



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA:
INGENIERIA ELÉCTRICA**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELÉCTRICO
MENCIÓN SISTEMAS DE POTENCIA**

**TEMA:
“MODELO MATEMÁTICO MOTOR DC CONEXIÓN
INDEPENDIENTE”**

AUTORES:

**FRANCISCO JAVIER MEZA WEBER
PAOLO DOMINGO RAMOS MORALES**

**DIRECTOR DE TESIS:
ING. DAVID CÁRDENAS VILLACRÉS**

ABRIL 2015

GUAYAQUIL – ECUADOR

CERTIFICACIÓN

Por medio del presente proyecto certifico, que el presente trabajo fue desarrollado y elaborado por el Sr. FRANCISCO JAVIER MEZA WEBER y el Sr. PAOLO DOMINGO RAMOS MORALES, bajo mi supervisión.

Ing. David Cárdenas Villacrés

RESPONSABILIDAD DE LOS HECHOS

“La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesis corresponden exclusivamente a los Autores”.

FRANCISCO JAVIER MEZA WEBER

C.I. 0930856992

PAOLO DOMINGO RAMOS MORALES

C.I. 0918824202

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, mis padres y maestros por el tiempo y paciencia que dedicaron a mi formación personal y académica. A todas aquellas personas que nos dieron la mano desinteresadamente para poder culminar este trabajo.

Paolo Ramos Morales.

Agradeciéndole a DIOS por la Fuerza que me ha dado para seguir siempre adelante, a mis Padres, Hermanos, Esposa y demás familiares por el sacrificio que han realizado para cumplir esta meta que fue el objetivo número uno que nos propusimos a lo largo de este camino.

Francisco Meza Weber.

ÍNDICE

Índice.....	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Ecuaciones.....	xi
Resumen.....	xiv
Abstract.....	xv
Introducción.....	xvi
Planteamiento del Problema.....	xvii
Justificación.....	xvii
Objetivo General y Específico.....	xviii
Metodología.....	xviii
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	19
1.1. Máquina Continua.....	19
1.1.1 Par Inducido en la Espira Rotatoria.....	20
1.1.2 Introducción a los Motores DC.....	21
1.1.3 Circuito Equivalente del Motor DC.....	26
1.2. Leyes Fundamentales.....	27
1.2.1. Ley de Faraday.....	27
1.2.2. Ley de Lenz.....	28
1.2.3. Ley de Mallas de Kirchhoff.....	29
1.2.4. Ley de Biot-Savart Magnitud y Dirección de la Fuerza.....	30
1.2.5. Par Electromagnético.....	31
1.3. Introducción a la Dinámica.....	32
1.4. Principio General de Funcionamiento.....	33
1.5. Constitución de Máquinas de Corriente Continua	35
1.5.1. Circuito Magnético.....	35
1.5.2. Circuito Eléctrico.....	36
1.5.2.1. El Circuito Inductor.....	36
1.5.2.2. El Circuito Inducido.....	37
1.5.3. Funcionamiento del Colector.....	37
1.6. Problemas de Conmutación en Máquinas Reales.....	38

1.6.1. Efecto de la Reacción de Armadura sobre la Regulación de Velocidad en todos los Motores DC.....	39
1.6.2. Voltaje $L \cdot di/dt$	40
1.7. Solución de los Problemas de Conmutación.....	42
1.7.1. Desplazamiento de Las Escobillas.....	42
1.7.2. Polos de Conmutación o Interpolo.....	43
1.7.3. Devanados de Compensación.....	44
1.8. Flujo de Potencia y Pérdidas en Máquinas DC.....	45
1.8.1. Pérdidas en Máquinas DC.....	46
1.8.2. Pérdidas Eléctricas o Pérdidas en el cobre.....	46
1.8.3. Pérdidas en las Escobillas.....	47
1.8.4. Pérdidas en el Núcleo.....	47
1.8.5. Pérdidas Mecánicas.....	48
1.8.6. Pérdidas Dispersas.....	48
1.9. Diagrama de Flujo de Potencia.....	48
CAPÍTULO II: MODELO MATEMÁTICO.....	50
2.1 Motor DC Conexión Independiente	50
2.2 Modelo Matemático.....	51
2.3 Solución Matemática de las Ecuaciones de Estado Estable de Corriente de Armadura y Velocidad Angular del Motor DC Conexión Independiente.....	53
2.4 Obtención de Datos Experimentales de Simulación de Funcionamiento de Motor DC Conexión Independiente Marca Hampden Modelo Dm-300.....	62
2.5 Datos de Placa del Motor DC Conexión Independiente Marca Hampden Modelo Dm-300 del cual se está realizando el Modelo Matemático.....	67
2.6 Cálculos Matemáticos de Motor DC Conexión Independiente Marca Hampden Modelo Dm-300 varios ejemplos.....	69
2.6.1 Cálculo Matemático motor DC a vacío, sin carga ($Tl = 0$ N.M) conectada en el Eje del Motor DC	69
2.6.2 Cálculo Matemático motor DC con carga mecánica ($Tl=4$ N.M) conectada en el Eje del Motor DC	71
2.6.3 Cálculo Matemático Motor DC con carga mecánica ($Tl=5.9$ N.M) conectada en el Eje del Motor DC	74
2.6.4 Cálculo Matemático de Motor DC con sobrecarga ($Tl=15$ N.M) conectada en el Eje del Motor por encima del rango de su valor nominal.....	77

CAPÍTULO III: SIMULACIONES DE MODELO MOTOR DC EN	
PROGRAMA DE CÁLCULO MATLAB.....	81
3.1 Introducción al Programa Matlab	81
3.2 Introducción de la Herramientas Guide y Simulink	81
3.3 Presentación solo de pantallas en Simulink y pantalla final en Guide.....	82
3.4 Ecuaciones Eléctrica, Mecánica y Torque Inducido programados a Simulink...	83
3.4.1 Ecuación Eléctrica Programada a Simulink	83
3.4.2 Ecuación Mecánica Programada a Simulink.....	86
3.4.3 Ecuación Torque Inducido programado a Simulink	88
3.5 Obtención de Datos Teóricos de Simulación de Funcionamiento de Motor DC Conexión Independiente sin carga, con carga y sobrecarga.....	89
3.5.1 Simulación Motor DC a Vacío, sin carga ($Tl = 0$ N.M) conectada en el Eje del Motor DC.....	89
3.5.2 Simulación Motor DC con carga ($Tl = 4$.M) conectada en el Eje del Motor DC	93
3.5.3 Simulación Motor DC con carga ($Tl = 5.9$ N.M) conectada en el Eje del Motor DC	96
3.5.4 Simulación Motor DC con sobrecarga ($Tl = 15$ N.M) conectada en el Eje del Motor DC.....	99
3.6 Galería de Fotos de los Motores DC existente en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil para las pruebas experimentales.....	107
3.7 Gráficas de Comportamiento del Motor DC Marca Hampden Modelo Dm-300, con valores obtenidos en las Simulaciones.....	119
3.8 Gráficas de Comportamiento del Motor DC Marca Hampden Modelo Dm-300, con valores obtenidos en el Laboratorio de Generadores y Motores..	122
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	125
4.1 Conclusiones	125
4.2 Recomendaciones	126
Bibliografía.....	127
ÍNDICE DE FIGURAS	
Figura 1 Lazo Sencillo Rotacional entre Caras Polares.....	20
Figura 2 Equivalente Eléctrico Motor DC Conexión Independiente.....	22
Figura 3 Equivalente Eléctrico Motor DC Shunt o Motor de Excitación en Paralelo	23
Figura 4 Circuito Equivalente Motor Imán Permanente.....	23

Figura 5 Circuito Equivalente Motor Compuesta Corta.....	24
Figura 6 Circuito Equivalente Motor Compuesta Larga.....	25
Figura 7 Motor DC Conexión Serie.....	25
Figura 8 Circuito Equivalente del Motor DC.....	26
Figura 9 Ejemplo de Ley de Lenz.....	28
Figura 10 Regla de Fleming para encontrar dirección de la FEM Inducida.....	28
Figura 11 Fuerza sobre un conductor que conduce Corriente en un Campo Magnético.....	31
Figura 12 Principio de Funcionamiento de una Máquina de Corriente Continua.....	34
Figura 13 Parte Fija del Circuito Magnético.....	36
Figura 14 Circuito Inductor Motor Hampden Modelo DM-300.....	37
Figura 15 Parte Móvil del Circuito Eléctrico Rotor Motor DC, Marca Hampden Modelo DM-300.....	37
Figura 16 Funcionamiento de un Colector Elemental.....	38
Figura 17 Desarrollo de la Reacción del Inducido a un Generador.....	40
Figura 18 Inversión del Flujo de Corriente en una Bobina bajo Conmutación.....	41
Figura 19 Polos de Conmutación o Interpolos.....	44
Figura 20 Devanado de Compensación.....	45
Figura 21 Diagrama de Flujo de Potencia para una Máquina DC-Generador.....	49
Figura 22 Diagrama de Flujo de Potencia para una Máquina DC-Motor.....	50
Figura 23 Circuito Equivalente de Motor DC Conexión Independiente.....	50
Figura 24 Vista de Dato Voltaje.....	63
Figura 25 Vista de Dato Corriente.....	63
Figura 26 Medición del Diámetro del Rotor.....	65
Figura 27 Medición del Peso del Rotor.....	66
Figura 28 Placa de Motor DC Marca Hampden Modelo DM-300.....	67
Figura 29 Motor DC, Marca Hampden.....	68
Figura 30 Captura del Programa Matlab Herramienta Simulink.....	82
Figura 31 Captura del Programa Matlab Herramienta Guide.....	83
Figura 32 Diagrama de Bloques de Ecuación Eléctrica Corriente de Armadura programado a Simulink.....	84
Figura 33 Diagrama de Bloques de Ecuación Mecánica Velocidad Angular programado a Simulink.....	87

Figura 34 Diagrama de Bloques de Ecuación Torque Inducido programado a Simulink	88
Figura 35 Captura de Ingreso de Datos en Guide para realizar Simulación Motor DC sin Carga $Tl=0$ N.m.....	90
Figura 36 Captura de Programa Matlab con Herramienta Simulink Motor DC sin Carga $Tl=0$ N.m.....	90
Figura 37 Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC sin Carga.....	91
Figura 38 Captura Gráfica en Guide de Torque Inducido Motor DC sin Carga.....	91
Figura 39 Captura Gráfica en Guide de Corriente De Armadura sin Carga.....	92
Figura 40 Captura de Datos de salida en Guide.....	92
Figura 41 Captura de Ingreso de Datos en Guide para realizar Simulación Motor DC con Carga $Tl=4$ N.m.....	93
Figura 42 Captura de Programa MatLab con Herramienta Simulink Motor DC con Carga $Tl=4$ N.m.....	94
Figura 43 Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC con Carga $Tl=4$ N.m.....	94
Figura 44 Captura Gráfica en Guide de Torque Inducido con Carga $Tl=4$ N.m.....	95
Figura 45 Captura Gráfica en Guide de Corriente de Armadura con Carga $Tl=4$ N.m.	95
Figura 46 Captura de Datos de Salida en Guide.....	96
Figura 47 Captura de Ingreso de Datos en Guide para realizar Simulación Motor DC con Carga $Tl= 5.9$ N.m.....	96
Figura 48 Captura de Programa Matlab con Herramienta Simulink Motor DC con Carga $Tl= 5.9$ N.m.....	97
Figura 49 Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC con carga $Tl=5.9$ N.m.....	98
Figura 50 Captura Gráfica en Guide de Torque Inducido con Carga $Tl=5.9$ N.m.....	98
Figura 51 Captura Gráfica en Guide de Corriente de Armadura con Carga $Tl=5.9$ N.m.....	99
Figura 52 Captura de Datos de Salida en Guide.....	99
Figura 53 Captura de Ingreso de Datos en Guide para realizar Simulación Motor DC con Carga $Tl= 15$ N.m.....	100

Figura 54 Captura de Programa Matlab con Herramienta Simulink Motor DC con Carga $Tl= 15$ N.m.....	100
Figura 55 Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC con Carga $Tl=15$ N.m.....	101
Figura 56 Captura Gráfica en Guide de Torque Inducido con Carga $Tl=15$ N.m....	101
Figura 57 Captura Gráfica en Guide de Corriente de Armadura con Carga $Tl=15$ N.m	102
Figura 58 Captura de Datos de Salida en Guide.....	102
Figura 59 Medición de Voltaje de Armadura de Motor DC, Marca Hampden DM-300	107
Figura 60 Medición RPM en el Eje del Motor DC Marca Hampden DM-300.....	107
Figura 61 Medición Directa de Corriente y Voltaje DC en los terminales del Banco de Prueba hacia el Devanado de Armadura con Interpolo.....	108
Figura 62 Medición de Voltaje DC de Generador hacia las Resistencias Eléctricas utilizadas como Carga.....	108
Figura 63 Vista del Indicador Mecánico de Torque.....	109
Figura 64 Vista General de Medición de Parámetros en Motor DC Marca Hampden DM-300 con Carga.....	109
Figura 65 Vista General de Motor DC, Generador DC, y Resistencias Eléctricas utilizados como Carga.....	110
Figura 66 Gráfica de % de error de Corriente de Armadura vs Torque de Carga....	116
Figura 67 Gráfica de % de error de Torque Inducido vs Torque De Carga.....	117
Figura 68 Gráfica de % de error de Velocidad Angular vs Torque de Carga.....	118
Figura 69 Curva de Corriente de Armadura versus Torque Inducido (datos simulados)	119
Figura 70 Curva de Velocidad Angular versus Corriente de Armadura (datos simulados)	120
Figura 71 Curva de Velocidad Angular versus Torque Inducido (datos simulados)	121
Figura 72 Curva de Corriente de Armadura versus Torque Inducido (datos experimentales).....	122
Figura 73 Curva de Velocidad Angular versus Corriente de Armadura (datos experimentales).....	123
Figura 74 Curva de Velocidad Angular versus Torque Inducido.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos Experimentales requeridos para la Simulación en Matlab.....	66
Tabla 2: Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales.....	71
Tabla 3: Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales.....	74
Tabla 4: Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales.....	77
Tabla 5: Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales.....	80
Tabla 6: Datos de Simulación en Matlab del Motor DC Conexión Independiente..	104
Tabla 7: Datos Experimentales de Motor DC Conexión Independiente.....	111
Tabla 8: % de Error entre las variables obtenidas en Simulink y las variables obtenidas experimentalmente.....	114

ÍNDICE DE LAS ECUACIONES

Ecuación 1; Fuerza Inducida.....	20
Ecuación 2: Par.....	21
Ecuación 3: Ley de Faraday 1-1.....	27
Ecuación 4: Ley de Faraday 1-2.....	27
Ecuación 5: Ley Kirchhoff Ecuación.....	29
Ecuación 6: Ley de Kirchhoff 2.....	29
Ecuación 7: Ley de Kirchhoff 3.....	30
Ecuación 8: Ley de Biot-Savart.....	30
Ecuación 9: Ley de Biot-Savart2.....	31
Ecuación 10: Par Electromagnético.....	31
Ecuación 11: Par Electromagnético 2.....	32
Ecuación 12: Onda de F.m.m.....	32
Ecuación 13: Velocidad de la Corriente con respecto al Tiempo.....	41
Ecuación 14: Eficiencia de una Máquina.....	45
Ecuación 15: Eficiencia de una Máquina 2.....	45
Ecuación 16: Pérdida en el Inducido.....	46
Ecuación 17: Pérdidas en el Campo.....	46
Ecuación 18: Pérdidas en las Escobillas.....	47
Ecuación 19: Pérdidas Dispersas.....	48
Ecuación 20: Potencia Mecánica.....	49
Ecuación 21: Potencia Eléctrica Resultante.....	49
Ecuación 22: Voltaje aplicado al Circuito de la Excitación.....	51
Ecuación 23: Voltaje de la Armadura.....	51

Ecuación 24: Ecuación Eléctrica del Motor DC Conexión Independiente en Estado Estable.....	51
Ecuación 25: Ecuación Eléctrica del Motor DC. Conexión Independiente en Estado Estable 2.....	51
Ecuación 26: Torque (a)	52
Ecuación 27: Torque (b)	52
Ecuación 28: Torque (c)	52
Ecuación 29: Torque (d).....	52
Ecuación 30: Ecuación Mecánica del Motor DC Conexión Independiente en Estado Estable.....	52
Ecuación 31: Potencia de la Armadura.....	53
Ecuación 32: Potencia de Eje.....	53
Ecuación 34: Igualdad de Unidades.....	54
Ecuación 35: Voltaje al Circuito de Excitación.....	54
Ecuación 36: Corriente de Armadura.....	54
Ecuación 37: Corriente de Armadura (a).....	54
Ecuación 38: Variación de Velocidad Angular.....	54
Ecuación 45: Varia Lambda.....	55
Ecuación 46: Varia Beta.....	55
Ecuación 60: Resolución de la Ecuación General de Velocidad Angular en Estado Estable.....	58
Ecuación 62: Corriente de Armadura Estado Estable.....	59
Ecuación 63: Torque Inducido.....	59
Ecuación 64: Torque Inducido en Estado Estable.....	59
Ecuación 65: Torque aplicando Carga Mecánica al Eje.....	59
Ecuación 81: Variación de Velocidad Angular con Carga expresada en función de S	62
Ecuación 82: Ecuación de Velocidad Angular con Carga expresada en función de S	62
Ecuación 83: Ley de Ohm.....	63
Ecuación 84: Constante de Fuerza Contra-Electromotriz.....	64
Ecuación 86: Coeficiente de Rozamiento Viscoso.....	64
Ecuación 87: Momento de Inercia del Rotor.....	65
Ecuación 88: Par de Frenado.....	68

Ecuación 89: Velocidad Angular sin Carga en función del Tiempo.....	70
Ecuación 90: Corriente de Armadura sin Carga en función del Tiempo.....	70
Ecuación 91: Torque Inducido sin Carga en función del Tiempo.....	70
Ecuación 92: Velocidad Angular considerado con Carga $Tl=4$ N.m en función del Tiempo.....	73
Ecuación 93: Corriente de Armadura considerado con Carga $Tl=4$ N.m en función del Tiempo.....	73
Ecuación 94: Torque Inducido considerado con Carga $Tl=4$ N.m en función del Tiempo.....	74
Ecuación 95: Velocidad Angular considerado con Carga $Tl=5.9$ N.m en función del Tiempo.....	76
Ecuación 96: Corriente de Armadura considerado con Carga $Tl=5.9$ N.m en función del Tiempo.....	76
Ecuación 97: Torque Inducido considerado con Carga $Tl=5.9$ N.m en función del Tiempo.....	77
Ecuación 98: Velocidad Angular considerado con Carga $Tl=15$ N.m en función del Tiempo.....	79
Ecuación 99: Corriente de Armadura considerado con Carga $Tl=15$ N.m en función del Tiempo.....	79
Ecuación 100: Torque Inducido considerado con Carga $Tl=15$ N.m en función del Tiempo.....	80
Ecuación 102: Ecuación Eléctrica Corriente de Armadura para programar a Simulink.....	84
Ecuación 105: Ecuación Mecánica Velocidad Angular para programar a Simulink.....	86

RESUMEN

Esta Tesis se realizó con el apoyo de la materia de Maquinarias Eléctricas I, Análisis Numérico y curso Programación de Matlab, dirigida a los estudiantes de las Carreras Técnicas que cursen los primeros Niveles Académicos.

Se desarrollaron las Simulaciones en el Programa Matlab con la Herramienta Simulink junto con Guide (modo gráfico), previo a las fórmulas del Circuito Eléctrico y Circuito Dinámico obtenidos del Motor de Corriente Continua Conexión Independiente, además de la resolución de sus fórmulas mediante métodos numéricos, dichas simulaciones son entregadas al Laboratorio de Motores y Generadores servirá como guía para que se desarrollen los conocimientos adquiridos dentro de las aulas, experimentando de manera práctica y programada, conceptos y principios de funcionamiento de Motores de Corriente Continua Conexión Independiente.

Se realizaron distintas prácticas con sus respectivas simulaciones en el programa Matlab, funcionando el Motor de Corriente Continua sin Carga y con Carga a diferentes valores, observando las gráficas en función del tiempo del comportamiento de las Revoluciones por Minuto, Corriente de Armadura y Torque Inducido. Las prácticas y programación se ejecutaron dentro de un tiempo dispuesto para la elaboración de la Tesis.

ABSTRACT

This thesis was carried out with the support of electrical machinery I, subject numerical analysis and Matlab programming, course aimed at students of technical careers, which are the first academic levels.

Simulations were developed in the Matlab program with the tools Simulink and Guide (graphic mode) prior to electric circuit formulas and numerical dynamic circuit obtained from Motor continuous current connection independent as well as the resolution of their formulas using numerical methods. Those simulations were delivered to the laboratory of Motors and generators which will serve as a guide to develop the knowledge acquired in the classroom, experiencing in a practical and programmed way, concepts and principles of DC Motors operation.

In addition, different experimental practices were carried out with their respective simulations in Matlab program running the DC Motor with and without electrical charge with different values, watching graphs according to the time of the behavior of the revolutions per minute, armature current and induced torque.

INTRODUCCIÓN

En este presente documento se expone todo lo que respecta al desarrollo de la ejecución del tema de Tesis.

La base central del trabajo de tesis es de exponer el Modelo Matemático, utilizando el software MATLAB, con sus herramientas de SIMULINK y GUIDE (modo gráfico).

Se resolvieron ecuaciones involucradas con métodos numéricos, además se requiere el conocimiento físico del sistema, sus unidades de las constantes que aparecen en el modelo, obtención de las variables requeridas y con la programación adecuada del programa Matlab generando los resultados.

Para corroborar estos resultados, también se tomaron datos experimentales, utilizando el Motor DC Marca “HAMPDEN” Modelo DM-300, que se encuentra en el Laboratorio de Motores y Generadores de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil.

Los Motores de Corriente Continua son muy utilizados en nuestro medio en diferentes aplicaciones y para este caso el tipo de Motor DC a utilizar es de Conexión Independiente, donde este tipo de conexión está conformado por dos fuentes de voltajes DC Independientes, donde una alimentará al devanado de campo o inductor y la otra fuente alimentará al devanado del rotor o inducido. Este tipo de Motor nos ofrece un amplio rango de velocidad y pueden proporcionar un alto par Motor con control sencillo y económico. Dicho control de velocidad se lo puede realizar controlando la corriente de campo o controlar la corriente del rotor, para este caso se realizará el control en el devanado del rotor.

Finalmente se exponen tablas con todos los datos obtenidos, tantos teóricos y experimentales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las Máquinas Eléctricas son utilizadas en muchas aplicaciones, ya que, su control es relativamente sencillo y como resultado es prioritario conocer su funcionamiento bajo ciertas condiciones de operación en estado estable y con carga variable. Es por eso que, en nuestro medio laboral hay personas que no tienen ideas claras del funcionamiento de los Motores DC, cómo identificarlos, ni muchos menos cómo diagnosticar, prevenir problemas y que acción realizar, por lo tanto, es un problema no tener conocimientos de esta rama de las Máquinas Eléctricas, en donde estamos expuestos en un medio competitivo.

Para observar su funcionamiento y comportamiento más preciso, en la actualidad existen herramientas computacionales sin la obligación de tener el Motor DC partiendo de las Ecuaciones Matemáticas del mismo ya que este sería una aproximación a lo real

JUSTIFICACIÓN

De acuerdo al problema planteado se realizará el estudio del Motor DC Marca Hampden Modelo DM-300, involucrando sus ecuaciones Eléctrica y Mecánica obtendremos su circuito equivalente, además de su teoría de funcionamiento se observará su comportamiento en estado estable y a diferentes rango de carga, además de realizar con dichas ecuaciones mencionadas la programación en MATLAB con sus herramientas como Simulink, y Guide para visualizar sus gráficas correspondientes.

El programa MATLAB es muy importante para nuestra enseñanza y formación profesional, ya que, esta herramienta es muy versátil y útil para muchas aplicaciones en nuestro entorno laboral, junto con los conocimientos adquiridos en el entorno académico se obtendrá un resultado positivo de entendimiento del Motor DC en general y sus aplicaciones.

OBJETIVO GENERAL

Analizar y comprender el comportamiento dinámico del Motor DC Marca Hampden Modelo DM-300 mediante la simulación con el programa Matlab.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la Teoría del Motor DC.
- Conseguir las Ecuaciones Matemáticas del Motor DC estudiado.
- Adquirir los parámetros del Motor DC Marca Hampden Modelo DM-300.
- Simular en computadora el comportamiento del Motor DC, estudiado mediante Matlab con la herramienta Simulink y comparar con los valores reales en prácticas realizadas en el Laboratorio de Motores y Generadores.

METODOLOGÍA

En el CAPITULO 2., se ejecuta el Desarrollo Matemático de las Ecuaciones Eléctrica y Mecánica del Motor DC Marca HAMDEN Modelo DM300.

Obtención experimental de los parámetros requeridos para realizar sistema de ecuaciones planteadas además de cálculos matemáticos de comportamiento del Motor DC estudiado en estado estable (sin carga y con carga aplicada)

En el CAPITULO 3., se realizan pruebas y mediciones experimentales del Motor DC estudiado en diferentes escenarios además de la programación de las Ecuaciones Eléctrica y Mecánica en MATLAB con la herramienta SIMULINK, por consiguiente las simulaciones correspondientes.

Luego se exponen las tablas correspondientes experimental y simulada del Motor DC estudiado, comparando sus variables adquiridas.

Finalmente en el CAPITULO 4., se expone las conclusiones y recomendaciones de esta tesis desarrollada.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. MÁQUINA CONTINUA

(Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 483) Las Máquinas DC son Generadores que convierten Energía Mecánica en Energía Eléctrica DC y Motores que convierten Energía Eléctrica DC en Energía Mecánica. La mayoría de las Máquinas DC son semejantes a las Máquinas AC, porque tienen voltajes y corrientes AC dentro de ellas; las Máquinas DC tienen una salida DC solo porque existe un mecanismo que convierte los voltajes AC internos en voltajes DC en sus terminales. Puesto que este mecanismo se denomina conmutador, la Maquinaria DC se conoce también como máquina de colector o conmutada.

Los principios fundamentales involucrados en la operación de las Máquinas DC son muy simples. Por desgracia, con frecuencia son ensombrecidos por la complejidad de la construcción de las máquinas reales.

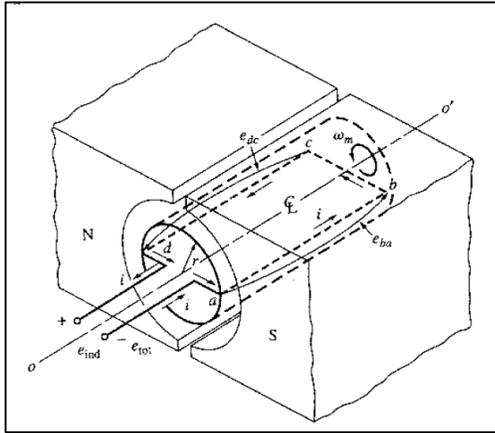
Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, se ha extraído conceptos sobre la Máquina DC: donde se indica que la máquina lineal, sirvió como introducción al comportamiento de la máquina. Su respuesta a la carga y al cambio de los campos magnéticos, reseña aproximadamente el comportamiento de los Generadores y los Motores reales. Sin embargo, los Generadores y los Motores reales no se mueven en línea recta, sino que rota. El siguiente paso para entender las máquinas reales es estudiar los ejemplos más sencillos posibles de una Máquina Rotatoria.

La Máquina Rotatoria de más sencilla posible, consiste en una sola espira de alambre que rota alrededor de un eje fijo. La parte rotante de la Máquina se llama el rotor; la parte estacionaria se denomina estator. El Campo Magnético de la Máquina es suministrado por los polos norte y sur magnético mostrados sobre el estator.

Nótese en la Figura 1, que la espira del rotor yace en una ranura labrada en un núcleo ferromagnético. El hierro del rotor, junto con la forma curva de las caras polares, provee la anchura de entrehierro constante entre el rotor y el estator. La reluctancia del aire es mucho mayor que la reluctancia del hierro en la máquina. Para minimizar

la reluctancia del camino del flujo a través de la máquina, el flujo magnético debe tomar el camino más corto posible a través del aire entre la cara polar y la superficie del rotor.

Figura 1: Lazo Sencillo Rotacional entre Caras Polares



Fuente: Stephen Chapman S. J., Máquinas Eléctricas

1.1.1 PAR INDUCIDO EN LA ESPIRA ROTATORIA

Se conecta una batería a la máquina. ¿Cuánto se producirá en la espira cuando se cierra el interruptor y se permite el flujo de corriente dentro de ella? Para determinar el par, obsérvese en detalle la espira mostrada en la figura 1.

El método que debe emplearse para determinar el par sobre la espira, consiste en tener por separado cada segmento de esta y luego sumar los efectos de los segmentos individuales. La fuerza inducida sobre un segmento de la espira está dada por la Ecuación #1.

Ecuación #1: Fuerza inducida

$$F = i * (l \times B)$$

Fuente: Chapman S. J.

Siendo:

F : Fuerza inducida (Newton).

i : Corriente que atraviesa la espira (Amp).

l : Longitud de la espira (Metros).

B : Campo Magnético que atraviesa la espira (Tesla).

El par sobre el segmento está dado por la Ecuación #2:

Ecuación #2: Par

$$\tau = r * F * \text{sen } \theta N$$

Fuente: Chapman S. J.

Siendo:

r: Radio tomado desde el eje de rotación hasta el borde de la espira (Metros).

F: Fuerza inducida.

Donde **θ** es el ángulo entre **r** y **F**. El par es cero en todos los puntos en los que la espira está situada fuera de las caras polares.

1.1.2 INTRODUCCIÓN A LOS MOTORES DC

(Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 546) Los primeros Sistemas de Potencia en los Estados Unidos fueron sistemas DC pero, hacia los años 1890, los Sistemas DC fueron primando sobre los Sistemas AC, a pesar de este hecho, los Motores DC continuaron siendo una fracción importante de la maquinaria comprada cada año hasta los años de 1960. ¿Por qué fueron tan comunes los Motores DC si los sistemas de potencia DC en si fueron raros?

Hubo varias razones para la popularidad prolongada de los Motores DC, una fue que los sistemas de potencia DC son comunes aun en automóviles, camiones y aviones. Los Motores DC también se aplican cuando se requerían amplias variaciones de velocidad.

Los Motores DC son accionados por una Fuente de Potencia DC, a menos que se especifique otra cosa, se supone que el voltaje de entrada es constante, puesto que, esta suposición simplifica el análisis de los Motores y la comparación entre los diferentes tipos de ellos.

Hay seis clases principales de Motores DC de uso general:

- a) Motor DC Conexión Independiente.
- b) Motor DC Conexión Paralelo o Shunt.
- c) Motor DC Conexión Imán Permanente.
- d) Motor DC Conexión Compuesta Corta.

e) Motor DC Conexión Compuesta Larga.

f) Motor DC Conexión Serie.

a) Motor DC Conexión Independiente.

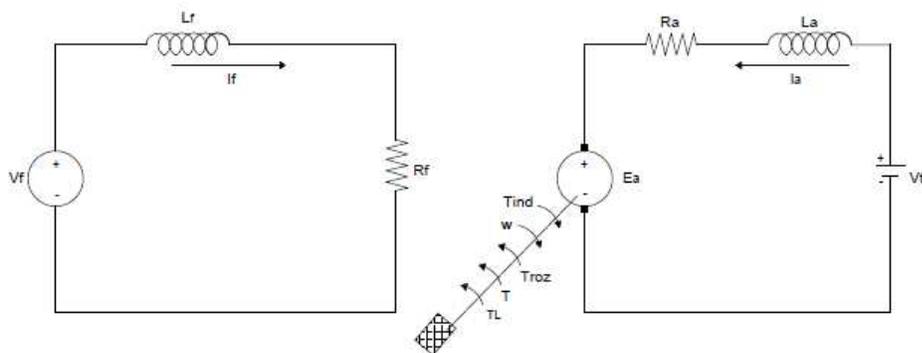
Por medio de la alimentación DC del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes, como se detalla en la figura 2.

El campo del estator es constante al no depender de la carga del motor, y el par de fuerza prácticamente es constante.

Las variaciones de velocidad al aumentar la carga se deberán solo a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor.

Se aplica donde se requiera una velocidad prácticamente constante como grúas marinas ventilador de hornos, tornos, taladros de materiales, desenrollado de bobinas y proceso de útiles.

Figura 2: Equivalente Eléctrico Motor DC Conexión Independiente



Fuente: Los autores

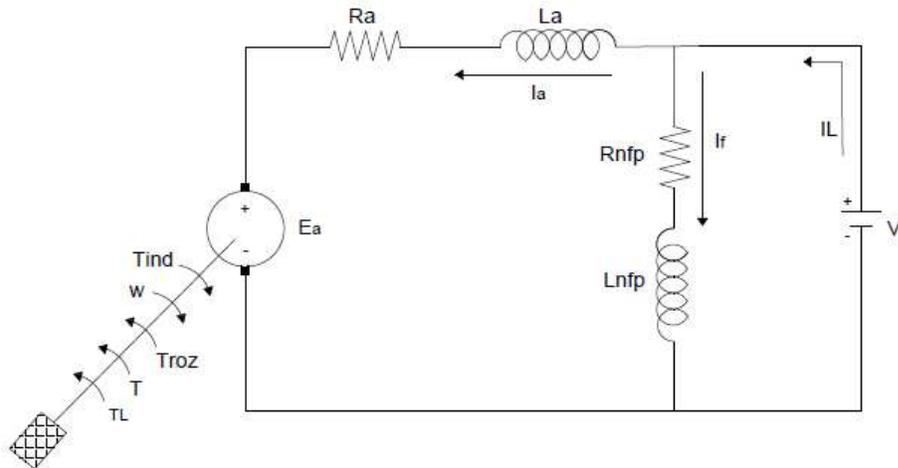
b) Motor DC Conexión Paralelo o Shunt.

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición). Es un Motor Eléctrico de Corriente Continua cuyo bobinado inductor principal está conectado en paralelo con el circuito formado por los bobinados inducidos e inductor auxiliar, obsérvese en detalle la figura 3.

Las bobinas principales están constituidas por muchas espiras y con hilo de poca sección, por lo que, la resistencia del bobinado inductor principal es muy grande.

Es utilizado en aplicaciones de velocidad constante, como en los accionamientos para los generadores de Corriente Continua en los grupos moto generadores de corriente continua.

Figura 3: Equivalente Eléctrico Motor DC Shunt o Motor De Excitación En Paralelo

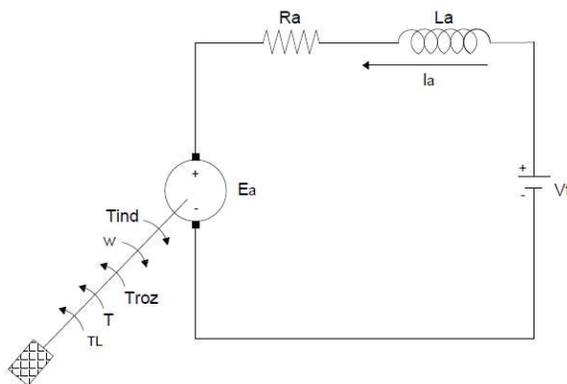


Fuente: Los autores

c) Motor DC Conexión Imán Permanente.

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 575). Un Motor DC de imán permanente es un Motor DC cuyos polos están hechos de imanes permanentes. En algunas aplicaciones, los Motores DC ofrecen muchos más beneficios que los Motores DC en derivación. Puesto que, estos Motores no requieren circuito de campo externo, no tienen las pérdidas en el cobre del circuito de campo asociados con los Motores DC en derivación. Debido a que no requieren devanado de campo, estos Motores pueden ser más pequeños que los correspondientes Motores DC en derivación. Los Motores DC de imán permanente son muy comunes en tamaños pequeños de caballaje fraccional y subfraccional, en los cuales no puede justificarse el costo y espacio de un circuito separado de campo. Obsérvese en detalle la figura 4.

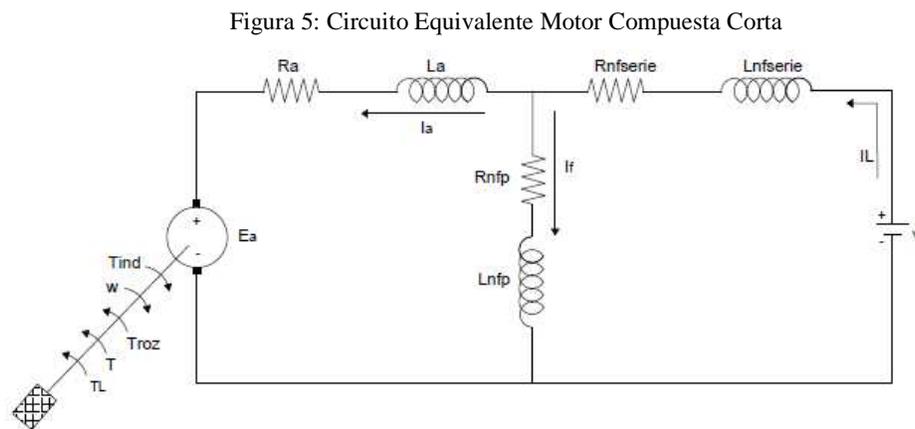
Figura 4: Circuito Equivalente Motor Imán Permanente



Fuente: Los autores

d) Motor DC Conexión Compuesta Corta.

(Jesús F. Mora, Máquinas Eléctricas, 5ta Edición, Mac Graw Hill, España 2003). Se caracteriza por tener un par elevado de arranque sin peligro de desestabilizarse, como el Motor serie, aunque puede llegar a altas velocidades. Son utilizados en grúas, malacates y los elevadores utilizan Motores compuestos acumulativos, ya que de esa manera pueden poner en marcha con suavidad una carga pesada sin tener un aumento excesivo de su velocidad al operar en vacío. A menudo el campo en serie se desconecta en forma automática del circuito, cuando el malacate está en su velocidad de operación. Este Motor tiene un campo en serie y un campo en derivación que son los devanados del estator y posee también el devanado móvil que es rotor. Obsérvese en detalle la figura 5.



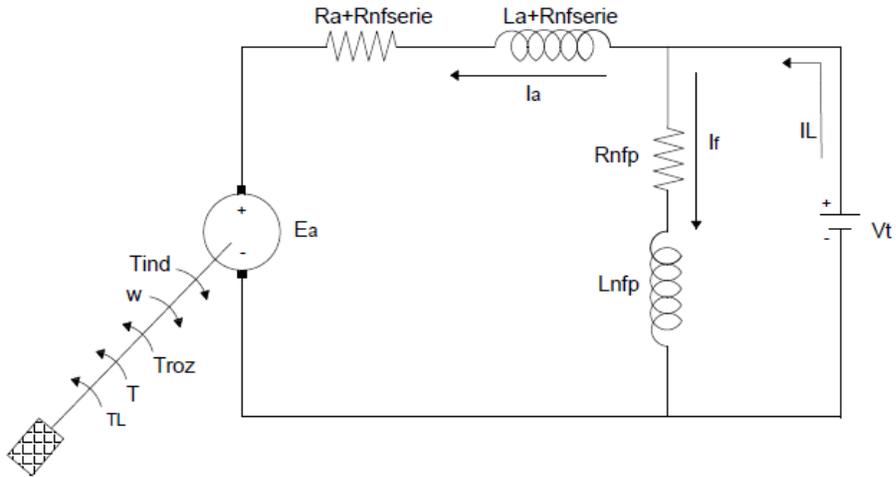
Fuente: Los autores

e) Motor DC Conexión Compuesta Larga.

(Jesús F. Mora, Máquinas Eléctricas, 5ta Edición, Mac Graw Hill, España 2003). Este Motor desarrolla un gran par, para ajustarse a un incremento en el par de la carga, igual que un Motor en serie. No obstante, el Motor compuesto acumulativo tiene una velocidad en vacío definida y controlable, de manera que no existe el problema del “escape”. Por ello, este tipo de Motor es en particular adecuado en los usos que requieran aplicaciones bruscas de cargas grandes. Algunos de esos usos son las Máquinas laminadoras o las grandes troqueladoras o cortadoras. Una ventaja en particular en la aplicación súbita de cargas grandes pero de corta duración consiste en que cuando el Motor disminuye su velocidad de rotación al recibir la carga, entrega parte de su energía cinética almacenada para mover la carga. Si la velocidad se

mantuviere más constante, tendrían que demandarse grandes corrientes pico de la línea de alimentación debido al transitorio resultante. Así mismo, posee dos devanados en el estator que son el campo paralelo y campo serie, además del devanado del rotor. Ver figura 6.

Figura 6: Circuito Equivalente Motor Compuesta Larga

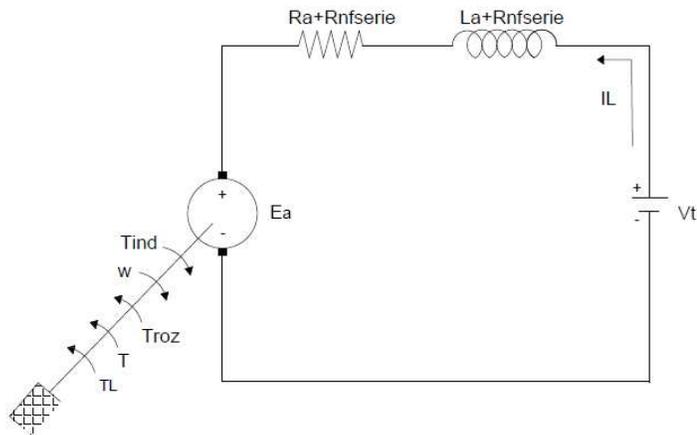


Fuente: Los autores

f) Motor DC Conexión Serie.

El Motor serie o Motor de Conexión en serie, está conformado por un devanado de la armadura y un de devanado de excitación o inducido, van conectados en serie. Por lo tanto, la corriente de excitación o del inductor es también la corriente del inducido absorbida por el Motor. La potencia es casi constante.

Figura 7: Motor DC Conexión Serie

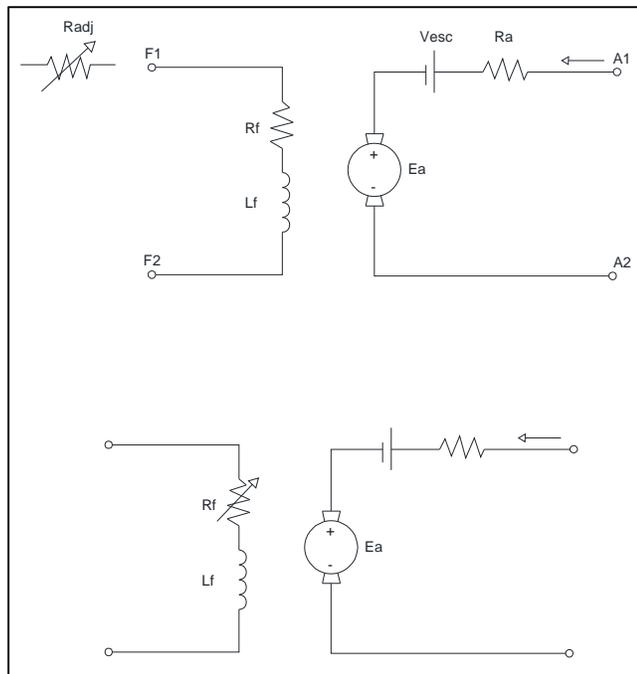


Fuente: Los autores

1.1.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DC

(Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 483). Se ha extraído algunos conceptos sobre la Máquina DC, en la figura 8 se muestra el circuito equivalente de un Motor DC. En esta figura, el circuito del inducido está representado por una fuente ideal de voltaje E_a y una resistencia R_a . Esta representación es el equivalente Thevenin de la estructura total del rotor, incluidas las bobinas del rotor, los interpolos y los devanados de compensación. La caída de voltaje en la escobilla está representada por una pequeña batería V_{esc} . Las bobinas de campo que produce el flujo magnético en el generador están representadas por la inductancia L_f y la resistencia R_f . La resistencia separada R_{adj} , representa una resistencia exterior variable, utilizada para controlar la cantidad de corriente en el circuito de campo.

Figura 8: Circuito Equivalente del Motor DC



Fuente: Los autores

1.2. LEYES FUNDAMENTALES

1.2.1 Ley de Faraday

(Michael Liwischitz-Garik, 1981, pág. 27). Establece la fórmula de esta Ley en la siguiente Ecuación #3:

Ecuación #3 Ley de Faraday 1-1

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} * 10^{-8} \text{ volt}$$

Fuente: Michael Liwischitz-Garik

Esto es, la Fem inducida en un circuito cerrado es igual a la razón de decremento del flujo Φ con respecto al tiempo entrelazada con el circuito y su unidad viene dada en voltios.

Cuando un conductor se mueve con relación al flujo, que es constante con el tiempo a una velocidad v , puede ser conveniente utilizar la Ley de Faraday en la forma expresada en la Ecuación #4.

Ecuación #4 Ley de Faraday 1-2

$$e = -B * l * v * 10^{-8} \text{ volt}$$

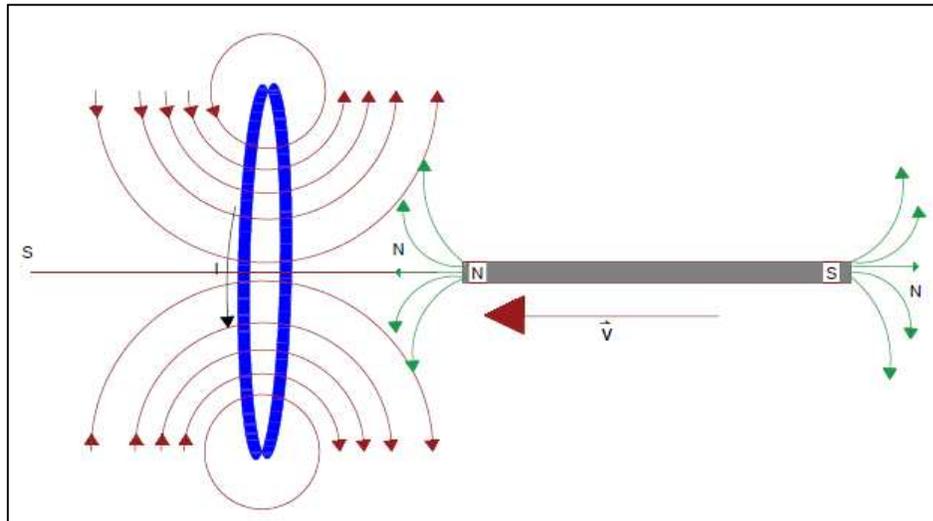
Fuente: Chapman S. J.

Puede interpretarse como sigue: La Fem inducida en el conductor es igual al flujo cortado por éste, por segundo.

En la Ecuación #4, B es la densidad de flujo en Gauss, l la longitud del conductor dentro del flujo en cm y v la velocidad relativa entre conductor y el flujo en cm/seg. Cuando B está expresada en líneas por pulgada cuadrada, l en pulgadas, y v en pies por minuto, debe multiplicarse el miembro del lado derecho de la Ecuación 4 por 1/5. (Michael Liwischitz-Garik, 1981, pág. 28)

1.2.2 LEY DE LENZ

Figura 9: Ejemplo de LEY DE LENZ

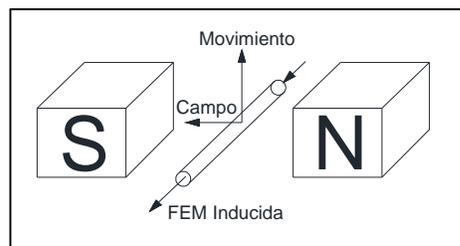


Fuente: Los autores

(Kosow, 1991, pág. 11). Hace notar que la Ley de Faraday de la inducción electromagnética no es sino uno de los efectos electromagnéticos que relaciona la fuerza mecánica que se aplica a un cuerpo con el campo electromagnético. Las direcciones de voltaje y la corriente inducida con el conductor representado en la Figura 1. Tienen una relación definida con el cambio de eslabonamiento de flujo que las induce. De la Ecuación #3.

El valor negativo de la Ecuación #3 indica que \mathcal{E} se opone a la variación del flujo quien la produce. Este signo corresponde a la Ley de Lenz.

Figura 10: Regla de Fleming para encontrar dirección de la FEM inducida



Fuente: Los autores

En todos los casos de inducción magnética, un voltaje inducido hará que fluya una corriente en un circuito cerrado en dirección, tal que, el efecto magnético se oponga al cambio que la produce. Ver figura 9.

El enunciado anterior de la Ley de Lenz implica una causa y un efecto que se opone a una causa. La causa implicada no es necesariamente el movimiento del conductor que resulta de una fuerza mecánica, sino un cambio en los eslabonamientos de flujo. El efecto implicado, es una corriente debido a un voltaje inducido, cuyo campo se opone a la causa. Así, en todos los casos de inducciones electromagnética, siempre que se tiene un cambio de flujo, se induce un voltaje que tiende a establecer una corriente en dirección, tal que, se produzca un campo quien se oponga al cambio en el flujo que enlaza las vueltas (bobinas) del circuito . Si se ve de ese modo, se hará patente un concepto de la Ley de Lenz, que satisface todos los casos de la FEM inducida, incluso el Transformador y el Motor de Inducción, así como la FEM inducida en los Motores y generadores DC.

1.2.3 LEY DE MALLAS DE KIRCHHOFF

Extrayendo datos de (Michael Liwischitz-Garik, 1981, pág. 36) se establece que, en cada malla de una red, la suma de todas las Fems aplicadas e inducidas tomadas en consideración con los signos adecuados es igual a la suma de todas las caídas de tensión resistiva. Ver Ecuación #5:

Ecuación #5 Ley Kirchhoff

$$\Sigma(V + E) = \Sigma(I * R)$$

Fuente: Michael Liwischitz-Garik

Aplicando la Ley de Kirchhoff a un circuito **R-L** con una **L** constante y la tensión aplicada **v**, la Ecuación #6 obtenida es:

Ecuación #6 Ley de Kirchhoff 2

$$v - L * \frac{di}{dt} = (i * R)$$

Fuente: Michael Liwischitz-Garik

Ecuación #7 Ley de Kirchhoff 3

$$v = i * R + L * \frac{di}{dt}$$

Fuente: Michael Liwischitz-Garik

Donde v e i son valores instantáneos de la tensión y corriente aplicadas, respectivamente, L el valor de la inductancia (Henrios) y di/dt la derivada de la corriente con respecto al tiempo, como esta expresado en la Ecuación #7.

Las ecuaciones #3 y #4 pueden interpretarse en la forma siguiente: en cualquier instante la tensión aplicada, debe vencer la caída de tensión resistiva y la Fem de autoinducción. Mientras que, esta interpretación es físicamente correcta, sería por completo errónea concluir de la Ecuación #4 es la misma naturaleza que la caída de tensión resistiva ($i*R$). No deberá olvidarse que L es el flujo entrelazado con una Fem inducida, pero nada más.

1.2.4 LEY DE BIOT-SAVART. MAGNITUD Y DIRECCIÓN DE LA FUERZA

(Michael Liwischitz-Garik, 1981, pág. 41). Indica que la Ley sobre las fuerzas sobre conductores en un campo magnético es cuando el conductor que conduce corriente está orientado propiamente en un campo magnético, se ejerce una fuerza sobre este. Si la dirección de las líneas de inducción hace un ángulo α con la dirección del conductor que conduce la corriente, ver figura 11, donde la fuerza esta expresada en la Ecuación #8:

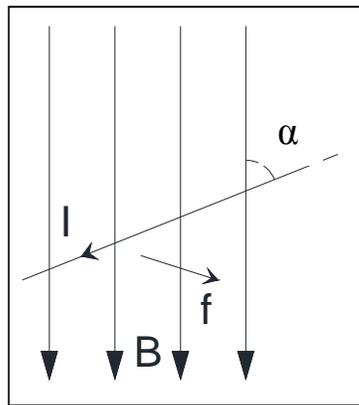
Ecuación #8 Ley de Biot-Savart

$$f = 8.85 * 10^{-8} B * l_e * I * \text{sen} \alpha \text{ lb}$$

Fuente: Michael Liwischitz-Garik

Donde l_e es la longitud efectiva del conductor en pulgadas, esto es la longitud situada dentro del flujo, I la corriente en amperes, B la densidad del flujo en líneas por pulgadas cuadrada en la que el conductor está alojado y α es el ángulo comprendido entre la corriente y densidad de flujo .

Figura 11: Fuerza sobre un conductor que conduce corriente en un Campo Magnético



Fuente: Los autores

En Máquinas Eléctricas, las líneas de inducción y los conductores están practicantes siempre perpendiculares entre sí. De este modo en Máquinas Eléctricas se obtiene la siguiente Ecuación #9:

Ecuación #9 Ley de Biot-Savart 2

$$f = 8.85 * 10^{-8} B * l_e * I \text{ lb}$$

Fuente: Fundamento Electromagnetismo

1.2.5 PAR ELECTROMAGNÉTICO

(Cherta, 2006, pág. 51). Se rescató los conceptos del par electromagnético y se indica que, el par que se desarrolla en el inducido de las Máquinas de Corriente Continua cuando está la Máquina excitada, es recorrido por una corriente, se puede calcular aplicando el punto de vista electromagnético (acción de un campo magnético sobre una capa de corriente) el cual se visualiza en la siguiente Ecuación #10:

Ecuación #10 Par Electromagnético

$$M = -\frac{\pi}{2} * p^2 * \Phi_1 * Fem * \text{sen}\theta \text{ N.M.}$$

Fuente: Cherta

Si las escobillas están sobre la línea neutra (eje transversal), el ángulo formado por el eje del campo magnético (eje directo) y el eje de la onda de f.m.m. del inducido, es igual a 90° eléctricos, por tanto la fórmula anterior aplicada a la máquina de corriente

continua, prescindiendo del signo, cuyo significado no es otro que el de fijar el sentido del par, será expresada en la Ecuación #11:

Ecuación #11 Par Electromagnético 2

$$M = \frac{\pi}{2} * p^2 * \Phi_1 * Fem \ N.M.$$

Fuente: Cherta

La capa de corriente distribuida uniforme, cuando cubre la totalidad de la superficie del inducido, determina una onda de f.m.m. de forma triangular, cuyo valor máximo, según la Ecuación #12 es:

Ecuación #12 Onda de F.m.m.

$$Fm = \frac{1}{2} * \frac{\pi \cdot r}{p} * A \text{ Av por polo}$$

Fuente: Cherta

Siendo **A** la carga específica o corriente por unidad de desarrollo del entrehierro, en **A/m**.

1.3. INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA

(Riley & Sturges, 1994, pág. 2). Se ha definido a la mecánica diciendo que, es la rama de la física que trata de la respuesta de los cuerpos a la acción de las fuerzas, para conveniencia de estudio se divide en:

- Mecánica de los cuerpos rígidos
 - Estática (equilibrio del cuerpo rígido)
 - Dinámica (movimiento del cuerpo rígido)
- Mecánica de los cuerpos deformables
- Mecánica de los fluidos

En la Dinámica intervienen las magnitudes de velocidad y aceleración, que dependen del tiempo. Los experimentos de Galileo Galilei dieron al inicio del desarrollo de la dinámica, Christian Huygens continuó la labor de Galileo con el invento del reloj de péndulo, presentó teoremas de aceleración y fuerza centrífuga; el Sir Isaac Newton

completó la formulación de los Principios Fundamentales de la Mecánica y su enunciado de la Leyes del Movimiento.

Leyes de Newton del Movimiento

Primera Ley

Todo cuerpo se mantiene en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme, salvo si se ve forzado a cambiar dicho estado por la acción de fuerzas a él aplicadas

Segunda Ley

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz aplicada, y tiene lugar en la dirección de la recta según la cual se aplica la fuerza.

Tercera Ley

La reacción es siempre igual y opuesta a la acción; es decir, las acciones que dos cuerpos que ejercen uno sobre otro son siempre iguales y directamente opuestas.

El trabajo de Newton lo extendió Leonhard Euler, con los sistemas de cuerpos rígidos, Euler fue el primero de utilizar la expresión momento de inercia. D'Alembert introdujo el concepto de la fuerza de inercia. Cuando se introducen las fuerzas de inercia los trabajos previos en mecánica basados en observaciones astronómicas fueron normalizados por LaGrange, quien dedujo analíticamente las Ecuaciones del Movimiento, utilizando conceptos energéticos. (Riley & Sturges, 1994, pág. 3)

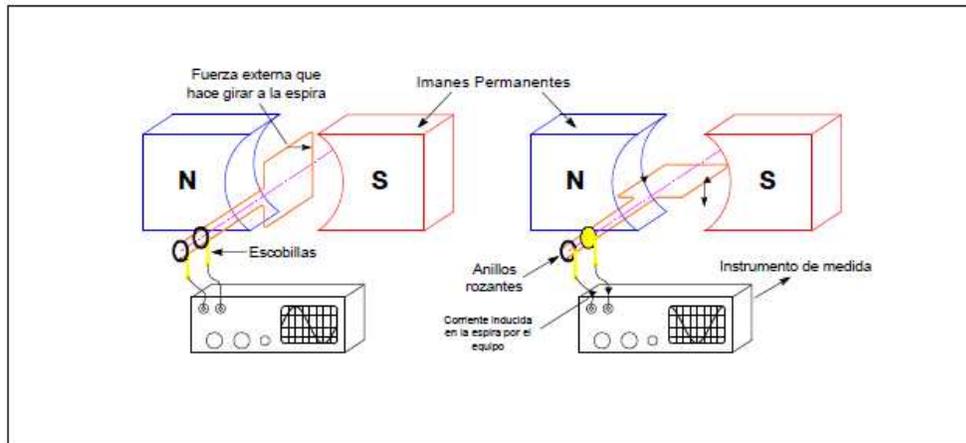
1.4. PRINCIPIO GENERAL DE FUNCIONAMIENTO

Las Máquinas de Corriente Continua, como las demás Máquinas Eléctricas Rotativas, basan su funcionamiento en las Leyes Fundamentales del

Electromagnetismo, se pueden comprender fácilmente un modelo elemental de máquina.

En la Figura 12 se representa una Máquina DC Continua elemental, que consta de una espira sumergida en un campo magnético constante, generado mediante imanes permanentes. Para poder extraer datos sobre lo que sucede en un cuerpo giratorio como es la espira, se utilizaran un par de anillos rasantes en combinación con un juego de escobillas.

Figura 12: Principio de Funcionamiento de una Máquina de Corriente Continua



Fuente: Los autores

Si una fuerza mecánica externa hace que la espira gire dentro del campo, aparecerá una tensión en sus terminales que podrá ser registrada por un aparato de medida. Esta tensión será senoidal, siempre y cuando la velocidad de giro se mantenga constante. Este es el principio de funcionamiento de la Máquina de Corriente Continua como generador.

Si por el contrario, se consigue que una corriente variable recorra la espira, sobre ella aparecerá una fuerza que dará lugar a un par de giro. Para que este par sea constante, y dé, por tanto, lugar a una velocidad de giro constante, es necesario que la corriente introducida sea de carácter senoidal. Este es el principio de funcionamiento de la Máquina de Corriente Continua como Motor. (Fernández Cabanas, García Melero, Alonso Orcajo, Cano Rogríguez, & Solares Sariego, 1998, pág. 73).

Para que las variables de Funcionamiento de la Máquina sean continuas es imprescindible introducir algún mecanismo de rectificación e inversión. El dispositivo característico en la Máquina Continua es el colector, este dispositivo también es la que genera el mayor número de problemas para su mantenimiento, ya que, se trata de un conjunto de delgas sobre las que deslizan un par de escobillas de grafito.

1.5. CONSTITUCIÓN DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

(Castillo, pág. 118). Se tomaron datos sobre la constitución de una Máquina de Corriente Continua he indica que está formada principalmente por un circuito magnético y dos circuitos eléctricos.

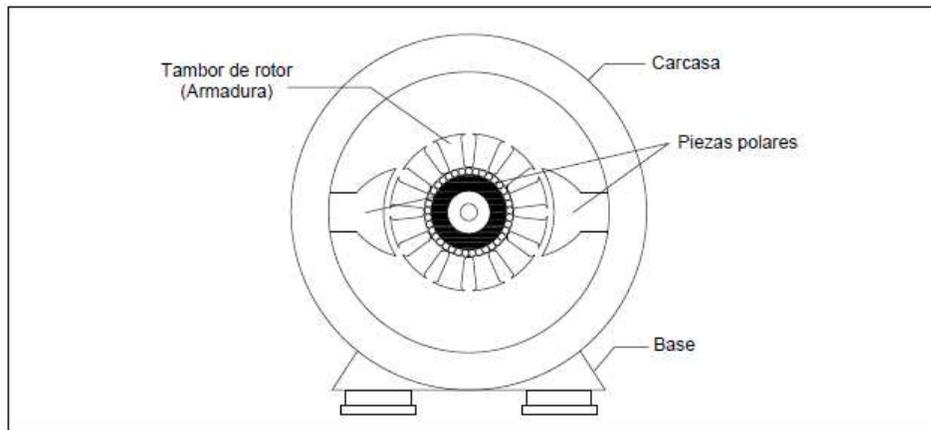
1.5.1 CIRCUITO MAGNÉTICO

El Circuito Magnético está formado por una parte fija, ubicada en el estator, y otra móvil en el rotor. Sobre ellas se encuentran bobinados los dos Circuitos Eléctricos.

El Circuito Magnético fijo está constituido por piezas o masas polares, tantas como polos tiene la máquina. Estas piezas, que pueden ser de tipo saliente o ranurado, se fijan a la carcasa o culata de la máquina, que se encargará de cerrar dicho circuito magnético, ver figura 13.

El circuito rotativo es un tambor cilíndrico de chapa magnética, que se encuentra ranurado de forma axial. Se suele denominar armadura y por su centro pasa el eje de la máquina, en el cual también se encuentra embutido el colector de delgas y los rodamientos.

Figura 13: Parte Fija del Circuito Magnético



Fuente: Los autores

1.5.2 CIRCUITO ELÉCTRICO

El Circuito Eléctrico está constituido por dos partes bien diferenciadas: el Inductor y el Inducido.

1.5.2.1 EL CIRCUITO INDUCTOR

Se encuentra alojado en el estator y bobinado sobre las piezas polares. Es el encargado de generar el campo magnético fijo que se induce sobre el mismo circuito del rotor. Está constituido por bobinas de grandes dimensiones, cuyo número es igual al de polos que tiene la máquina. El inductor también recibe el nombre de excitación o devanado de excitación.

El número de pares de polos debe ser siempre par, de forma que la polaridad se presente de forma alternativa (N-S-N-S). El centro de cada uno de los polos se denomina eje polar, habiendo tantos como pares de polos tenga la máquina. El ángulo entre dos polos consecutivos siempre debe ser el mismo.

El eje situado entre dos polos se denominan línea neutra, y sobre ella los efectos magnéticos serán nulos. Así, una Máquina de Corriente Continua tiene tantas líneas neutras como pares de polos. Ver figura 14.

Figura 14: Circuito Inductor Motor Hampden Modelo DM-300.

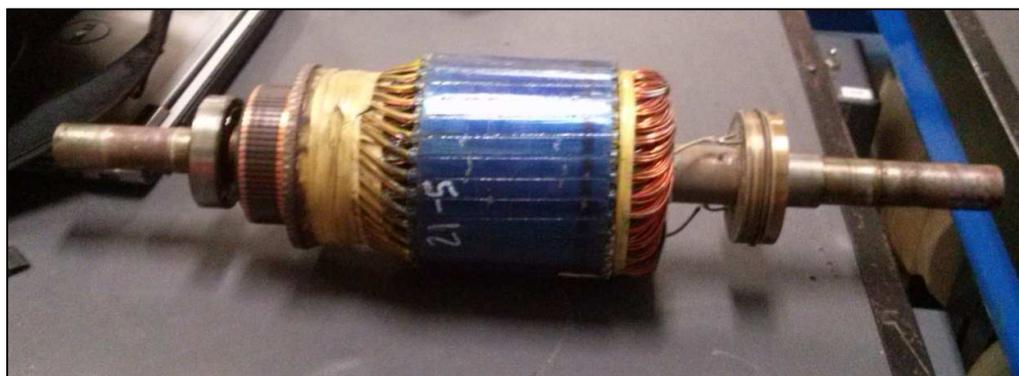


Fuente: Los autores

1.5.2.2 EL CIRCUITO INDUCIDO

Se encuentra alojado en el rotor. Su devanado consta de numerosas bobinas que se sitúan en las ranuras del tambor y que, además, se encuentran conectadas al exterior a través del sistema de conmutación. Ver figura 15.

Figura 15: Parte Móvil del Circuito Eléctrico, Rotor Motor Hampden DM-300

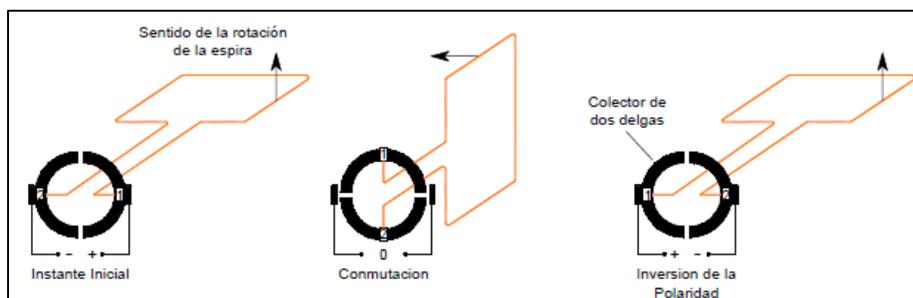


Fuente: Los Autores

1.5.3 FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR

(Fernández Cabanas, García Melero, Alonso Orcajo, Cano Rogríguez, & Solares Sariago, 1998, pág. 74). El colector es un órgano que funciona como rectificador en el generador y como inversor u ondulator en los Motores. Su modo de funcionamiento puede apreciarse en la siguiente figura 16.

Figura 16: Funcionamiento de un Colector Elemental



Fuente: Los Autores

Los extremos de la espira, en vez de salir al exterior a través de anillos rasantes y escobillas, se muevan a dos semianillos conductores, llamados delgas, que giran con la espira. Sobre estos anillos deslizan las escobillas, de modo que la mitad de la revolución uno de los extremos está conectado al terminal positivo y la otra mitad al negativo.

Mediante este colector de dos delgas se obtiene una tensión unidireccional, pero bastante alejada de la continua, en las máquinas reales, el colector consta de un gran número de delgas y el inducido tiene una gran cantidad de conductores, con lo que, la tensión es prácticamente continua. Se puede observar también que la corriente en los conductores cambia de sentido al atravesar la línea de las escobillas. A este fenómeno, de análisis bastante complejo, se la denomina conmutación. (Fernández Cabanas, García Melero, Alonso Orcajo, Cano Rogríguez, & Solares Sariego, 1998, pág. 75)

1.6. PROBLEMAS DE CONMUTACIÓN EN MÁQUINAS REALES

Dentro del proceso de conmutación en las máquinas reales ocurren dos efectos muy importantes, los cuales son los siguientes:

Reacción de Armadura

Voltaje $L^* di/dt$

1.6.1 EFECTO DE LA REACCIÓN DE ARMADURA SOBRE LA REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN TODOS LOS MOTORES DC.

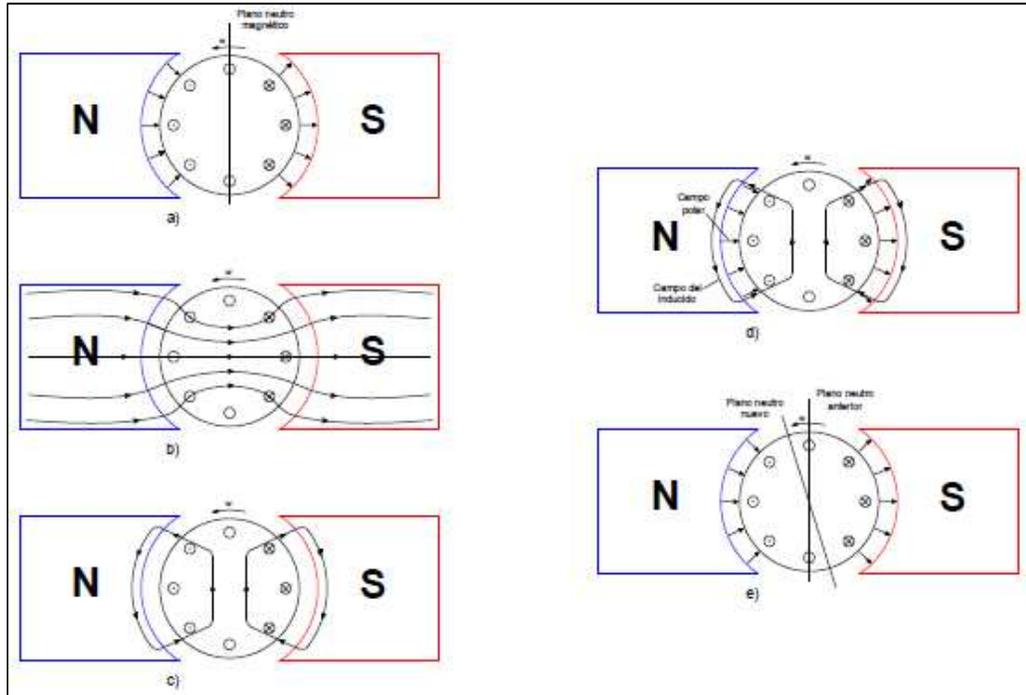
La Reacción de Armadura, es el efecto de la Fuerza Magnetomotriz que producen los conductores de la armadura al reducir y distorsionar el flujo mutuo de entrehierro, que produce el devanado del campo. La Ecuación fundamental de la velocidad, la Ecuación expuesta indica que si se reduce el flujo de campo en su denominador se originara un aumento de velocidad.

El efecto de la reacción de armadura, varía directamente con la carga o con la corriente de armadura. Al cargar cualquier Motor de DC, independientemente de su tipo, el efecto de la reacción de armadura es reducir el flujo de entrehierro y, dependiendo del grado de saturación, aumentar la velocidad del Motor. (Kosow, 1991, pág. 142)

El primer problema, debido a la reacción del inducido, es el desplazamiento del plano neutro. El plano neutro se define como el plano interno de la máquina en la que la velocidad de los alambres del rotor, está exactamente en paralelo con las líneas de flujo magnético, de modo que e_{ind} es cero en los conductores del plano.

Para entender mejor el problema del desplazamiento del neutro véase la figura 17, muestra una Máquina DC de dos polos. Nótese que el flujo está distribuido uniformemente bajo las caras polares, el plano neutro se desplaza en la dirección del movimiento; en un Motor se desplaza en la dirección opuesta. Además la cantidad de desplazamiento depende de la cantidad de corriente en el rotor y por lo tanto, de la carga de la máquina. (Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 516)

Figura 17: Desarrollo de la Reacción del Inducido a un generador, e) Flujo resultante bajo los polos.
 El plano neutro se ha desplazado en dirección del movimiento.

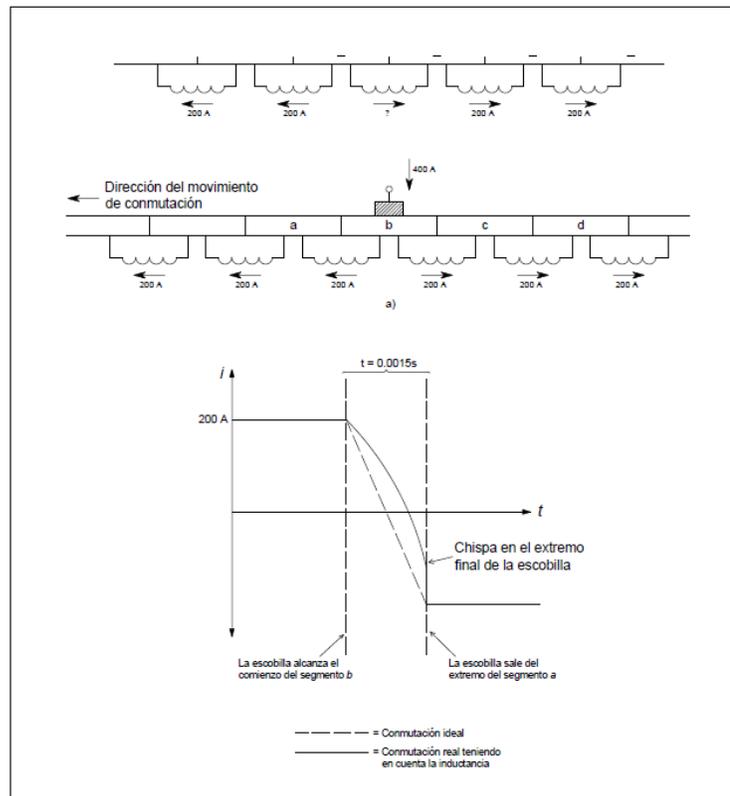


Fuente: Los Autores

1.6.2 VOLTAJE $L \cdot di/dt$

El segundo problema importante es el voltaje $L \cdot di/dt$ generado en los segmentos d) y e). Para entender este problema, remítase a la figura 18, que representa una serie de segmento de colector y los conductores conectados entre ellos. Suponiendo que la corriente en la escobilla es 400 A., la corriente en cada trayectoria es 200 A. Ver figura 18. Nótese que cuando un segmento de conmutación es cortocircuitado, el flujo de corriente a través de este segmento del colector se debe invertir. (Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 518)

Figura 18: Inversión del Flujo de Corriente en una Bobina Bajo Conmutación



Fuente: S. Chapman S. J., Máquinas Eléctricas Tercera Edición.

Si la Máquina gira a 800r/min y hay 50 segmentos de conmutación, cada segmento de conmutación se mueve bajo una escobilla y la libera de nuevo en $t=0.0015s$. Entonces, la velocidad de cambio de la corriente con respecto al tiempo en el lazo corto debe promediarse. Ver Ecuación #13.

Ecuación #13 Velocidad de la Corriente con Respecto al Tiempo.

$$\frac{di}{dt} = \frac{400A}{0.0015s} = 166.667 A/s$$

Fuente: S. Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 520

Aún con muy pequeña inductancia en el lazo, se inducirá un golpe muy significativo de voltaje inductivo $v = L \cdot di/dt$ en el segmento de conmutación cortocircuitado. Este alto voltaje ocasiona chispa en las escobillas de la máquina y causa los mismos problemas de formación de arco que ocasiona el desplazamiento del plano neutro. (Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 520)

1.7 SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE CONMUTACIÓN

Se han desarrollado tres técnicas para corregir parcial o totalmente los problemas de reacción del inducido y de voltajes $L \cdot di/dt$:

1. Desplazamiento de las Escobillas.
2. Polos de Conmutación.
3. Devanados de Compensación.

1.7.1 DESPLAZAMIENTO DE LAS ESCOBILLAS

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 520). Históricamente, los primeros intentos para mejorar el proceso de conmutación en las Máquinas DC reales, se llevaron a cabo para detener el chipoteo en las escobillas, causado por el desplazamiento del plano neutro y los efectos de $L \cdot di/dt$. La primera técnica ingeniería por los diseñadores de la Máquina fue sencilla: si el plano neutro de la máquina se desplaza, ¿Por qué no desplazar con él las escobillas para detener el chispeo?

Aunque, esta parecía una buena idea, hay varios problemas serios asociados a ella. Por esto el plano neutro se mueve con cada cambio de carga y la dirección del desplazamiento se invierte cuando la Máquina pasa de operación de Motor a operación de Generador. Entonces, alguien tendría que ajustar las escobillas cada vez que cambiara la carga en la máquina. Además, desplazar las escobillas podría haber detenido el chisporroteo de las escobillas, pero agravaría el efecto de debilitamiento del flujo de la reacción del inducido en la máquina. Esto se demuestra por dos efectos:

- 1).- La Fuerza Magnetomotriz del rotor tiene ahora una componente vectorial que se opone a la Fuerza Magnetomotriz de los polos.
- 2).- El cambio en distribución de la corriente del inducido se concentra aún más en las partes saturadas de las caras polares.

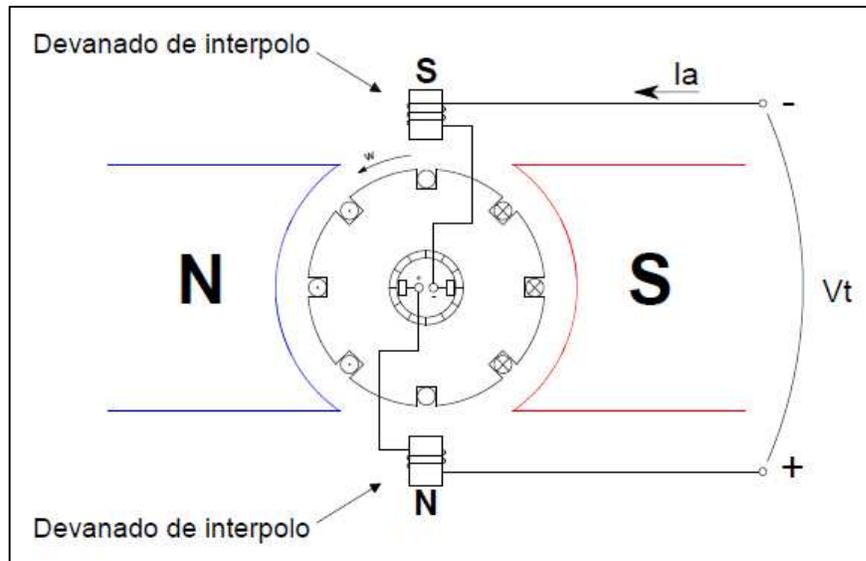
1.7.2 POLOS DE CONMUTACIÓN O INTERPOLOS.

(Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 522). Debido a las desventajas anotadas antes, y en especial a que una persona debe ajustar la posición de las escobillas de las Máquinas, en cuanto cambia su carga, se buscó otra solución para el problema de chisporroteo. Esta nueva técnica se basa, en que, si el voltaje en los alambres bajo conmutación se redujera a cero, no habría chisporroteo en las escobilla. Para lograr esto, se colocan pequeños polos llamados polos de conmutación o interpolos, en medio de los polos principales. Estos polos de conmutación se localizan directamente sobre los conductores que están conmutándose. Suministrando un flujo desde los polos de conmutación, puede cancelarse con exactitud el voltaje de las bobinas bajo conmutación. Si la cancelación es exacta, no habrá chisporroteo en las escobillas.

Los polos de conmutación no cambian de ninguna manera la operación de la Máquina, dado que son tan pequeños que solo afectan a los pocos conductores bajo conmutación. Nótese que no se afecta la reacción del inducido bajo las caras polares, principales porque los efectos de los polos de conmutación, no se extienden tan lejos. Esto significa, que los polos de conmutación no afecta el debilitamiento del flujo en la máquina.

¿Cómo se lleva a cabo la supresión del voltaje en los segmentos de conmutación para todos los valores de carga? Mediante una simple conexión de los devanados de los interpolos en serie, con los devanados de rotor. Cuando aumenta la carga en la corriente del rotor también aumenta la magnitud del desplazamiento del plano neutro y el tamaño de los efectos de $L \cdot di/dt$. Estos efectos juntos, incrementan el voltaje en los conductores bajo conmutación. Sin embargo, el flujo del interpole también se eleva y produce un gran voltaje en los conductores, que se opone al voltaje debido al desplazamiento del plano neutro. Como resultado neto, sus efectos se cancelan sobre el amplio rango de carga, nótese de los interpolos funcionan bien, sea que la máquina opere como Generador o como Motor, puesto que cuando esta cambia de Motor a Generador, la corriente cambia de dirección tanto en el rotor como en los interpolos. Por tanto, los efectos de voltaje de ellos se cancelan. Ver figura 19.

Figura 19: Polos de Conmutación o Interpolos

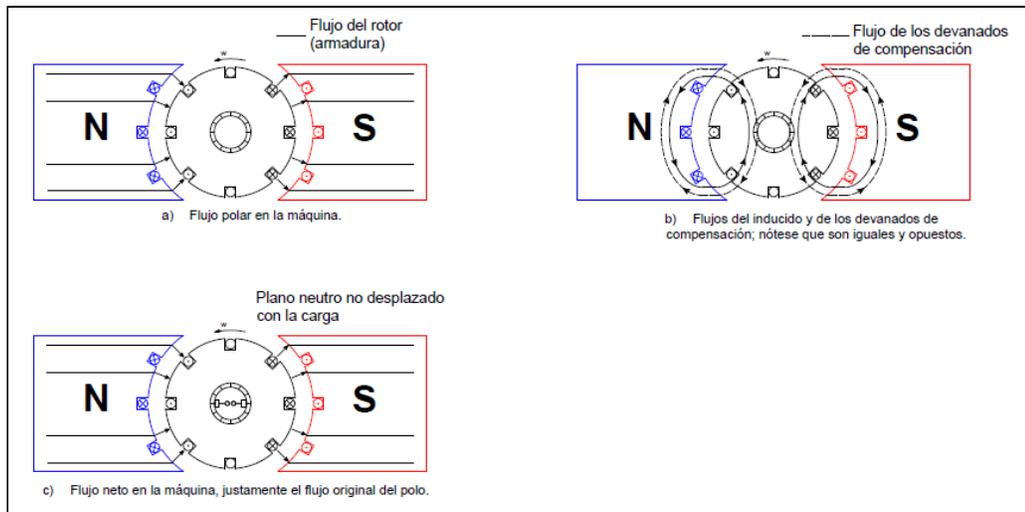


Fuente: Los Autores

1.7.3 DEVANADOS DE COMPENSACIÓN

(Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág. 523). Para Motores de ciclo de trabajo pesado e intenso, el problema del debilitamiento del flujo puede ser muy grave. Para cancelar por completo la reacción del inducido y por tanto eliminar el desplazamiento del plano neutro y el debilitamiento del flujo, se desarrolló una técnica diferente que incluye la disposición de devanados de compensación en ranuras labradas en las caras de los polos paralelos a los conductores del rotor para cancelar el efecto de distorsión de la reacción del inducido. Estos devanados están conectados en serie con los devanados del rotor de modo que cuando cambia la carga en el rotor, cambia también la corriente en los devanados de compensación. Ver figura 20.

Figura 20: Devanado de Compensación



Fuente: Los Autores

1.8 FLUJO DE POTENCIA Y PÉRDIDAS EN MÁQUINAS DC.

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 537). Los Generadores DC toman Potencia Mecánica y Potencia Eléctrica, mientras que, los Motores DC toman Potencia Eléctrica y producen Potencia Mecánica. Lo que se concluye, es que, no toda la potencia de entrada a la máquina es útil en el otro lado, pues siempre hay alguna pérdida asociada al proceso.

La eficiencia de una Máquina DC se la puede definir por la Ecuación #14:

Ecuación #14 Eficiencia de una Máquina

$$n = \frac{P_{out} (W)}{P_{in} (W)} * 100\%$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

La diferencia entre la potencia de entrada y la de salida de la Máquina son las pérdidas que ocurren en su interior. Entonces la Ecuación #15 es:

Ecuación #15 Eficiencia de una Máquina 2

$$n = \frac{P_{out} (W) - Pérdidas (W)}{P_{in} (W)} * 100\%$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

1.8.1 PÉRDIDAS EN MÁQUINAS DC.

Las pérdidas que ocurren en las Máquinas de Corriente Continua se pueden dividir en cinco categorías:

1. Pérdidas Eléctricas o Pérdidas en el Cobre (Pérdidas $I^2 * R$) (W).
2. Pérdidas en las Escobillas (W).
3. Pérdidas en el Núcleo (W).
4. Pérdidas Mecánicas (W).
5. Pérdidas Misceláneas o Dispersas (W).

1.8.2 PÉRDIDAS ELÉCTRICAS O PÉRDIDAS EN EL COBRE

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 538). Indica que, las pérdidas en el cobre ocurren en los devanados del inducido y del campo de la máquina. Para los devanados del inducido y del campo, las pérdidas en el cobre están dadas por las siguientes ecuaciones #16 y #17:

Ecuación #16 Pérdidas en el Inducido

$$P_A = I_A^2 * R_A$$

Ecuación #17 Pérdidas en el Campo

$$P_F = I_F^2 * R_F$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Dónde:

P_A = Pérdidas en el Inducido (W).

P_F = Pérdidas en el Circuito de Campo (W).

I_A = Corriente del Inducido (Amp).

I_F = Corriente de Campo (Amp).

R_A = Resistencia del Inducido (Ω).

R_F = Resistencia del Campo (Ω).

La resistencia utilizada en estos cálculos es la resistencia del devanado a la temperatura normal de operación.

1.8.3 PÉRDIDAS EN LAS ESCOBILLAS

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 538). Las pérdidas por caída en las escobillas corresponden a la potencia perdida a través del contacto potencial en las escobillas de la máquina.

Están dadas por la Ecuación #18:

Ecuación #18 Pérdida en las Escobillas

$$PBD = V_{BD} \cdot I_A$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Dónde:

PBD = Pérdidas por caída en las Escobillas (W).

V_{BD} = Caída de voltaje en la Escobilla (Voltios).

I_A = Corriente del Inducido (Amp).

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 539). Las pérdidas en las Escobillas se calculan de este modo, porque la caída de voltaje a través de un conjunto de escobillas es aproximadamente constante en un amplio rango de corrientes del inducido. A menos que, se especifique lo contrario, se supone que es normal la caída de voltaje en las escobillas: alrededor de 2V.

1.8.4 PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 539). Las pérdidas en el núcleo son las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que ocurren en el metal del Motor. Estas pérdidas, descritas en el capítulo 1, varían con el cuadro de la densidad de flujo (B^2) y, en el rotor, con la 1.5 enésima potencia de la velocidad de rotación ($n^{1.5}$).

1.8.5 PÉRDIDAS MECÁNICAS

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 539). Las pérdidas mecánicas en una máquina DC son las pérdidas asociadas a los efectos mecánicos. Hay dos tipos básicos de pérdidas mecánicas: *rozamiento propio* y *rozamiento con el aire*. Las pérdidas por rozamiento propio son las causadas por fricción de los rodamientos de la máquina, mientras que las pérdidas por rozamiento con el aire son las causadas por fricción entre las partes móviles de la máquina y el aire encerrado en la estructura de ella. Estas pérdidas varían con el cubo de la velocidad de rotación de la máquina.

1.8.6 PÉRDIDAS DISPERSAS

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 539). Las pérdidas dispersas son aquellas que no se pueden clasificar en alguna de las categorías indicadas anteriormente. No tiene importancia el cuidado con que se contabilicen las pérdidas, pues casi siempre algunas quedan por fuera de las categorías mencionadas. Todas esas pérdidas se reúnen en las pérdidas misceláneas. Para la mayoría de las Máquinas, las pérdidas misceláneas se toman convencionalmente como el 1% de la plena carga. Ver Ecuación #19.

Ecuación #19 Pérdidas Dispersas.

$$Perd. disp = 1\% * Potencia del motor (W)$$

Fuente: Los autores

1.9 DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA

(Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, pág., 539-540). Una de las técnicas más apropiadas para explicar las pérdidas de potencia en una máquina es el Diagrama de Flujo de Potencia. La figura 21, muestra un diagrama de flujo de potencia para un generador DC. En esta figura, se suministra potencia mecánica a la máquina y luego se restan las pérdidas misceláneas, las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el núcleo. Después de restadas esas pérdidas, se convierte la potencia

mecánica restante en Potencia Eléctrica en el punto indicado **P_{conv}**. La Potencia Mecánica convertida está dada por la Ecuación #20.

Ecuación #20 Potencia Mecánica

$$P_{con} = T_{ind} * \omega_m$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Y la Potencia Eléctrica resultante está dada por la Ecuación #21.

Ecuación #21 Potencia Eléctrica Resultante

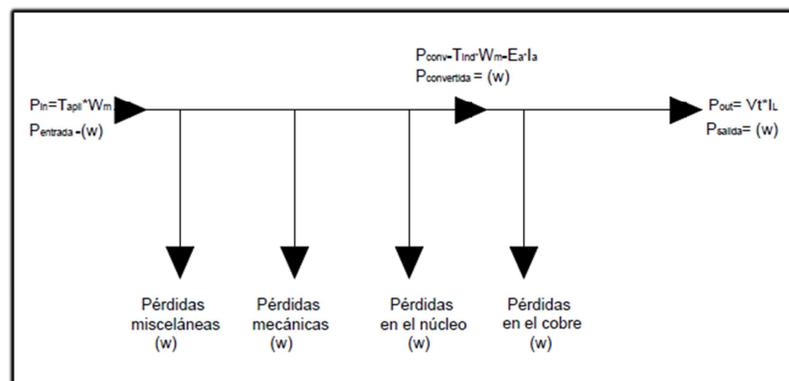
$$P_{con} = E_A * I_A$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Sin embargo, esta no es la potencia que aparece en los terminales de la máquina. Antes de alcanzar los terminales, deben restarse las Pérdidas Eléctricas ($I^2 * R$) y las Pérdidas en las Escobillas.

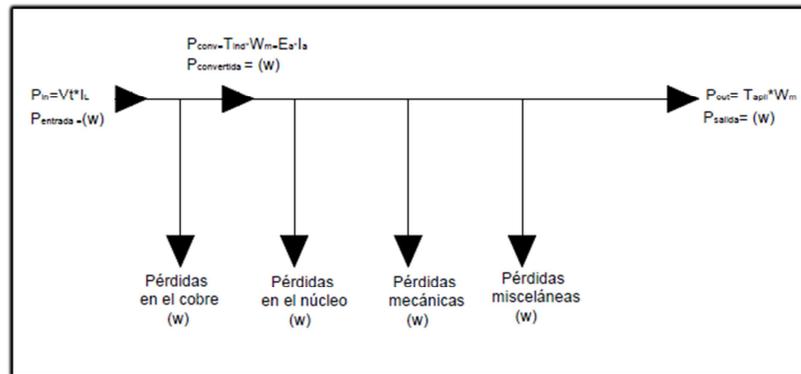
En el caso de los Motores DC, este Diagrama de Flujo de Potencia simplemente se invierte. El Diagrama de Flujo de Potencia de un Motor se muestra en la figura 22.

Figura 21: Diagrama de Flujo de Potencia para una Máquina DC - Generador



Fuente: Los autores

Figura 22: Diagrama de Flujo de Potencia para una Máquina DC – Motor



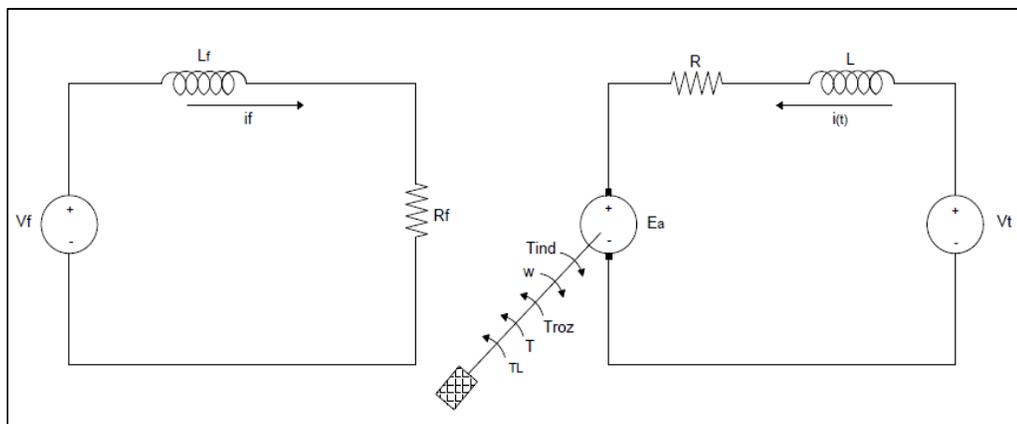
Fuente: Los autores

CAPÍTULO II: MODELO MATEMÁTICO

2.1 MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE.

Como resumen, se puede enunciar que un Motor DC Conexión Independiente, es un Motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia, separada de voltaje constante. Esto se puede apreciar en la figura 23.

Figura 23: Circuito Equivalente de Motor DC Conexión Independiente



Fuente: Los autores

Para el siguiente proceso se considera constante el circuito de devanado de campo del Motor y el Modelo se realizará en el circuito de devanado de excitación.

2.2 MODELO MATEMÁTICO

De acuerdo con la Ley de Voltaje de Kirchoff, se realizará el siguiente análisis al Motor DC Conexión Independiente, su Ecuación es #22.

Ecuación #22 Voltaje aplicado al Circuito de Excitación

$$V_T = R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt} + Ea$$

Fuente: Chapman S. J.

Ecuación #23 Voltaje de la Armadura

$$Ea: K * \omega(t)$$

Fuente: Chapman S. J.

Siendo:

L: Inductancia de la Armadura y de interpolo (Henrios).

R: Resistencia de la Armadura y de interpolo (Ω).

V_T: Voltaje aplicado al Circuito de la Armadura (Voltios).

Ea: Voltaje de la Armadura (Voltios).

i(t): Corriente de la Armadura en función del tiempo.

$\omega(t)$: Velocidad Angular en función del tiempo.

K: Constante de la Fuerza Contra-Electromotriz V/ (rad/Seg.).

Ecuación #24 Ecuación Eléctrica del Motor DC Conexión Independiente en estado estable 1

$$L * \frac{di(t)}{dt} = V_T - (R * i(t)) - (K * \omega(t))$$

Fuente: Chapman S. J.

Ecuación #25 Ecuación Eléctrica del Motor DC Conexión Independiente en estado estable 2

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{V_T}{L} - \left(\frac{R}{L} * i(t) \right) - \left(\frac{K}{L} * \omega(t) \right)$$

Fuente: Chapman S. J.

En la Ecuación #25 se ve reflejada la Ecuación Eléctrica del Motor DC Conexión Independiente en estado estable.

De acuerdo con la 2da Ley de Newton de rotación dinámica, el momento de una fuerza (Torque) expresada en la Ecuación #26:

Ecuación #26 Torque (a)

$$T = T_{ind} - T_{roz}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #27 Torque (b)

$$J * \alpha = k * i(t) - f * \omega(t)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Siendo:

T: Torque (N.m).

T_{ind}: Torque Inducido (N.m).

T_{roz}: Torque de Rozamiento (N.m).

J: Momento de Inercia del Rotor (Kg.m²).

α : Aceleración Angular (Radianes).

f: Constante de Torque Electromagnético (Volt/ rad/ Seg.).

f: Coeficiente de Rozamiento Viscoso (N.m.Seg./ rad).

$\omega(t)$: Velocidad Angular en función del tiempo (rad/ Seg.).

Ecuación #28 Torque (c)

$$J * \frac{d^2\theta}{dt} = (k * i(t)) - (f * \omega(t))$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #29 Torque (d)

$$J * \frac{d^2\theta}{dt} = k * i(t) - f * \frac{d\theta}{dt}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #30 Ecuación Mecánica del Motor DC Conexión Independiente en estado estable

$$\frac{d^2\theta}{dt} = \left(\frac{k}{J} * i(t) \right) - \left(\frac{B}{J} * \omega(t) \right)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

En la Ecuación #30 se obtiene de manera Matemática la Ecuación Mecánica del Motor DC Conexión Independiente en estado estable.

2.3 SOLUCIÓN MATEMÁTICA DE LAS ECUACIONES DE ESTADO ESTABLE DE CORRIENTE DE ARMADURA Y VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE.

La constante Torque Electromagnético k y la constante de la Fuerza Contra-Electromotriz K son dos parámetros separados para el Motor estudiado, pero sus valores están fuertemente relacionados por la semejanza en su valor numérico considerando que la Potencia en la Armadura (P_a) es igual a la Potencia entregada al eje (P_{eje}), por ende se denominara a estas constantes con la letra K para los análisis teóricos y simulación a desarrollar.

Ecuación #31 Potencia de la Armadura

$$P_a = E_a * i(t)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #32 Potencia de Eje

$$P_{eje} = T_{ind} * \omega(t)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

En la condición de estado estacionario la potencia en la armadura, es igual a la potencia entregada al eje, siendo $E_a = K * \omega(t)$ y $T_{ind} = k * i(t)$ modo que podemos igualar las ecuaciones #31 y #32 planteadas.

$$P_a = P_{eje}$$

Ecuación # 33

$$(K * \omega) * i = (k * i) * \omega$$

$$K = k = K$$

Donde, en las unidades del SI, T_{ind} está en N.m y $\omega(t)$ está en Rad/Seg., obteniendo que:

Ecuación #34 Igualdad de unidades

$$K [V/(\text{rad}/\text{Seg.})] = k (\text{N.m}/\text{A})$$

Fuente: Chapman S. J.

Para este desarrollo matemático el valor de la inductancia de la armadura con interpolo se denominara L y este es igual a 0 por que no hay campo variable en el devanado de la armadura e interpolo ya que se aplica un voltaje DC constante, pero para el desarrollo de las simulaciones se considerara un valor de L de 0.01 Henrios, según la Ecuación #22.

L= 0 Henrios.

Ecuación #35 Voltaje al Circuito de Excitación (a)

$$V_T = R * i(t) + Ea$$

Fuente: Chapman S. J.

Ecuación #36 Corriente de Armadura

$$i(t) = \frac{V_T - Ea}{R}$$

Fuente: Chapman S. J.

Ecuación #37 Corriente de Armadura (a)

$$i(t) = \frac{V_T - K * \omega(t)}{R}$$

Fuente: Chapman S. J.

Se reemplaza de la Ecuación #37 en la Ecuación #38 Variación de Velocidad Angular.

Ecuación #38 Variación de Velocidad Angular

$$K * i(t) = \left(J * \frac{d\omega}{dt} \right) + [f * \omega(t)]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación # 39

$$K * \left(\frac{V_T - K * \omega}{R} \right) = \left(J * \frac{d\omega}{dt} \right) + f \omega(t)$$

Ecuación # 40

$$[V_T - K\omega] = \left(\frac{J * R}{K} * \frac{d\omega}{dt}\right) + \left(\frac{f * R}{K} * \omega(t)\right)$$

Ecuación # 41

$$V_T = \left(\frac{J * R}{K}\right) * \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{f * R}{K} * \omega(t)\right) + [K * \omega(t)]$$

Ecuación #42

$$V_T = \left(\frac{J * R}{K}\right) * \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{f * R}{K} + K\right) * \omega(t)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación #42, se obtiene:

Ecuación #43

$$\mathcal{L}V_T = \mathcal{L}\left(\frac{J * R}{K}\right) * \frac{d\omega(t)}{dt} + \mathcal{L}\left(\frac{f * R}{K} + K\right) * \omega(t)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #44

$$\frac{V_T}{s} = \left(\frac{J * R}{K}\right) * (s * W(s)) + \left(\frac{f * R}{K} + K\right) * W(s)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Se define las constante γ y β como:

Ecuación #45 Variable lambda

$$\gamma = \frac{J * R}{K}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #46 Variable beta

$$\beta = \left(\frac{f * R}{K} + K\right)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Se reemplaza en la Ecuación #44 las ecuaciones #45 y #46, siendo:

Ecuación # 47

$$\frac{V_T}{s} = s * \gamma * W(s) + \beta * W(s)$$

Ecuación #48

$$\frac{V_T}{s} = W(s) * [s\gamma + \beta]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Obtenida la Ecuación de velocidad en función del tiempo, se procede a resolver mediante fracciones parciales la Ecuación #49.

Ecuación #49

$$W(s) = \frac{V_T}{s(s\gamma + \beta)} = VT \left[\frac{1}{s(s\gamma + \beta)} \right] = VT \left[\frac{a(s\gamma + \beta) + bs}{s(s\gamma + \beta)} \right]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Para determinar **a**

Ecuación #50

$$b*s=0$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación # 51

$$s=0$$

$$a*(s\gamma + \beta)=1$$

Ecuación #52

$$a= 1/\beta$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Para determinar **b**

Ecuación #53

$$a*(s\gamma + \beta)= 0$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Proceso de la Ecuación:

$$(sY + \beta) = 0$$

$$S = -\beta/Y$$

$$b*s = 1$$

$$b \left(-\frac{\beta}{Y} \right) = 1$$

Ecuación #54

$$b = -\frac{Y}{\beta}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Las ecuaciones #52 y #54 se reemplazarán en la Ecuación #49 como resultado se obtiene la Ecuación #55:

Ecuación #55

$$W(s) = V_T \left(\frac{1}{s} + \frac{-\frac{Y}{\beta}}{sY + \beta} \right)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #56

$$W(s) = V_T \left(\frac{1}{s} \right) + V_T \left(\frac{-\frac{Y}{\beta}}{sY + \beta} \right)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Proceso de encontrar la expresión mínima de velocidad angular en función de S.

$$W(s) = V_T \left(\frac{1}{s} \right) - V_T \left(\frac{\frac{Y}{\beta}}{\left(s + \frac{\beta}{Y} \right) Y} \right)$$

$$W(s) = V_T \left(\frac{1}{s} \right) - V_T \left(\frac{\frac{1}{\beta}}{s + \frac{\beta}{Y}} \right)$$

Ecuación #57

$$W(s) = \frac{V_T}{\beta} * \left(\frac{1}{s}\right) - \frac{V_T}{\beta} * \left(\frac{1}{s + \frac{\beta}{\gamma}}\right)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Se aplica la anti transformada de Laplace a la Ecuación #57.

Ecuación #58

$$\mathcal{L}^{-1}W(s) = \mathcal{L}^{-1}\frac{V_T}{\beta} * \left(\frac{1}{s}\right) - \mathcal{L}^{-1}\frac{V_T}{\beta} * \left(\frac{1}{s + \frac{\beta}{\gamma}}\right)$$

Ecuación #59

$$\omega(t) = \frac{V_T}{\beta} - \frac{V_T}{\beta} * e^{-(\beta/\gamma)t}$$

Ecuación #60 Resolución de la Ecuación General de Velocidad Angular estado estable

$$\omega(t) = \frac{V_T}{\beta} * \left(1 - e^{-(\beta/\gamma)t}\right)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Resolución de la Ecuación General de Velocidad Angular estado estable.

e= número de Euler que es 2.71828.

Ahora se encontrará i(t) de la Ecuación #36.

Ecuación #36 Corriente de Armadura (a)

$$i(t) = \frac{V_T - K * \omega(t)}{R}$$

Fuente: Chapman S. J.

Se reemplazará la Ecuación #60 en la Ecuación #36:

Ecuación # 61

$$i(t) = \frac{V_T}{R} - \frac{K}{R} \left[\frac{V_T}{\beta} \left(1 - e^{-(\beta/\gamma)t} \right) \right]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #62 Corriente de Armadura estado estable

$$i(t) = \frac{V_T}{R} - \left(\frac{K * V_T}{R * \beta} \right) + \left(\frac{K * V_T}{R * \beta} \right) * e^{-(\beta/\gamma)t}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Resolución de la Ecuación General de corriente de armadura estado estable.
Ahora se encontrará T_{ind} en la Ecuación # 63.

Ecuación #63 Torque inducido.

$$T_{ind} = K * i(t)$$

Fuente: Chapman S. J.

Se reemplazará la Ecuación #62 en la Ecuación #63.

Ecuación #64 Torque inducido en estado estable

$$T_{ind} = \frac{V_T * K}{R} - \frac{K^2 * V_T}{R * \beta} + \frac{K^2 * V_T}{R * \beta} * e^{-(\beta/\gamma)t}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Resolución de la Ecuación General de Torque inducido en estado estable.
Ingresando la carga mecánica al Motor DC.

Ecuación #65 Torque aplicando Carga Mecánica al Eje.

$$T_{ind} = T + T_{roz} + T_l$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Siendo T_l : carga mecánica externa aplicada al eje del Motor DC.

Ecuación #66

$$K * i(t) = \left(J * \frac{d\omega(t)}{dt} \right) + (f * \omega(t)) + T_l$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Se reemplaza $i(t)$ de la Ecuación #36 en la Ecuación #66

Ecuación #67

$$K * \left(\frac{Vt - [K * \omega(t)]}{R} \right) = \left(J * \frac{d\omega(t)}{dt} \right) + (f * \omega(t)) + Tl$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #68

$$\frac{K}{R} * (Vt - [K * \omega(t)]) = \left(J * \frac{d\omega(t)}{dt} \right) + (f * \omega(t)) + Tl$$

Ecuación #69

$$Vt - [K * \omega(t)] = \left(\frac{J * R}{K} * \frac{d\omega(t)}{dt} \right) + \left(\frac{f * R}{K} * \omega(t) \right) + \frac{Tl * R}{K}$$

Ecuación #70

$$Vt = \left(\frac{J * R}{K} * \frac{d\omega(t)}{dt} \right) + \left(\frac{f * R}{K} + K \right) * \omega(t) + \frac{Tl * R}{K}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación #70, quedando de esta forma:

$$\int V_T = \int \left(\frac{J * R}{K} \right) * \frac{d\omega(t)}{dt} + \int \left(\frac{f * R}{K} + K \right) * \omega(t) + \int \frac{Tl * R}{K}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #71

$$\frac{V_T}{s} = \left(\frac{J * R}{K} \right) * (s * W(s)) + \left(\frac{f * R}{K} + K \right) * W(s) + \frac{Tl * R}{s * K}$$

Ecuación #72

$$\frac{V_T}{s} = \left(\frac{J * R}{K} * s + \frac{f * R}{K} + K \right) * W(s) + \frac{Tl * R}{s * K}$$

Ecuación #73

$$W(s) = \frac{\frac{V_T}{s} - \frac{Tl * R}{s * K}}{\left(\frac{J * R}{K} * s + \frac{f * R}{K} + K\right)} = \frac{\frac{K * V_T - Tl * R}{s * K}}{\frac{J * R * s + f * R + K^2}{K}}$$

Ecuación #74

$$W(s) = \frac{(K * V_T - Tl * R) * K}{(J * R * s + f * R + K^2) * Ks}$$

Ecuación #75

$$W(s) = \frac{K^2 * V_T}{(J * R * s + f * R + K^2) * Ks} - \frac{Tl * R * K}{s * K(J * R * s + f * R + K^2)}$$

Ecuación #76

$$W(s) = \frac{\frac{K * V_T}{1}}{\frac{(J * R * s + f * R + K^2) * s}{1}} - \frac{Tl * R}{s * (J * R * s + f * R + K^2)}$$

Ecuación #77

$$W(s) = \frac{V_T}{\frac{s}{K} * (J * R * s + f * R + K^2)} - \frac{Tl * R}{s * (J * R * s + f * R + K^2)}$$

Ecuación #78

$$W(s) = \frac{V_T}{s * \left(\frac{J * R * s}{K} + \frac{f * R}{K} + K\right)} + \frac{-Tl * R}{s * (J * R * s + f * R + K^2)}$$

Fuente: Chapman Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #79

$$W(s) = W_{csc}(s) + \Delta W(s)$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

$$W(s) = W_{csc}(s) + \Delta W(s)$$

$W(s)$: velocidad angular en funcion de s.

$W_{csc}(s)$: velocidad angular considerado sin carga.

$\Delta W(s)$: variacion de velocidad angular en funcion de s.

De la Ecuación #80 se denota que:

Ecuación #80

$$W_{csc}(s) = \frac{V_T}{s * \left(\frac{J * R * s}{K} + \frac{f * R}{K} + K \right)}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #81 Variación de Velocidad Angular con carga expresada en función de s

$$\Delta W(s) = \frac{-Tl * R}{s * (J * R * s + f * R + K^2)}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #82 Ecuación de la Velocidad Angular con carga expresada en función de s

$$W(s) = \frac{V_T}{s * \left(\frac{J * R * s}{K} + \frac{f * R}{K} + K \right)} + \frac{-Tl * R}{s * (J * R * s + f * R + K^2)}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

2.4 OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES DE SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE MARCA HAMPDEN MODELO DM-300.

Parámetros del Motor.

Medición experimental de los parámetros del Motor DC Conexión Independiente.

Medición de Resistencias.

Se realizó un experimento de aplicar un voltaje < 6 VDC a los devanados de la armadura e interpolos conectados en serie midiendo la corriente de consumo en estos devanados. Aplicando Ley de ohm se obtiene el valor de resistencia total en los devanados mencionados.

Figura 24: Vista de dato de voltaje



Fuente: Los autores

Figura 25: Vista de dato de corriente



Fuente: Los autores

Ecuación #83 Ley de Ohm

$$R = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{5.734}{10.5} = 0.54\Omega$$

Fuente: Chapman S.J.

Constante de Fuerza Contra- Electromotriz K .

De acuerdo al modelo matemático del Motor DC, cuando el Motor DC se estabiliza, la corriente de la armadura es constante este fenómeno es cuando el Motor funciona a vacío, por lo que la constante de fuerza contra-electromotriz se puede calcular a partir de la Ecuación #35:

$$V_T = R * i(t) + E_a$$

$$V_T = (R * i) + E_a = (R * i) + K * \omega$$

Despejando K

Ecuación #84 Constante de Fuerza Contra-Electromotriz

$$\mathbb{K} = \frac{V_T - (R * i)}{\omega} = \frac{125 - (0.54 * 1.91)}{190.40} = 0.651 \frac{V}{rad/seg}$$

Fuente: Chapman S. J.

Luego de haber obtenido el valor de la constante de la fuerza contra-electromotriz \mathbb{K} , se determina directamente la constante torque electromagnético k , a través de la siguiente relación:

$$k = \mathbb{K} \left[\frac{N.m}{A}; \frac{V}{rad/seg} \right]$$

A estas constantes se les denominara con una letra designada K constante electromagnética de la máquina.

$$K = 0.651 \frac{V}{rad/seg}$$

Coefficiente de Rozamiento Viscoso.

Conociendo ya el modelo mecánico del Motor DC, cuando el Motor funciona en vacío con velocidad angular y corriente constante además no tiene aceleración angular (α) por ende es cero, de la Ecuación #27 se reduce a igualar los términos involucrados y se obtiene la siguiente Ecuación:

Ecuación #85

$$K * i(t) = f * \omega(t)$$

Ecuación #86 Coeficiente de Rozamiento Viscoso

$$f = \frac{K * i}{\omega} = \frac{0.651 * 1.91}{190.40} = 0.00653 \frac{N.m.sg}{rad}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Inductancia del Motor DC.

Para este desarrollo matemático el valor de la inductancia total, entre la armadura e interpolo L es igual a 0, porque no hay campo variable en los devanado de la armadura e interpolo ya que se aplica un voltaje DC constante, pero para el

desarrollo de las simulaciones en Matlab se considerará un valor de L de 0.01 Henrios.

$$L = 0.01 \text{ Henrios}$$

Inercia del Rotor del Motor DC.

Para este proceso se desmonto el rotor del Motor para realizar las mediciones correspondientes para obtener su valor de inercia, para este cálculo se considerara que el rotor es netamente cilíndrico y se reduce a la siguiente Ecuación #69:

Ecuación #87 Momento de Inercia del Rotor

$$J = \frac{1}{2} * M * r^2$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Siendo:

M: Masa del rotor en Kg.

r: Radio del rotor en m.

Figura 26: Medición del Diámetro del Rotor



Fuente: Los autores

Figura 27: Medición del peso del rotor



Fuente: Los autores

Peso del rotor es 18.18 kg.

El diámetro del rotor es 0.138 m y su radio es la mitad del diámetro su valor es 0.069 m. Estos valores se reemplazan en la Ecuación #87.

$$J = \frac{1}{2} * 18.18 * 0.069^2 = 0.0432 \text{ Kg. m}^2$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Resumen de los parámetros del Motor DC conexión independiente marca HAMPDEN Modelo DM-300 a utilizar.

Después de haber realizado los experimentos arriba mencionados para obtener los parámetros deseados más próximos al Motor DC estudiado, ya que, no se pudo obtener dichos valores por el fabricante.

Tabla 1. Datos Experimentales requeridos para la Simulación en Matlab

DATOS EXPERIMENTALES REQUERIDOS PARA SIMULACIÓN EN MATLAB	
R	0,54Ω
K	0,651 V/(Rad./Seg.)
f	0,00653 (N.m.Seg.)/Rad.
L	0.01 Henrios
J	0.0432 Kg.m²
Vt	125 VDC

Fuente: Los autores

**2.5 DATOS DE PLACA DEL MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE
MARCA HAMPDEN MODELO DM-300 DEL CUAL SE ESTA
REALIZANDO EL MODELO MATEMÁTICO.**

MARCA: HAMPDEN

MODELO: DM-300

VOLTAJE DE ARMADURA: 125 VDC

CORRIENTE DE ARMADURA: 23 AMP

VOLTAJE DE CAMPO: 125 VDC

CORRIENTE DE CAMPO: 0.6 AMP

VELOCIDAD: 1800 RPM

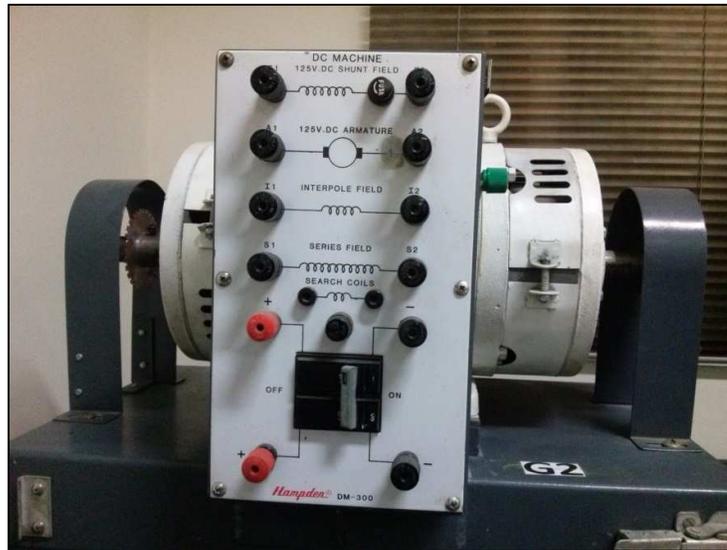
POTENCIA: 3 HP/ 2 KW

Figura 28: Placa de Motor DC Marca Hampden Modelo DM-300



Fuente: Los autores

Figura 29: Motor DC, Marca Hampden



Fuente: Los autores

$T_{\text{máx}}$. Aplicado al Motor estudiado se denomina como par de frenado.

Ecuación #88 Par de frenado.

$$T_{\text{max}} = \frac{5252 * Hp}{\text{rpm}}$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Siendo:

Hp: Potencia del Motor obtenido de dato de placa.

Rpm: Revoluciones por Minuto del Motor obtenido de dato de placa.

$$T_{\text{max}} = \frac{5252 * 3}{1800} = 8.75 \text{ lb. ft} = 11.86 \text{ N. m}$$

Fuente: Los autores

Torque inducido nominal es:

Ecuación #63 Torque inducido.

$$T_{\text{ind}} = K * ia$$

Fuente: Chapman S. J.

$$T_{\text{ind}} = 0.651 * 23 = 14.97 \text{ N. m}$$

Fuente: Los autores

2.6 CÁLCULOS MATEMÁTICOS DE MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE MARCA HAMPDEN MODELO DM-300 VARIOS EJEMPLOS.

2.6.1 Cálculo Matemático Motor DC a vacío, sin carga ($Tl = 0 \text{ N. m}$) conectada en el Eje del Motor DC.

$$Tl = 0 \text{ N. m}$$

$$V_T: 125 \text{ VDC}$$

$$R: 0.54\Omega$$

$$\omega_{0_{exp}}: 190.40 \text{ rad/sg}$$

$$Ia: 1.91 \text{ Amp}$$

$$J: 0.0432 \text{ Kg. m}^2$$

De la Ecuación #84 se obtiene:

$$K_{exp} = \frac{V_T - (R * Ia)}{\omega_{0_{exp}}} = \frac{125 - (0.54 * 1.91)}{190.40} = 0.651 \frac{\text{V}}{\text{rad/sg}}$$

De la Ecuación #86 se obtiene:

$$f_{exp} = \frac{K * Ia}{\omega_{0_{exp}}} = \frac{0.651 * 1.91}{190.40} = 0.00653 \frac{\text{N.m.sg}}{\text{rad}}$$

De la Ecuación #45 se obtiene:

$$\gamma = \frac{J * Ia}{K_{exp}} = \frac{0.0432 * 1.91}{0.651} = 0.0358$$

De la Ecuación #46 se obtiene:

$$\beta = \frac{f_{exp} * R}{K_{exp}} + K_{exp} = \frac{0.00653 * 0.54}{0.651} + 0.651 = 0.6564$$

$$\frac{\beta}{\gamma} = \frac{0.6564}{0.0358} = 18.33$$

De los valores obtenidos en los cálculos anteriores estos se reemplazan en la Ecuación #60.

$$\omega(t) = \frac{V_T}{\beta} * \left(1 - e^{-(\beta/\gamma)t}\right) = \frac{125}{0.6564} * (1 - e^{-18.33t}) = 190.43 * (1 - e^{-18.33t})$$

Ecuación #89 Velocidad Angular sin carga en función del tiempo.

$$\omega(t) = 190.43 - 190.43e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$\omega_0 = 190.43 \text{ rad/sg } \omega_{csc}$$

ω_{csc} : velocidad angular considerado sin carga.

Se reemplaza todos los valores hallados en la Ecuación #62:

$$i(t) = \frac{125}{0.54} - \left(\frac{0.651 * 125}{0.54 * 0.6564}\right) + \left(\frac{0.651 * 125}{0.54 * 0.6564} * e^{-18.33t}\right)$$

$$i(t) = 231.48 - 229.57 + 229.57e^{-18.33t}$$

Ecuación #90 Corriente de armadura sin carga en función del tiempo.

$$i(t) = 1.91 + 229.57e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$I_0 = 1.91 \text{ Amp } I_{a_{csc}}$$

$I_{a_{csc}}$: corriente de armadura considerado sin carga.

De la Ecuación #63 se obtiene:

$$T \text{ ind}(t) = K_{exp} * i(t)$$

$$T \text{ ind}(t) = 0.651 * (1.91 + 229.57e^{-18.33t})$$

Ecuación #91: Torque Inducido sin carga en función del tiempo.

$$T \text{ ind}(t) = 1.24 + 229.57e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$T \text{ ind}_0 = 1.24 \text{ N.m } T \text{ ind}_{csc}$$

$T \text{ ind}_{csc}$: torque inducid considerado sin carga.

Tabla 2. Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales

TABLA DE COMPARACIÓN DE DATOS MOTOR DC			
DATOS TEÓRICOS CALCULADOS		DATOS DE MOTOR DC HAMPDEN DM-300 (NOMINALES)	
TL (N.m)	0	TL (N.m)	11,86
Ia (Amp)	1,91	Ia (Amp)	23
w (Rad./ Seg.)	190,43	w (Rad./ Seg.)	188,5
T ind. (N.m)	1,24	T ind. (N.m)	14,97

Fuente: Los autores

Conclusión: los resultados obtenidos como Corriente de Armadura (I_a) 1.91 Amp, torque inducido (T_{ind}) 1.24 N.m y velocidad angular (w) 190.43 Rad/Seg. en los cálculos realizados de las ecuaciones planteadas del Motor DC sin carga externa conectada al eje indican que siempre hay una carga propia interna del Motor DC estudiado como es el torque de rozamiento y torque propio del momento de inercia del rotor que son de sentido opuesto al movimiento del sentido del torque inducido, comparando con la Tabla 2. Estos valores calculados son pequeños con respecto a los valores nominales.

2.6.2 Cálculo Matemático Motor DC con Carga Mecánica ($Tl = 4 \text{ N.m}$) conectada en el Eje del Motor DC.

Considerando una carga mecánica aplicada al eje de $Tl = 4 \text{ N.m}$

$$Tl = 4 \text{ N.m}$$

$$V_T: 125 \text{ VDC}$$

$$R: 0.54\Omega$$

$$\omega_{0_{exp}}: 190.40 \text{ rad/sg}$$

$$I_a: 1.91 \text{ Amp}$$

$$J: 0.0432 \text{ Kg.m}^2$$

De la Ecuación #81 se obtendrá solamente la variación de Velocidad Angular.

$$\Delta W(s) = \frac{-Tl * R}{s * (J * R * s + f_{exp} * R + K_{exp}^2)}$$

$$\Delta W(s) = \frac{-4 * 0.54}{s[(0.0432 * 0.54)s + (0.00653 * 0.54) + 0.652^2]}$$

$$\Delta W(s) = \frac{-2.16}{s(0.0233s + 0.4273)} = -2.16 * \left(\frac{1}{s(0.0233s + 0.4273)} \right)$$

De esta expresión se sacaran los valores de A y B.

$$\left(\frac{1}{s(0.0233s + 0.4273)} \right) = \left[\frac{A(0.0233s + 0.4273) + Bs}{s(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

Para hallar el valor de A de la Ecuación #52 se considera:

$$B * s = 0 \text{ siendo } s = 0$$

$$A(0.0233s + 0.4273) = 1$$

$$A(0.0233(0) + 0.4273) = 1$$

Donde $A(0.4273) = 1$

$$A = \frac{1}{0.4273} = 2.34$$

Para hallar el valor de B de la Ecuación #54 se considera:

$$A(0.0233s + 0.4273) = 0$$

$$0.0233s + 0.4273 = 0$$

$$0.0233s = -0.4273$$

$$s = \frac{-0.4273}{0.0233} = -18.33$$

Donde $Bs = 1$

$$B = \frac{1}{s} = \frac{1}{-18.33} = -0.0545$$

$$\Delta W(s) = -2.16 \left[\frac{A}{s} + \frac{B}{(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

$$\Delta W(s) = -2.16 \left[\frac{2.34}{s} + \frac{-0.0545}{(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

$$\Delta W(s) = \left[-2.16 * 2.34 * \left(\frac{1}{s} \right) \right] + \frac{(2.16 * 0.0545)}{0.0233} * \left(\frac{1}{\frac{0.0233s}{0.0233} + \frac{0.4273}{0.0233}} \right)$$

$$\Delta W(s) = -5.054 * \left(\frac{1}{s} \right) + 5.052 \left(\frac{1}{s + 18.33} \right)$$

Aplicando anti transformada de Laplace a esta expresión reducida de la Ecuación #81.

$$\mathcal{L}^{-1} \Delta W(s) = -5.054 * \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \right) + 5.052 \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s + 18.33} \right)$$

$$\Delta \omega(t) = -5.054 + 5.052 e^{-18.33t}$$

$$\omega(t) = \omega_{csc}(t) + \Delta \omega(t) = 190.43 + (-5.054 + 5.052 e^{-18.33t})$$

Ecuación #92 Velocidad Angular considerado con carga TL= 4 N.m en función del tiempo

$$\omega(t) = 185.37 + 5.052 e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$\omega_{ccc} = 185.37 \text{ rad/sg}$$

ω_{ccc} : velocidad angular considerando con carga TL = 4 N. m.

De la Ecuación #36 se obtiene:

$$i(t) = \frac{V_T - K_{exp} * \omega(t)}{R} = \frac{V_T}{R} - \frac{K_{exp}}{R} * \omega(t)$$

$$i(t) = \frac{125}{0.54} - \frac{0.651}{0.54} * (185.37 + 5.052 e^{-18.33t})$$

$$i(t) = 231.48 - [1.205 * (185.37 + 5.052 e^{-18.33t})]$$

$$i(t) = 231.48 - 223.37 - 6.087 e^{-18.33t}$$

Ecuación #93 Corriente de Armadura considerado con carga TL= 4 N.m en función del tiempo

$$i(t) = 7.63 - 6.087 e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$i_{ccc} = 7.63 \text{ Amp.}$$

i_{ccc} : corriente de armadura considerando con carga TL = 4 N. m.

De la Ecuación #63 se obtiene:

$$T \text{ ind}(t) = K_{exp} * i(t) = 0.651 * (7.63 - 6.087 e^{-18.33t})$$

Ecuación #94 Torque inducido considerado con carga $T_L = 4 \text{ N.m}$ en función del tiempo

$$T_{ind}(t) = 4.96 - 3.96e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$T_{ind_{ccc}} = 4.96 \text{ N.m}$$

$T_{ind_{ccc}}$: torque inducido considerando con carga.

Tabla 3. Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales

TABLA DE RESPUESTAS			
DATOS TEÓRICOS CALCULADOS		DATOS DE MOTOR DC HAMPDEN DM-300 (NOMINALES)	
TL (N.m)	4	TL (N.m)	11.86
Ia (Amp.)	7.63	Ia (Amp.)	23
w (Rad./ Seg.)	185.37	w (Rad./ Seg.)	188.5
T ind. (N.m)	4.96	T ind. (N.m)	14.97

Fuente: Los autores

Conclusión: los resultados obtenidos como corriente de armadura (I_a) 7.63 Amp, torque inducido (T_{ind}) 4.96 N.m y velocidad angular (w) 185.37 Rad./Seg. en los cálculos realizados de las ecuaciones planteadas del Motor DC con carga externa conectada al eje indican que **I_a** y **T_{ind}** . Aumentaron proporcionalmente a la carga aplicada al eje y que la **w** disminuyó, comparando los valores calculados con respecto a los nominales en la tabla 3. Los datos calculados numéricamente siguen dentro de las especificaciones de los datos nominales por ende el Motor DC estudiado funciona sin novedad.

2.6.3 Cálculo Matemático Motor DC con Carga Mecánica ($T_l = 5.9 \text{ N.m}$) conectada en el Eje del Motor DC.

Considerando una carga mecánica aplicada al eje de $T_l = 5.9 \text{ N.m}$

$$T_l = 5.9 \text{ N.m}$$

$$V_T: 125 \text{ VDC}$$

$$R: 0.54\Omega$$

$$\omega_{0_{exp}}: 190.40 \text{ rad/sg}$$

$$I_a: 1.91 \text{ Amp}$$

$$J: 0.0432 \text{ Kg.m}^2$$

De la Ecuación #81 se obtendrá solamente la Variación De Velocidad Angular.

$$\Delta W(s) = \frac{-Tl * R}{s * (J * R * s + f_{exp} * R + K_{exp}^2)}$$
$$\Delta W(s) = \frac{-5.9 * 0.54}{s[(0.0432 * 0.54)s + (0.00653 * 0.54) + 0.652^2]}$$
$$\Delta W(s) = \frac{-3.186}{s(0.0233s + 0.4273)} = -3.186 * \left(\frac{1}{s(0.0233s + 0.4273)} \right)$$

De esta expresión se sacaran los valores de A y B.

$$\left(\frac{1}{s(0.0233s + 0.4273)} \right) = \left[\frac{A(0.0233s + 0.4273) + Bs}{s(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

Para hallar el valor de A de la Ecuación #52 se considera:

$$B * s = 0 \text{ siendo } s = 0$$

$$A(0.0233s + 0.4273) = 1$$

$$A(0.0233(0) + 0.4273) = 1$$

Donde $A(0.4273) = 1$

$$A = \frac{1}{0.4273} = 2.34$$

Para hallar el valor de B de la Ecuación #54 se considera:

$$A(0.0233s + 0.4273) = 0$$

$$0.0233s + 0.4273 = 0$$

$$0.0233s = -0.4273$$

$$s = \frac{-0.4273}{0.0233} = -18.33$$

Donde $Bs = 1$

$$B = \frac{1}{s} = \frac{1}{-18.33} = -0.0545$$

$$\Delta W(s) = -3.186 \left[\frac{A}{s} + \frac{B}{(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

$$\Delta W(s) = -3.186 \left[\frac{2.34}{s} + \frac{-0.0545}{(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

$$\Delta W(s) = \left[-3.186 * 2.34 * \left(\frac{1}{s} \right) \right] + \frac{(3.186 * 0.0545)}{\mathbf{0.0233}} * \left(\frac{1}{\frac{0.0233s}{\mathbf{0.0233}} + \frac{0.4273}{\mathbf{0.0233}}} \right)$$

$$\Delta W(s) = -7.455 * \left(\frac{1}{s} \right) + 7.452 \left(\frac{1}{s + 18.33} \right)$$

Aplicando anti transformada de Laplace a esta expresión reducida de la Ecuación #81.

$$\mathcal{L}^{-1} \Delta W(s) = -7.455 * \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \right) + 7.452 \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s + 18.33} \right)$$

$$\Delta \omega(t) = -7.455 + 7.452 e^{-18.33t}$$

$$\omega(t) = \omega_{csc}(t) + \Delta \omega(t) = 190.43 + (-7.455 + 7.452 e^{-18.33t})$$

Ecuación #95 Velocidad Angular considerado con carga TL= 5.9 N.m en función del tiempo

$$\omega(t) = 182.97 + 7.452 e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$\omega_{ccc} = 182.97 \text{ rad/sg}$$

ω_{ccc} : velocidad angular considerando con carga.

De la Ecuación #36 se obtiene:

$$i(t) = \frac{V_T - K_{exp} * \omega(t)}{R} = \frac{V_T}{R} - \frac{K_{exp}}{R} * \omega(t)$$

$$i(t) = \frac{125}{0.54} - \frac{0.651}{0.54} * (182.97 + 7.452 e^{-18.33t})$$

$$i(t) = 231.48 - [1.205 * (182.97 + 7.452 e^{-18.33t})]$$

$$i(t) = 231.48 - 220.47 - 8.97 e^{-18.33t}$$

Ecuación #96 Corriente de Armadura considerado con carga TL= 5.9 N.m en función del tiempo

$$i(t) = 11.01 - 8.97 e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$i_{ccc} = 11.01 \text{ Amp.}$$

i_{ccc} : corriente de armadura considerando con carga.

De la Ecuación #63 se obtiene:

$$T_{ind}(t) = \exp * i(t) = 0.651 * (11.01 - 8.97e^{-18.33t})$$

Ecuación #97 Torque inducido considerado con carga TL = 5.9 N.m en función del tiempo

$$T_{ind}(t) = 7.16 - 5.83e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$T_{ind_{ccc}} = 7.16 \text{ N.m}$$

$T_{ind_{ccc}}$: torque inducido considerando con carga.

Tabla 4. Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales

TABLA DE RESPUESTAS			
DATOS TEÓRICOS CALCULADOS		DATOS DE MOTOR DC HAMPDEN DM-300 (NOMINALES)	
TL (N.m)	5.9	TL (N.m)	11.86
Ia (Amp.)	11.01	Ia (Amp.)	23
w (Rad./Seg.)	182.97	w (Rad./Seg.)	188.5
T ind. (N.m)	7.16	T ind. (N.m)	14.97

Fuente: Los autores

Conclusión: los resultados obtenidos como Corriente de Armadura (Ia) 11.01 Amp, Torque Inducido (T ind) 7.16 N.m y Velocidad Angular (w) 182.97 Rad/Seg. en los cálculos realizados de las ecuaciones planteadas del Motor DC con carga externa conectada al eje indican que Ia y Tind. Aumentaron proporcionalmente a la carga aplicada al eje y que la w disminuyó, comparando los valores calculados con respecto a los nominales en la tabla 4. Los datos calculados numéricamente siguen dentro de las especificaciones de los datos nominales por ende el Motor DC estudiado, funciona sin novedad.

2.6.4 Cálculo Matemático de Motor DC con sobre carga (Tl = 15 N.m) conectada en el eje del Motor por encima del rango de su valor nominal.

Considerando una carga mecánica aplicada al eje de Tl = 15 N.m

$$Tl = 15 \text{ N.m}$$

$V_T: 125 \text{ VDC}$

$R: 0.54\Omega$

$\omega_{0_{exp}}: 190.40 \text{ rad/sg}$

$I_a: 1.91 \text{ Amp}$

$J: 0.0432 \text{ Kg. m}^2$

De la Ecuación #81 se obtendrá solamente la variación de velocidad angular.

$$\Delta W(s) = \frac{-Tl * R}{s * (J * R * s + f_{exp} * R + K_{exp}^2)}$$
$$\Delta W(s) = \frac{-15 * 0.54}{s[(0.0432 * 0.54)s + (0.00653 * 0.54) + 0.652^2]}$$
$$\Delta W(s) = \frac{-8.1}{s(0.0233s + 0.4273)} = -8.1 * \left(\frac{1}{s(0.0233s + 0.4273)} \right)$$

De esta expresión se sacaran los valores de A y B.

$$\left(\frac{1}{s(0.0233s + 0.4273)} \right) = \left[\frac{A(0.0233s + 0.4273) + Bs}{s(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

Para hallar el valor de A de la Ecuación #52 se considera:

$$B * s = 0 \text{ siendo } s = 0$$

$$A(0.0233s + 0.4273) = 1$$

$$A(0.0233(0) + 0.4273) = 1$$

Donde $A(0.4273) = 1$

$$A = \frac{1}{0.4273} = 2.34$$

Para hallar el valor de B de la Ecuación #54 se considera:

$$A(0.0233s + 0.4273) = 0$$

$$0.0233s + 0.4273 = 0$$

$$0.0233s = -0.4273$$

$$s = \frac{-0.4273}{0.0233} = -18.33$$

Donde $Bs = 1$

$$B = \frac{1}{s} = \frac{1}{-18.33} = -0.0545$$

$$\Delta W(s) = -8.1 \left[\frac{A}{s} + \frac{B}{(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

$$\Delta W(s) = -8.1 \left[\frac{2.34}{s} + \frac{-0.0545}{(0.0233s + 0.4273)} \right]$$

$$\Delta W(s) = \left[-8.1 * 2.34 * \left(\frac{1}{s} \right) \right] + \frac{(8.1 * 0.0545)}{\mathbf{0.0233}} * \left(\frac{1}{\frac{0.0233s}{\mathbf{0.0233}} + \frac{0.4273}{\mathbf{0.0233}}} \right)$$

$$\Delta W(s) = -18.95 * \left(\frac{1}{s} \right) + 18.94 \left(\frac{1}{s + 18.33} \right)$$

Aplicando anti transformada de Laplace a esta expresión reducida de la Ecuación #81.

$$\mathcal{L}^{-1} \Delta W(s) = -18.95 * \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \right) + 18.94 \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s + 18.33} \right)$$

$$\Delta \omega(t) = -18.95 + 18.94 e^{-18.33t}$$

$$\omega(t) = \omega_{csc}(t) + \Delta \omega(t) = 190.43 + (-18.95 + 18.94 e^{-18.33t})$$

Ecuación #98 Velocidad Angular considerado con carga TL= 15 N.m en función del tiempo

$$\omega(t) = 171.48 + 18.94 e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$\omega_{ccc} = 171.48 \text{ rad/sg}$$

ω_{ccc} : velocidad angular considerando con carga.

De la Ecuación #36 se obtiene:

$$i(t) = \frac{V_T - K_{exp} * \omega(t)}{R} = \frac{V_T}{R} - \frac{K_{exp}}{R} * \omega(t)$$

$$i(t) = \frac{125}{0.54} - \frac{0.651}{0.54} * (171.48 + 18.94 e^{-18.33t})$$

$$i(t) = 231.48 - [1.205 * (171.48 + 18.94 e^{-18.33t})]$$

$$i(t) = 231.48 - 206.63 - 22.82 e^{-18.33t}$$

Ecuación #99 Corriente de Armadura considerado con carga TL= 15 N.m en función del tiempo

$$i(t) = 24.85 - 22.82 e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$i_{ccc} = 24.85 \text{ Amp.}$$

i_{ccc} : corriente de armadura considerando con carga.

De la Ecuación #63 se obtiene:

$$T \text{ ind}(t) = K_{exp} * i(t) = 0.651 * (24.85 - 22.82e^{-18.33t})$$

Ecuación #100 Torque Inducido considerado con carga TL = 5.9 N.m en función del tiempo

$$T \text{ ind}(t) = 16.17 - 14.85e^{-18.33t}$$

Fuente: Los autores

$$T \text{ ind}_{ccc} = 16.17 \text{ N.m}$$

$T \text{ ind}_{ccc}$: torque inducido considerando con carga.

Tabla 5. Comparación de datos calculados con respecto a los datos nominales

TABLA DE RESPUESTAS			
DATOS TEÓRICOS CALCULADOS		DATOS DE MOTOR DC HAMPDEN DM-300 (NOMINALES)	
TL (N.m)	15	TL (N.m)	11.86
Ia (Amp)	24.85	Ia (Amp)	23
w (Rad/Seg.)	171.48	w (Rad/Seg.)	188.5
T ind. (N.m)	16.17	T ind. (N.m)	14.97

Fuente: Los autores

Conclusión: los resultados obtenidos como corriente de armadura (**Ia**) 15 Amp, torque inducido (**T ind**) 16.17 N.m y velocidad angular (**w**) 171.48 Rad/Seg. en los cálculos realizados de las ecuaciones planteadas del Motor DC con carga externa conectada al eje indican que **Ia** y **Tind.** aumentaron proporcionalmente a la carga aplicada al eje considerablemente y la **w** disminuyó considerablemente, comparando los valores calculados con respecto a los nominales en la Tabla 5. Los datos calculados numéricamente están por encima de los valores nominales por ende el Motor DC estudiado, está sobrecargado ocasionando sobrecalentamiento y deterioro parcial o total de sus devanados del inducido e inductor.

CAPÍTULO III: SIMULACIONES DE ANÁLISIS MOTOR DC MARCA HAMPDEN MODELO DM-300 EN PROGRAMA DE CÁLCULO MATLAB.

3.1 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA MATLAB

La palabra Matlab viene de la abreviatura de MATrix LABoratory, que es su traducción sería "Laboratorio de Matrices", es un software matemático que ofrece un entorno de Desarrollo Integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (TOOLBOXES); y las de Simulink con los paquetes de bloques (BLOCKSETS).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL. Matpic (2015). Colección de videos tutoriales: Matlab. Recuperado de http://www.matpic.com/esp/videos_tutoriales/video_tutoriales.htmlMATLAB

3.2 INTRODUCCIÓN DE LA HERRAMIENTAS GUIDE Y SIMULINK

(Barragán Guerrero, 2008) Guide es un entorno de programación visual del programa Matlab para realizar y ejecutar programas que necesite ingreso continuo de datos.

Tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

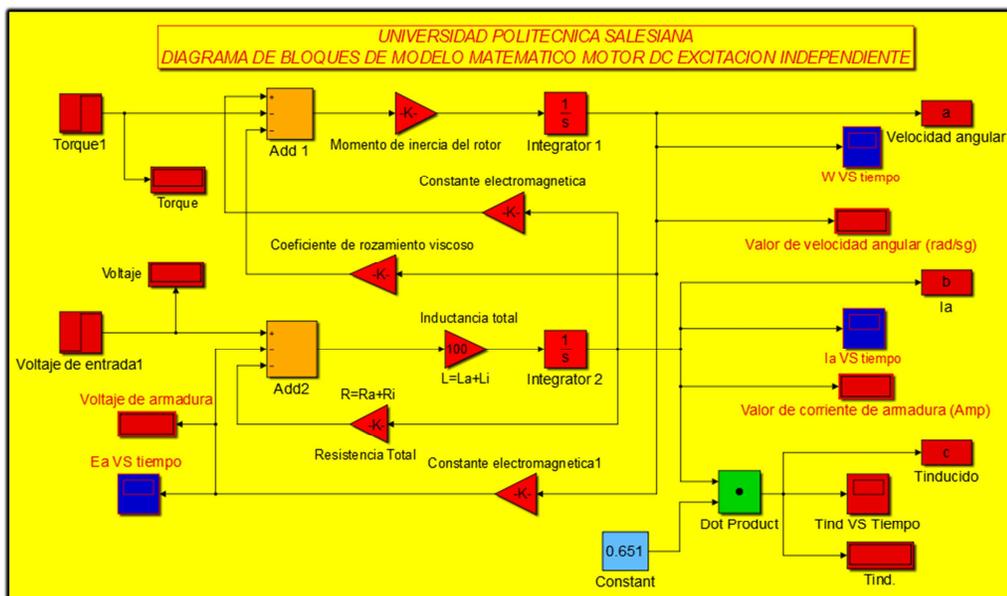
En la herramienta Guide se presentan las opciones de:

- Blank GUI
- GUI with Uicontrols
- Gui with Axes and Menu
- Modal Question Dialog
- Funcionamiento de una aplicación GUI

La aplicación GUIDE consta de dos archivos; **.m** y **.fig**. El archivo **.m** es el que contiene el código con la correspondiente de los botones de control de la interfaz y el archivo **.fig** contiene los elementos gráficos.

3.3 PRESENTACIÓN SOLO DE PANTALLAS EN SIMULINK Y PANTALLA FINAL EN GUIDE.

Figura 30: Captura de Programa Matlab herramienta Simulink



Fuente: Los autores

Figura 31: Captura de Programa Matlab herramienta Guide



Fuente: Los autores

3.4 ECUACIONES ELÉCTRICA, MECÁNICA Y TORQUE INDUCIDO PROGRAMADOS A SIMULINK.

3.4.1 ECUACIÓN ELÉCTRICA PROGRAMADA A SIMULINK.

De la Ecuación #22 Voltaje aplicado al Circuito de Excitación, se dejará planteado a su mínima expresión:

$$L * \frac{di(t)}{dt} = V_T - R * i(t) - Ea$$

Fuente: Chapman S. J.

De la Ecuación #23 Voltaje de Armadura se reemplazará en la Ecuación #22 Voltaje aplicado al Circuito de Excitación.

Ecuación #23 Voltaje de la Armadura

$$Ea: K * \omega(t)$$

Fuente: Chapman S. J.

$$L * \frac{di(t)}{dt} = V_T - (R * i(t)) - (K * \omega(t))$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} * [V_T - R * i(t) - K * \omega(t)]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Luego, se integrará ambos términos para obtener la Ecuación #101:

Ecuación #101

$$\int \frac{di(t)}{dt} = \int \frac{1}{L} * [V_T - R * i(t) - K * \omega(t)]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Ecuación #34 Igualdad de Unidades

$$K [V/ (rad/Seg.)]= k (N.m/A)$$

$$K = k = K$$

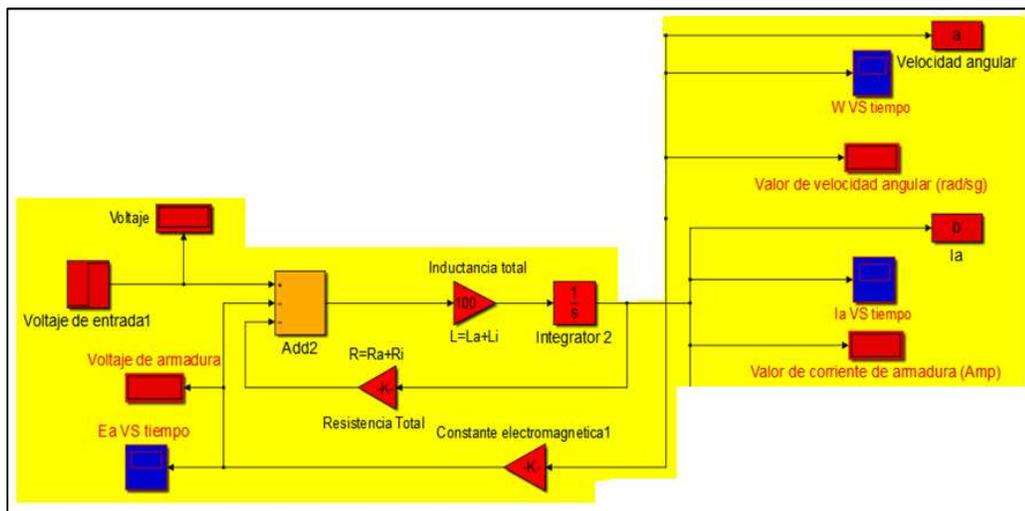
Fuente: Chapman S. J.

Ecuación #102 Ecuación Eléctrica Corriente de Armadura para codificar a Simulink

$$i(t) = \int \frac{1}{L} * [V_T - R * i(t) - K * \omega(t)]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Figura 32: Diagrama de Bloques de Ecuación Eléctrica Corriente de Armadura Programa Simulink



Fuente: Los autores

Se observa, en la figura 32, Diagrama de Bloques de Simulink como step (paso), sumador algebraico, gain, integrador, scope (gráfica de función), workspace y display donde cada uno de los bloques realizan una función determinada en la Ecuación Eléctrica.

El bloque Step Voltaje de entrada1, genera una señal tipo escalón donde se ingresa el valor de voltaje DC de los Terminales del Circuito de Excitación que es de 125 VDC, a su vez se encuentra un display conectado donde se observa el valor de la variable de entrada para este caso el voltaje de entrada 1 en el bloque step.

El bloque Sumador Add2 calcula la suma algebraica de todas sus entrada alimentadas al bloque para este caso son voltaje de entrada 1, resistencia total y constante electromagnética1, y el resultado de esta operación la muestra en su salida.

El bloque Gain Inductancia total se aloja el valor de la inductancia total del Motor DC estudiado que es ganancia constante donde se multiplica con el valor de entrada que es el resultado del bloque sumador Add2, el resultado de esta operación se lo transmite como salida de información hacia el bloque integrador Integrator2.

El bloque Gain Constante Electromagnética1 se aloja el valor K constante electromagnética característica interna del Motor DC estudiado, donde este valor es la ganancia constante donde se multiplica con el valor de entrada de corriente de armadura $i(t)$ (tiempo inicial: 0 Seg.; $i(0)= 0$ Amp) y la salida de este bloque su información entra al bloque sumador Add2 ya descrito, además esta operación su resultado es también el voltaje de la armadura donde se conecta un display para visualizar dicho valor y se conecta un bloque scope donde se visualizará la gráfica de voltaje de armadura en función del tiempo (opcional solo en Simulink).

El bloque Integrador Integrator2 su entrada es la salida del bloque gain Inductancia total, donde este valor se integrará como esta descrita en la Ecuación #84 y como resultado la corriente de armadura $i(t)$ en función del tiempo para un tiempo $t > 0$ Seg., y estos a su vez están conectados a un bloque scope para graficar la corriente de armadura en función del tiempo y a un bloque workspace Ia donde se aloja la variable $i(t)$ como información para la interface con Guide. Como se observa es un diagrama de bloques lazo cerrado con retroalimentación en los bloques gain de resistencia total y constante electromagnética. Ver figura 32.

3.4.2 ECUACIÓN MECÁNICA PROGRAMADA A SIMULINK.

De la Ecuación #65 Torque aplicando Carga Mecánica al Eje se la reescribe:

$$T = T_{ind} - T_{roz} - T_l$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Siendo T_l : Carga Mecánica Externa aplicada al Eje del Motor DC estudiado.

Ecuación #103

$$J * \frac{d\omega(t)}{dt} = K * i(t) - (f * \omega(t)) - T_l$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Luego, se integrará ambos términos para obtener la Ecuación #104:

Ecuación #104

$$\int \frac{d\omega(t)}{dt} = \int \frac{1}{J} * [K * i(t) - (f * \omega(t)) - T_l]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

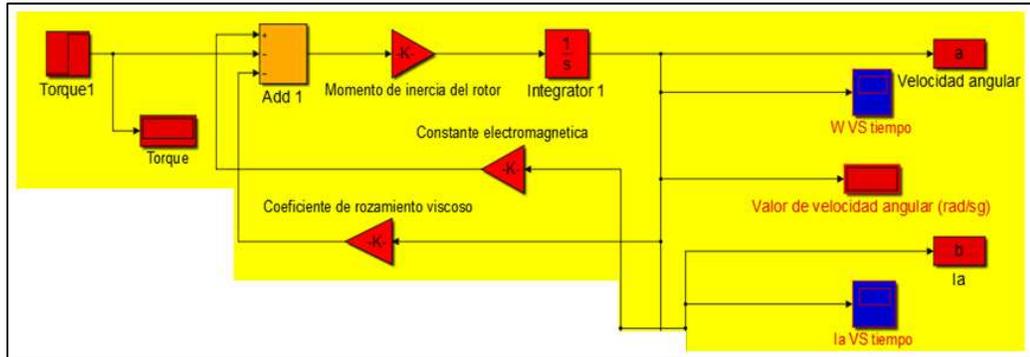
Ecuación #105 Ecuación Mecánica velocidad angular para codificar a Simulink

$$\omega(t) = \int \frac{1}{J} * [K * i(t) - (f * \omega(t)) - T_l]$$

Fuente: Maquinarias Eléctricas I (Ing. Otto Astudillo A.)

Figura 33: Diagrama de Bloques de Ecuación Mecánica Velocidad Angular

Programa Simulink



Fuente: Los autores

Como lo descrito en el caso anterior de la Ecuación 84, corriente de armadura, también se describirá los bloques involucrados en la Ecuación Mecánica de Velocidad Angular.

El Bloque Step Torque1 genera una señal tipo escalón donde se ingresa el valor de torque de carga externa aplicada al eje del Motor DC estudiado, a su vez se encuentra un display conectado donde se observa el valor de la variable de entrada para este caso el Torque1 en el bloque step que es desde cero en adelante.

El Bloque Sumador Add 1 calcula la suma algebraica de todas sus entrada alimentadas al bloque para este caso son Torque1, coeficiente de rozamiento viscoso y constante electromagnética, y el resultado de esta operación la muestra en su salida.

El Bloque Gain Momento de Inercia del rotor se aloja el valor de J (momento de inercia del rotor) del Motor DC estudiado que es ganancia constante donde se multiplica con el valor de entrada que es el resultado del bloque sumador Add 1, el resultado de esta operación se lo transmite como salida de información hacia el bloque integrador Integrator1.

El Bloque Gain Constante Electromagnética se aloja el valor K, constante electromagnética, característica interna del Motor DC estudiado donde este valor es la ganancia constante donde se multiplica con el valor de entrada de corriente de armadura $i(t)$ (tiempo inicial: 0 Seg.; $i(0)= 0$ Amp) y la salida de este bloque su información entra al bloque sumador Add 1 ya descrito.

El Bloque Integrador Integrator1 su entrada es la salida del Bloque Gain Momento de inercia del rotor, donde este valor se integrará como esta descrita en la Ecuación #87 y como resultado la velocidad angular $w(t)$ en función del tiempo para un tiempo $t > 0$ Seg., y estos a su vez están conectados a un bloque scope para graficar la corriente de armadura en función del tiempo y a un bloque workspace velocidad angular donde se aloja la variable $w(t)$ como información para la interface con Guide. Como se observa es un diagrama de bloques lazo cerrado con retroalimentación en los bloques gain de coeficiente de rozamiento viscoso y constante electromagnética. Ver figura 33.

3.4.3 ECUACIÓN TORQUE INDUCIDO PROGRAMADA A SIMULINK.

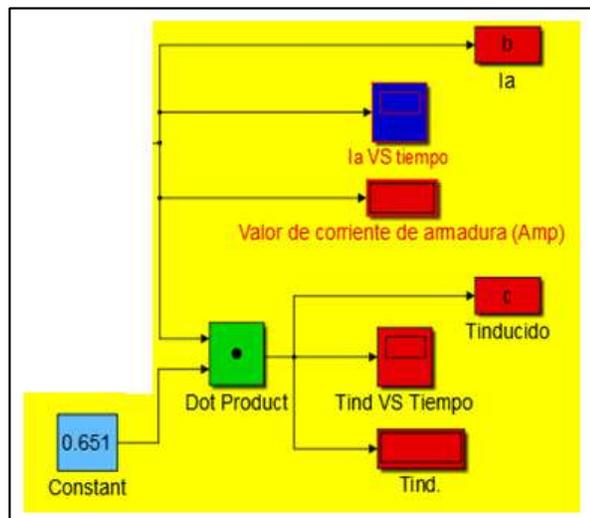
Ahora se expresará T_{ind} en la Ecuación #63.

Ecuación #63 Torque inducido para codificar en Simulink.

$$T_{ind} = K * i(t)$$

Fuente: Chapman S. J.

Figura 34: Diagrama de Bloques de Ecuación Torque Inducido Programa a Simulink



Fuente: Los autores

Para este proceso, se describirá cómo funcionan los bloques involucrados para obtener el valor del Torque Inducido en función del tiempo.

Tenemos el bloque Constant, que proporciona una señal de valor constante y para este caso se alojará el valor de K constante electromagnética como se observa en la figura 34, donde esa señal entrara al bloque Dot Product.

El bloque Dot Product, tiene dos entradas lo cual una es la constante electromagnética y la otra entrada es la corriente de armadura $i(t)$ donde internamente el bloque mencionado realizará la multiplicación de estas señales de entrada y el resultado es el valor del torque inducido en función del tiempo donde tenemos conectados un scope y display lo cual visualizaremos el valor calculado y su grafica en función del tiempo además de ingresar esa información en un workspace Inducido para la interface con Guide. Ver figura 34.

3.5 OBTENCIÓN DE DATOS DE SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE ESTUDIADO SIN CARGA, CON CARGA Y SOBRECARGA

3.5.1 Simulación Motor DC a vacío, sin carga ($Tl = 0$ N. m) conectada en el eje del Motor DC.

Para este caso, se simulará sin carga externa mecánica aplicada al eje del Motor DC conociéndose en el campo industrial como Motor DC funcionando a vacío.

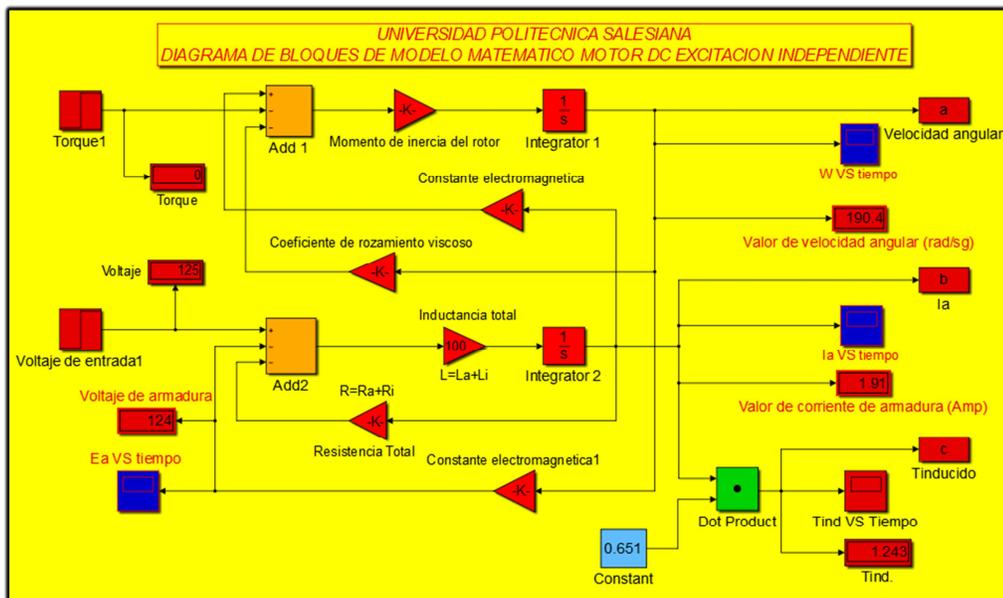
Figura 35: Captura de ingreso de datos en Guide para realizar Simulación Motor DC sin Carga
 $TL=0$ N.m

Ingresar Datos		
Voltaje de entrada	125	Voltios
Constante electromagnética	0.651	V/rad/sg
Coefficiente de rozamiento viscoso	0.00653	N.m.s/rad
Resistencia Total	0.54	Ohm
Inductancia Total	0.01	Henrios
Torque carga mecánica	0	N.m
Momento de inercia del rotor	0.0432	Kg.m ²
Ingreso de Carga	2	seg

Fuente: Los autores

En esta figura 35, se visualiza los datos ingresados experimentales requeridos para realizar la simulación del Motor DC sin carga, el torque de carga mecánica en este caso es 0 N.m y el ingreso de carga es 2 Seg. donde se refiere el tiempo donde se conectaría la carga externa mecánica al eje del Motor DC.

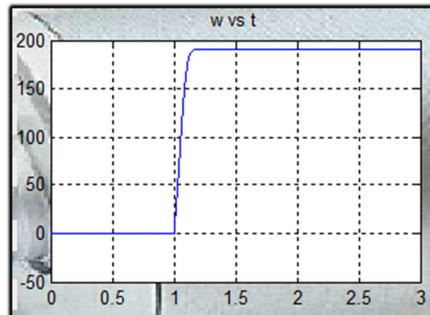
Figura 36: Captura de Programa Matlab con herramienta Simulink Motor DC sin carga $TL=0$ N.m



Fuente: Los autores

Para esta simulación, se visualiza en cada bloque display los valores simulados donde dos display muestra los datos de entrada (voltaje de entrada 1 es 125 VDC y torque es 0 N.m) y tres display muestra los datos de salidas (I_a , w y t . inducido) y un display de verificación de voltaje de armadura 124 VDC con el Motor DC a vacío, los datos de entrada fueron ingresados en la ventana de Guide (ver figura 35) para luego simular sus ecuaciones Eléctrica y Mecánica en Simulink dando como resultado la Corriente de Armadura es 1.91 Amp., Velocidad Angular de 190.4 rad/Seg. y Torque Inducido es 1.243 N.m. Además sus correspondientes scope designados donde se visualiza las gráficas en función del tiempo. Ver figura 36.

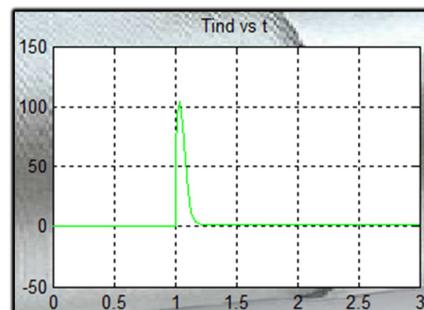
Figura 37: Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC sin carga.



Fuente: Los autores

Para la figura 37, se observa la gráfica de Velocidad Angular del Motor DC sin carga, específicamente del rotor su comportamiento desde 0 a 3Seg., donde el rotor comienza a girar progresivamente partiendo desde 0 rad/Seg. rompiendo su momento de inercia a partir 1 Seg. hasta llegar a la velocidad angular de 190.42 Rad/ Seg. estabilizado.

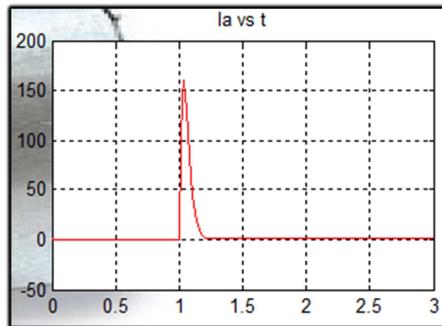
Figura 38: Captura de Gráfica en Guide de Torque Inducido sin carga.



Fuente: Los autores

Para la figura 38, se observa la gráfica de torque inducido, este torque inducido requiere un torque alto para romper el momento de inercia del rotor por ende a partir de 1 Seg. se visualiza el pico de arranque de torque inducido hasta llegar al punto máximo aproximado de 105 N.m y luego baja hasta llegar al valor de 1.24 N.m estabilizado, equilibrándose el torque inducido con respecto a los torques de carga propia del motor y rozamiento.

Figura 39: Captura de Gráfica en Guide de Corriente de Armadura sin carga.



Fuente: Los autores

En la figura 39, se visualiza el comportamiento de la corriente de armadura o de excitación, donde en el instante que se aplica el voltaje al circuito de excitación la corriente arranca desde 0 Amp., aumentando progresivamente, pasando por un valor de corriente necesaria para crear un campo magnético en sus devanados de armadura e interpolos y así al aumentar la corriente de excitación aumentaría el campo magnético, creándose par inducido con el campo magnético del devanado de campo, produciendo el movimiento angular para romper el momento de inercia del rotor (carga propia del Motor) hasta llegar al pico de corriente aproximado de 160 Amp. y luego bajar hasta estabilizarse a 1.91 Amp.

Figura 40: Captura de Datos de Salida en Guide

Velocidad Angular	190.4279	rad/seg
Corriente de Armadura	1.9101	Amp
Torque Inducido	1.2435	N.m

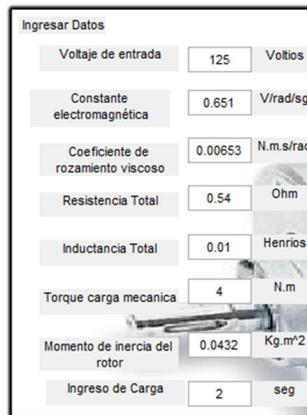
Fuente: Los autores

En la figura 40, se muestra los datos de salidas calculados para Motor DC estudiado a vacío (sin carga), además, estos valores están dentro de los valores nominales del Motor DC estudiado como se describió en el cap.2, ítem 2.6.1, pág.73.

3.5.2 Simulación Motor DC con carga ($Tl = 4 . m$) conectada en el Eje del Motor DC.

Para este caso se simulará con carga externa mecánica aplicada al eje del Motor DC conociéndose en el campo industrial como Motor DC funcionando con carga.

Figura 41: Captura de Ingreso de Datos en Guide para realizar simulación Motor DC con TL=4 N.m

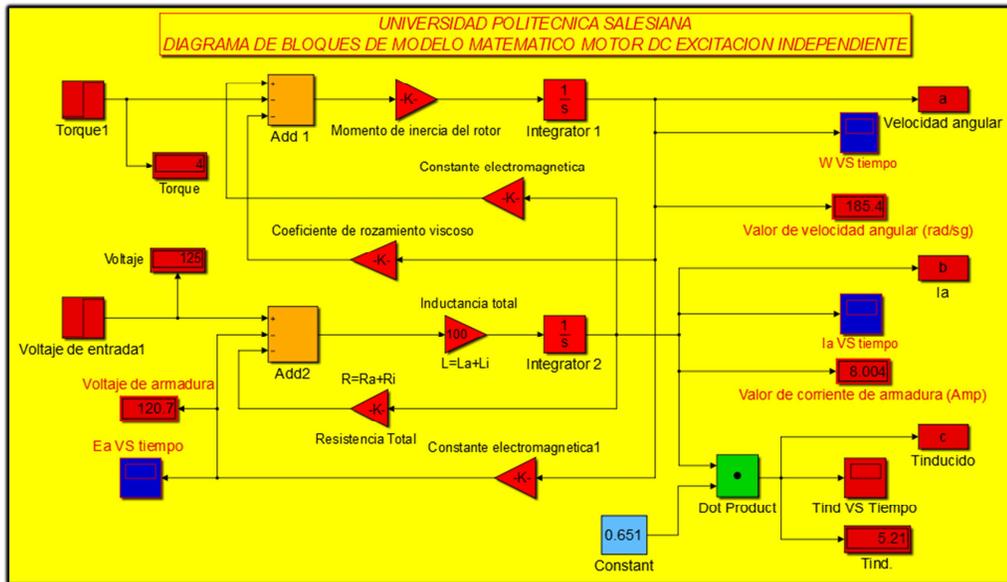


Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje de entrada	125	Voltios
Constante electromagnética	0.651	V/rad/sg
Coefficiente de rozamiento viscoso	0.00653	N.m.s/rad
Resistencia Total	0.54	Ohm
Inductancia Total	0.01	Henrios
Torque carga mecánica	4	N.m
Momento de inercia del rotor	0.0432	Kg.m ²
Ingreso de Carga	2	seg

Fuente: Los autores

En esta figura 41 se visualiza los datos ingresados experimentales requeridos para realizar la simulación del Motor DC con carga, el torque de carga mecánica en este caso es 4 N.m y el ingreso de carga es 2 Seg. donde se refiere el tiempo donde se conectaría la carga externa mecánica al Eje del Motor DC.

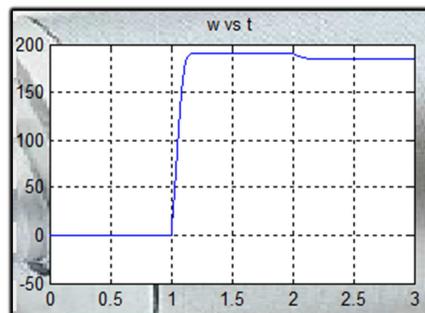
Figura 42: Captura de Programa Matlab con herramienta Simulink Motor DC con carga TL= 4 N.m



Fuente: Los autores

Para esta simulación, se visualiza en cada bloque display los valores simulados donde dos display muestra los datos de entrada (voltaje de entrada 1 es 125 VDC y torque es 4 N.m) y tres display muestra los datos de salidas (I_a , w y t . inducido) y un display de verificación de voltaje de armadura 120.7 VDC con el Motor DC con carga, los datos de entrada fueron ingresados en la ventana de Guide (ver figura 41) para luego simular sus Ecuaciones Eléctrica y Mecánica en Simulink dando como resultado la corriente de armadura es 8 Amp., velocidad angular de 185.4 Rad/ Seg. y torque inducido es 5.21 N.m. Además sus correspondientes scope designados donde se visualiza las gráficas en función del tiempo. Ver figura 42.

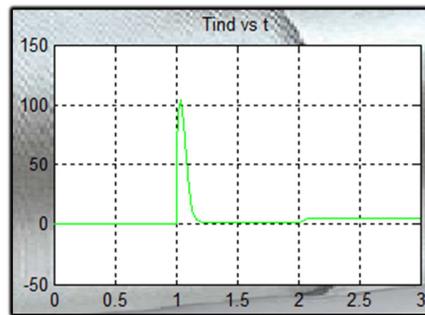
Figura 43: Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC con carga TL= 4 N.m.



Fuente: Los autores

Para la figura 43, se observa la gráfica de velocidad angular del Motor DC con carga ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora se observa que ingresa una carga externa mecánica al Eje del Motor DC a los 2 Seg. donde se tiene una caída por efecto de la carga donde caerá la velocidad angular de 190.42 a 185.4 Rad/ Seg. luego de esto queda estabilizado el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica la velocidad angular caerá inversamente a proporcional a la carga mecánica.

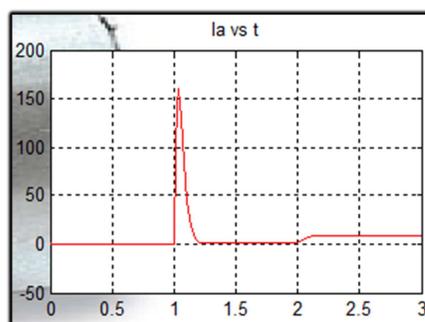
Figura 44: Captura de Gráfica en Guide de Torque Inducido con Carga TL= 4N.m.



Fuente: Los autores

Para la figura 44, se observa la gráfica de torque inducido del Motor DC con carga, ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora entra la carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg. donde hay una pendiente creciente de torque inducido de 1.24 a 5.21 N.m luego se estabiliza el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica aumenta el torque inducido proporcionalmente a la carga mecánica.

Figura 45: Captura de Gráfica en Guide de Corriente de Armadura con carga TL= 4 N.m.



Fuente: Los autores

En la figura 45, se observa la gráfica de corriente de armadura del Motor DC con carga, ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora entra la carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg. donde hay una pendiente creciente de corriente de armadura de 1.91 a 8 Amp luego se estabiliza el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica aumenta la corriente proporcionalmente a la carga mecánica.

Figura 46: Captura de Datos de Salida en Guide

Velocidad Angular	185.3732	rad/seg
Corriente de Armadura	8.0038	Amp
Torque Inducido	5.2105	N.m

Fuente: Los autores

En la figura 46, se muestra los datos de salidas calculados para Motor DC estudiado con carga externa mecánica aplicada al eje, además estos valores están dentro de los valores nominales del Motor DC estudiado, como se describió en el cap.2, ítem 2.6.2, pág.76.

3.5.3 Simulación Motor DC con carga ($Tl = 5.9 \text{ N.m}$) conectada en el eje del Motor DC.

Para este caso, se simulará con carga externa mecánica aplicada al eje del Motor DC conociéndose en el campo industrial como Motor DC funcionando con carga.

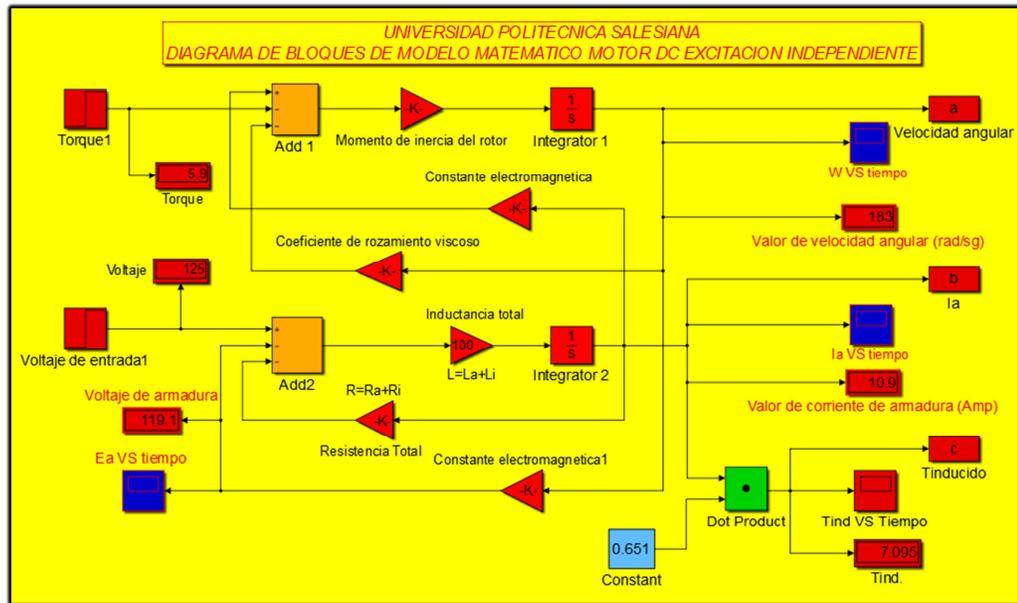
Figura 47: Captura de Ingreso de Datos en Guide para realizar simulación Motor DC con $Tl=5.9 \text{ N.m}$

Ingresar Datos		
Voltaje de entrada	125	Voltios
Constante electromagnética	0.651	V/rad/sg
Coefficiente de rozamiento viscoso	0.00653	N.m.s/rad
Resistencia Total	0.54	Ohm
Inductancia Total	0.01	Henrios
Torque carga mecanica	5.9	N.m
Momento de inercia del rotor	0.0432	Kg.m ²
Ingreso de Carga	2	seg

Fuente: Los autores

En esta figura 47, se visualiza los datos ingresados experimentales requeridos para realizar la simulación del Motor DC con carga, el torque de carga mecánica en este caso es 5.9 N.m y el ingreso de carga es 2 Seg., donde se refiere el tiempo donde se conectaría la carga externa mecánica al Eje del Motor DC.

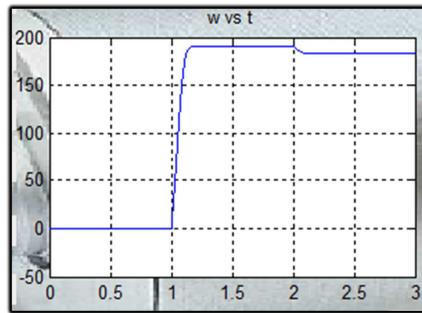
Figura 48: Captura de Programa Matlab con herramienta Simulink Motor DC con carga $T_L = 5.9$ N.m



Fuente: Los autores

Para esta simulación, se visualiza en cada bloque display los valores simulados donde dos display muestra los datos de entrada (voltaje de entrada 1 es 125 VDC y torque es 5.9 N.m) y tres display muestra los datos de salidas (I_a , w y t . inducido) y un display de verificación de voltaje de armadura 119.1 VDC con el Motor DC con carga, los datos de entrada fueron ingresados en la ventana de Guide (ver figura 47) para luego simular sus Ecuaciones Eléctrica y Mecánica en Simulink dando como resultado la corriente de armadura es 10.9 Amp, velocidad angular de 183 rad/ Seg. y torque inducido es 7.09 N.m. Además sus correspondientes scope designados donde se visualiza las gráficas en función del tiempo. Ver figura 48.

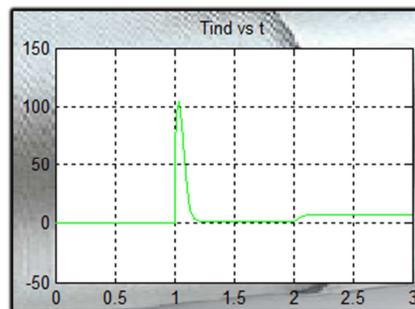
Figura 49: Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC con carga TL= 5.9 N.m.



Fuente: Los autores

En la figura 49, se observa la gráfica de velocidad angular del Motor DC con carga ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora se observa que ingresa una carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg., donde se tiene una caída por efecto de la carga donde caerá la velocidad angular de 190.42 a 183 Rad/ Seg. luego de esto queda estabilizado el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica la velocidad angular caerá inversamente a proporcional a la carga mecánica.

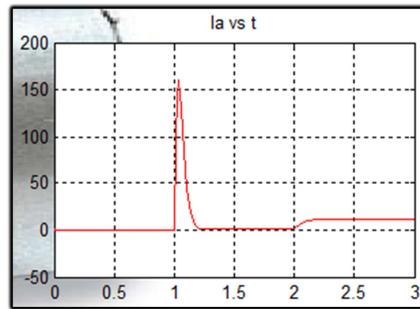
Figura 50: Captura de Gráfica en Guide de Torque Inducido con carga TL= 5.9N.m.



Fuente: Los autores

Para la figura 50, se observa la gráfica de torque inducido del Motor DC con carga, ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora entra la carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg., donde hay una pendiente creciente de torque inducido de 1.24 a 7.09 N.m luego se estabiliza el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica aumenta el torque inducido proporcionalmente a la carga mecánica.

Figura 51: Captura de Gráfica en Guide de Corriente de Armadura con carga TL= 5.9 N.m.



Fuente: Los autores

En la figura 51, se observa la gráfica de corriente de armadura del Motor DC con carga, ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora entra la carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg., donde hay una pendiente creciente de corriente de armadura de 1.91 a 10.9 Amp. luego se estabiliza el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica aumenta la corriente proporcionalmente a la carga mecánica.

Figura 52: Captura de Datos de Salida en Guide

Velocidad Angular	182.9722	rad/seg
Corriente de Armadura	10.8983	Amp
Torque Inducido	7.0948	N.m

Fuente: Los Autores

En la figura 52, se muestra los datos de salidas calculados para Motor DC estudiado con carga externa mecánica aplicada al eje, además estos valores están dentro de los valores nominales del Motor DC estudiado como se describió en el cap.2, ítem 2.6.3, pág.79.

3.5.4 Simulación Motor DC con Sobrecarga ($Tl = 15 \text{ N.m}$) conectada en el Eje del Motor DC.

Para este caso se simulará con sobrecarga externa mecánica aplicada al eje del Motor DC conociéndose en el campo industrial como Motor DC funcionando sobrecargado.

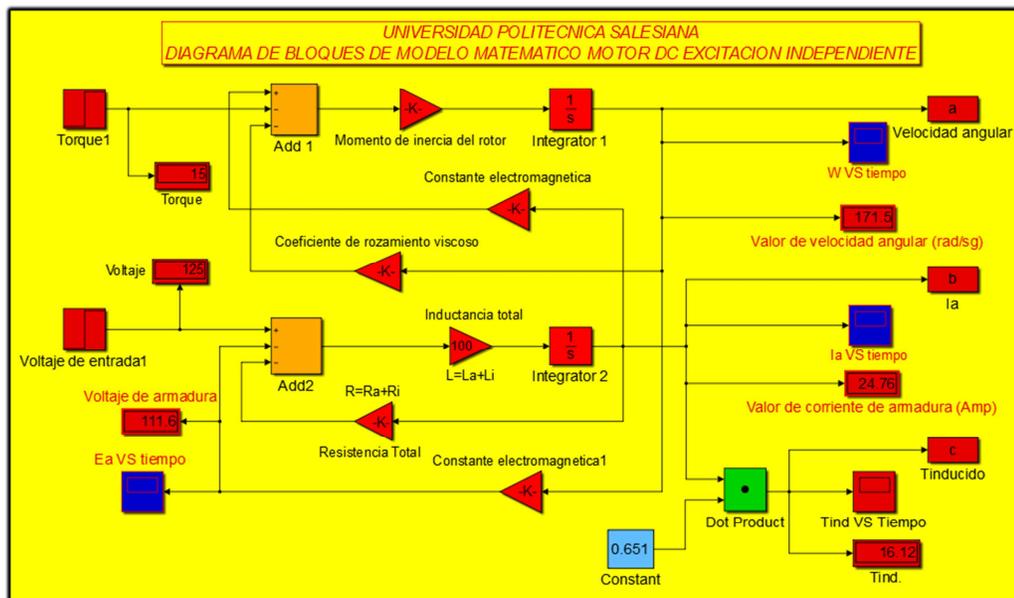
Figura 53: Captura de ingreso de datos en Guide para realizar simulación Motor DC con TL=15 N.m

Ingresar Datos		
Voltaje de entrada	125	Voltios
Constante electromagnética	0.651	V/rad/sg
Coefficiente de rozamiento viscoso	0.00653	N.m.s/rad
Resistencia Total	0.54	Ohm
Inductancia Total	0.01	Henrios
Torque carga mecánica	15	N.m
Momento de inercia del rotor	0.0432	Kg.m ²
Ingreso de Carga	2	seg

Fuente: Los autores

En esta figura 53, se visualiza los datos ingresados experimentales requeridos para realizar la simulación del Motor DC con sobrecarga, el torque de carga mecánica en este caso es 15 N.m y el ingreso de carga es 2 Seg. donde se refiere el tiempo donde se conectaría la carga externa mecánica al Eje del Motor DC.

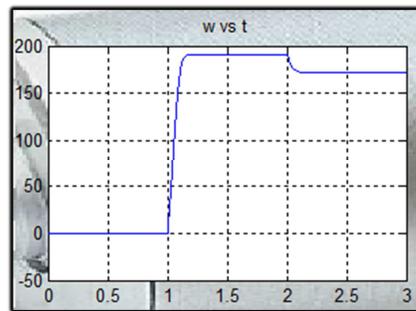
Figura 54: Captura de Programa Matlab con herramienta Simulink Motor DC con carga TL= 15 N.m



Fuente: Los autores

Para esta simulación, se visualiza en cada bloque display los valores simulados donde dos display muestra los datos de entrada (voltaje de entrada 1 es 125 VDC y torque es 15 N.m) y tres display muestra los datos de salidas (I_a , ω y t . inducido) y un display de verificación de voltaje de armadura 111.6 VDC con el Motor DC con carga, los datos de entrada fueron ingresados en la ventana de Guide (ver figura 53) para luego simular sus Ecuaciones Eléctrica y Mecánica en Simulink dando como resultado la corriente de armadura es 24.76 Amp., velocidad angular de 171.5 Rad/ Seg. y torque inducido es 16.12 N.m. Además sus correspondientes scope designados donde se visualiza las gráficas en función del tiempo. Ver figura 54.

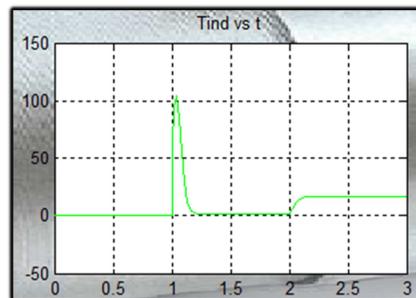
Figura 55: Captura Gráfica en Guide de la Velocidad Angular Motor DC con carga $T_L = 15$ N.m.



Fuente: Los autores

En la figura 55, se observa la gráfica de velocidad angular del Motor DC con carga ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora se observa que ingresa una carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg., donde se tiene una caída por efecto de la carga donde caerá la velocidad angular de 190.42 a 171.5 Rad/ Seg., luego de esto, queda estabilizado el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica la velocidad angular caerá inversamente a proporcional a la carga mecánica.

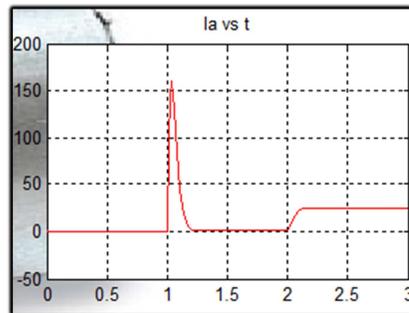
Figura 56: Captura de Gráfica en Guide de Torque Inducido con carga $T_L = 15$ N.m.



Fuente: Los autores

Para la figura 56, se observa la gráfica de torque inducido del Motor DC con carga, ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora entra la carga externa mecánica al Eje del Motor DC a los 2, Seg. donde hay una pendiente creciente de torque inducido de 1.24 a 16.12 N.m, luego se estabiliza el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica aumenta el torque inducido proporcionalmente a la carga mecánica.

Figura 57: Captura de Gráfica en Guide de Corriente de Armadura con carga TL= 15 N.m.



Fuente: Los autores

En la figura 57, se observa la gráfica de corriente de armadura del Motor DC con carga, ya que en el ítem 3.5.1 se analizó el comportamiento en vacío, ahora entra la carga externa mecánica al eje del Motor DC a los 2 Seg., donde hay una pendiente creciente de corriente de armadura de 1.91 a 24.76 Amp., luego se estabiliza el sistema con la carga conectada, esto se interpreta que al aumentar la carga mecánica aumenta la corriente proporcionalmente a la carga mecánica.

Figura 58: Captura de Datos de Salida en Guide

Velocidad Angular	171.4728	rad/seg
Corriente de Armadura	24.7615	Amp
Torque Inducido	16.1197	N.m

Fuente: Los autores

En la figura 58, se muestra los datos de salidas calculados para Motor DC estudiado con carga externa mecánica aplicada al eje, además estos valores están sobre los valores nominales del Motor DC estudiado como se describió en el cap.2, ítem 2.6.4, pág.82. Como resultado en la vida práctica el Motor DC estudiado comenzaría a calentar los devanados de campo, armadura, interpolos, carbones y colector de delgas

estarían por encima de su temperatura de funcionamiento nominal, dañando progresivamente el aislamiento de los devanados involucrados y colector de delgas por ende el Motor DC funciona erróneamente acortando el tiempo de vida útil y su velocidad angular comenzaría a oscilar.

Tabla 6: Datos de Simulación en Matlab del Motor DC Conexión Independiente

TABLA DE DATOS SIMULADOS DEL MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE														
Rt	Vt	Ia=IL	Ea (V)	n(rpm)	w	Pcu	P ent	P armadura	Peje (w)	Pfmc	Troz	T carga	T ind.	%n
(Ω)	(V)	(Amp)			(Rad./Seg.)	(w)	(w)	(w)		(w)	(N.m)	(N.m)	(N.m)	
0,54	125	1,9	124	1819,39	190,43	1,95	237,5	235,55	0	235,55	1,24	0	1,24	0,00
0,54	125	2,8	123,5	1812,32	189,69	4,23	350	345,77	104,3295	241,44	1,27	0,55	1,82	29,81
0,54	125	4,15	122,8	1802,39	188,65	9,30	518,75	509,45	264,11	245,34	1,30	1,4	2,70	50,91
0,54	125	4,39	122,6	1799,52	188,35	10,41	548,75	538,34	305,127	233,22	1,24	1,62	2,86	55,60
0,54	125	4,49	122,6	1798,85	188,28	10,89	561,25	550,36	320,076	230,29	1,22	1,7	2,92	57,03
0,54	125	4,64	122,5	1797,61	188,15	11,63	580	568,37	338,67	229,70	1,22	1,8	3,02	58,39
0,54	125	4,82	122,4	1796,37	188,02	12,55	602,5	589,95	357,238	232,72	1,24	1,9	3,13	59,29
0,54	125	4,95	122,3	1794,65	187,84	13,23	618,75	605,52	375,68	229,84	1,22	2	3,22	60,72
0,54	125	5,13	122,2	1794,08	187,78	14,21	641,25	627,04	394,338	232,70	1,24	2,1	3,34	61,50
0,54	125	5,27	122,2	1792,64	187,63	15,00	658,75	643,75	412,786	230,97	1,23	2,2	3,43	62,66
0,54	125	5,4	122,1	1791,59	187,52	15,75	675	659,25	431,296	227,96	1,22	2,3	3,52	63,90
0,54	125	5,47	122	1790,64	187,42	16,16	683,75	667,59	449,808	217,78	1,16	2,4	3,56	65,79
0,54	125	5,73	121,9	1789,11	187,26	17,73	716,25	698,52	468,15	230,37	1,23	2,5	3,73	65,36
0,54	125	5,81	121,9	1788,25	187,17	18,23	726,25	708,02	486,642	221,38	1,18	2,6	3,78	67,01
0,54	125	6,04	121,7	1786,62	187	19,70	755	735,30	504,9	230,40	1,23	2,7	3,93	66,87

0,54	125	6,18	121,7	1785,57	186,89	20,62	772,5	751,88	523,292	228,58	1,22	2,8	4,02	67,74
0,54	125	6,35	121,6	1784,14	186,74	21,77	793,75	771,98	541,546	230,43	1,23	2,9	4,13	68,23
0,54	125	6,49	121,5	1782,99	186,62	22,74	811,25	788,51	559,86	228,65	1,23	3	4,22	69,01
0,54	125	6,62	121,4	1781,75	186,49	23,67	827,5	803,83	578,119	225,72	1,21	3,1	4,31	69,86
0,54	125	6,79	121,3	1780,61	186,37	24,90	848,75	823,85	596,384	227,47	1,22	3,2	4,42	70,27
0,54	125	6,91	121,3	1779,65	186,27	25,78	863,75	837,97	614,691	223,28	1,20	3,3	4,49	71,17
0,54	125	7,13	121,2	1778,31	186,13	27,45	891,25	863,80	632,842	230,96	1,24	3,4	4,64	71,01
0,54	125	7,22	121,1	1777,17	186,01	28,15	902,5	874,35	651,035	223,32	1,20	3,5	4,70	72,14
0,54	125	7,39	121	1775,83	185,87	29,49	923,75	894,26	669,132	225,13	1,21	3,6	4,81	72,44
0,54	125	7,49	120,9	1774,78	185,76	30,29	936,25	905,96	687,312	218,64	1,18	3,7	4,88	73,41
0,54	125	7,72	120,8	1773,25	185,6	32,18	965	932,82	705,28	227,54	1,23	3,8	5,02	73,09
0,54	125	7,84	120,8	1772,96	185,57	33,19	980	946,81	723,723	223,09	1,20	3,9	5,10	73,85
0,54	125	8,03	120,7	1770,86	185,35	34,82	1003,75	968,93	741,4	227,53	1,23	4	5,22	73,86
0,54	125	8,18	120,6	1769,62	185,22	36,13	1022,5	986,37	759,402	226,97	1,23	4,1	5,32	74,27
0,54	125	8,3	120,5	1768,66	185,12	37,20	1037,5	1000,30	777,504	222,80	1,20	4,2	5,40	74,94
0,54	125	8,45	120,4	1767,42	184,99	38,56	1056,25	1017,69	795,457	222,24	1,20	4,3	5,50	75,31
0,54	125	8,68	120,3	1765,41	184,78	40,68	1085	1044,32	813,032	231,28	1,25	4,4	5,65	74,93
0,54	125	8,78	120,3	1765,03	184,74	41,63	1097,5	1055,87	831,33	224,54	1,22	4,5	5,72	75,75
0,54	125	8,97	120,2	1763,69	184,6	43,45	1121,25	1077,80	849,16	228,64	1,24	4,6	5,84	75,73

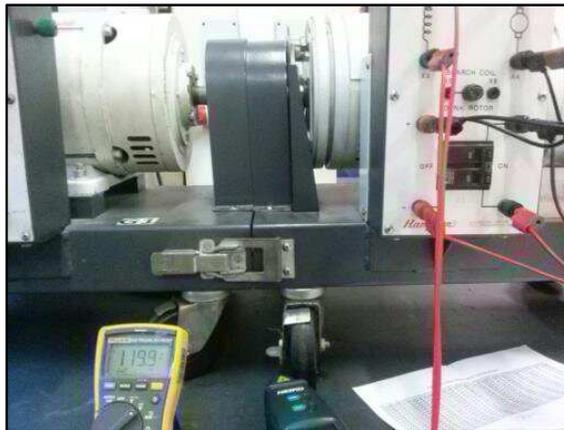
0,54	125	9,05	120,1	1762,74	184,5	44,23	1131,25	1087,02	867,15	219,87	1,19	4,7	5,89	76,65
0,54	125	9,23	120	1760,92	184,31	46,00	1153,75	1107,75	884,688	223,06	1,21	4,8	6,00	76,68
0,54	125	9,26	119,9	1760,35	184,25	46,30	1157,5	1111,20	902,825	208,37	1,13	4,9	6,03	78,00
0,54	125	9,53	119,8	1758,63	184,07	49,04	1191,25	1142,21	920,35	221,86	1,21	5	6,21	77,26
0,54	125	9,7	119,8	1757,39	183,94	50,81	1212,5	1161,69	938,094	223,60	1,22	5,1	6,31	77,37
0,54	125	9,83	119,7	1756,72	183,87	52,18	1228,75	1176,57	956,124	220,45	1,20	5,2	6,40	77,81
0,54	125	10	119,6	1755,29	183,72	54,00	1250	1196,00	973,716	222,28	1,21	5,3	6,51	77,90
0,54	125	10,11	119,5	1754,24	183,61	55,19	1263,75	1208,56	991,494	217,06	1,18	5,4	6,58	78,46
0,54	125	10,31	119,4	1752,90	183,47	57,40	1288,75	1231,35	1009,085	222,27	1,21	5,5	6,71	78,30
0,54	125	10,44	119,4	1751,66	183,34	58,86	1305	1246,14	1026,704	219,44	1,20	5,6	6,80	78,67
0,54	125	10,32	119,3	1750,22	183,19	57,51	1290	1232,49	1044,183	188,31	1,03	5,7	6,71	80,94
0,54	125	10,74	119,2	1749,27	183,09	62,29	1342,5	1280,21	1061,922	218,29	1,19	5,8	6,99	79,10
0,54	125	11,06	119,1	1748,50	183,01	66,05	1382,5	1316,45	1079,759	236,69	1,29	5,9	7,20	78,10

Fuente: Los autores

3.6 GALERÍA DE FOTOS DE LOS MOTORES DC EXISTENTE EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE DE GUAYAQUIL PARA LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación, en las Figuras siguientes se muestran los Motores DC que se encuentran en el Laboratorio de Motores y Generadores que se utilizaron para realizar las pruebas experimentales.

Figura 59: Medición de Voltaje de Armadura de Motor DC Hampden DM-300



Fuente: Los autores

Figura 60: Medición de RPM en el Eje del Motor DC Hampden DM-300



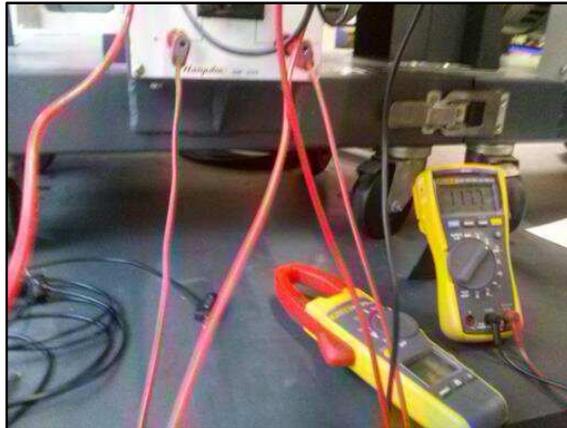
Fuente: Los autores

Figura 61: Medición Directa de Corriente y Voltaje DC en los Terminales del Banco de Prueba hacia el Devanado de Armadura con Interpolo



Fuente: Los autores

Figura 62: Medición del Voltaje DC de Generador hacia las Resistencias Eléctricas utilizadas como carga



Fuente: Los autores

Figura 63: Vista del Indicador Mecánico de Torque



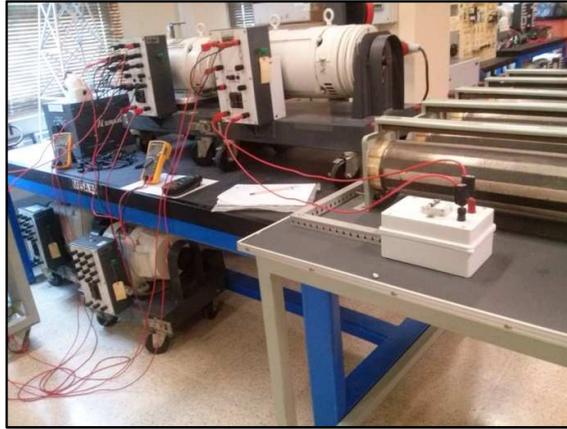
Fuente: Los autores

Figura 64: Vista General de Medición de Parámetros en Motor DC Marca Hampden DM-300 con carga



Fuente: Los autores

Figura 65: Vista General de Motor DC, Generador DC y Resistencias Eléctricas utilizadas como carga



Fuente: Los autores

Tabla 7: Datos Experimentales de Motor DC Conexión Independiente

TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE														
Ra (Ω)	Vt (v)	Ia=IL (Amp)	Ea (V)	n (rpm)	w (rad./seg.)	Pcu (w)	P ent (w)	P armad (w)	Peje (w)	Pfmc (w)	Troz (N.m)	T carga (N.m)	T ind. (N.m)	%n (Rend)
0,54	125	1,91	125	1819	190,39	1,97	238,75	236,78	0,00	236,78	1,24	0	1,24	0,00
0,54	125	2,98	124,8	1798	188,19	4,80	372,50	367,70	103,50	264,20	1,40	0,55	1,94	27,79
0,54	125	4,1	124,8	1790	187,35	9,08	512,50	503,42	262,29	241,13	1,29	1,4	2,67	51,18
0,54	125	4,7	124,5	1788	187,14	11,93	587,50	575,57	303,17	272,40	1,46	1,62	3,06	51,60
0,54	125	5,2	124,5	1779	186,20	14,60	650,00	635,40	316,54	318,86	1,71	1,7	3,39	48,70
0,54	125	5,2	124,3	1785	186,83	14,60	650,00	635,40	336,29	299,10	1,60	1,8	3,39	51,74
0,54	125	4,9	124,3	1800	188,40	12,97	612,50	599,53	357,96	241,57	1,28	1,9	3,19	58,44
0,54	125	6,1	124,2	1793	187,67	20,09	762,50	742,41	375,33	367,07	1,96	2	3,97	49,22
0,54	125	6,2	124,5	1788	187,14	20,76	775,00	754,24	393,00	361,24	1,93	2,1	4,04	50,71
0,54	125	5,9	124,2	1792	187,56	18,80	737,50	718,70	412,64	306,06	1,63	2,2	3,84	55,95
0,54	125	5,9	124,1	1799	188,30	18,80	737,50	718,70	433,08	285,62	1,52	2,3	3,84	58,72
0,54	125	6,9	124,1	1794	187,77	25,71	862,50	836,79	450,65	386,14	2,06	2,4	4,49	52,25
0,54	125	6,8	124,2	1799	188,30	24,97	850,00	825,03	470,74	354,29	1,88	2,5	4,43	55,38
0,54	125	7,2	124	1792	187,56	27,99	900,00	872,01	487,66	384,34	2,05	2,6	4,69	54,18

0,54	125	7,1	124	1799	188,30	27,22	887,50	860,28	508,40	351,88	1,87	2,7	4,62	57,28
0,54	125	6,2	124,4	1800	188,40	20,76	775,00	754,24	527,52	226,72	1,20	2,8	4,04	68,07
0,54	125	7,3	124	1800	188,40	28,78	912,50	883,72	546,36	337,36	1,79	2,9	4,75	59,88
0,54	125	7,6	123,9	1790	187,35	31,19	950,00	918,81	562,06	356,75	1,90	3	4,95	59,16
0,54	125	7	124,2	1800	188,40	26,46	875,00	848,54	584,04	264,50	1,40	3,1	4,56	66,75
0,54	125	7	124,1	1799	188,30	26,46	875,00	848,54	602,55	245,99	1,31	3,2	4,56	68,86
0,54	125	7,3	124	1789	187,25	28,78	912,50	883,72	617,92	265,80	1,42	3,3	4,75	67,72
0,54	125	7,6	124,1	1785	186,83	31,19	950,00	918,81	635,22	283,59	1,52	3,4	4,95	66,87
0,54	125	8,6	124	1785	186,83	39,94	1075,00	1035,06	653,91	381,16	2,04	3,5	5,60	60,83
0,54	125	7,7	123,9	1787	187,04	32,02	962,50	930,48	673,34	257,14	1,37	3,6	5,01	69,96
0,54	125	8,5	124	1783	186,62	39,02	1062,50	1023,49	690,50	332,99	1,78	3,7	5,53	64,99
0,54	125	9	123,8	1778	186,10	43,74	1125,00	1081,26	707,17	374,09	2,01	3,8	5,86	62,86
0,54	125	8,5	124,1	1783	186,62	39,02	1062,50	1023,49	727,82	295,66	1,58	3,9	5,53	68,50
0,54	125	9,2	124	1775	185,78	45,71	1150,00	1104,29	743,13	361,16	1,94	4	5,99	64,62
0,54	125	9,6	124,1	1774	185,68	49,77	1200,00	1150,23	761,28	388,95	2,09	4,1	6,25	63,44
0,54	125	9,3	123,8	1786	186,93	46,70	1162,50	1115,80	785,13	330,67	1,77	4,2	6,05	67,54
0,54	125	9,45	123,6	1778	186,10	48,22	1181,25	1133,03	800,22	332,81	1,79	4,3	6,15	67,74
0,54	125	10,2	123,5	1764	184,63	56,18	1275,00	1218,82	812,38	406,44	2,20	4,4	6,64	63,72

0,54	125	9,5	123,9	1779	186,20	48,74	1187,50	1138,77	837,91	300,86	1,62	4,5	6,18	70,56
0,54	125	10,6	123,5	1770	185,26	60,67	1325,00	1264,33	852,20	412,13	2,22	4,6	6,90	64,32
0,54	125	9,85	124	1790	187,35	52,39	1231,25	1178,86	880,56	298,30	1,59	4,7	6,41	71,52
0,54	125	11,16	123,8	1770	185,26	67,25	1395,00	1327,75	889,25	438,50	2,37	4,8	7,27	63,75
0,54	125	10,7	123,9	1770	185,26	61,82	1337,50	1275,68	907,77	367,90	1,99	4,9	6,97	67,87
0,54	125	11,17	123,8	1774	185,68	67,38	1396,25	1328,87	928,39	400,48	2,16	5	7,27	66,49
0,54	125	10,85	123,4	1768	185,05	63,57	1356,25	1292,68	943,76	348,92	1,89	5,1	7,06	69,59
0,54	125	11,96	123,3	1758	184,00	77,24	1495,00	1417,76	956,82	460,94	2,51	5,2	7,79	64,00
0,54	125	11	123,9	1769	185,16	65,34	1375,00	1309,66	981,32	328,34	1,77	5,3	7,16	71,37
0,54	125	12,1	122,9	1749	183,06	79,06	1512,50	1433,44	988,53	444,90	2,43	5,4	7,88	65,36
0,54	125	11,45	123,7	1776	185,89	70,80	1431,25	1360,45	1022,38	338,07	1,82	5,5	7,45	71,43
0,54	125	13	123	1740	182,12	91,26	1625,00	1533,74	1019,87	513,87	2,82	5,6	8,46	62,76
0,54	125	11,7	123	1770	185,26	73,92	1462,50	1388,58	1055,98	332,60	1,80	5,7	7,62	72,20
0,54	125	13,45	122,9	1768	185,05	97,69	1681,25	1583,56	1073,29	510,27	2,76	5,8	8,76	63,84
0,54	125	12,1	123	1764	184,63	79,06	1512,50	1433,44	1089,33	344,11	1,86	5,9	7,88	72,02

Fuente: Los autores

Tabla 8: Porcentaje de Error entre las Variables obtenidas en Simulink y las Variables obtenidas Experimentalmente

DATOS SIMULADOS			DATOS EXPERIMENTALES			PORCENTAJE DE ERROR		
Ia=IL (Amp)	T ind. (N.m)	w (Rad/Seg.)	Ia=IL (Amp)	T ind. (N.m)	w (Rad/Seg.)	Ia=IL (Amp)	T ind. (N.m)	w (Rad/Seg.)
1.9	1.24	190.43	1.91	1.24	190.39	0.53	0.00	0.02
2.8	1.82	189.69	2.98	1.94	188.19	6.43	6.59	0.79
4.15	2.70	188.65	4.1	2.67	187.35	1.20	1.11	0.69
4.39	2.86	188.35	4.7	3.06	187.14	7.06	6.99	0.64
4.49	2.92	188.28	5.2	3.39	186.2	15.81	16.10	1.10
4.64	3.02	188.15	5.2	3.39	186.83	12.07	12.25	0.70
4.82	3.13	188.02	4.9	3.19	188.4	1.66	1.92	0.20
4.95	3.22	187.84	6.1	3.97	187.67	23.23	23.29	0.09
5.13	3.34	187.78	6.2	4.04	187.14	20.86	20.96	0.34
5.27	3.43	187.63	5.9	3.84	187.56	11.95	11.95	0.04
5.4	3.52	187.52	5.9	3.84	188.3	9.26	9.09	0.42
5.47	3.56	187.42	6.9	4.49	187.77	26.14	26.12	0.19
5.73	3.73	187.26	6.8	4.43	188.3	18.67	18.77	0.56
5.81	3.78	187.17	7.2	4.69	187.56	23.92	24.07	0.21

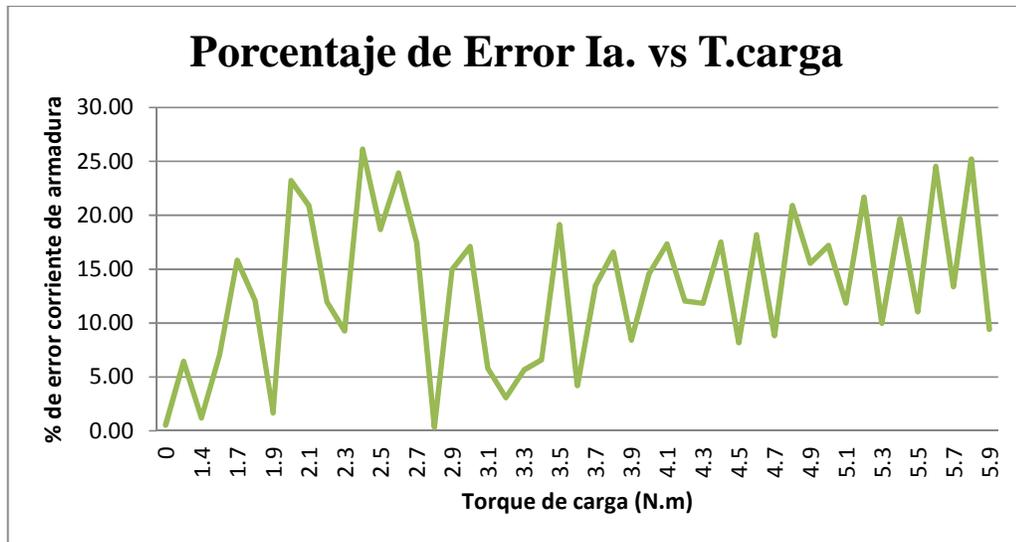
6.04	3.93	187
6.18	4.02	186.89
6.35	4.13	186.74
6.49	4.22	186.62
6.62	4.31	186.49
6.79	4.42	186.37
6.91	4.49	186.27
7.13	4.64	186.13
7.22	4.70	186.01
7.39	4.81	185.87
7.49	4.88	185.76
7.72	5.02	185.6
7.84	5.10	185.57
8.03	5.22	185.35
8.18	5.32	185.22
8.3	5.40	185.12

7.1	4.62	188.3
6.2	4.04	188.4
7.3	4.75	188.4
7.6	4.95	187.35
7	4.56	188.4
7	4.56	188.3
7.3	4.75	187.25
7.6	4.95	186.83
8.6	5.6	186.83
7.7	5.01	187.04
8.5	5.53	186.62
9	5.86	186.1
8.5	5.53	186.62
9.2	5.99	185.78
9.6	6.25	185.68
9.3	6.05	186.93

17.55	17.56	0.70
0.32	0.50	0.81
14.96	15.01	0.89
17.10	17.30	0.39
5.74	5.80	1.02
3.09	3.17	1.04
5.64	5.79	0.53
6.59	6.68	0.38
19.11	19.15	0.44
4.19	4.16	0.63
13.48	13.32	0.46
16.58	16.73	0.27
8.42	8.43	0.57
14.57	14.75	0.23
17.36	17.48	0.25
12.05	12.04	0.98

Fuente: Los autores

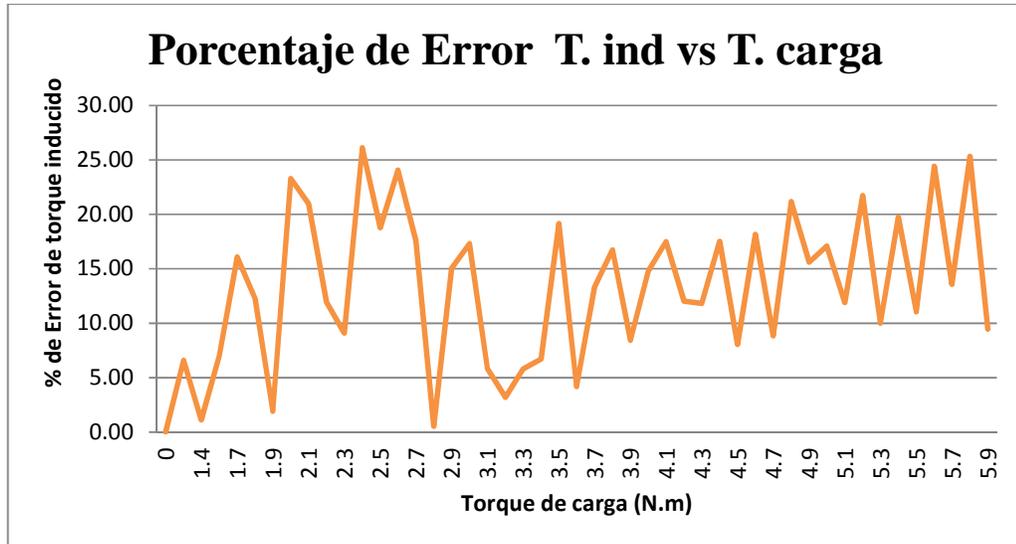
Figura 66: Gráfica de Porcentaje de error de Corriente de Armadura vs Torque de Carga



Fuente: Los autores

Como se puede apreciar en la figura 66, tenemos una gráfica distorsionada de % de error, donde la corriente de armadura su valor más alto de error es de 26.14% en un torque de carga de 2.4 N.m., debido a que sus valores simulados y experimentales tiene una diferencia de 1.43 Amp., siendo el experimental más alto que el simulado, esto es debido a que en el experimental se involucra el problema de no tener devanado de compensación esto produce distorsión y disminución del flujo principal ocasionando que la corriente de armadura varíe poco, pero considerable para el error, el punto mínimo de error es de 0.32% con torque de carga de 2.8 N.m., debido a que el % de error es pequeño, donde en ese instante la corriente de armadura simulado casi concuerda con el valor de corriente experimental, la corriente experimental va estar siempre variando en rangos pequeños ya por el efecto mencionado de distorsión y disminución del flujo principal.

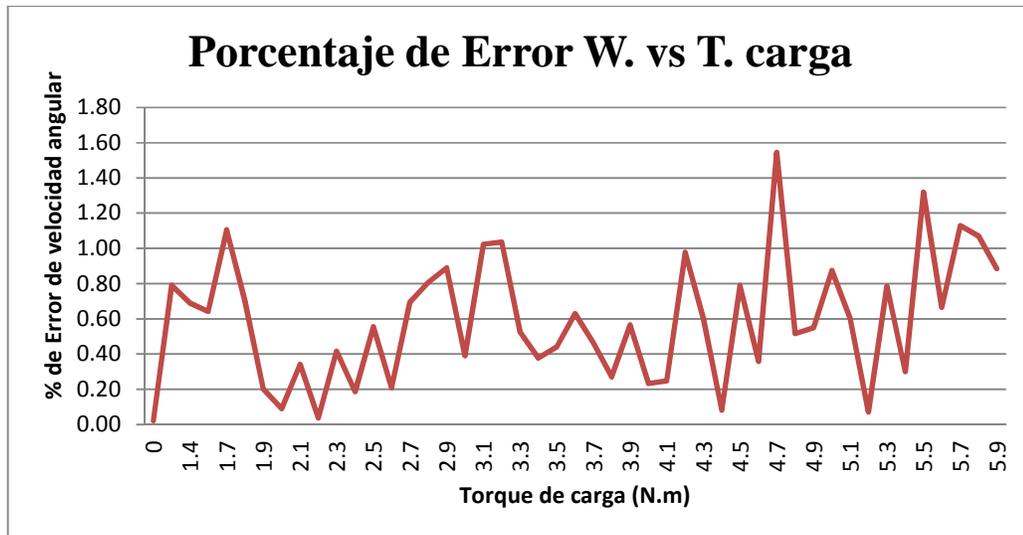
Figura 67: Gráfica de Porcentaje de error de Torque Inducido vs Torque de Carga



Fuente: Los autores

Como se puede apreciar en la figura 67, tenemos una gráfica distorsionada de % de error, donde el torque inducido su valor más alto de error es de 26.12% en un torque de carga de 2.4 N.m., debido a que sus valores simulados y experimentales tienen una diferencia de 0.93 N.m., siendo el experimental más alto que el simulado, esto es debido a que en el experimental se involucra el problema de no tener devanado de compensación esto produce distorsión y disminución del flujo principal ocasionando que el torque inducido varíe poco pero considerable para el error, el punto mínimo de error es de 0.5% con torque de carga de 2.8 N.m., debido a que el % de error es pequeño donde en ese instante que el torque inducido simulado casi concuerda con el valor de torque inducido experimental, el torque experimental va estar siempre variando en rangos pequeños ya por el efecto mencionado de distorsión y disminución del flujo principal, además que esta variable del torque inducido tiene relación directa con el valor de corriente de armadura donde también las gráficas # 66 y # 67 de % error, tienen el mismo comportamiento.

Figura 68: Gráfica de Porcentaje de error de Velocidad Angular vs Torque de Carga

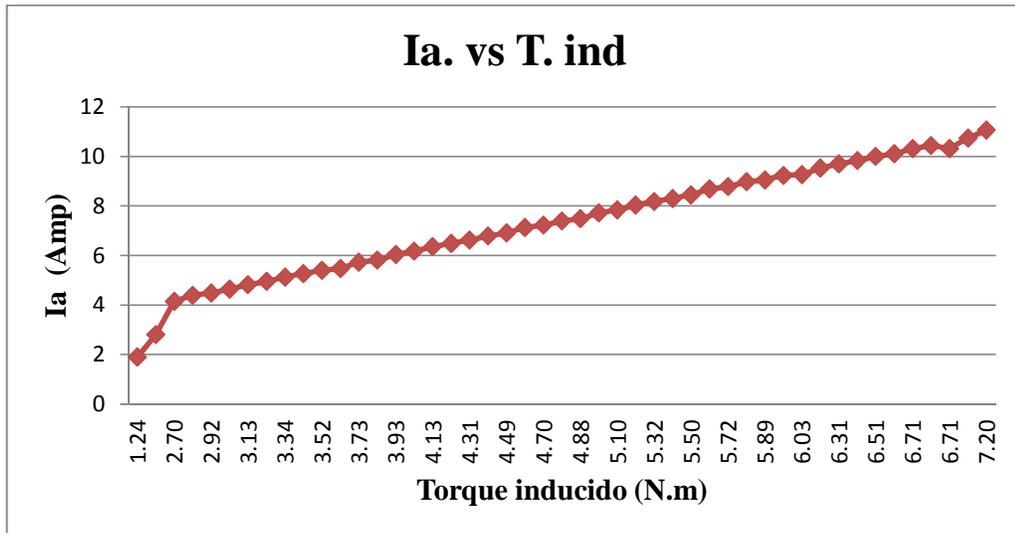


Fuente: Los autores

Como se puede apreciar en la figura 68, tenemos una gráfica distorsionada de % de error, donde la velocidad angular su valor más alto de error es de 1.54% en un torque de carga de 4.7 N.m., debido a que sus valores simulados y experimentales tienen una diferencia de 0.35 Rad/Seg., siendo el experimental más alto que el simulado esto es debido a que en el experimental se involucra el problema de no tener devanado de compensación esto produce distorsión y disminución del flujo principal ocasionando que la velocidad angular varíe poco, el punto mínimo de error es de 0.07% con torque de carga de 5.2 N.m., debido a que el % de error es pequeño donde en ese instante la velocidad angular simulada casi concuerda con el valor de velocidad angular experimental, la velocidad angular experimental va estar siempre variando en rangos pequeños ya por el efecto mencionado de distorsión y disminución del flujo principal.

3.7 GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DC MARCA HAMPDEN MODELO DM-300 CON VALORES OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES.

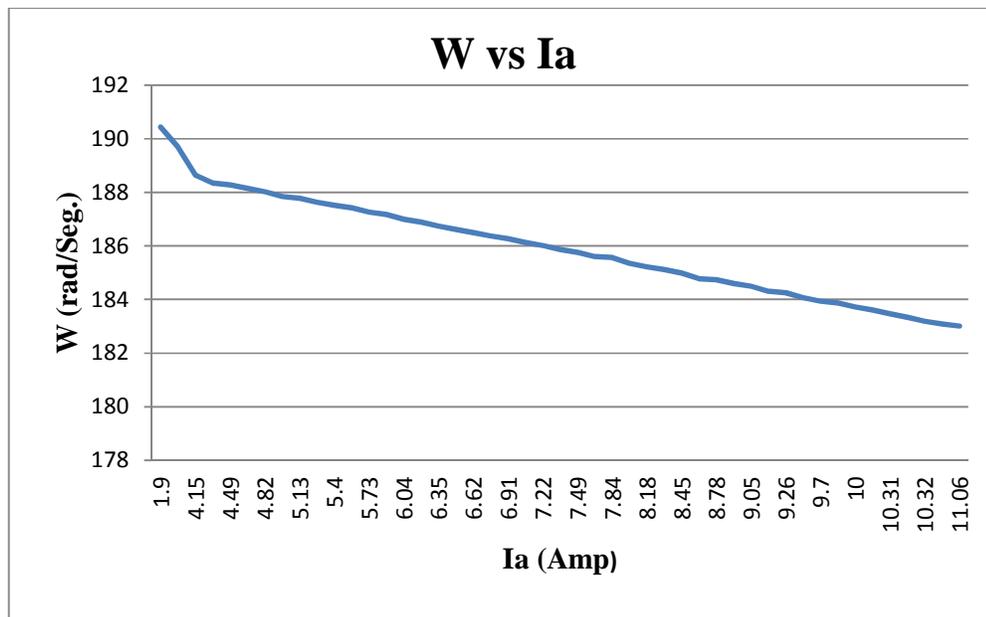
Figura 69: Curva de Corriente de Armadura versus Torque Inducido (datos simulados)



Fuente: Los autores

En la figura 69, se observa el comportamiento de la gráfica donde la corriente de armadura es directamente proporcional al torque inducido del Motor DC, eso quiere decir a medida que aumenta la carga mecánica aplicada al eje del Motor DC la corriente de armadura aumenta y así también aumenta el torque inducido, estas variables están estrechamente relacionada. Este comportamiento es lineal, porque Matlab, su herramienta Simulink, realiza la simulación lo más exacto posible sin pérdidas Eléctricas, Mecánicas y sin efecto de reacción de armadura y golpe inductivo.

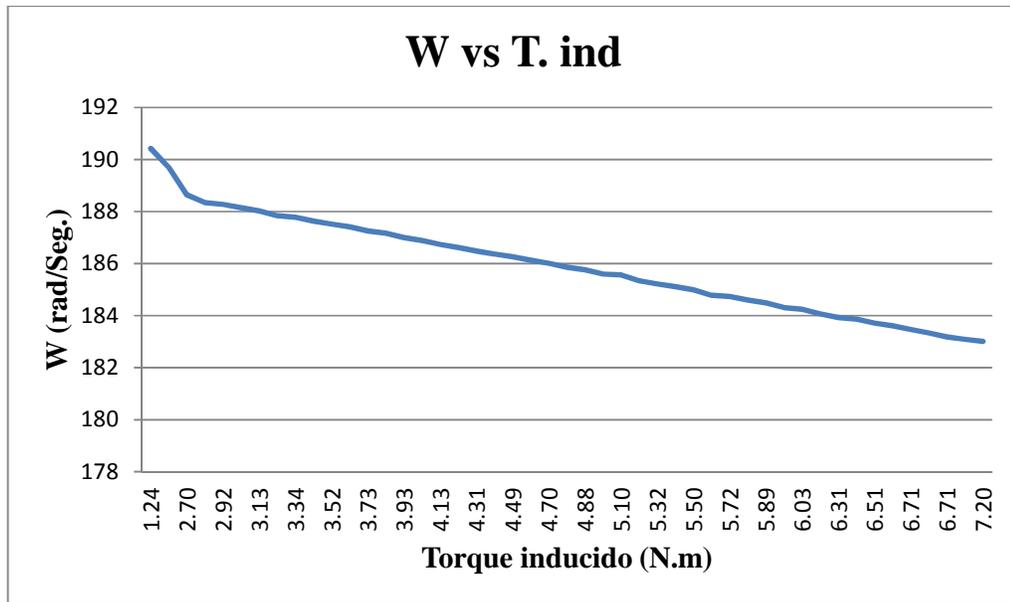
Figura 70: Curva de Velocidad Angular versus Corriente de Armadura (datos simulados)



Fuente: Los autores

De la figura 70, se observa el comportamiento de la gráfica donde la velocidad angular es inversamente proporcional a la corriente de armadura, a medida que la corriente de armadura aumenta por efecto de la carga aplicada al eje del Motor DC la velocidad angular bajará paulatinamente, además el comportamiento de la gráfica es lineal decreciente porque Matlab, su herramienta Simulink, realiza la simulación lo más exacto posible sin pérdidas en el cobre ni problemas de reacción de armadura ni golpe inductivo.

Figura 71: Curva de Velocidad Angular versus Torque Inducido (datos simulados)

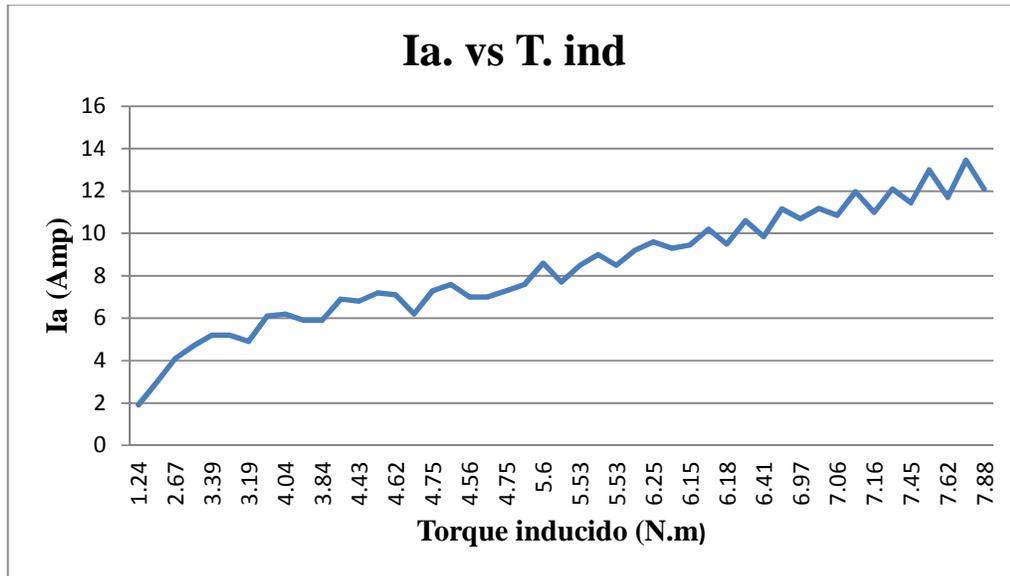


Fuente: Los autores

De la figura 71, se observa el comportamiento de la gráfica donde la velocidad angular es inversamente proporcional al torque inducido, a medida que el torque inducido aumenta por efecto de la carga aplicada al eje del Motor DC la velocidad angular bajará paulatinamente, además el comportamiento de la gráfica es lineal decreciente porque Matlab, su herramienta Simulink, realiza la simulación lo más exacto posible sin pérdidas en el cobre ni problemas de reacción de armadura ni golpe inductivo.

3.8 GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DC MARCA HAMPDEN MODELO DM-300 CON VALORES OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE GENERADORES Y MOTORES.

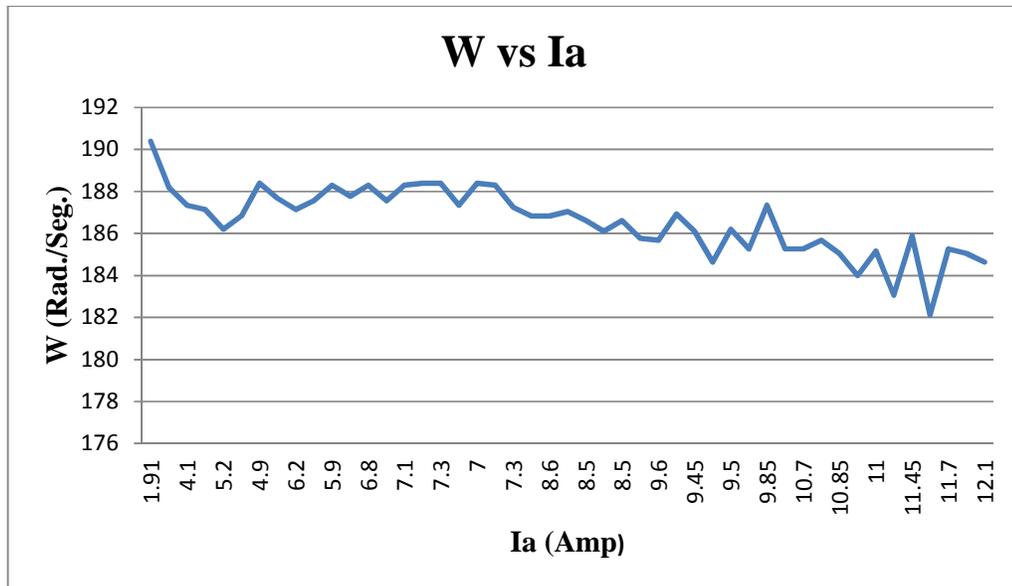
Figura 72: Curva de Corriente de Armadura versus Torque Inducido (datos experimentales)



Fuente: Los autores

En la figura 72, se observa el comportamiento de la gráfica donde la corriente de armadura es directamente proporcional al torque inducido del Motor DC, eso quiere decir a medida que aumenta la carga mecánica aplicada al eje del Motor DC la corriente de armadura aumenta y así también aumenta el torque inducido de manera inestable, estas variables están estrechamente relacionada. Cabe recalcar, que la pequeña distorsión de la gráfica gran parte es producido por la carga (resistencias variables eléctricas) que estaba conectada a un generador DC y este acoplado al Motor DC que no era estable del todo al momento de aumentar la carga, donde también están presente las pérdidas en el cobre, pérdidas mecánicas y golpe inductivo ya que no tiene devanado de compensación en el Motor DC.

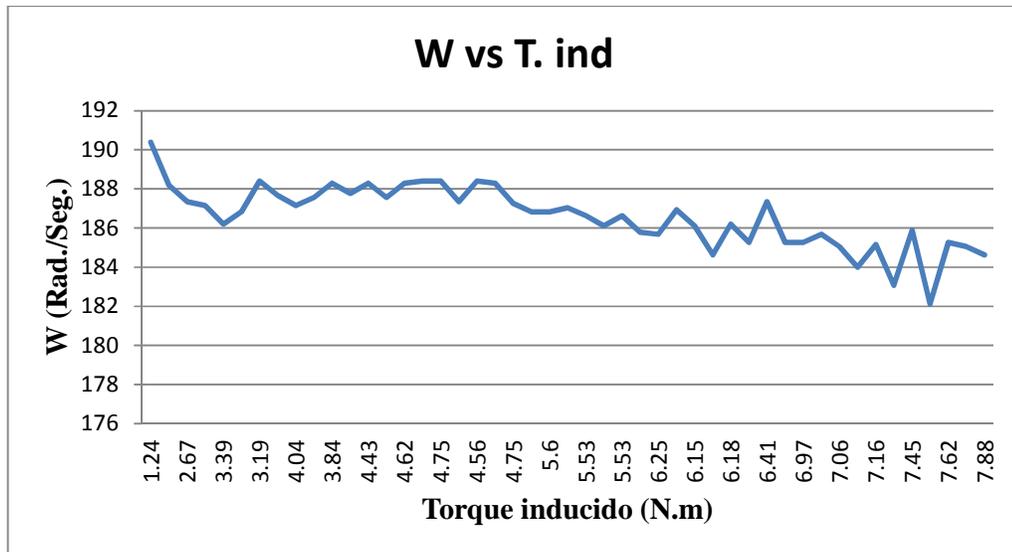
Figura 73: Curva de Velocidad Angular versus Corriente de Armadura (datos experimentales)



Fuente: Los autores

De la figura 73, se observa el comportamiento de la gráfica donde la velocidad angular es inversamente proporcional a la corriente de armadura, a medida que la corriente de armadura aumenta por efecto de la carga mecánica aplicada al eje del Motor DC la velocidad angular bajará paulatinamente de manera inestable, como ya se detalló en el comportamiento inestable de **Ia.** vs **T.ind** la inestabilidad de la gráfica analizada también se verá involucrada ya que tiene relación estrecha en sus variables.

Figura 74: Curva de Velocidad Angular versus Torque Inducido (datos experimentales)



Fuente: Los autores

De la figura 74, se observa el comportamiento de la gráfica donde la velocidad angular es inversamente proporcional al torque inducido, a medida que el torque inducido aumenta por efecto de la carga aplicada al eje del Motor DC, la velocidad angular bajará paulatinamente de manera inestable por la inestabilidad en el sistema ya detallado en los comportamientos **Ia vs T.ind** y **W vs Ia**, es muy importante saber sus comportamientos y problemas de conmutación en las condiciones de funcionamiento con carga.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES.-

Para obtener el Modelo Matemático de un Motor DC Conexión Independiente, es primordial tener claro los conocimientos teóricos de funcionamiento, comportamiento y sus problemas de conmutación de los Motores DC en general.

El Modelado Matemático del Motor DC estudiado nos lleva a realizar operaciones matemáticas como por ejemplo integral, Laplace etc.

Se obtuvieron de manera experimental los parámetros físicos del Motor Hampden Modelo DM-300, ya que, este fue la aproximación más real, los valores reales de fábrica no se pudieron obtener.

Con Matlab, sus herramientas Simulink y Guide, se realizó la programación del Motor DC estudiado con las Ecuaciones Eléctrica y Mecánica involucradas, para así, conocer su comportamiento antes diferentes condiciones de funcionamiento al vacío (sin carga), con carga y sobrecarga sin la necesidad de tener el sistema físicamente. Como resultado se obtuvieron datos de simulaciones y experimentales adquiriendo destrezas en el ámbito matemático y de programación utilizando la herramienta de Simulink y Guide, implementando un sistema de control en el devanado de armadura o devanado de excitación. Todo este proceso desarrollado es muy importante ya que tendremos un mejor concepto de funcionamiento con todas sus variables, problemas y soluciones del Motor DC estudiado.

4.2 RECOMENDACIONES.-

Es de vital importancia seguir realizando estos modelos matemáticos en diferentes aplicaciones de la carrera Ing. Eléctrica para aprender mucho mejor el manejo del programa Matlab.

Este modelo se recomienda aplicarse en todos los Motores DC y los de conexión compuesta, siendo mínimo cambio necesario para su aplicación, para poder encontrar una utilidad en resolver de manera apropiada daños dentro de los equipos y de obtener datos de comportamiento de las mismas con cargas variables para así corregir funcionamientos incorrectos que se puedan producir dentro de dichas máquinas y evitar eventos indeseados.

Desde otro punto de vista, se recomienda orientar a la persona en formación académica a adquirir más destreza y conocimientos en la programación de Matlab, utilizando gran parte de sus herramientas proporcionadas y aplicables para nuestro campo Técnico Profesional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barragán Guerrero, D. (05 de Mayo de 2008). Manual de Interfaz Gráfica de Usuario de Matlab. Ecuador.
- [2] Castillo, J. C. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. Editex.
- [3] Chapman S. J., (2000). *Máquinas Eléctricas*. Santa Fe: MC GRAW HILL.
- [4] Chapman S. J., (2000). *Máquinas Eléctricas*. México: McGrawHill.
- [5] Chapman S. J., (Tercera Edición). *Máquinas Eléctricas*. Australia: MC GRAW HILL.
- [6] Cherta, M. C. (2006). *Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas Tomo II Máquinas de Corriente Continua*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, s.a.
- [7] Fernández Cabanas, M., García Melero, M., Alonso Orcajo, G., Cano Rogríguez, J. M., & Solares Sariego, J. (1998). *Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [8] Kosow, I. (1991). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. México: Prentice-Hall.
- [9] Michael Liwischitz-Garik, D.-I. (1981). *Máquinas de Corriente Alterna*. México: Compañía Editorial Continental S.A.
- [10] RiLey, W. F., & Sturges, L. D. (1994). *Ingeniería Mecánica Dinámica*. Barcelona: Reverté .
- [11] Vilorio, J. R. (2009). *Automatismo Industriales*. Madrid: Paraninfo.
- [12] Gutiérrez, A. (1992). *Curso de metodos de investigación y elaboración de la monografía*. Quito: Serie didactica AG.
- [13] Mathwork Inc. *Manual Matlab. versión 7.0*, (Editorial Pearson, Estados Unidos, 2004)
- [14] Álvarez, M. *Folleto de problemas de Maquinaria Eléctrica I* (Espol, Guayaquil 2008).
- [15] Zill, D. *Ecuaciones Diferenciales con aplicaciones de modelado*, 6ta Ed. (Thomson, Virginia, 1997).
- [16] Fraile, M. J, *Máquinas Eléctricas*, 5ta Edición (Mc Graw Hill, España, 2003) .
- [17] Ing. Otto Astudillo A, *Maquinarias Eléctricas I*.