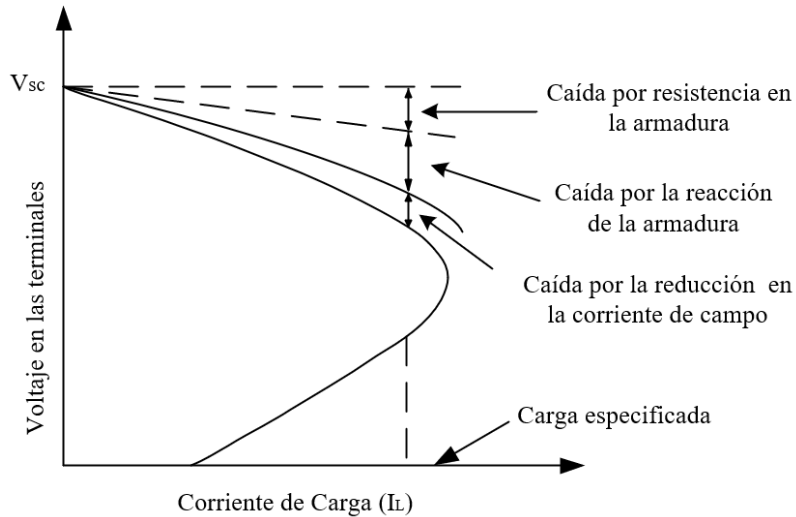


Figura 1.15 Curva característica externa del generador shunt

1.3.2.1.3 Generador de corriente continua en serie [1]

Este tipo de generadores la armadura se encuentra en serie con el bobinado de campo, el bobinado de campo debe que conducir la corriente de carga especificada, razón por la que su número de vueltas es reducido y tienen un conductor de alto calibre. Generalmente cuentan con una resistencia variable R_d que puede estar conectada en paralelo con el devanado de campo para controlar su corriente y flujo.

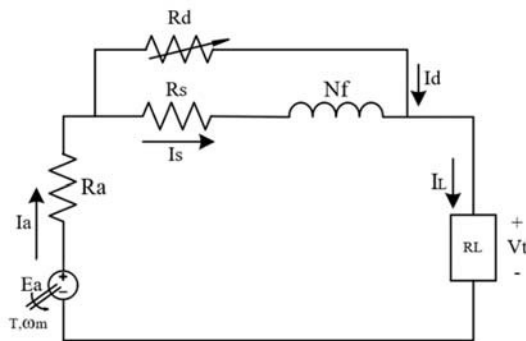


Figura 1.16 Circuito equivalente del generador de corriente continua en serie

Es importante tomar en cuenta que este tipo de generador tiende a suministrar una corriente constante de carga, aunque el voltaje aumente como se muestra en la curva característica externa.

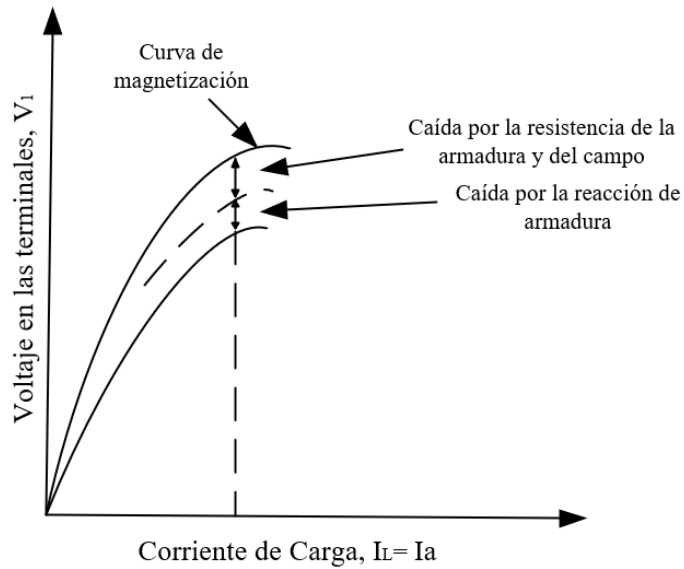


Figura 1.17 Curva característica externa de un generador de corriente continua en serie

Las ecuaciones que rigen al generador de corriente continua serie en estado estable son las siguientes:

$$V_t = E_a - I_a R_a - I_s R_s \quad [V] \quad (1.35)$$

$$I_s R_s = I_d R_d \quad [V] \quad (1.36)$$

$$I_a = I_L = I_s + I_d \quad [A] \quad (1.37)$$

Donde:

E_a : fem inducida en el devanado de armadura

R_a : Resistencia en el devanado de armadura

I_a : Corriente en el devanado de armadura

I_L : Corriente de carga

I_s : Corriente en el devanado de campo serie

I_d : Corriente en la resistencia del desviador para el campo en serie

R_s : Resistencia en el devanado del campo serie

R_d : Resistencia en del desviador del campo serie

1.3.2.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA - MOTOR

Las máquinas de corriente continua operando como motor se clasifican en tipos similares a los del generador, shunt, serie y compound. Se puede tener motores con excitación independiente si se usa una fuente auxiliar para el devanado de campo, esto no es práctico debido a que se necesitarían dos fuentes de energía eléctrica [1].

En la operación del motor de corriente continua, el campo magnético es establecido por los polos del estator, en tanto que en los conductores de la armadura a través del conmutador, se mantiene la misma dirección de corriente y por lo tanto se genera un campo constante de posición fija en el espacio [1].

1.3.2.2.1 Motor en serie [1]

Se conecta el devanado del campo en serie con el circuito de armadura, como se muestra en la Figura 1.18, se incluye una resistencia externa en serie con la armadura que se puede usar para arrancar el motor o controlar la velocidad.

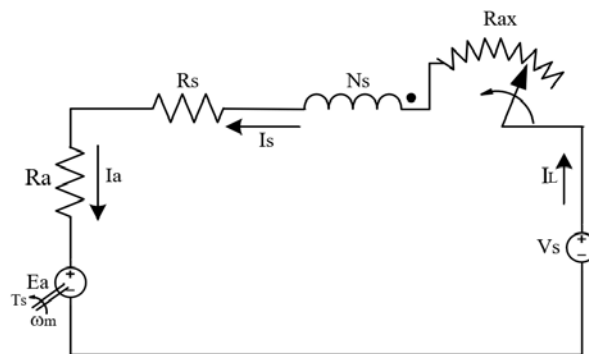


Figura 1.18 Circuito de un motor de corriente continua en serie

1.3.2.2.2 Motor shunt [1]

Este tipo de máquina tiene una resistencia en el circuito de armadura Figura 1.19, el devanado de campo se conecta directamente a la fuente, cuando el voltaje es constante el flujo que se crea en el campo también lo es.

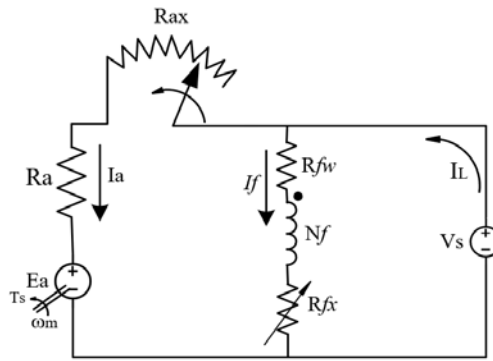


Figura 1.19 Motor de corriente continua Shunt

1.3.2.2.3 Motor compound [1]

Si un motor shunt puede tener un devanado de campo adicional en serie, el cual se puede conectarse de modo que el flujo producido apoye al flujo establecido en el devanado de campo shunt, se puede conectar como un motor en derivación larga o corta como se ve en la Figura 1.20.

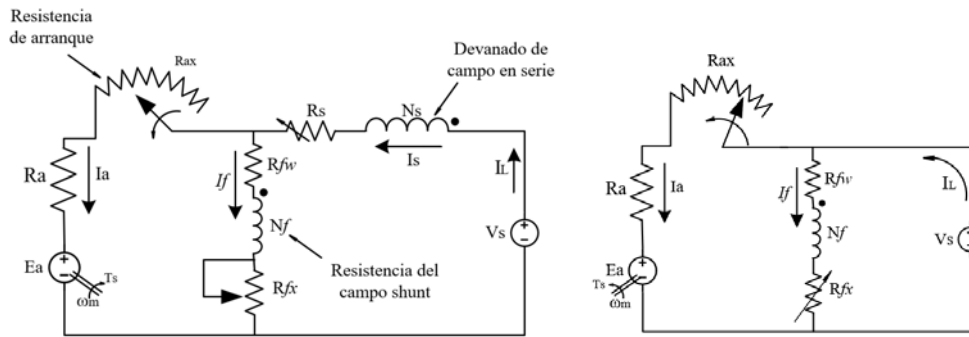


Figura 1.20 Dos formas de conexión del motor de corriente continua compound

La principal razón por la que se utilizan los motores de corriente continua es por el control de velocidad que se puede tener sin afectar su construcción.

Entre los métodos utilizados para el control de velocidad se tiene el control por resistencia de armadura y el control de campo.

- **Control de velocidad por resistencia de armadura [1]**

Este método consiste en insertar una resistencia R_c , en el circuito de armadura de un motor shunt, serie o compound. Esta resistencia adicional del circuito de armadura reduce la fuerza contraelectromotriz en el motor para tener la corriente requerida en la armadura, la velocidad se puede expresar de la siguiente manera:

$$\omega_m = \frac{V_s - I_a R}{K_a \Phi_p} \quad (1.38)$$

Donde:

$R = R_a + R_s + R_c$ (para un motor shunt)

$R = R_a + R_c$ (para un motor serie o compound)

ω_m : Velocidad angular de rotación del motor

K_a : Constante de la máquina

Φ_p : Flujo por polo

V_s : Voltaje aplicado a través de los terminales de armadura

Este método tiene algunas desventajas:

- a) Pérdida de potencia considerable en la resistencia de control R_c
- b) Disminución en la eficacia del motor
- c) Deficiente regulación de la velocidad de los motores shunt y compound

- **Control de velocidad a través del control de campo [1]**

Este método, es más eficiente y económico, además de controlarse la velocidad se controla el flujo en el motor, la corriente en el devanado de campo de un motor shunt puede controlarse introduciendo una resistencia en serie, en tanto que para un motor serie se conecta una resistencia desviadora en paralelo con el devanado de campo.

Con este método se puede tener una velocidad más alta que la nominal, debido que al conectar las resistencias se tiene una disminución en el flujo del motor, la cual es inversamente proporcional a la velocidad.

1.3.3 HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS MÓDULOS DIDÁCTICOS DE SOFTWARE

Para realizar los módulos didácticos se utiliza MATLAB, que es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos, que combina un entorno de escritorio para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y array directamente [4].

Entre las prestaciones que tiene MATLAB están:

- Análisis de datos: exploración, modelado y visualización de datos [4]
- Graficas: visualizar y exportar datos
- Desarrollo de algoritmos: Diseñar algoritmos para aplicaciones de escritorio y embebidas.
- Creaciones de apps: Crear apps web y de escritorio.
- Uso de MATLAB con otros lenguajes: Utilizar Python, C/C+, Fortran, Java y otros lenguajes.

Para la realización de los módulos didácticos de software de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua, se utiliza las prestaciones Simulink y App Designer.

- **Simulink**

Es un entorno de diagrama de bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos, con el cual se pueden realizar el diseño a nivel de sistema, simulación, generación automática de código, prueba y verificación continuas de sistemas integrados [4].

Esta prestación de MATLAB permite realizar el modelo matemático de cada una de las máquinas con los parámetros debidamente establecidos y verificar el comportamiento de las variables que rigen a cada una de estas.

Simulink se puede integrar con la prestación App Designer, lo que va a permitir que las variables de entrada y salida del modelo matemático de cada una de las máquinas (transformadores y máquinas de corriente continua), se puedan monitorear con las pantallas de usuario.

- **App Designer**

Integra dos tareas principales de creación de aplicaciones que son: diseñar componentes visuales de una interfaz gráfica de usuario (GUI) y programar el comportamiento de la aplicación [4].

1. Diseñar componentes visuales de una interfaz gráfica de usuario (GUI): Arrastrar y soltar los componentes visuales en el lienzo, para poder tener el diseño preciso de la aplicación se tiene que utilizar las diferentes sugerencias de alineación [4].
2. Programar el comportamiento de la aplicación: App Designer genera automáticamente el código orientado a objetos que especifica el diseño, se tiene

integrado un editor de MATLAB para poder programar el modelamiento de la aplicación [4].

Las aplicaciones realizadas por medio de App Designer se pueden hacer independientes por medio de MATLAB Compiler para compartirlas con otros usuarios y pueden ejecutarlas sin instalar ningún software adicional [4].

Por medio de esta prestación se realizan las pantallas de cada uno de los módulos didácticos con la finalidad de realizar la aplicación para los usuarios.

1.3.4 TEORIA DE ERRORES EN LAS MEDIDAS

El objetivo principal de la teoría de errores es limitar cualquier resultado numérico obtenido de manera experimental, de forma que nos indique cuan alejado está este resultado del valor exacto.

En el contexto de este trabajo al ser experimental se tiene como resultado varios datos surgidos de las mediciones realizadas con los módulos, las que posteriormente serán contrastadas con las mediciones tomadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. Siendo la medición, un proceso en el cual se cuantifica una propiedad física como resultado de compararla con otra similar tomada como patrón, la cual se adopta como unidad. Sin embargo, cuando se mide una cantidad física el valor obtenido no es idéntico al “valor verdadero”, por lo que no se debe tratar a las medidas como números exactos, sino que consiste en intervalos los cuales se debe tener la confianza que se halla el “valor esperado”. Un ejemplo de esto es medir la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente, teniendo como resultado [5]:

$$(339 \pm 2) \text{ [m/s]} \quad (1.39)$$

Donde la velocidad del sonido comprende el intervalo desde 337 a 341 [m/s], pero eso no significa que el valor esté entre los límites indicados, sino que existe una probabilidad que se encuentre ahí [5].

Por lo que, al necesitar conclusiones de los resultados experimentales de cada una de las prácticas, se debe hacer una estimación de los errores debido a que los resultados serán de usados por los estudiantes de diferentes formas [5].

Debido a esto, cada práctica que se realiza tiene que tener la mayor exactitud posible, para alcanzar el objetivo del proyecto [5].

Por último, el error está relacionado estrechamente con la realización experimental de cada práctica, el método efectuado y el significado de los resultados. Las principales causas de los errores son [5]:

- **Del experimentador:** Se da por la forma incorrecta de usar o leer los aparatos de medida [5].
- **De los instrumentos de medida y de los métodos experimentales:** Puede ser por varias causas como por ejemplo aparatos de medida mal seleccionados o a su vez defectuosos [5].
- **Del medio ambiente:** Se produce debido a las variaciones de los parámetros ambientales durante la experimentación, alterando las propiedades de los cuerpos o apartados de medida [5].

Los errores experimentales se clasifican en:

1. **Errores Sistemáticos:** Estos errores permanecen constantes o varían regularmente en un conjunto de lecturas, sus causas son [5]:
 - a) **Personales:** Se produce cuando el experimentador lee los instrumentos y los adapta a su percepción, pero el experimentador previene esta tendencia.
 - b) **Errores de calibración:** Se da cuando el elemento no está calibrado con el patrón adecuado, esto se reduce realizando una adecuada calibración, tomando varias mediciones a diferentes escalas (si es posible) [5].
 - c) **Métodos y el medio ambiente:** Este tipo de errores se presenta por la utilización de métodos que no son adecuados o las condiciones en las que se realiza el experimento no son aptas. Debido a que las condiciones climáticas afectan a las propiedades físicas de los cuerpos y a los aparatos de medición [5].
2. **Errores Aleatorios:** Se producen por diversos factores como: trabajar con varias muestras datos, datos que varían de forma desconocida e incontrolable, valores que pueden ser positivos o negativos. Estos están presentes en el experimento y en ausencia de errores sistemáticos, se dan a causa de las lecturas dispersas alrededor del “valor verdadero” de la cantidad que se mide. Este tipo de errores se determinan por métodos estadísticos. Por lo cual es conveniente hacer una diferenciación entre la palabra exactitud y precisión [5]:
 - El resultado con bajo error aleatorio se dice que es preciso.
 - El resultado que no tiene error sistemático se dice que es exacto.
3. **Equivocación (Error Grave):** Esto se da por realizar métodos erróneos como por ejemplo sumar en vez de restar, por escribir o leer mal una cifra, esto se produce por falta de cuidado por parte del experimentador teniendo resultados erróneos, y esto se determina al realizar varias veces la medición [5].

1.3.4.1 CÁLCULO DE LOS ERRORES

Durante la realización de cualquier análisis cuantitativo se debe tomar en cuenta todas las variables que puedan afectar a los resultados finales, estos pueden ser causados por los instrumentos utilizados o por las personas que manejan el material de medición, por lo que para el cálculo de errores se definen los siguientes [5]:

Error absoluto: Este error permite determinar cuán cercano se obtuvo el valor experimental, es decir en cuanta cantidad nos excedimos o se requería, y se determina a partir de la siguiente ecuación [5]:

$$EA = |VE - VT| \quad (1.40)$$

Donde:

EA Error absoluto

VE Valor Experimental

VT Valor Teórico

Error relativo porcentual: Ayuda a conocer el porcentaje de error que se obtuvo en los resultados, y se lo calcula a partir de la siguiente ecuación [5]:

$$ER = \frac{|VE - VT|}{VT} \times 100\% \quad (1.41)$$

Donde:

ER Error relativo

VE Valor Experimental

VT Valor Teórico

2 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Los modelos matemáticos son la base para verificar el correcto funcionamiento de cada una de las máquinas, en este apartado se desarrollan cada uno de estos con la finalidad de incorporarlos a una simulación.

Los modelos matemáticos que se desarrollan son de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua, con la finalidad de obtener los módulos del software para prácticas que abarcan estos tópicos.

2.1 TRANSFORMADORES

Los modelos matemáticos que se necesitan para el desarrollo de las prácticas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas del apartado de transformadores son: transformador monofásico ideal, transformador monofásico de dos devanados y transformador trifásico.

2.1.1 TRANSFORMADOR IDEAL [2]

Para el modelamiento matemático del transformador se parte del estudio del transformador monofásico ideal, con las siguientes premisas: las pérdidas en el cobre, núcleo y la reluctancia del núcleo son despreciables, además no existen flujos de dispersión.

Como se expuso en el capítulo 1, el transformador monofásico ideal tiene la siguiente relación entre el devanado primario y secundario.

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

Además, la relación entre e_1 y e_2 :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{d \frac{\lambda_1}{dt}}{d \frac{\lambda_2}{dt}} = \frac{N_1 \left(d \frac{\phi_m}{dt} \right)}{N_2 \left(d \frac{\phi_m}{dt} \right)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

Despreciando las pérdidas, se tiene:

$$e_1 i_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} e_2 \right) \left(-\frac{N_2}{N_1} i_2 \right) = -e_2 i_2 \quad (2.3)$$

La impedancia referida al primario es

$$Z_1 = \frac{e_1}{i_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} e_2 \right) \left(\frac{N_1}{N_2 i_2} \right) = \frac{N_1^2}{N_2^2} \left(\frac{e_2}{i_2} \right) = \frac{N_1^2}{N_2^2} Z_2 \quad (2.4)$$

2.1.2 TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS [2]

Para aplicar el modelo matemático en una simulación computacional, se debe tener en cuenta cuál es el modelo de espacio-estado del transformador, en la Figura 2.1 se muestra el mismo. Por lo tanto, las variables necesarias para el modelamiento son: variables de estado (flujos), variables de entrada (voltajes) y variables de salida (corrientes). Por ello, es necesario deducir las ecuaciones de enlaces de flujo y voltaje [2].

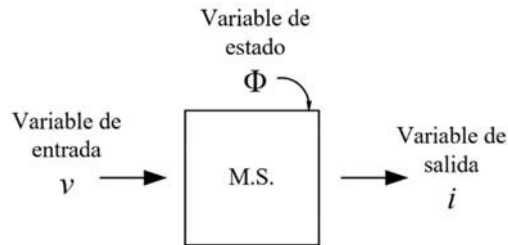


Figura 2.1 Modelo de espacio-estado para un transformador

- **ECUACIONES DE FLUJO**

El enlace de flujo total se divide en dos componentes como se muestra en la figura 2.2, la primera componente es el enlace de flujo mutuo ϕ_m , que es común para los dos devanados y la segunda componente es el enlace de flujo del mismo devanado ϕ_{l1} , se puede expresar el enlace de flujo para cada devanado de la siguiente manera:

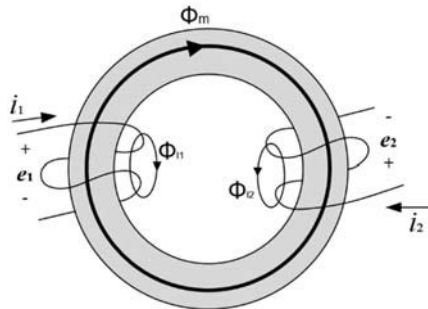


Figura 2.2 Enlace de flujo

$$\phi_1 = \phi_{l1} + \phi_m \quad (2.5)$$

$$\phi_2 = \phi_{l2} + \phi_m \quad (2.6)$$

Donde:

ϕ_{l1} Flujo disperso del bobinado primario

ϕ_{l2} Flujo disperso del bobinado secundario

ϕ_m Flujo mutuo establecido en el núcleo

Los enlaces de flujo se pueden expresar en términos de corrientes:

$$\lambda_1 = N_1(N_1 i_1 P_{l1} + (N_1 i_1 + N_2 i_2) P_m) \quad (2.7)$$

$$\lambda_1 = (N_1^2 P_{l1} + N_1^2 P_m) i_1 + N_1 N_2 P_m i_2 \quad (2.8)$$

Donde:

$$\phi_{l1} = N_1 i_1 P_{l1}$$

$$\phi_m = (N_1 i_1 + N_2 i_2) P_m$$

$$L_{11} = N_1^2 P_{l1} + N_1^2 P_m$$

$$L_{12} = N_1 N_2 P_m$$

Los enlaces de flujo se pueden expresar para cada uno de los devanados:

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \quad (2.9)$$

$$\lambda_2 = L_{22} i_2 + L_{21} i_1 \quad (2.10)$$

Donde:

L_{11} y L_{11} Inductancias propias de los devanados primario y secundario respectivamente.

L_{12} y L_{21} Inductancias mutuas entre los devanados.

La inductancia propia en el devanado primario es la suma del flujo disperso del devanado primario más su componente magnetización, sobre la corriente propia de sí mismo. Así, en el devanado primario la $i_2=0$.

$$L_{11} = \frac{N_1(\phi_{l1} + \phi_{m1})}{i_1} = L_{l1} + L_{m1} \quad (2.11)$$

$$L_{22} = \frac{N_2(\phi_{l2} + \phi_{m2})}{i_2} = L_{l2} + L_{m2} \quad (2.12)$$

Donde $\phi_{m2} = (N_2 i_2) P_m$ es una porción del flujo mutuo que es magnetizado por i_2 . Por lo que la saturación del núcleo afecta a la inductancia de los devanados. Tomando la

porción de L_{m2} a L_{m1} , se tiene la relación de la inductancia magnetizante de los devanados.

$$L_{m2} = \frac{N_2(\phi_{m2})}{i_2} = \frac{N_2(L_{12})}{N_1} = N_2^2 P_m \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 L_{m1} \quad (2.13)$$

El flujo total mutuo vinculado a cada uno de los devanados puede expresarse en términos de sus propias inductancias magnetizantes, así:

$$N_1(\phi_m) = N_1(\phi_{m1} + \phi_{m2}) = L_{m1} \left(i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2\right) \quad (2.14)$$

- **ECUACIONES DE VOLTAJE**

Para un transformador el voltaje inducido de cada uno de los devanados es igual a la variación de los enlaces de flujo en el tiempo [2].

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (2.15)$$

Donde:

$$L_{11} = L_{l1} + L_{m1}$$

$$L_{12} i_2 = \frac{N_2 L_{m1} i_2}{N_1}$$

El voltaje inducido en el bobinado primario se puede expresar de la siguiente manera:

$$e_1 = L_{l1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d\left(i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2\right)}{dt} \quad (2.16)$$

Para realizar la simulación, se debe tener todos los parámetros referidos a un bobinado. Del bobinado que se refiere hay tener todos los parámetros disponibles, para lograr esto se utiliza la ecuación de la relación de transformación y se denotara a la corriente referida i_2' , en donde el voltaje inducido en cada uno de los devanados es [2]:

$$e_1 = L_{l1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i_2')}{dt} \quad (2.17)$$

$$e_2 = L_{l2} \frac{di_2}{dt} + L_{m2} \frac{d\left(\frac{N_1}{N_2} i_1 + i_2\right)}{dt} \quad (2.18)$$

El voltaje inducido del bobinado secundario se puede referir al bobinado primario utilizando la relación de voltaje:

$$e'_2 = L'_{12} \frac{di'_2}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt}(i_1 + i'_2) \quad (2.19)$$

El voltaje terminal de un bobinado es igual a la suma de los voltajes inducidos más la caída de voltaje en la resistencia del devanado:

$$v_1 = i_1 r_1 + e_1 = i_1 r_1 + L_{l1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} \quad (2.20)$$

El voltaje terminal del bobinado secundario se puede referir al bobinado primario:

$$v'_2 = \frac{N_1}{N_2} v_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} i_2\right) \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2 + e'_2 \quad (2.21)$$

$$v'_2 = r'_2 i'_2 + L'_{12} \frac{di'_2}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt}(i_1 + i'_2) \quad (2.22)$$

Donde:

$$\left(\frac{N_1}{N_2} i_2\right) = i'_2$$

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2 = r'_2$$

Para el desarrollo del modelo matemático del transformador de dos devanados, es necesario escribir las ecuaciones de los voltajes en función de las variables de estado (flujos):

$$v_1 = i_1 r_1 + \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (2.23)$$

$$v'_2 = i'_2 r'_2 + \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi'_2}{dt} \quad (2.24)$$

Donde:

$$\Psi_1 = w_b \lambda_1$$

$$\Psi_2 = w_b \lambda_2$$

w_b Es la frecuencia base con las que son calculadas las reactancias.

Los enlaces de flujo por segundo de cada devanado se expresan:

$$\Psi_1 = w_b \lambda_1 = x_{l1} i_1 + \Psi_m \quad (2.25)$$

$$\Psi'_2 = w_b \lambda'_2 = x'_{l2} i'_2 + \Psi_m \quad (2.26)$$

$$\Psi_m = w_b L_{m1} (i_1 + i'_2) = x_{m1} (i_1 + i'_2) \quad (2.27)$$

Donde:

x_{l1} : Reactancia del bobinado primario

Ψ_m : Enlaces de flujo

Hay que tener en cuenta que el enlace de flujo mutuo (Ψ_m) esta asociada con la inductancia magnética referida al bobinado primario. Además, la corriente puede expresarse en termino de los flujos magnéticos de cada uno de los devanados.

$$i_1 = \frac{\Psi_1 - \Psi_m}{x_{l1}} \quad (2.28)$$

$$i'_2 = \frac{\Psi'_2 - \Psi_m}{x'_{l2}} \quad (2.29)$$

La ecuación del flujo mutuo, expresadas en función de las inductancias son:

$$\Psi'_m \left(\frac{1}{x_{m1}} + \frac{1}{x_{l1}} + \frac{1}{x'_{l2}} \right) = \frac{\Psi_1}{x_{l1}} + \frac{\Psi'_2}{x'_{l2}} \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_{m1}} + \frac{1}{x_{l1}} + \frac{1}{x'_{l2}} \quad (2.31)$$

La ecuación 2.30 se puede expresar de manera más reducida:

$$\Psi_m = X_M \left(\frac{\Psi_1}{x_{l1}} + \frac{\Psi'_2}{x'_{l2}} \right) \quad (2.32)$$

Con la ecuación 2.23 y 2.24, se puede reemplazar con las ecuaciones de corriente para encontrar las ecuaciones de flujo de cada devanado:

$$\Psi_1 = \int \left\{ w_b v_1 - w_b r_1 \left(\frac{\Psi_1 - \Psi_m}{x_{l1}} \right) \right\} dt \quad (2.33)$$

$$\Psi_2 = \int \left\{ w_b v'_2 - w_b r'_2 \left(\frac{\Psi'_2 - \Psi_m}{x'_{l2}} \right) \right\} dt \quad (2.34)$$

Con las ecuaciones 2.28, 2.29, 2.32, 2.33 y 2.34 se puede encontrar el modelo matemático para un transformador de dos devanados ideal como se muestra en la Figura 2.4.

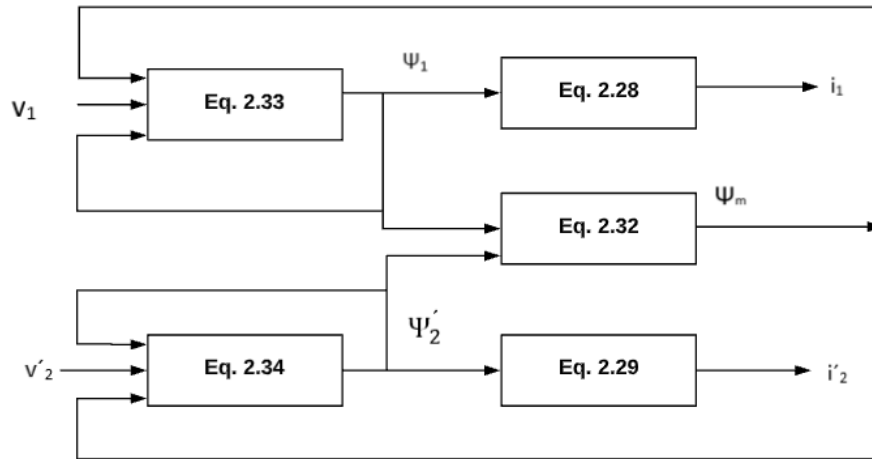


Figura 2.3 Modelo matemático de un transformador monofásico ideal

Para el modelamiento de un transformador monofásico real se tiene que incorporar la saturación del núcleo porque esta afecta al valor de la inductancia mutua y en menor proporción a las inductancias de dispersión. El comportamiento de saturación del núcleo puede ser determinado a partir de la curva de magnetización de circuito abierto del transformador. Como se muestra en la figura 2.4, para obtener la curva de saturación se gráfica el valor rms del voltaje del primario en función de la corriente sin carga en el devanado secundario [2].

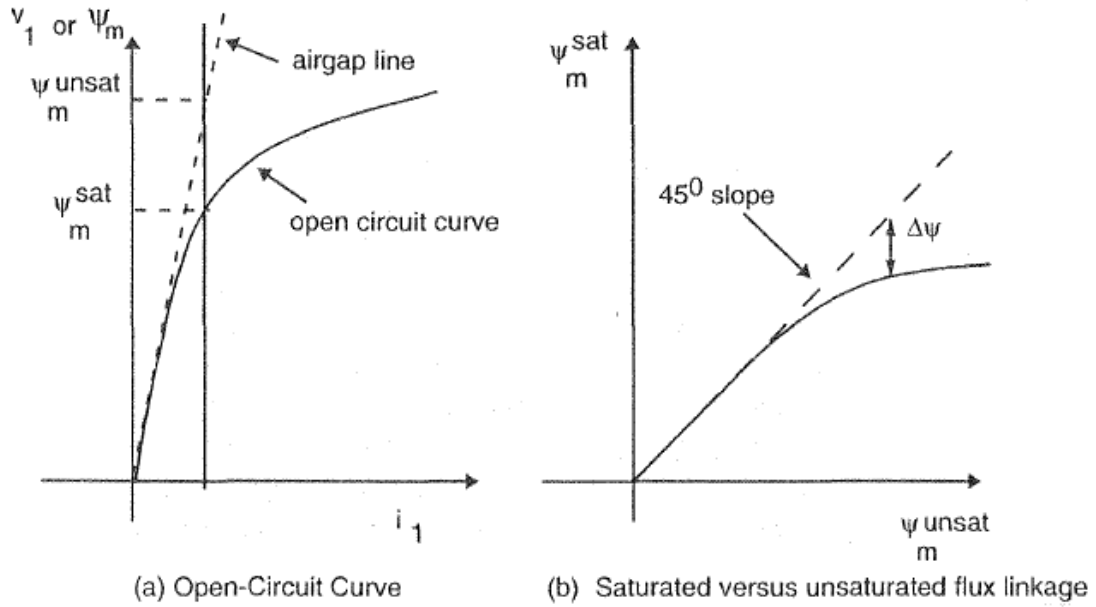


Figura 2.4 Características de Saturación

Con las pérdidas del núcleo ignoradas, la corriente en vacío es la corriente de magnetización $I_{m\text{rms}}$.

La caída de voltaje en la impedancia serie, $r_1 + j\omega L_{l1}$, es despreciable comparados con la caída de voltaje en la reactancia de magnetización, donde $X_{m1} = \omega L_{m1}$ y se considera que $V_{1\text{rms}} \approx I_{m\text{rms}} \cdot X_{m1}$, en la región no saturada, la relación $\frac{V_{1\text{rms}}}{I_{m\text{rms}}}$ es lineal y constante. Se tiene que:

$$\lambda = L \cdot i \quad (2.35)$$

$$\Psi_m = \omega_b \cdot L_{m1} (i_1 + i_2') \quad (2.36)$$

Considerando los efectos de saturación:

$$\Psi_m^{\text{unsat}} = \omega_b \cdot L_{m1}^{\text{unsat}} \cdot (i_1 + i_2') = X_{m1}^{\text{unsat}} \cdot (i_1 + i_2') \quad (2.37)$$

$$i_1 = \frac{\Psi_1 - \Psi_m^{\text{sat}}}{X_{l1}} \quad (2.38)$$

$$i_2' = \frac{\Psi_2' - \Psi_m^{\text{sat}}}{X_{l2}'} \quad (2.39)$$

Reemplazo en la ecuación de Ψ_m^{unsat} reemplazo las ecuaciones de i_1 y i_2' , se tiene:

$$\frac{\Psi_m^{unsat}}{X_{m1}^{unsat}} = \frac{\Psi_1 - \Psi_m^{sat}}{X_{l1}} + \frac{\Psi_2' - \Psi_m^{sat}}{X_{l12}'} \quad (2.40)$$

$$\Psi_m^{unsat} = \Psi_m^{sat} + \Delta\Psi \quad (2.41)$$

Reemplazando 2.41 en 2.40:

$$\Psi_m^{sat} = X_m \left(\frac{\Psi_1}{X_{l1}} + \frac{\Psi_2'}{X_{l12}'} - \frac{\Delta\Psi}{X_{m1}^{unsat}} \right) \quad (2.42)$$

Donde:

$$\frac{1}{XM} = \frac{1}{X_{m1}^{unsat}} + \frac{1}{X_{l1}} + \frac{1}{X_{l12}'} \quad (2.43)$$

Para obtener la saturación del flujo mutuo, es necesario determinar el valor de $\Delta\Psi$ en la ecuación 2.42, esto facilitará la relación entre $\Delta\Psi$ y Ψ_m^{unsat} .

Las ecuaciones 2.33, 2.34, 2.38, 2.39 y 2.42 permiten el modelo matemático para la simulación de un transformador de dos devanados incorporando la saturación, como se muestra en la Figura 2.5.

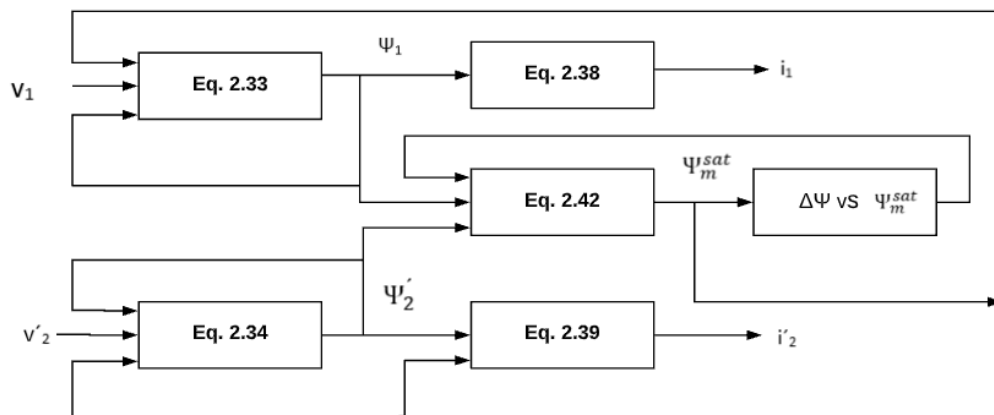


Figura 2.5 Modelo matemático de un transformador de dos devanados incluyendo la saturación

2.1.3 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO [2]

Las conexiones utilizadas para el desarrollo de la práctica que contempla el transformador trifásico son Y-Y y Δ -Y. Las ecuaciones necesarias para el modelamiento matemático de cada una de las columnas son 2.28, 2.29, 2.32, 2.33 y 2.34 siendo las mismas utilizadas para el transformador monofásico de dos devanados [2].

En la Figura 2.6 se presenta el diagrama de bloques Simulink del transformador trifásico en conexión Y-Y, en tanto que en la Figura 2.7 se puede observar dicho diagrama para el transformador en conexión Δ -Y [2].

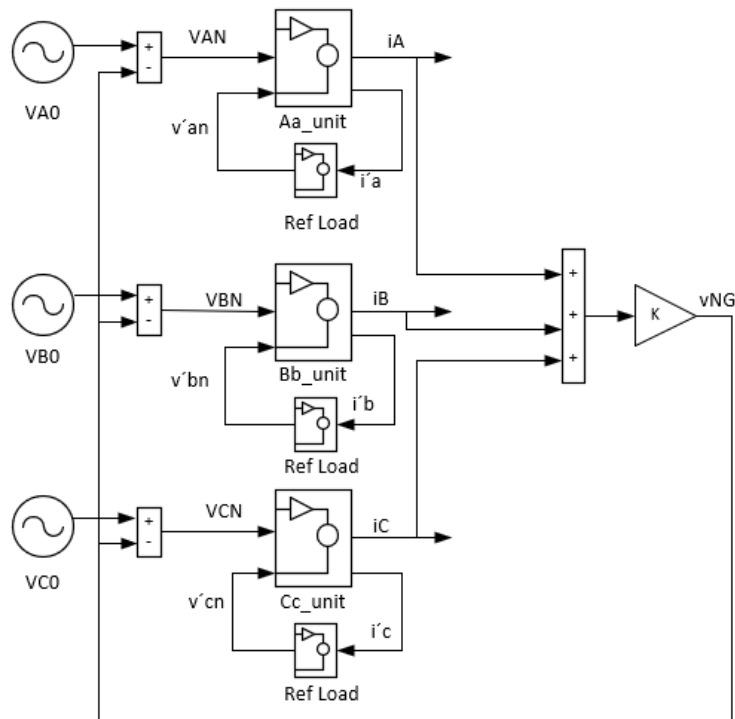


Figura 2.6 Modelo matemático de un transformador trifásico con conexionado Yy

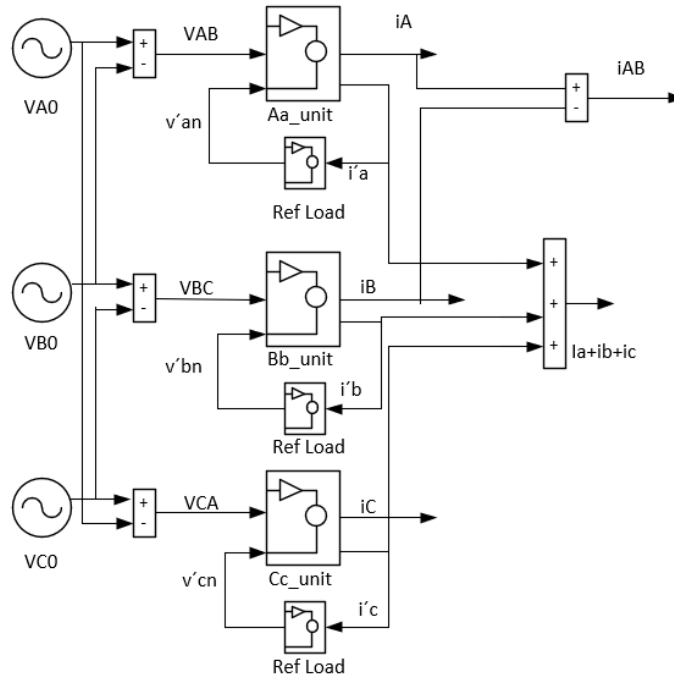


Figura 2.7 Modelo matemático de un transformador trifásico con conexión en Δ

Dentro del bloque Aa_unit se encuentra el modelo matemático de un transformador monofásico de dos devanados, Figura 2.3.

2.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

2.2.1 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO MOTOR [2]

Según se puede apreciar en la Figura 2.8, la fuente de voltaje conectada en los terminales del devanado de armadura produce una corriente (I_a), a la que se opone la fem inducida (E_a). La corriente de armadura al interactuar con el flujo del devanado de campo produce un torque electromecánico (T_{em}) [2].

En la máquina de corriente continua, actuando como motor, el rotor se acelera en la dirección del T_{em} , y la máquina llega a una velocidad de estado estable cuando el torque electromecánico se equilibra con el torque mecánico sumado al de pérdidas [2].

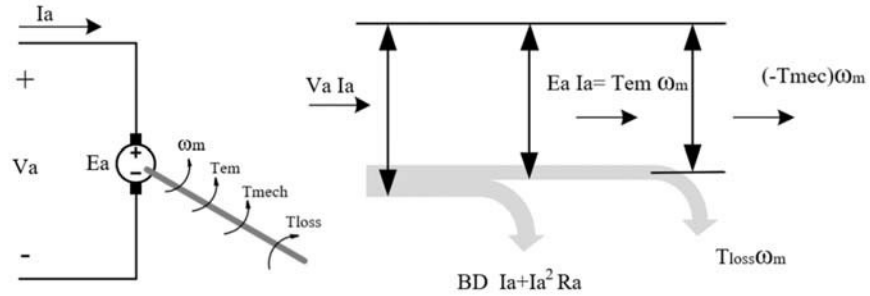


Figura 2.8 Máquina de corriente continúa actuando como motor

Se establece la ecuación del voltaje en el devanado de armadura:

$$V_a = E_a + R_a I_a + V_{brush} + L_{aq} \frac{dI_a}{dt} \quad (2.44)$$

Donde:

R_a : Resistencia en el devanado de armadura

V_{brush} : La caída de voltaje total

L_{aq} : Inductancia en el devanado de armadura

Al igualar la ecuación del par de aceleración del rotor con su par de inercia se tiene:

$$T_{em} - T_{loss} + T_{mech} = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.45)$$

Donde:

T_{mech} : Es el torque mecánico externo que se aplica en el eje en dirección al sentido de rotación.

T_{em} : Es el torque electromecánico desarrollado por la máquina.

T_{loss} : Torque que representa la fricción y pérdidas por efecto del viento.

Cuando la velocidad del rotor se encuentra en estado estable, se tiene una relación entre la fem interna y la componente del voltaje de armadura dada por:

$$E_a = k_a \Phi \omega_m = V_a - I_a R_a - V_{brush} \quad (2.46)$$

El torque electromagnético esta dado por:

$$T_{em} = k_a \phi I_a \quad (2.47)$$

Donde:

I_a : Es la corriente de armadura

Para el arranque del motor a un voltaje fijo se van introduciendo resistencias de arranque para mantener la corriente del inducido en límites seguros. En la Figura 2.9 se puede observar el circuito equivalente para el arranque del motor por medio de resistencias [2].

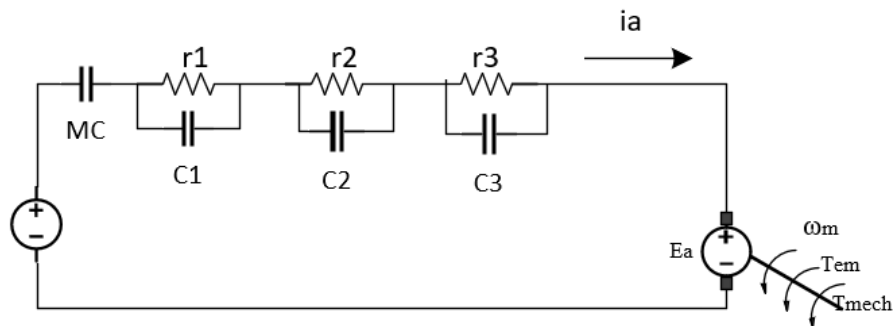


Figura 2.9 Circuito equivalente para el arranque de un motor DC por medio de resistencias

Donde:

- MC1 Contacto principal de la máquina inicialmente cerrado.
- r1, r2, r3 Resistencias que se introducen en el orden respectivo para el arranque.
- C1, C2, C3 Contactos que inician abiertos y se van cerrando para introducir las resistencias de arranque de la máquina.

Por ley de Kirchoff se encuentra la ecuación de voltaje en terminales:

$$V_a = I_a R_t + L_{aq} \frac{dI_a}{dt} + E_a + V_{brush} \quad (2.48)$$

Donde:

R_t Es la suma de las resistencias de arranque más la resistencia del devanado del inducido.

V_{brush} Es la caída de voltaje en el conmutador

Las ecuaciones 2.48 y 2.45 se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$I_a(t) = \frac{1}{L_{aq}} \int_0^t (V_{dc} - V_{brush} - I_a R_t - E_a) dt + I_a(0) \quad (2.49)$$

$$\omega_m(t) = \frac{1}{J} \int_0^t (T_{em} + T_{mech} - D_\omega \omega_m) dt + \omega_m(0) \quad (2.50)$$

Donde:

D_ω : coeficiente de amortiguamiento de la máquina.

Con las ecuaciones 2.49 y 2.50 se desarrolla en modelo matemático cuyo diagrama simulink se observa en la Figura 2.10.

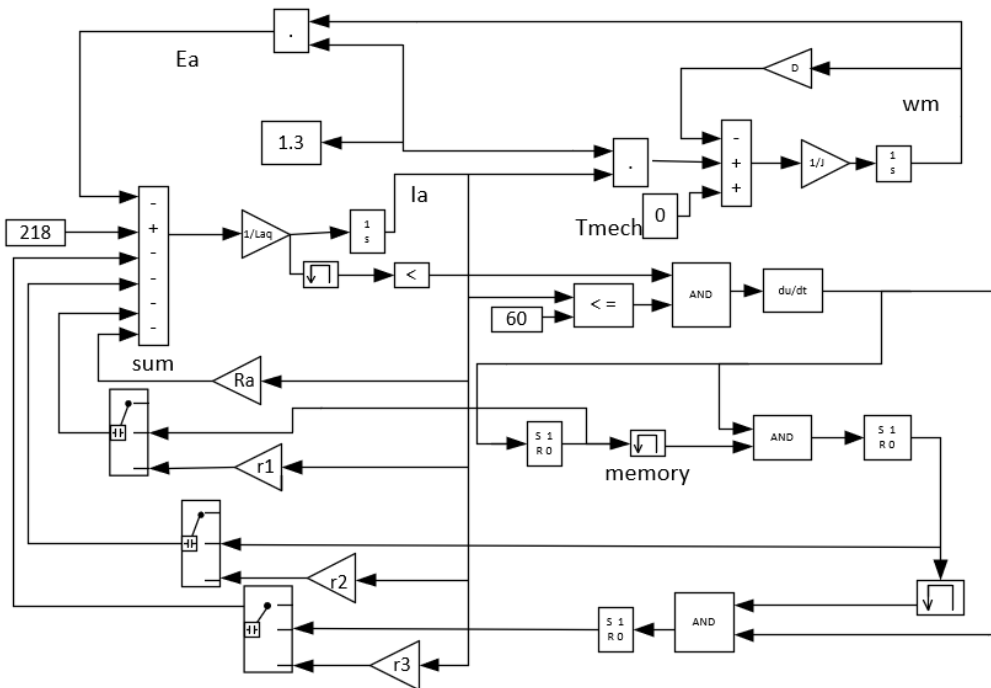


Figura 2.10 Modelo matemático del arranque por medio de resistencias de un motor DC

2.2.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR [2]

Cuando la máquina de corriente continua actúa como generador, una máquina primomotriz aplica un torque externo T_{mech} para que el rotor gire, en presencia de una densidad de flujo magnético o excitación externa, generando un voltaje de velocidad en los devanados de armadura, como se puede observar en la Figura 2.11 [2].

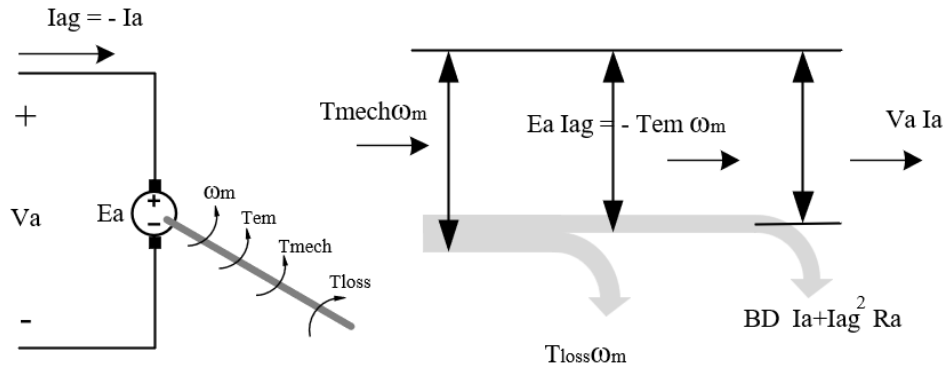


Figura 2.11 Máquina de corriente continúa actuando como generador

Para la realización del módulo se necesario tener el modelo matemático de generador de corriente continua en configuración shunt.

La ecuación del bobinado de campo es:

$$V_f = I_f(R_f + R_{rh}) + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (2.51)$$

Donde:

R_f y R_{rh} : Resistencia del devanado campo y reóstato del devanado de campo

L_f : Inductancia del devanado de campo.

El voltaje inducido se puede expresar:

$$E_a = V_a + R_a I_a + V_{brush} + L_{aq} \frac{dI_a}{dt} \quad E_a = k_a \omega_m \Phi \quad (2.52)$$

Donde:

V_a : Voltaje en terminal de armadura.

I_a : Corriente en los terminales de armadura.

R_a : Resistencia del devanado de armadura.

L_{aq} : Inductancia del devanado de armadura.

Para el modelo matemático se toma en cuenta la curva de magnetización con la siguiente formula:

$$\frac{E_a}{\omega_m} = k_a \phi = E_a \frac{E_{a0}}{\omega_{m0}} \quad (2.53)$$

El flujo ϕ es proporcional a I_f . Se puede reemplazar $k_a \phi$ por $k_f I_f$.

$$E_{a0} = k_f \omega_{m0} I_f = k_g k_f \quad (2.54)$$

En la Figura 2.12 se puede apreciar el modelo matemático a implementarse en Simulink para el generador de corriente continua en configuración shunt.

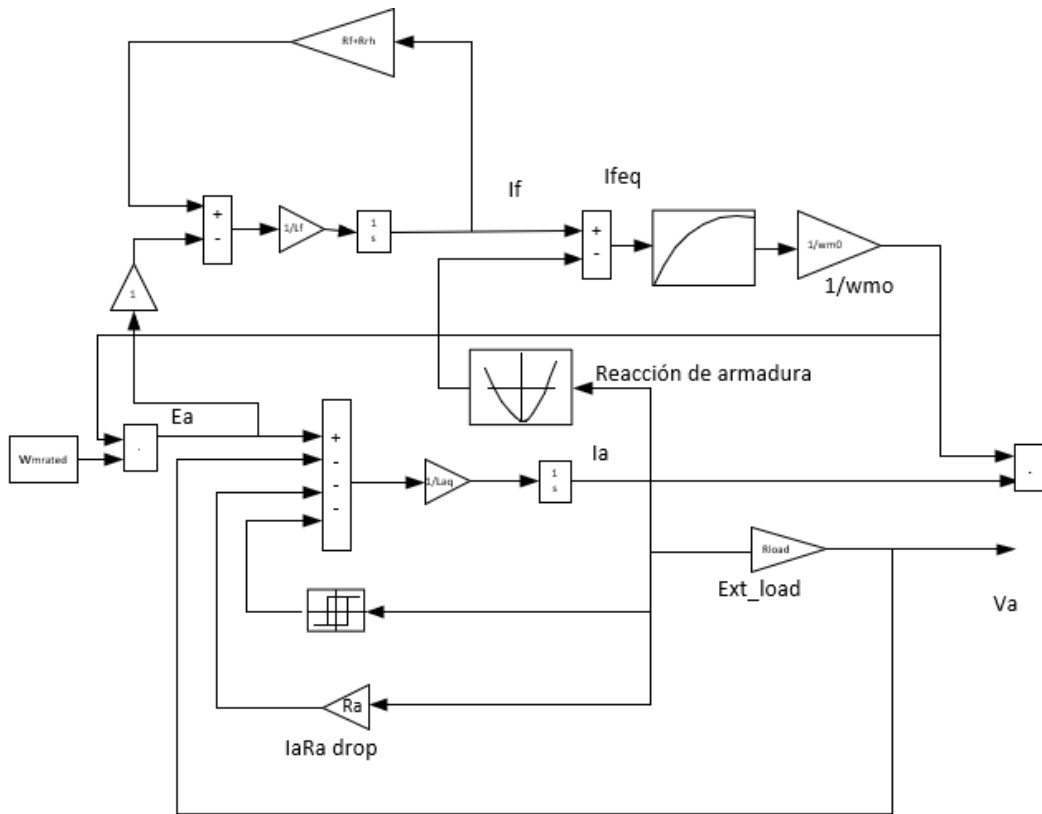


Figura 2.12 Modelo matemático de un generador CC shunt

3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS MÁQUINAS

3.1 TRANSFORMADOR

Los parámetros necesarios para la implementación del modelo matemático en Simulink son los siguientes:

- Curva de saturación magnética del transformador
- Resistencias de los devanados
- Pérdidas en el núcleo
- Corriente de excitación
- Resistencia de los devanados
- Reactancias de dispersión

Para la determinación de cada uno de estos se realiza la prueba de circuito abierto y cortocircuito del transformador. Además, de verificar los datos de placa de cada una de las máquinas.

La prueba de circuito abierto tiene como objetivo determinar las pérdidas del núcleo del transformador y la corriente de excitación, en la Figura 3.1 se observa cómo se realizó la prueba de circuito abierto en el transformador monofásico presente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.



Figura 3.1 Prueba de circuito abierto del transformador monofásico

La prueba de corto circuito tiene como objetivo determinar la resistencia de los devanados y las reactancias de dispersión. En la Figura 3.2 se observa cómo se realizó la prueba de corto circuito en el transformador monofásico presente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.



Figura 3.2 Prueba de corto circuito del transformador monofásico

En la Tabla 3.1 se observan los resultados obtenidos al realizar las pruebas en el transformador monofásico.

Tabla 3.1 Resultados obtenidos en las pruebas del transformador

| PRUEBAS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS | | | |
|--|-------|-------|-------|
| | V [V] | I [A] | P [w] |
| Prueba de Cortocircuito | 40 | 5,08 | 68 |
| Prueba de Circuito Abierto | 110,1 | 0,71 | 15,3 |
| *fp =0,2 | | | |

La curva de saturación o curva en vacío del transformador monofásico se determina de la siguiente manera:

- Colocar una fuente variable de voltaje en el lado primario.
- Variar la fuente en pasos de voltaje desde cero hasta un valor mayor al voltaje nominal del transformador.
- Anotar lecturas de corriente y voltaje simultáneamente.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.2. Mientras que, la curva de saturación usada para la simulación se muestra en la Figura 3.3.

TABLA 3.2 Resultados obtenidos para encontrar la curva de saturación

| Corriente[A] | Voltaje [V] | Corriente[A] | Voltaje [V] |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 0 | 0 | 0,5 | 85,9 |
| 0,1 | 5 | 0,5 | 91,1 |
| 0,1 | 12,4 | 0,6 | 95,5 |
| 0,2 | 18,3 | 0,8 | 103,2 |
| 0,2 | 24,4 | 1 | 106,6 |
| 0,2 | 30,5 | 1,1 | 110,7 |
| 0,2 | 44,8 | 1,3 | 113,3 |
| 0,3 | 62,9 | 1,4 | 117,4 |
| 0,3 | 68,8 | 1,8 | 120,6 |
| 0,4 | 77,9 | | |

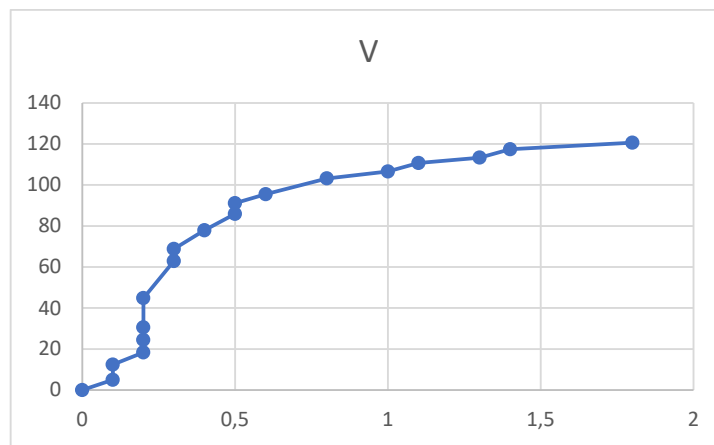


Figura 3.3 Curva monofásico del transformador monofásico

Para la implementación del transformador trifásico se considera un banco de transformadores con los parámetros similares a los del transformador monofásico obtenidos con anterioridad, en la Tabla 3.3 se observa los mismos.

Tabla 3.3 Parámetros del transformador

| PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR | | | |
|------------------------------|-------------------|-------|--------------------|
| V | 127 [V] | X2 | 3208 [Ω] |
| I | 5 [A] | Rc | 15.4 [Ω] |
| R1 | 0.3 [Ω] | Xm | 76136 [Ω] |
| R2 | 0.7 [Ω] | Psi1o | 0 |
| X1 | 3208 [Ω] | Psi1o | 0 |

3.2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Para la implementación del modelo matemático de la máquina continua funcionando como generador y motor se necesita los datos de las resistencias de los bobinados y la curva de saturación magnética.

Para conocer el valor de la resistencia de los bobinados, se realiza la prueba del voltímetro-amperímetro, con los siguientes pasos:

Determinar cuáles son los devanados de campo y armadura, de ser el caso el devanado de compensación.

- Conectar la fuente de voltaje alimentar los devanados como se muestra en la Figura 3.4.

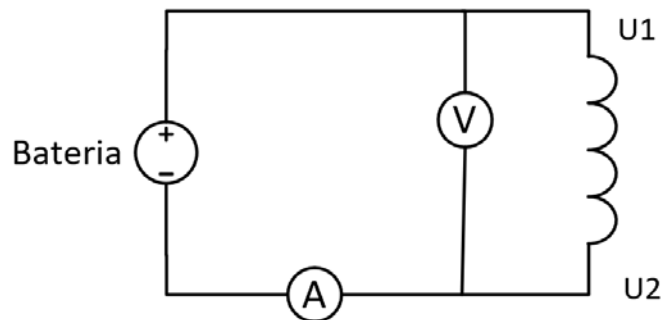


Figura 3.4 Circuito de conexión para determinar la resistencia de los bobinados

Donde:

A y V : Amperímetro y Voltímetro respectivamente.

- Anotar los valores del amperímetro y voltímetro, determinar las resistencias de los devanados por medio de la ley de ohm.

Tabla 3.4 Resistencia de los bobinados obtenidos en la máquina de corriente continua

| DATOS DE RESISTENCIAS | |
|-----------------------|------------------|
| Ra | 0.5 [Ω] |
| Rf | 148 [Ω] |

Para la determinación de la curva de saturación magnética de la máquina de corriente continua se realiza por medio de la prueba de circuito abierto, se realiza a velocidad nominal y constante. Realizando los siguientes pasos:

1. Sin excitar el generador se debe anotar el valor del voltaje remanente.

2. El devanado del campo debe estar alimentado con una fuente de corriente continua de forma que se puedan obtener diferentes valores de voltaje generador.
3. Mientras se varía el voltaje, anotar de forma simultánea los valores de voltaje en armadura y la corriente de campo. Desde que la corriente de campo es cero hasta conseguir un voltaje 125% del voltaje nominal.

En la Figura 3.5 se observa el circuito implementado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas para la determinación de la curva de saturación



Figura 3.5 Prueba de circuito abierto de la máquina de corriente continua

El procedimiento anterior corresponda a la determinación de la curva de manera ascendente, pero también se puede conseguir la misma curva de manera descendente, pero se empezaría desde que se tiene el valor máximo en la armadura e ir disminuyendo el voltaje hasta conseguir que la corriente de campo llego a cero, en la Tabla 3.5 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 3.5 Datos obtenidos en la prueba de circuito abierto

| Corriente de Campo I_f [A] | Voltaje en terminales [V] | Corriente de Campo I_f [A] | Voltaje en terminales [V] |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 0 | 2,2 | 1,3 | 94,7 |
| 0,3 | 15 | 1,4 | 103,7 |
| 0,4 | 25,2 | 1,5 | 108,8 |
| 0,5 | 35 | 1,6 | 115,5 |
| 0,6 | 45,5 | 1,7 | 120 |
| 0,7 | 52,9 | 1,8 | 124,7 |
| 0,8 | 60,2 | 1,9 | 129,5 |
| 0,9 | 68,7 | 2 | 133,1 |
| 1 | 76,9 | 2,1 | 136,2 |
| 1,1 | 83,5 | 2,2 | 139,7 |
| 1,2 | 88,3 | | |

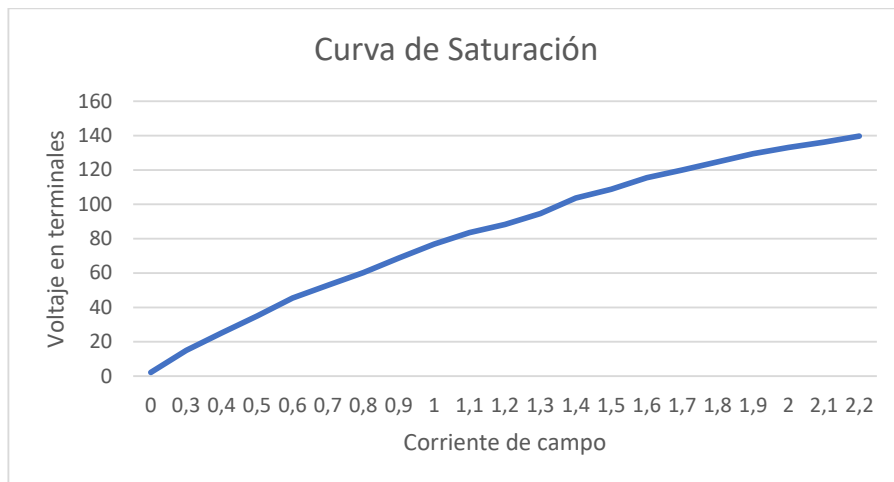


Figura 3.6 Curva de saturación de la máquina de corriente continua

Tabla 3.6 Datos de placa de la máquina de corriente continua

| DATOS DE LA MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA | | | |
|---|----------------|------------|------------------|
| Ex | 110 [V] | C.V. | 3.5 |
| V | 110 [V] | Ra | 0.5 [Ω] |
| I | 28 [A] | Rf | 148 [Ω] |
| Tm | 1800 [rev/min] | Vremanente | 2.2 [V] |

4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DIDÁCTICOS DE SOFTWARE

Para implementar los módulos didácticos, se dividieron los tópicos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua en cinco prácticas añadiendo una con la finalidad que el usuario conozca el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de manera virtual.

1. Introducción al Laboratorio de Máquinas Eléctricas y uso de los módulos de software.
2. Transformador monofásico.
3. Pruebas con transformadores monofásicos.
4. Transformador trifásico.
5. Máquina de corriente continua como motor.
6. Máquina de corriente continua como generador.

Para la implementación de los módulos didácticos de software que contemplan las prácticas número dos hasta el número seis se implementó el diagrama de flujo que se me muestra en la Figura 4.1.

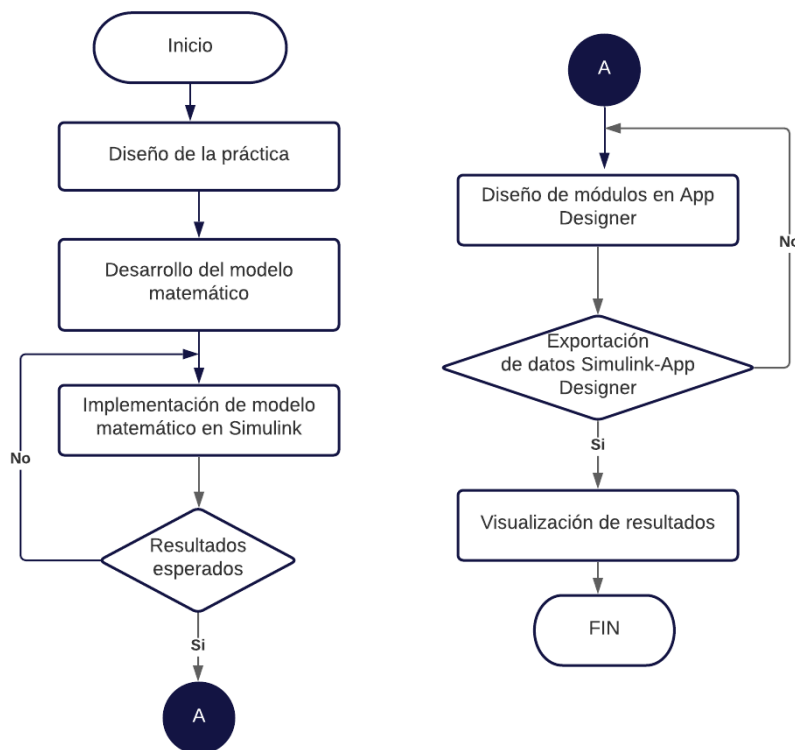


Figura 4.1 Diagrama de flujo para realización de las prácticas

En el ANEXO A se encuentra un manual de usuario donde se explica la programación realizada en Simulink y App Designer, con la finalidad que el instructor del laboratorio pueda realizar modificaciones en las pantallas del programa de requerirlo.

El diseño de las hojas guías se encuentra en el ANEXO B, donde están detalladas todas las prácticas con sus respectivas secciones (preparatorio, desarrollo e informe). Además, en el ANEXO C se tiene un banco de preguntas donde el instructor puede seleccionar varias como parte de coloquio para cada práctica.

Al ingresar al módulo principal del software se tiene una portada como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2 Pantalla de portada del software

Al seleccionar el botón Iniciar en la pantalla de Portada, se abre la pantalla de Selección de Prácticas, como se observa en la Figura 4.3 donde se encuentra un menú, que permite ingresar a cada una de las prácticas.

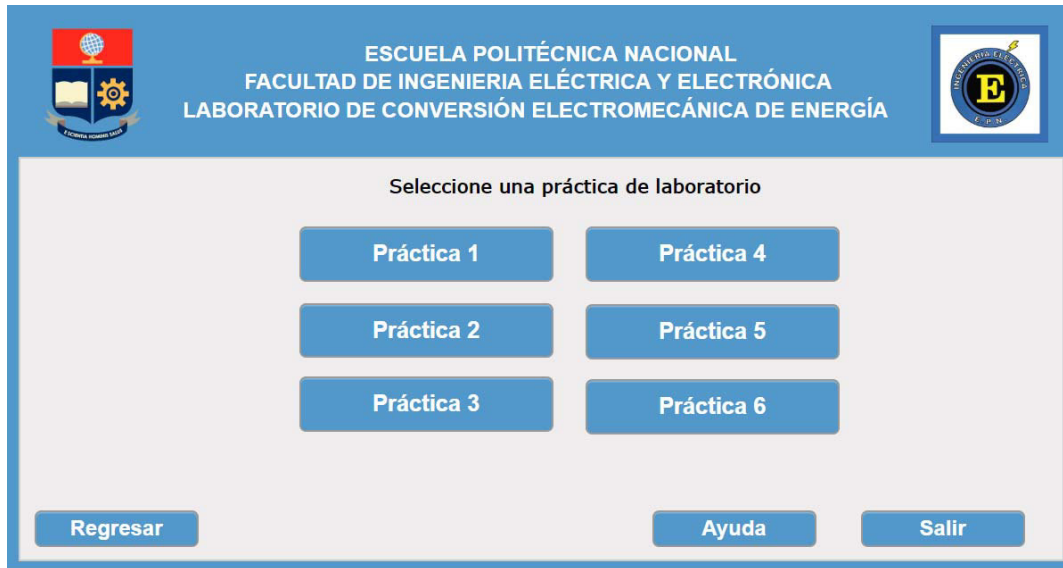


Figura 4.3 Pantalla de selección de las prácticas.

Todas las pantallas de usuario del software constan de tres botones base que son:

- **Regresar** Permite ir a la pantalla anterior.
- **Ayuda:** Da información básica de la pantalla o pasos a seguir para el adecuado funcionamiento de la pantalla.
- **Siguiente** Permite ir a la siguiente pantalla.

4.1 PRÁCTICA UNO: INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y USO DE LOS MÓDULOS DE SOFTWARE.

Para la implementación de esta práctica se utilizó App Designer, este módulo tiene algunas pantallas donde se muestran los diferentes equipos de medición y máquinas eléctricas que posee en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

En la Figura 4.4 del diagrama de flujo se presenta las pantallas diseñadas para la realización de esta práctica. Adicionalmente, en la Figura 4.5 se observa las pantallas implementadas en App Designer para la realización esta práctica.

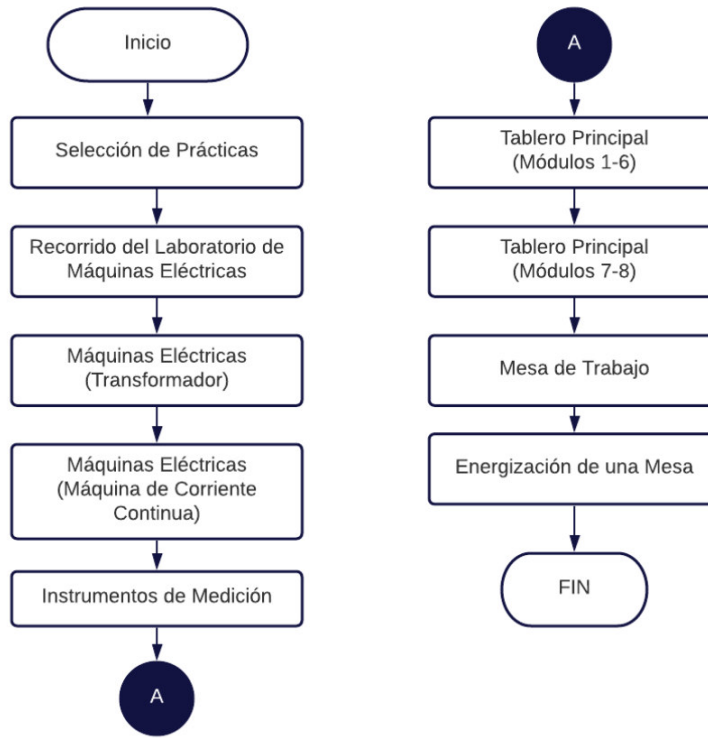


Figura 4.4 Diagrama de flujo de las pantallas de la práctica uno



Figura 4.5 Pantallas implementadas en App Designer para la práctica uno

4.2 PRÁCTICA DOS: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Esta práctica se diseñó para que el usuario pueda determinar la polaridad relativa de cada devanado del transformador, de tal manera que pueda entender el comportamiento del transformador monofásico bajo distintas configuraciones y condiciones de carga.

Para realizar esta práctica se utilizó el modelo matemático deducido en el capítulo 2 Figura 2.3, que pertenece a un transformador monofásico de dos devanados ideal bajo los parámetros del transformador del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, en la Figura 4.6 se puede observar la implementación de este en Simulink.

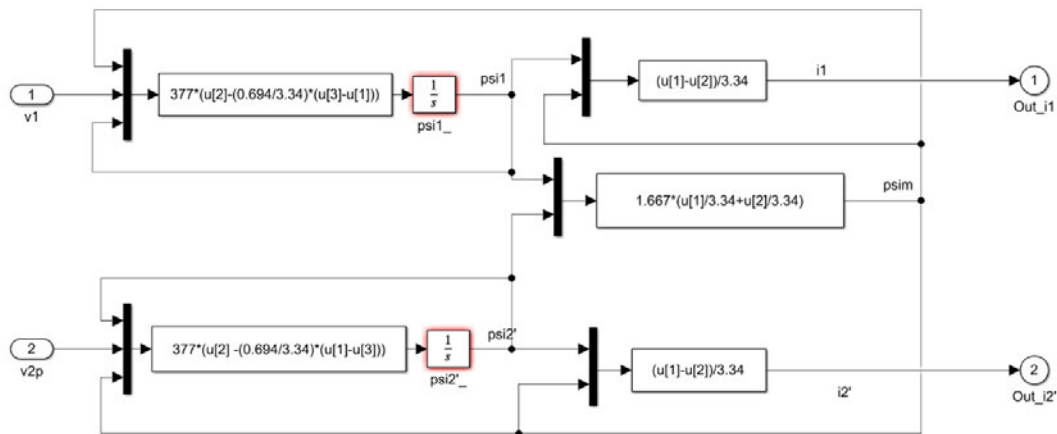


Figura 4.6 Modelo matemático de un transformador de dos devanados ideal implementado en Simulink

Se creó un subsistema con las variables de entrada (v_1 , v_{2p}) y variables de salida (i_1 , i_2'), las cuales sirven para exportarlas a App Designer como se puede observar en la Figura 4.7.

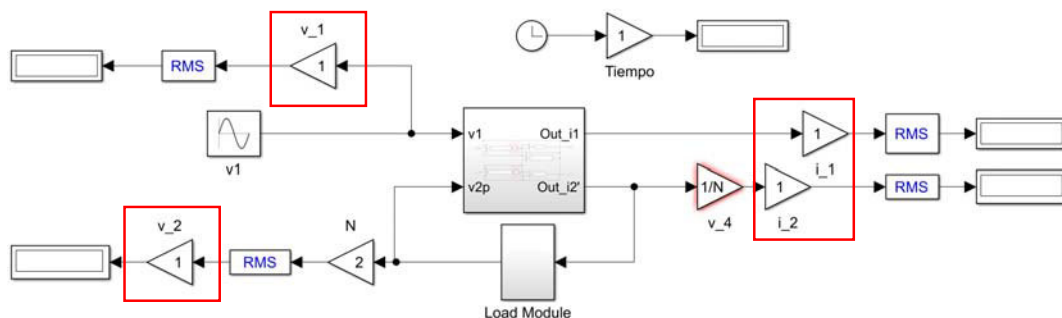


Figura 4.7 Subsistema creado en Simulink para la exportación de variables de entrada y salida

Después de tener el modelo matemático funcional en Simulink, se diseñan las pantallas de usuario según lo establecido en el diagrama de flujo de la Figura 4.8. Adicionalmente, en la Figura 4.9 se observan las pantallas implementadas en App Designer para la realización de esta práctica.

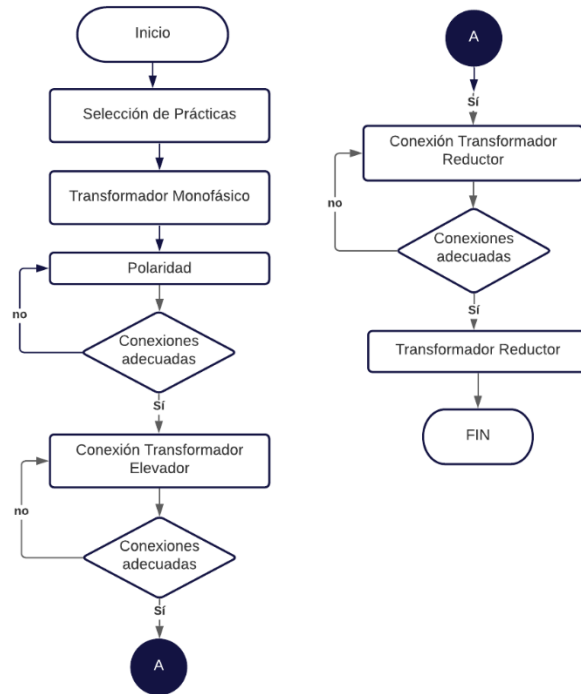


Figura 4.8 Diagrama de flujo de las pantallas de la práctica dos

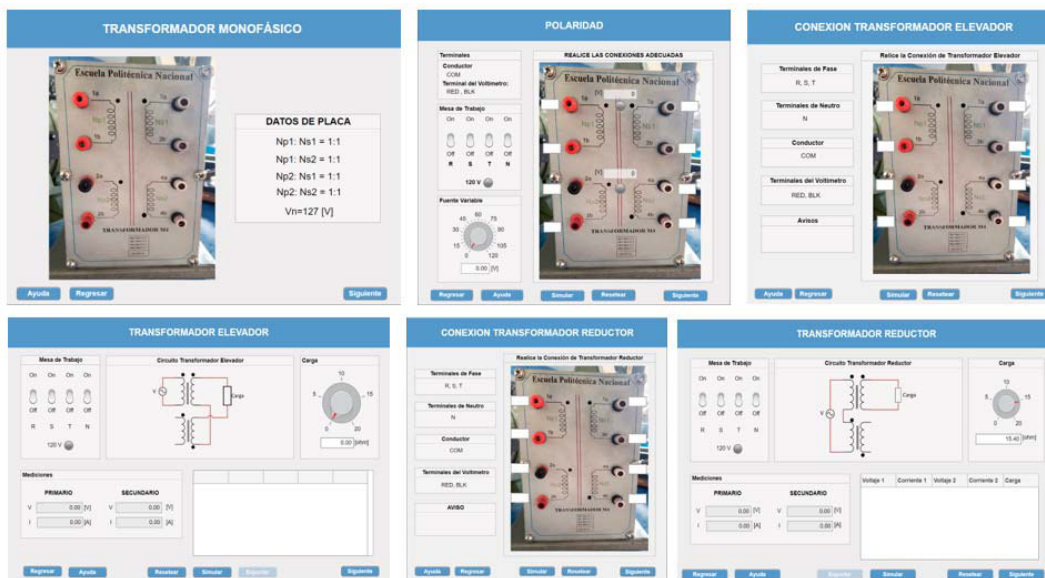


Figura 4.9 Pantallas implementadas en App Designer para la práctica dos

4.3 PRÁCTICA TRES: PRUEBAS CON TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

Esta práctica se diseñó de forma que el usuario pueda realizar la prueba de cortocircuito y circuito abierto del transformador monofásico.

Para la realización de esta práctica se utilizó el modelo matemático de un transformador monofásico de dos devanados incorporando la saturación que fue demostrado en el capítulo 2 Figura 2.5. En Figura 4.10 se puede apreciar la implementación del modelo matemático en Simulink. Además, crearon subsistemas al igual que en la práctica dos para tener un mejor manejo de las variables de entrada y salida como se observa en la Figura 4.11.

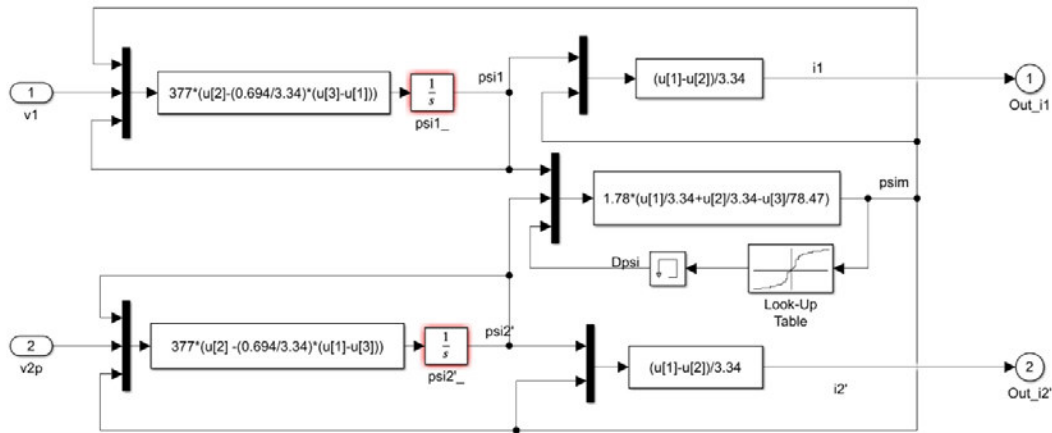


Figura 4.10 Modelo matemático de un transformador de dos devanados incorporando la saturación implementada en simulink

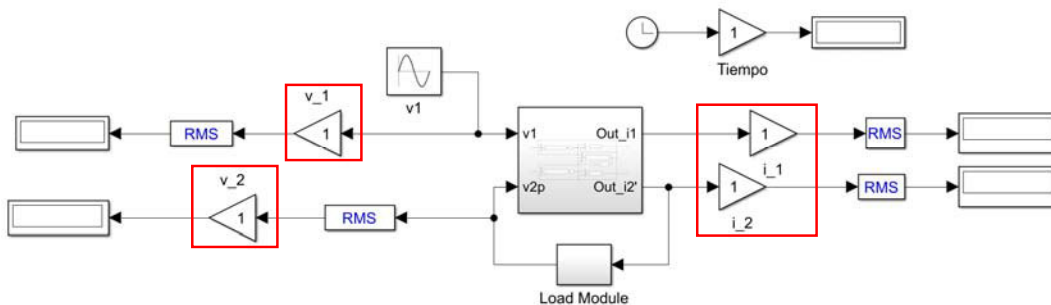


Figura 4.11 Subsistema creado en Simulink para la exportación de variables de entrada y salida

Luego de tener funcional el modelo matemático implementado en Simulink, se diseñó cada una de las pantallas que van a conformar el módulo de esta práctica tal como se

muestran en el diagrama de flujo de en Figura 4.12. Adicionalmente, en la Figura 4.13 se observan las pantallas implementadas en App Designer para la realización de esta práctica.

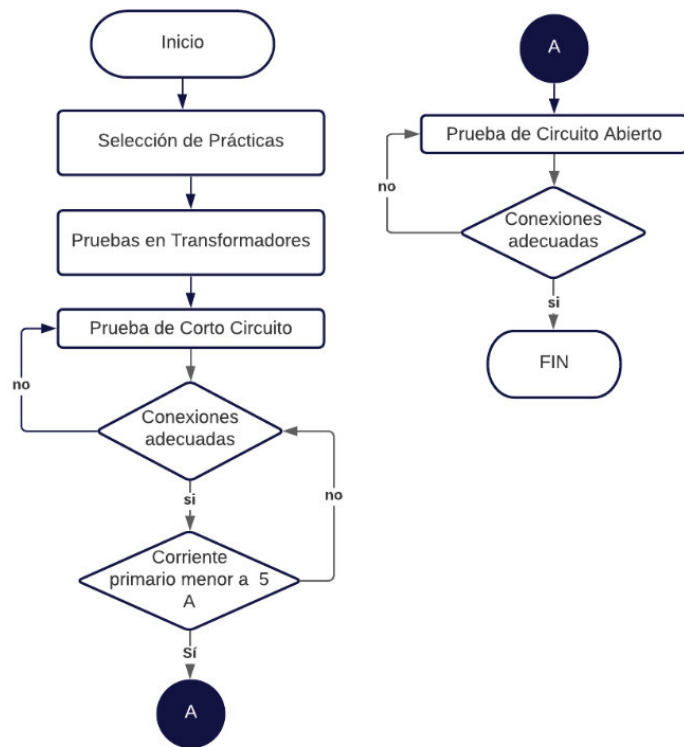


Figura 4.12 Diagrama de flujo de las pantallas de la práctica tres

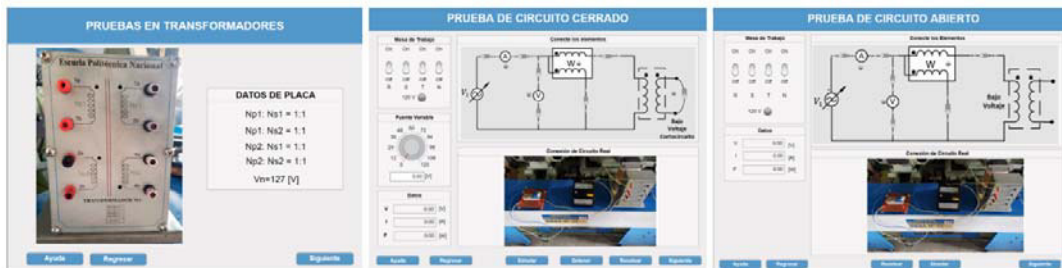


Figura 4.13 Pantallas implementadas en App Designer para la práctica cuatro

4.4 PRÁCTICA CUATRO: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Esta práctica se diseñó para que el usuario pueda realizar las conexiones del transformador trifásico Yy y Δy , y estudiar el comportamiento de este bajo diferentes condiciones de carga.

Para la realización de este módulo se utilizó el modelo demostrado en el capítulo dos Figura 2.6 y Figura 2.7, que consta de tres transformadores monofásicos ideales como se puede observar en la Figura 4.14, las tres columnas del transformador son similares. Además, se creó un subsistema con seis variables de entrada (v_{1A} , v_{2A} , v_{1B} , v_{2B} , v_{1C} y v_{2C}) y seis de salida (i_{1A} , i_{2A} , i_{1B} , i_{2B} , i_{1C} e i_{2C}), para realizar las conexiones Yy y Δy . Como se puede observar en la Figura 4.15 y Figura 4.16 respectivamente

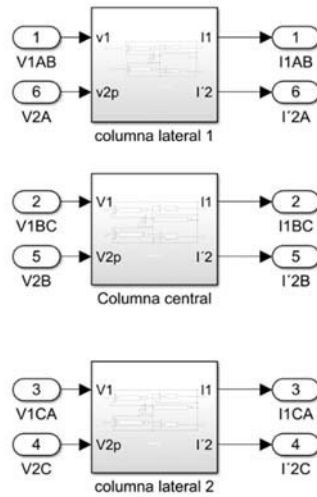


Figura 4.14 Subsistema de los tres transformadores ideales con las seis variables de entrada y salida

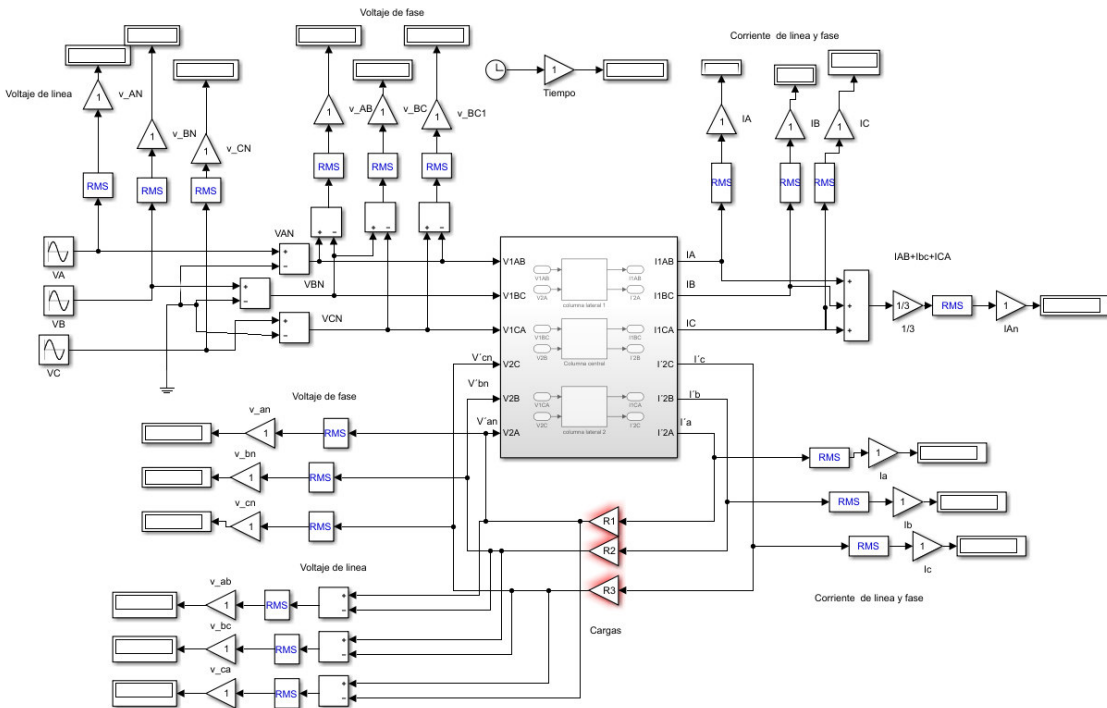


Figura 4.15 Conexión Yy del Transformador trifásico implementado en Simulink

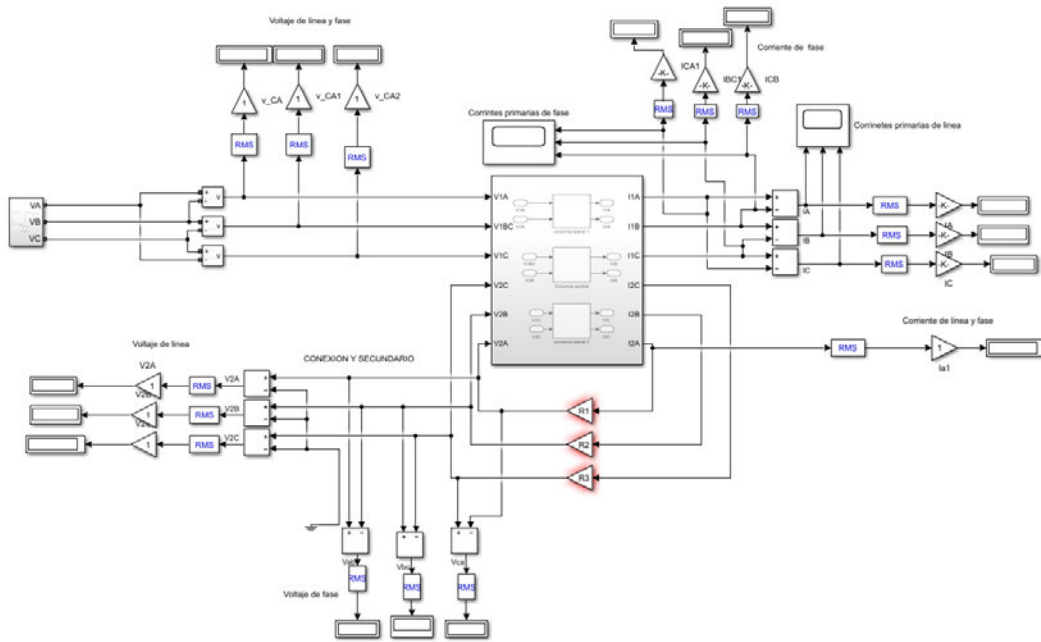


Figura 4.16 Conexión Δ y del transformador trifásico implementado en Simulink

Luego de tener las dos conexiones realizadas de manera adecuada y funcionales se diseñó las pantallas de usuario que conforman la práctica tres como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 4.17. Adicionalmente, en la Figura 4.18 se observa las pantallas implementadas en App Designer para la realización de esta práctica.

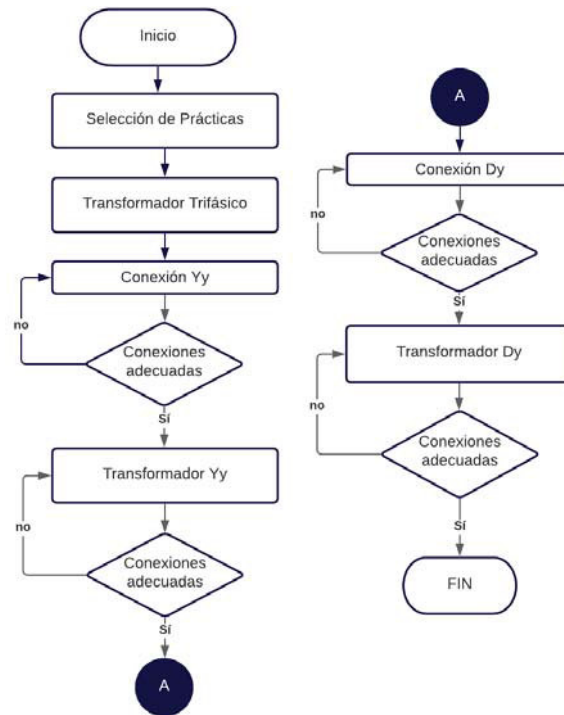


Figura 4.17 Diagrama de flujo de las pantallas de la práctica cuatro



Figura 4.18 Pantallas implementadas en App Designer para la práctica cuatro

4.5 PRÁCTICA CINCO: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO MOTOR

Esta práctica se desarrolló para que el usuario pueda apreciar el comportamiento de la máquina de corriente continua funcionando como motor.

Para la realización de esta práctica se utiliza el modelo matemático deducido en el capítulo 2 Figura 2.10. En la Figura 4.19 se puede apreciar el mismo implementado en Simulink con los parámetros de la máquina presente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

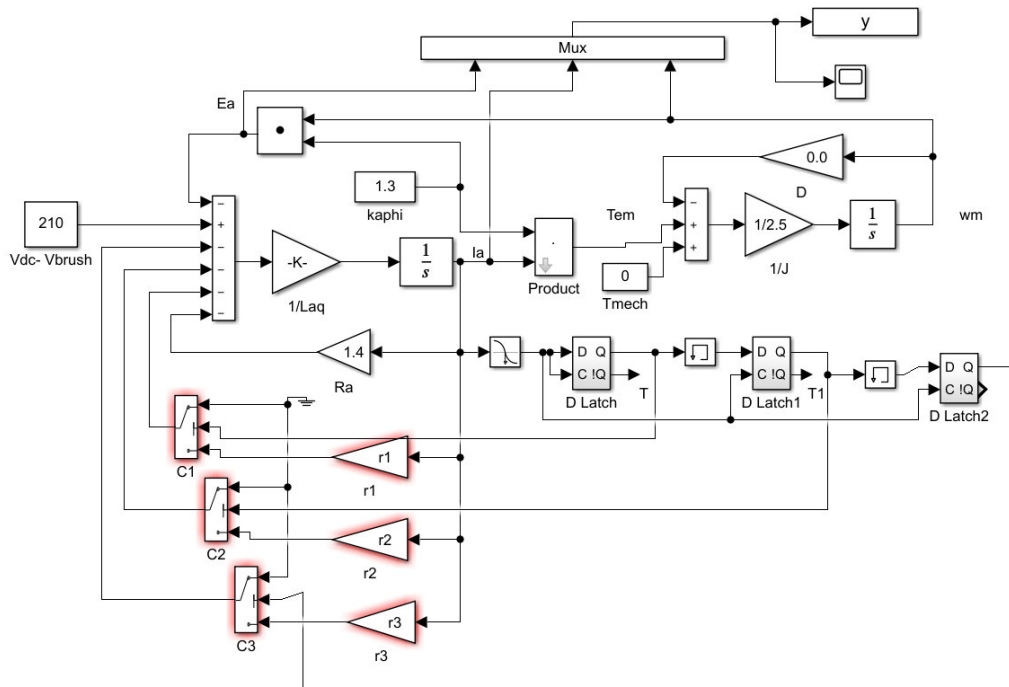


Figura 4.19 Modelo matemático la máquina eléctrica de corriente continua como motor implementado en Simulink.

Luego de tener funcional el modelo matemático implementado en Simulink se diseñan las pantallas que conforman la práctica cinco, como se establece en el diagrama de flujo de la Figura 4.20. Adicionalmente, en la Figura 4.21 se observa las pantallas implementadas en App Designer para la realización de esta práctica

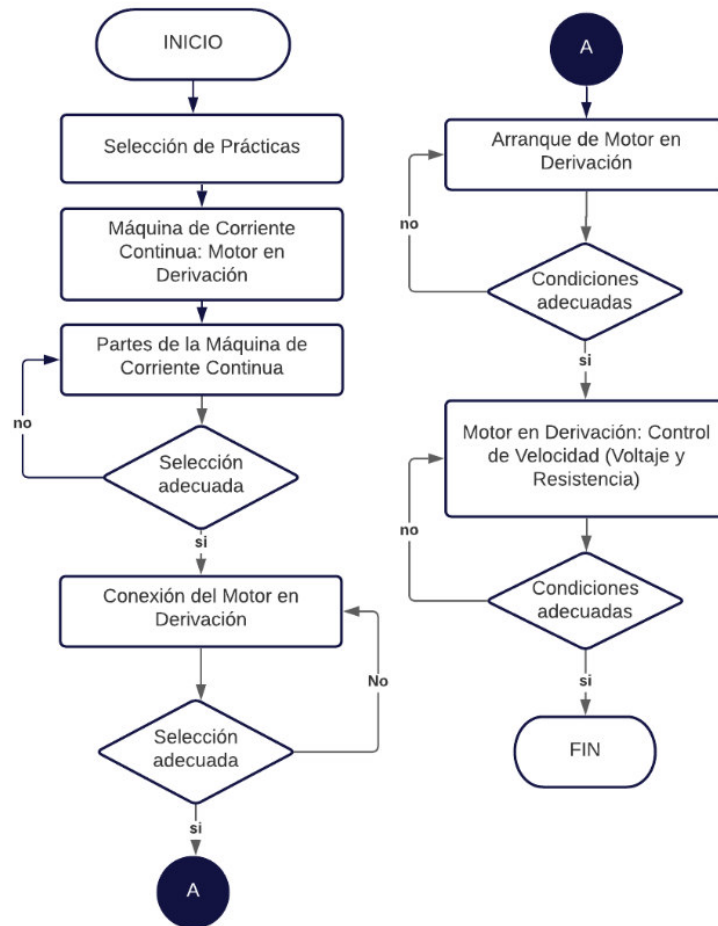


Figura 4.20 Diagrama de flujo de las pantallas implementadas en la práctica cinco



Figura 4.21 Pantallas implementadas en App Designer para la práctica cinco

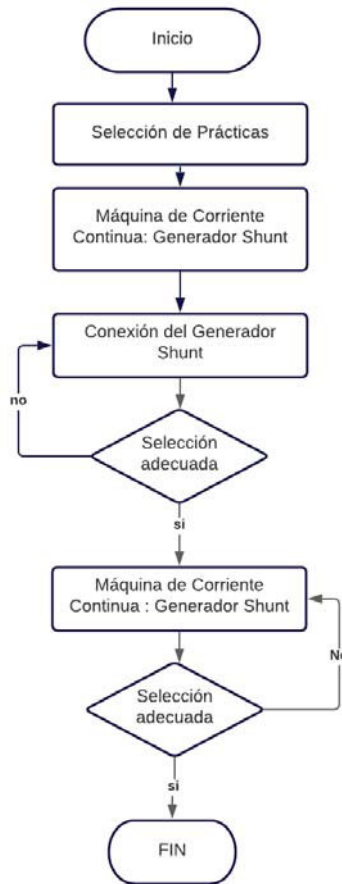


Figura 4.23 Diagrama de flujo para la implementación de la práctica seis



Figura 4.24 Pantallas para realización de la práctica seis

5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

En esta sección se realiza una comparación entre los datos obtenidos de los módulos de software y los datos de las prácticas que se realizan en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de manera presencial, con la finalidad de validar los modelos matemáticos planteados anteriormente.

Para el cálculo de errores se considera como el valor real los datos obtenidos en el Laboratorio debido a que los modelos matemáticos están realizados con los parámetros de las máquinas presentes en el Laboratorio.

5.1 PRÁCTICA UNO: INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y USO DE LOS MÓDULOS DE SOFTWARE

Esta práctica cuenta con nueve pantallas, que presentan fotografías de los instrumentos de medida, máquinas eléctricas, mesa de trabajo y el panel principal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con la finalidad que el estudiante conozca el Laboratorio de manera virtual.

En la última pantalla se debe realizar la energización de una de las mesas de trabajo por medio del panel principal como se puede observar en la Figura 5.1.

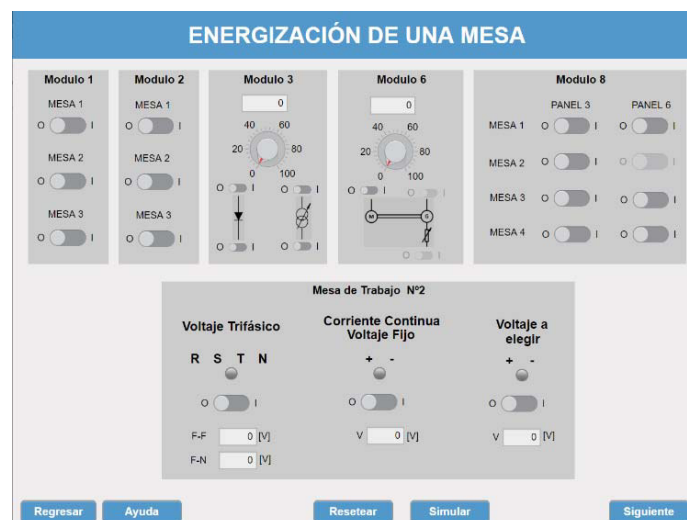


Figura 5.1 Pantalla del módulo de la energización de una mesa de trabajo

Análisis de Resultados:

De manera presencial el instructor realizaba un recorrido a los estudiantes por el Laboratorio de Máquinas Eléctricas indicando el funcionamiento de los equipos que conforman el mismo, mientras que con la ayuda del módulo se lo realiza de manera virtual, para la energización de la mesa de trabajo se utilizó únicamente los paneles principales del módulo para que el usuario pueda visualizar los niveles de voltaje que se pueden tener en los bornes de las mesas de trabajo.

5.2 PRÁCTICA DOS: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

En este módulo se realiza la prueba de polaridad en el transformador monofásico, las conexiones del transformador en configuración elevador y reductor con diferentes pasos de carga. Los pasos de carga en la configuración del transformador elevador o reductor son cargas resistivas simuladas similar al módulo que se tiene en el Laboratorio físico, a continuación, en la Tabla 5.1 se presentan los datos obtenidos en este módulo.

Tabla 5.1 Resultados obtenidos en el módulo

| Pasos de carga | Transformador Elevador | | | | Transformador Reductor | | | |
|----------------|------------------------|-------|------------|-------|------------------------|-------|------------|-------|
| | Primario | | Secundario | | Primario | | Secundario | |
| | V [V] | I [A] | V [V] | I [A] | V [V] | I [A] | V [V] | I [A] |
| 1 | 120 | 1,5 | 242,36 | 2,22 | 120 | 2,3 | 60 | 0,9 |
| 2 | 120 | 4,74 | 266,55 | 3,03 | 120 | 4,8 | 57,64 | 1,24 |
| 3 | 120 | 10,4 | 278,64 | 4,56 | 120 | 6,3 | 54,49 | 1,82 |

En el Laboratorio para el análisis del transformador monofásico los pasos de carga se lo hacen con un módulo de resistencias, tanto en la configuración de transformador elevador o reductor, a continuación, en la Tabla 5.2, se presentan los datos tabulados de obtenidos de manera presencial.

Tabla 5.2 Resultados obtenidos en el laboratorio

| Pasos de carga | Transformador Elevador | | | | Transformador Reductor | | | |
|----------------|------------------------|-------|------------|-------|------------------------|-------|------------|-------|
| | Primario | | Secundario | | Primario | | Secundario | |
| | V [V] | I [A] | V [V] | I [A] | V [V] | I [A] | V [V] | I [A] |
| 1 | 124,1 | 1,9 | 243,5 | 2,8 | 120 | 2,1 | 60 | 0,6 |
| 2 | 122,5 | 5,9 | 235,2 | 5,7 | 120 | 4,1 | 58 | 1,3 |
| 3 | 121,5 | 11,1 | 231,9 | 6,7 | 119,5 | 5,4 | 54,5 | 1,9 |

Para validar el módulo realizado se efectúa el cálculo de errores, como valor teórico se toma en cuenta el obtenido del Laboratorio y como valor experimental los datos

obtenidos en los modelos matemáticos, en la Tabla 5.3 se pueden observar los respectivos errores.

Ejemplo de cálculo:

Error Relativo Porcentual:

$$ER = \frac{|VE - VT|}{VT} \times 100\% \tag{5.1}$$

$$ER = \frac{|124,1 - 120|}{120} \times 100\% = 3,42\% \tag{5.2}$$

Tabla 5.3 Resultado del cálculo de errores

| Pasos de carga | Transformador Elevador | | | | Transformador Reductor | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Primario | | Secundario | | Primario | | Secundario | |
| | Error Relativo de V (%) | Error Relativo de I (%) | Error Relativo de V (%) | Error Relativo de I (%) | Error Relativo de V (%) | Error Relativo de I (%) | Error Relativo de V (%) | Error Relativo de I (%) |
| 1 | 3,42 | 7,95 | 1,33 | 11,11 | 0,00 | 8,70 | 0,00 | 33,33 |
| 2 | 2,08 | 2,79 | 0,57 | 21,28 | 0,00 | 14,58 | 0,62 | 4,84 |
| 3 | 1,25 | 6,73 | 0,55 | 2,13 | 0,42 | 14,29 | 1,89 | 4,40 |

Análisis de Resultados:

Como se puede observar se tienen un cierto rango de errores en cada uno de los datos tomados, estos pueden deberse a diversos factores, pero lo principal es que las máquinas presentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas han perdido sus propiedades debido a su uso continuo, otro puede ser debido a que los métodos de medición no fueron adecuados, o pudieron presentarse errores del tipo humano. Además, los valores fluctúan ya que la energización se la realiza directo de la red y el valor entregado a la mesa de trabajo no es constante como es el caso del módulo.

5.3 PRÁCTICA TRES: PRUEBAS CON TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

En este módulo se realizan las pruebas de cortocircuito y circuito abierto, con los valores de los parámetros del transformador monofásico presente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

En la Tabla 5.4 se muestra los resultados de la prueba de circuito abierto y cortocircuito obtenidos mediante el módulo.

Tabla 5.4 Resultados obtenidos en el módulo al tomar al realizar las pruebas de circuito abierto y cortocircuito

| PRUEBAS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS | | | |
|--|-------|-------|-------|
| | V [V] | I [A] | P [W] |
| Prueba de Cortocircuito | 40 | 5 | 64 |
| Prueba de Circuito Abierto | 110 | 0,68 | 15 |
| *fp =0,2 | | | |

En la Tabla 5.5 se muestra los resultados obtenidos al realizar respectivas pruebas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de manera presencial.

Tabla 5.5 Resultados obtenidos en el Laboratorio de la prueba de circuito abierto y cortocircuito

| PRUEBAS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS | | | |
|--|-------|-------|-------|
| | V [V] | I [A] | P [w] |
| Prueba de Cortocircuito | 41,5 | 5,08 | 68 |
| Prueba de Circuito Abierto | 110,1 | 0,71 | 15,3 |
| *fp =0,2 | | | |

Para validar el módulo realizado se efectúa el cálculo de errores, como valor teórico se toma el obtenido de los datos del Laboratorio y como valor experimental los datos obtenidos de los módulos, en la Tabla 5.6 se puede el resultado total del cálculo de errores.

Ejemplo de cálculo:

Error Relativo:

$$ER = \frac{|VE - VT|}{VT} \times 100\% \quad (5.3)$$

$$ER = \frac{|41,5 - 40|}{40} \times 100\% = 3,75\% \quad (5.4)$$

Tabla 5.6 Resultado del cálculo de errores

| PRUEBAS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Error Relativo de V [%] | Error Relativo de I [%] | Error Relativo de P [%] |
| Prueba de Cortocircuito | 3,75 | 1,57 | 5,88 |
| Prueba de Circuito Abierto | 0,09 | 4,23 | 1,96 |
| *fp =0,2 | | | |

Análisis de Resultados:

Los errores obtenidos se pueden atribuir a diversos factores, el principal es que las máquinas e instrumentos presentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas han perdido sus propiedades debido a su extenso uso, y para este caso en particular se emplea el variac el cual ha perdido precisión y fluctúan los valores según la precisión de la persona que realice la prueba. Además, en la prueba de circuito abierto depende de la red eléctrica por lo que esta no entrega un valor continuo.

5.4 PRÁCTICA CUATRO: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

En este módulo se realiza el conexionado del transformador trifásico por medio de la comparación de caracteres en las configuraciones Yy0 y $\Delta y11$, con los pasos de carga se pueden verificar el funcionamiento del transformador con estas conexiones. Además, se puede observar las formas de onda de los voltajes de línea y de fase, simulando el osciloscopio que se utiliza en el laboratorio.

En la Tabla 5.7 y Tabla 5.8 muestran los resultados obtenidos del módulo del transformador trifásico conexión Yy y conexión Δy .

Tabla 5.7 Resultados obtenidos del módulo de transformador trifásico en conexión Yy

| Pasos de carga | TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONEXIÓN Yy | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------------|-----|-----|-------|----|-----|------------|-----|-----|-------|----|-----|
| | PRIMARIO | | | | | | SECUNDARIO | | | | | |
| | V [V] | | | I [A] | | | V [V] | | | I [A] | | |
| 1 | VA | 127 | VAB | 220 | IA | 0,7 | VA | 120 | VAB | 207 | IA | 0,5 |
| | VB | 127 | VBA | 220 | IB | 0,7 | VB | 120 | VBA | 207 | IB | 0,5 |
| | VC | 127 | VCA | 220 | IC | 0,7 | VC | 120 | VCA | 207 | IC | 0,5 |
| 2 | VA | 127 | VAB | 220 | IA | 1,5 | VA | 116 | VAB | 200 | IA | 1,1 |
| | VB | 127 | VBA | 220 | IB | 1,5 | VB | 116 | VBA | 200 | IB | 1,1 |
| | VC | 127 | VCA | 220 | IC | 1,5 | VC | 116 | VCA | 200 | IC | 1,1 |

Tabla 5.8 Resultados obtenidos del módulo de transformador trifásico en conexión Dy

| Pasos de carga | TRANSFORMADOR TRIFASICO Dy | | | | | | | |
|----------------|----------------------------|-----|-------|-----|------------|-----|-------|-----|
| | PRIMARIO | | | | SECUNDARIO | | | |
| | V [V] | | I [A] | | V [V] | | I [A] | |
| 1 | VAB | 220 | IAB | 0,7 | VAB | 207 | IAB | 0,5 |
| | VBA | 220 | IBC | 0,7 | VBA | 207 | IBC | 0,5 |
| | VCA | 220 | ICA | 0,7 | VCA | 207 | ICA | 0,5 |
| 2 | VAB | 220 | IAB | 1,5 | VAB | 200 | IAB | 1,1 |
| | VBA | 220 | IBC | 1,5 | VBA | 200 | IBC | 1,1 |
| | VCA | 220 | ICA | 1,5 | VCA | 200 | ICA | 1,1 |

En la Tabla 5.9 y Tabla 5.10 se muestra los resultados obtenidos al realizar la conexión del transformador trifásico en las configuraciones Yy y Dy en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de manera presencial respectivamente.

Tabla 5.9 Resultados obtenidos en el Laboratorio en la práctica de transformador trifásico en conexión Yy

| Pasos de carga | TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONEXIÓN Yy | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------------|--------|-----|-------|----|------|------------|--------|-----|-------|----|-----|
| | PRIMARIO | | | | | | SECUNDARIO | | | | | |
| | V [V] | | | I [A] | | | V [V] | | | I [A] | | |
| 1 | VA | 117,2 | VAB | 203 | IA | 0,55 | VA | 117,2 | VAB | 203 | IA | 0,5 |
| | VB | 125,04 | VBA | 216,6 | IB | 0,55 | VB | 118,7 | VBA | 205,7 | IB | 0,5 |
| | VC | 123,65 | VCA | 215,9 | IC | 0,55 | VC | 119,34 | VCA | 206,7 | IC | 0,5 |
| 2 | VA | 122,86 | VAB | 212,8 | IA | 1,3 | VA | 111,71 | VAB | 193,5 | IA | 1,1 |
| | VB | 124,53 | VBA | 215,7 | IB | 1,1 | VB | 113,44 | VBA | 196,5 | IB | 1 |
| | VC | 124,42 | VCA | 215,5 | IC | 1,3 | VC | 113,85 | VCA | 197,2 | IC | 1 |

Tabla 5.10 Resultados obtenidos en el Laboratorio en la práctica de transformador trifásico en conexión Dy

| Pasos de carga | TRANSFORMADOR TRIFASICO Dy | | | | | | | |
|----------------|----------------------------|-------|-------|-----|------------|-------|-------|------|
| | PRIMARIO | | | | SECUNDARIO | | | |
| | V [V] | | I [A] | | V [V] | | I [A] | |
| 1 | VAB | 212,4 | IAB | 1,7 | VAB | 203,4 | IAB | 0,9 |
| | VBA | 212,4 | IBC | 1,7 | VBA | 205,8 | IBC | 0,98 |
| | VCA | 212,4 | ICA | 1,7 | VCA | 206,3 | ICA | 0,98 |
| 2 | VAB | 212,2 | IAB | 3,3 | VAB | 193,5 | IAB | 1,8 |
| | VBA | 212,2 | IBC | 3,4 | VBA | 195,9 | IBC | 1,8 |
| | VCA | 212,2 | ICA | 3,4 | VCA | 196,5 | ICA | 1,9 |

Para validar el módulo realizado se efectúa el cálculo de errores, como valor teórico se toma en cuenta el obtenido del Laboratorio y como valor experimental los datos obtenidos en el módulo, en la Tabla 5.11 y Tabla 5.12 se puede observar el resultado del cálculo de errores.

Ejemplo de cálculo:

Error Relativo:

$$ER = \frac{|VE - VT|}{VT} \times 100\% \quad (5.6)$$

$$ER = \frac{|127 - 117,2|}{117,2} \times 100\% = 8,36\% \quad (5.5)$$

Tabla 5.11 Resultado del cálculo de errores del transformador trifásico en conexión Yy

| Pasos de carga | TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONEXIÓN Yy | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------------|------|-----|-------------------------|----|-------|-------------------------|------|-----|-------------------------|----|------|
| | PRIMARIO | | | | | | SECUNDARIO | | | | | |
| | Error Relativo de V [%] | | | Error Relativo de I [%] | | | Error Relativo de V [%] | | | Error Relativo de I [%] | | |
| 1 | VA | 8,36 | VAB | 8,37 | IA | 27,27 | VA | 2,39 | VAB | 1,97 | IA | 0,00 |
| | VB | 1,57 | VBA | 1,57 | IB | 27,27 | VB | 1,10 | VBA | 0,63 | IB | 0,00 |
| | VC | 2,71 | VCA | 1,90 | IC | 27,27 | VC | 0,55 | VCA | 0,15 | IC | 0,00 |
| 2 | VA | 3,37 | VAB | 3,38 | IA | 15,38 | VA | 3,84 | VAB | 3,36 | IA | 0,00 |
| | VB | 1,98 | VBA | 1,99 | IB | 36,36 | VB | 2,26 | VBA | 1,78 | IB | 9,09 |
| | VC | 2,07 | VCA | 2,09 | IC | 15,38 | VC | 1,89 | VCA | 1,42 | IC | 9,09 |

Tabla 5.12 Resultado del cálculo de errores del transformador trifásico Dy

| Pasos de carga | TRANSFORMADOR TRIFÁSICO Dy | | | | | | | |
|----------------|----------------------------|------|-------------------------|-------|-------------------------|------|-------------------------|-------|
| | PRIMARIO | | | | SECUNDARIO | | | |
| | Error Relativo de V [%] | | Error Relativo de I [%] | | Error Relativo de V [%] | | Error Relativo de I [%] | |
| 1 | VAB | 3,58 | IAB | 11,76 | VAB | 1,77 | IAB | 22,22 |
| | VBA | 3,58 | IBC | 11,76 | VBA | 0,58 | IBC | 12,24 |
| | VCA | 3,58 | ICA | 11,76 | VCA | 0,34 | ICA | 12,24 |
| 2 | VAB | 3,68 | IAB | 6,06 | VAB | 3,36 | IAB | 16,67 |
| | VBA | 3,68 | IBC | 2,94 | VBA | 2,09 | IBC | 16,67 |
| | VCA | 3,68 | ICA | 2,94 | VCA | 1,78 | ICA | 10,53 |

Análisis de Resultados:

Los errores obtenidos se pueden atribuir a diversos factores, el principal es la excesiva utilización del transformador trifásico e instrumentos presentes, que con el paso del tiempo van perdiendo sus propiedades, además se observa que las fases no están balanceadas y presentan diferentes valores de voltaje, por el contrario del módulo programado el cual presenta sus fases balanceadas y un transformador trifásico ideal.

5.5 PRÁCTICA CINCO: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO MOTOR

En este módulo se tiene la conexión de la máquina de corriente continua en configuración motor, se revisa como se realiza la adecuada energización mediante el análisis de la corriente de arranque, y se efectúa el análisis de control de velocidad.

En la Tabla 5.13 se muestran los valores obtenidos del módulo.

Tabla 5.13 Resultados obtenidos en el módulo de máquina de corriente continua como motor.

| MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA: MOTOR | | | |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| Velocidad vs Corriente | | Voltaje vs Velocidad | |
| Corriente de Campo I_f [A] | Velocidad n [rpm] | Voltaje Terminal V_a [V] | Velocidad n [rpm] |
| 0,7 | 1667 | 106,1 | 1810 |
| 0,65 | 1701 | 106,9 | 1825 |
| 0,6 | 1724 | 107,9 | 1843 |
| 0,55 | 1780 | 108,6 | 1856 |
| 0,5 | 1800 | 110 | 1890 |

En la Tabla 5.14 se observan los datos obtenidos en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Tabla 5.14 Resultados obtenidos en el Laboratorio de máquina de corriente continua como motor.

| MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA: MOTOR | | | |
|---|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Velocidad vs Corriente | | Voltaje vs Velocidad | |
| Corriente de Campo If [A] | Velocidad n [rpm] | Voltaje Terminal Va [V] | Velocidad n [rpm] |
| 0,7 | 1611 | 106,4 | 1820 |
| 0,62 | 1656 | 108,9 | 1856 |
| 0,56 | 1697 | 109,5 | 1866 |
| 0,5 | 1748 | 110,4 | 1874 |
| 0,51 | 1800 | 112,6 | 1903 |

Para validar el módulo realizado se efectúa el cálculo de errores, como valor teórico se toma en cuenta los datos obtenidos en el Laboratorio, mientras que el valor experimental son los datos obtenidos en los módulos, en la Tabla 5.15 se puede observar el resultado total del cálculo de errores.

Ejemplo de cálculo:

Error Relativo:

$$ER = \frac{|VE - VT|}{VT} \times 100\% \quad (5.7)$$

$$ER = \frac{|0,65 - 0,62|}{0,62} \times 100\% = 4,84\% \quad (5.8)$$

Tabla 5.15 Resultado del cálculo de errores

| MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA: MOTOR | | | |
|---|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Velocidad vs Corriente | | Voltaje vs Velocidad | |
| Error Relativo de If [%] | Error Relativo n [%] | Error Relativo Va [%] | Error Relativo n [%] |
| 0,00 | 3,48 | 0,28 | 0,55 |
| 4,84 | 2,72 | 1,84 | 1,67 |
| 7,14 | 1,59 | 1,46 | 1,23 |
| 10,00 | 1,83 | 1,63 | 0,96 |
| 1,96 | 0,00 | 2,31 | 0,68 |

Análisis de Resultados:

Se tiene un rango bajo de errores esto se puede deber a diversos factores, uno de ellos puede ser que los reóstatos al no ser precisos hacen que la corriente que se mide cambie. Además, los tacómetros usados para determinar el valor de la velocidad del motor tampoco son precisos ni nuevos y producen cierto error en la medición estos se tienen que sostener firmemente sino se tienen valores errados. Mientras que, en el módulo los valores de las simulaciones realizadas son más exactos.

5.6 PRÁCTICA SEIS: MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR

En este módulo se realiza la conexión shunt del generador de corriente continua, se efectúa el análisis para la obtención de la curva de saturación y observar cómo varía el voltaje con respecto a la carga.

En la Tabla 5.16 se tiene los valores obtenidos del módulo de máquina de corriente continua como generador.

Tabla 5.16 Resultados obtenidos en el módulo de máquina de corriente continua como generador

| MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR | | | | | |
|---|---|--------------------|--------------------------|---|--------------------|
| Velocidad n [rpm] | Corriente de Campo I_f [A] | Voltaje [V] | Velocidad n [rpm] | Corriente de Campo I_f [A] | Voltaje [V] |
| 1800 | 0,35 | 104 | 1800 | 0,65 | 68,9 |
| 1720 | 0,45 | 105 | 1800 | 0,8 | 74,1 |
| 1660 | 0,55 | 102 | 1800 | 1,15 | 86,6 |
| 1630 | 0,65 | 100 | 1800 | 1,81 | 93,5 |
| 1545 | 1,25 | 87 | 1800 | 1,9 | 97,8 |
| 1395 | 1,3 | 70 | 1800 | 1,99 | 110 |

En la Tabla se observan los datos obtenidos en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Tabla 5.17 Resultados del Laboratorio en la práctica de máquina de corriente continua como generador

| MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR | | | | | |
|--|---------------------------|-------------|-------------------|---------------------------|-------------|
| Velocidad n [rpm] | Corriente de Campo If [A] | Voltaje [V] | Velocidad n [rpm] | Corriente de Campo If [A] | Voltaje [V] |
| 1800 | 0,4 | 104 | 1800 | 0,68 | 73,1 |
| 1719 | 0,5 | 104,9 | 1800 | 0,79 | 80,4 |
| 1663 | 0,6 | 100,8 | 1800 | 1,14 | 95,2 |
| 1628 | 0,7 | 99,2 | 1800 | 1,79 | 110 |
| 1546 | 1,28 | 86,9 | 1800 | 1,88 | 111,1 |
| 1395 | 1,14 | 72,3 | 1800 | 1,95 | 112,7 |

Para realizar la comparación se toma como valores teóricos los datos obtenidos en el Laboratorio y como valor experimental los datos obtenidos de los módulos, en la Tabla 5.18 se puede observar el resultado total del cálculo de errores.

Ejemplo de cálculo:

Error Relativo:

$$ER = \frac{|VE - VT|}{VT} \times 100\% \quad (5.9)$$

$$ER = \frac{|1719 - 1720|}{1720} \times 100\% = 0,06\% \quad (5.10)$$

Tabla 5.18 Resultado del cálculo de errores

| MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA COMO GENERADOR | | | | | |
|--|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Error Relativo n [%] | Error Relativo If [%] | Error Relativo V [%] | Error Relativo n [%] | Error Relativo If [%] | Error Relativo V [%] |
| 0,00 | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 4,41 | 5,75 |
| 0,06 | 10,00 | 0,10 | 0,00 | 1,27 | 7,84 |
| 0,18 | 8,33 | 1,19 | 0,00 | 0,88 | 9,03 |
| 0,12 | 7,14 | 0,81 | 0,00 | 1,12 | 15,00 |
| 0,06 | 2,34 | 0,12 | 0,00 | 1,06 | 11,97 |
| 0,00 | 14,04 | 3,18 | 0,00 | 2,05 | 2,40 |

Análisis de Resultados:

Se observa que el rango de errores es tolerable esto puede deberse a varios factores, esta práctica como la anterior se hace mediante la variación del reóstato y al ser un elemento que ha sido usado con el paso de los tiempos pierde sus propiedades haciendo que los valores de corriente y voltaje sean variables cuando se toma las mediciones, de igual forma sucede con el tacómetro.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- En este trabajo se desarrolló herramientas de software para la simulación de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua, orientada al uso de prácticas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas mediante el software Matlab. Lo más importante de este desarrollo fue la realización de los modelos matemáticos de las máquinas presentes en el Laboratorio porque en base a estos se tiene accesos a las variables de entrada y salida para la realización de los módulos, una de las mayores dificultades fue la toma de datos que rigen a cada una de máquinas debido a el tiempo de vida útil que tiene cada una de estas.
- Se estructuró las practicas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que tienen como tópicos transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua, teniendo en cuenta el formato que se viene manejando con anterioridad: trabajo preparatorio, desarrollo, informe y coloquio.
- En el presente trabajo técnico se implementó un software de simulación con una interfaz gráfica que incluye los módulos de transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua. Mediante MATLAB y su prestación App Designer la misma que toma las variables de entrada y salida de los modelos matemáticos desarrollados en Simulink para que el usuario pueda ver el comportamiento de estas de forma didáctica.
- Se desarrolló manuales de usuario, el primero con los pasos detallados de la programación en Simulink y App Designer con la finalidad que el instructor pueda modificar alguno de los módulos en caso de requerirlo y el segundo con información necesaria para que el usuario pueda manejar y aprovechar todos los componentes de los módulos desarrollados.
- La determinación de los parámetros de las características del transformador se lo hizo a través de las pruebas de circuito abierto, circuito cerrado y curva de magnetización, debido a que los presentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas son artesanales. Mientras que la determinación de los parámetros de la máquina de corriente continua se los realizo con la curva de saturación y los datos de placa.

- En los módulos el estudiante se familiarizará y reforzara los conocimientos en los componentes académicos de las materias que se vienen dictando de manera virtual, así como los instructores tendrán este material de apoyo para la enseñanza de los diferentes equipos dentro del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- En la comparación de los modelos matemáticos con respecto a los datos de las prácticas realizadas de manera presencial, se tiene cierto rango de errores que pueden deberse a varios factores, el principal es debido a que las máquinas del Laboratorio han sido utilizadas durante varios años perdiendo parte de sus características eléctricas, y los elementos de medición han perdido precisión por el paso de tiempo.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se sugiere utilizar máquinas en correcto estado para que los parámetros obtenidos mediante pruebas sean los adecuados al momento de utilizarlos en cada modelo matemático.
- Al momento de diseñar las pantallas de usuario el nombre de la hoja de trabajo tiene que ser diferente al del archivo, debido a que Matlab arroja un error al tener los mismos.
- Para anexar otro módulo en el programa se recomienda seguir la misma paleta de colores y diseño de pantallas, que los presentes en este trabajo de titulación para tener armonía con todas prácticas que se dictan con las máquinas utilizadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- Se recomienda tener la última versión de Matlab instalada para que los módulos funcionen de una manera adecuada.
- Los módulos desarrollados se pueden anexar a otros módulos de diferentes máquinas eléctricas para tener un solo programa interactivo de todas las máquinas que conforman el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Guru y R. Huseyin, «Máquinas Eléctricas y transformadores,» Mexico, OXFORD University Press, 2010, pp. 138-395.
- [2] C.-M. Ong, «DYNAMIC SIMULATION OF ELECTRIC MACHINERY USING MATLAB/SIMULINK,» New Jersey 07458, Prentice Hall PTR, 1998, pp. 85-243.
- [3] S. Chapman, «ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS,» Australia, Higher Education, 2005, pp. 65-533.
- [4] MathWorks, «MathWorks,» The MathWorks, Inc, 1994-2021. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [5] Escuela Politecnica Nacional , «LABORATORIO DE FÍSICA GENERAL I,» Quito, EPN, 2021, pp. 1-10.
- [6] J. Pérez y G. Vizzotti, «Diseño y simulación de dos transformadores de distribución de 250 kVA: uno con núcleo de hierro silicio y otro con núcleo de vidrio metálico,» Plata, Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartilgual 4.0 International, 215, pp. 44-60.
- [7] M. Orduñez, «Simulación dinámica de Máquinas de corriente directa,» Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2010, pp. 43-80.
- [8] A. Fitzgerald, C. Kingseley y S. Umas, «Electric Machinery,» de *Máquinas Eléctricas Sexta Edición* , Mexico, Ingeniería Eléctrica Instituto Eléctrica .
- [9] J. Fraile Mora, «Máquinas eléctricas,» Madrid, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S A.U, 2003.
- [10] I. Kosow, «Máquinas eléctricas y transformadores,» Mexico, Prentice-Hall Inc, 1993.
- [11] S. Zeas, «Pruebas en máquinas de corriente continua, análisis y comparación con diferentes normas,» Quito, Escuela Politecnica Nacional, 2003.
- [12] J. Castañeda, «Estudio de las maquinas electricas,» Universidad autonoma de Leon, 1998.

- [13] F. Vargas y S. Machuca, «Maquinas electricas rotativas,» Peru, CONCYTEC, 1995.
- [14] M. Izquierdo, «Programa didactico de simulacion de transformadores,» Quito, Escuela Politecnica Nacional , 1998.
- [15] M. Rodríguez, de *Máquinas Eléctricas*, España, Universidad de Catabria, 2015.

ANEXOS

ANEXO A. Manual de programación

ANEXO B. Folleto

ANEXO C. Banco de preguntas

ANEXO D. Manual de usuario

ANEXO E. Módulos