

ARRANQUE Y FRENADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE
CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE. CONTROL MEDIANTE PLC

ÁNGELA MARÍA ARIAS LOZANO
CARLOS AUGUSTO RANGEL SEQUEDA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2013

ARRANQUE Y FRENADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE
CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE. CONTROL MEDIANTE PLC.

ÁNGELA MARÍA ARIAS LOZANO
CARLOS AUGUSTO RANGEL SEQUEDA

TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTOR:
M.P.E. JULIO AUGUSTO GELVEZ FIGUEREDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A Dios por todas las bendiciones recibidas.

A mis abuelitos por ser los ángeles que iluminan mi camino.

A mis padres Carlos Arias y Gloria Lozano por su amor, por creer en mi y por su apoyo incondicional.

A mi hermano por tener la capacidad de hacerme feliz.

A todas mis tías, sus esposos y sus hijos por brindarme todo su amor y su apoyo durante toda mi vida.

A Silvia por ser la mejor de las amigas y mi apoyo constante.

A mis amigas y amigos por tanta colaboración y tanto cariño.

A María Camila y Ana lucía por su inmensa colaboración.

A Julio Gelvez por su buena disposición y sus enseñanzas.

A todos quienes hicieron posible este logro.

Gracias por hacer parte de mi vida

ÁNGELA MARÍA ARIAS LOZANO

DEDICATORIA

A Dios, por ayudarme siempre.

A mis padres, hermanos y demás familiares, por su confianza y apoyo constante.

A ti, por estar siempre a mi lado, por hacer esto posible.

A mis amigos gracias por ser parte de mi vida.

CARLOS AUGUSTO RANGEL SEQUEDA.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS	23
1.1 CONCEPTOS GENERALES.....	23
1.2 MODELO MATEMÁTICO MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.....	29
1.3 MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.	32
2. PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.....	36
2.1 GENERALIDADES.....	36
2.2 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE	37
2.2.1 Datos de placa y parámetros suministrados por el fabricante del motor de corriente continua de excitación independiente.	37
2.2.2 Medición de la resistencia de armadura (R_a).....	37
2.2.2.1 Resultados con el óhmetro digital.	37
2.2.2.2 Resultados de medición de R_a con la curva tensión-corriente.....	38
2.2.3 Medición de la inductancia de armadura (L_a)	39
2.2.3.1 Medición con el puente de impedancias	39
2.2.4 Obtención de la constante del motor (K_m)	39
2.2.4.1 Relación $e\omega_0$ de la máquina en vacío	40
2.2.5 Constante de fricción.....	41
2.2.6 Medición del momento de Inercia del motor de corriente continua de excitación independiente.....	42
2.2.7 Parámetros del devanado de excitación o campo del motor de corriente continua de excitación independiente.....	42
2.2.7.1 Resistencia devanado de campo.	42
2.2.7.2 Inductancia del devanado de excitación.....	42
2.2.8 Resumen de los parámetros medidos para el motor DC.....	43

2.3 MEDICION DE LOS PARÁMETROS EN EL MOTOR DE INDUCCION	44
2.3.1 Datos de placa y parámetros suministrados por el fabricante del motor de inducción.....	45
2.3.2 Medición de la resistencia en corriente continua del devanado inductor.....	45
2.3.3 Prueba de la máquina de inducción en vacío.....	46
2.3.4 Prueba de rotor bloqueado para el motor de inducción.....	47
2.3.5 Obtención de los parámetros del motor de inducción.	48
2.3.6 Obtención del momento de inercia del motor de inducción.....	51
2.3.7 Resumen de los parámetros medidos para el motor de inducción.....	51
3. MARCO TEÓRICO DE LOS FRENADOS DINÁMICO Y A CONTRACORRIENTE .	53
3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS EN ESTADO ESTABLE DE LOS MOTORES DE DC EXCITACIÓN INDEPENDIENTE Y DE INDUCCIÓN.....	56
3.1.1 Curva característica de un motor de corriente continua de excitación independiente.....	56
3.1.2 Curva característica de un motor de inducción	57
3.2 FRENADO ELÉCTRICO DE LOS MOTORES	58
3.2.1.Generalidades.....	58
3.3 FRENADO A CONTRACORRIENTE DEL MOTOR DC EXCITACIÓN INDEPENDIENTE	59
3.4 FRENADO DINÁMICO DEL MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE....	60
3.5 FRENADO A CONTRACORRIENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	61
3.6 FRENADO DINÁMICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	62
4. SIMULACIÓN DEL ARRANQUE Y FRENADO DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE Y UN MOTOR DE INDUCCIÓN.....	64
4.1 GENERALIDADES.....	64
4.2 MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE	65
4.2.1 Resultados de las simulaciones del arranque del motor DC de excitación independiente.....	66
4.2.2 Simulación del frenado a contracorriente del motor DC de excitación independiente.....	73

4.2.3 Simulación del frenado dinámico del motor DC de excitación independiente.	75
4.3 MOTOR DE INDUCCIÓN.....	76
4.3.1 Arranque estrella-triángulo del motor de inducción.	77
4.3.2 Frenado a contracorriente del motor de inducción.	78
4.3.3 Frenado dinámico del motor de inducción.....	79
5. DIAGRAMAS ELECTRICOS DE LOS CIRCUITOS IMPLEMENTADOS	81
5.1 CIRCUITO RECTIFICADORES DE ONDA COMPLETA (placa N° 1).....	81
5.2 CIRCUITO RECTIFICADOR PARA LA CORRIENTE DE CAMPO DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA (tarjeta N° 2)	84
5.3 RELES AUXILIARES (tarjeta N° 3)	86
5.4 TROCEADOR O CHOPPER CLASE A (Tarjeta N°4)	88
5.5 CIRCUITO DE CONTROL DE LA BASE DEL BJT DEL CHOPPER Y CIRCUITO DEL INTERRUPTOR ESTÁTICO PARA LA RESISTENCIA DE FRENADO DINÁMICO. (TARJETA N°5).....	89
5.6 SONDA HALL (TARJETA N°6)	92
5.7 ACCIONAMIENTOS DE MANDO AL MOTOR DC.....	94
5.8 ACCIONAMIENTOS DE MANDO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	96
6. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.	99
6.1 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.	99
6.2 MOTOR DE INDUCCIÓN.....	104
6.3 RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de placa del motor de corriente continua de excitación independiente.	37
Tabla 2. Mediciones óhmetro digital para la resistencia de armadura del motor DC. ...	38
Tabla 3. Medición de tensión- corriente para hallar la resistencia de armadura	38
Tabla 4. Medición de la impedancia de armadura con el puente de impedancias	39
Tabla 5. Resultados medición de la constante Km motor de excitación independiente.	41
Tabla 6. Para la constante de fricción	41
Tabla 7. Medición de la resistencia del devanado de excitación	42
Tabla 8. Medición de la inductancia de campo.	42
Tabla 9. Resumen de los parámetros medidos al motor DC	43
Tabla 10. Datos de placa del motor de inducción.	45
Tabla 11. Medición de la resistencia de los devanados del estator.	45
Tabla 12. Resultados del ensayo en vacío para el motor de inducción.	47
Tabla 13. Resultados del ensayo motor acoplado a velocidad de sincronismo	47
Tabla 14. Resultados prueba de rotor bloqueado para el motor de inducción	48
Tabla 15. Resultados para τ_m .(tiempo el cual se tarda en alcanzar el 36,8% de la velocidad que llevaba la máquina).	51
Tabla 16. Resumen de los parámetros del motor de inducción	52
Tabla 17. Signos de las diferentes magnitudes en los cuatro cuadrantes de funcionamiento de la máquina.	55
Tabla 18. Especificaciones técnicas del PLC TWIDO TWDLCAE40DRF	121
Tabla 19. PANEL POSTERIOR autómata programable SCHNEIDER (TWDLCAE40DRF).	122
Tabla 20. Características Generales del PLC.	123
Tabla 21. Especificaciones de las entradas del PLC.	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. partes constitutivas de la máquina.	24
Figura 2. Esquema de la máquina generalizada	26
Figura 3. Fuerza que experimentan los conductores del devanado de armadura en un motor de corriente continua.	29
Figura 4. Modelo de la máquina de excitación independiente como motor , b como generador	31
Figura 5. Relación entre las cantidades a b c y q_d0 .	33
Figura 6 Circuito para hallar la curva tensión-corriente de armadura	38
Figura 7. Montaje para encontrar la constante K_m	40
Figura 8. Modelo del motor de corriente continua excitación independiente con los parámetros más relevantes	44
Figura 9. Circuito para realizar el montaje para hallar los parámetros del motor de inducción.	46
Figura 10. Modelo del motor de inducción con los parámetros más relevantes incluidos	52
Figura 11. Funcionamiento de la máquina en cuatro cuadrantes	54
Figura 12. Características par-velocidad de un motor DC excitación independiente	56
Figura 13. Zonas de operación de una máquina de inducción.	58
Figura 14. Frenado a contracorriente del motor DC excitación independiente.	60
Figura 15. Frenado dinámico del motor DC de excitación independiente.	61
Figura 16. Proceso de frenado a contracorriente del motor de inducción.	62
Figura 17. Proceso de frenado dinámico de un motor de inducción	63
Figura 18. Rampa de arranque para el motor DC de excitación independiente.	67
Figura 19. Simulación del motor DC de excitación independiente en condición de vacío	68
Figura 20. Simulación del arranque del motor DC de excitación independiente bajo carga proporcional a la velocidad	69

Figura 21. Simulación del arranque motor DC de excitación independiente a par constante.	70
Figura 22. Simulación del arranque directo motor DC de excitación independiente.	71
Figura 23. Resultados obtenidos en la simulación del frenado a contracorriente para el motor DC de excitación independiente.	74
Figura 24. Resultados de la simulación del frenado dinámico del motor DC de excitación independiente.	76
Figura 25. simulación del arranque y- Δ del motor de inducción.	78
Figura 26. Resultados de la simulación del frenado a contracorriente para el motor de inducción.	79
Figura 27. Resultados de la simulación del frenado dinámico para el motor de inducción	80
Figura 28. Fotografía de la Tarjeta N°1 del módulo de arranque y frenado	81
Figura 29a. rectificador de onda completa salida 14[V]	82
Figura 29b. Rectificador de onda completa salida 5 [Vdc]	82
Figura 29d. Rectificador Dual de onda completa salida 12 y -12 [Vdc]	83
Figura 29e. Rectificador de onda completa salida 12 [84
Figura 30. Fotografía de la tarjeta N°2 circuito rectificador para la corriente de campo del motor de corriente continua.	85
Figura 31. Circuito rectificador para la corriente de campo del motor de corriente continua.	86
Figura 32. Tarjeta N°3 del gabinete.	87
Figura 33. Funcionamiento de los relés auxiliares	87
Figura 34. Fotografía de la tarjeta n°4 del gabinete de arranque y frenado de motores	88
Figura 35. Circuito eléctrico del troceador o chopper clase A.	89
Figura 37. Circuito de control de la base del BJT del chopper	90
Figura 38. Circuito de control de la base del BJT del interruptor estático para el frenado dinámico	91
Figura 39. Fotografía tarjeta N°6, Sonda Hall.	92

Figura 40. Sonda Hall	93
Figura 41. Accionamientos para el control del campo, polaridad de la armadura, frenado dinámico y el frenado a contra corriente del motor de corriente continua de excitación independiente	94
Figura 42. Circuito implementado para el control de las bobinas de los contactores	96
Figura 43. Circuito para controlar el arranque y los frenados del motor de inducción	96
Figura 44. Circuito de conexión de las bobinas de los contactores al plc twido.	98
Figura 45. Forma de onda de la corriente durante el arranque del motor de corriente continua de excitación independiente	100
Figura 46. Forma de onda de la corriente durante el frenado dinámico del motor de corriente continua de excitación independiente.	101
Figura 47. Forma de onda de la corriente durante el frenado a contracorriente del motor de corriente continua de excitación independiente.	102
Figura 48. Forma de onda de la corriente durante el arranque estrella-triángulo del motor de inducción.	104
Figura 49. Forma de onda de la corriente durante el frenado dinámico del motor de inducción.	105
Figura 50. Forma de onda de la corriente durante el frenado dinámico del motor de inducción	106
Figura 51. Vista lateral izquierda del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua	113
Figura 52. Vista frontal del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua.	114
Figura 53. Vista lateral derecha del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua	116
Figura 54. Placa lateral derecha del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente.	117
Figura 55. Base autómatas compactas Schneider (TWDLCAE40DRF).	120
Figura 56. COMPONENTES AUTOMATA Schneider (TWDLCAE40DRF).	120
Figura 57. Panel posterior autómatas programables schneider (TWDLCAE40DRF).	122

Figura 58. Módulo de expansión	123
Figura 59. Procedimiento para el uso del módulo.	126

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: MANUAL MÓDULO DE ARRANQUE Y FRENADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE CONTINUA.....	113
ANEXO B: PROGRAMA PARA EL MÓDULO DE ARRANQUE Y FRENADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE. PLC TWIDO	130

RESUMEN

TITULO:

ARRANQUE Y FRENADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE CONTINUA EXCITACIÓN INDEPENDIENTE. CONTROL MEDIANTE PLC.*

AUTORES:

ARIAS Lozano Ángela María
RANGEL Sequeda Carlos Augusto. **

PALABRAS CLAVES:

Arranque, frenados dinámico y a contracorriente, motor de inducción, motor DC de excitación independiente, PLC.

DESCRIPCIÓN:

La finalidad de éste trabajo es reutilizar los elementos de mando y contactores existentes en un gabinete *** para implementar el arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente, así como el diseño de los circuitos de potencia y control de los mismos, para ayudar a afianzar los conocimientos adquiridos por el estudiante que cursa la materia accionamientos eléctricos, incluida en el plan de estudios de ingeniería eléctrica de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Como primera etapa del proyecto se realizaron los estudios teóricos correspondientes a las máquinas eléctricas rotativas así como los estudios pertinentes al arranque y frenado dinámico y a contracorriente del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente. De los cuales, se obtuvieron los modelos matemáticos de los motores a emplearse en el presente trabajo de grado.

Una vez definidos los modelos matemáticos a implementar, se procedió a la medición de los parámetros del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente, para así por medio de la herramienta MATLAB/SIMULINK simular el comportamiento de estas máquinas rotativas frente a los accionamientos de arranque y frenado dinámico y a contracorriente.

Se diseñaron los circuitos de potencia y control del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente para arranque y frenado, a su vez se implementaron dichos accionamientos para estas máquinas rotativas existentes en el laboratorio de máquinas de la E3T, por medio de la reutilización de contactores y elementos de mando del gabinete existente.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: M.P.E Julio Augusto Gálvez Figueredo.

***MARTINEZ Ramos Hugo Alejandro - DANIEL Mejía Uribe. Motores eléctricos: frenado dinámico y a contracorriente.2001. Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander

ABSTRACT

TITLE:

ACCELERATION AND DYNAMIC BRAKING AND COUNTERFLOW OF THE INDUCTION AND DIRECT CURRENT OF INDEPENDENT EXCITATION MOTOR. CONTROL USING PLC.*

AUTHORS:

ARIAS Lozano Ángela María

RANGEL Sequeda Carlos Augusto **

KEY WORDS:

Acceleration, dynamic and counterflow braking, induction motor, independent excitation DC motor, PLC.

DESCRIPTION:

The purpose of this work is to reuse the command elements and existing contactors in a cabinet *** in order to implement the acceleration and braking of the induction and direct current of independent excitation motor as well as the design of its power circuits and control, to aid reinforce the knowledge acquire by the student who attends electrical actuators, included in the electrical engineering curriculum of the UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

As first phase of the project were carried out the theoretical studies corresponding to the rotating electric machines as well as the pertinent studies to the acceleration and dynamic braking and counterflow of the induction and direct current of independent excitation motor. Of which were obtained the mathematical models of the motors used in this thesis.

Once defined the mathematical models to implement, the measurement of the induction and direct current of independent excitation motor parameters was come, so using the tool MATLAB/SIMULINK simulate the behavior of this rotating machines facing the actuators of acceleration and dynamic braking and counterflow.

The power and control of the induction and direct current of independent excitation motor circuits were design, also were implemented such actuators for these rotating machines available in the machines laboratory of the E3T through the reutilization of contactors and command elements present in the cabinet.

* Degree Work.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: MPE. Julio Gelvez.

***MARTINEZ Ramos Hugo Alejandro - DANIEL Mejía Uribe.. Electric Motor: dynamic and counterflow braking.2001. Bucaramanga, degree Work Universidad Industrial de Santander

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los procesos industriales es necesario arrancar y detener el movimiento de motores y la carga que estos accionan, siendo estos instantes los de mayores esfuerzos tanto mecánicos como eléctricos en la máquina; por lo general los procesos industriales requieren de un control automatizado que arranque y detenga el motor de manera suave, rápida y efectiva. En algunos procesos la parada del motor se da por simple desenergización de la máquina, mientras que otros requieren de sistemas de frenados tanto eléctricos como mecánicos para detener en el menor tiempo el eje del motor y garantizar que mientras esté desenergizado el eje no gire.

Los frenados eléctricos han demostrado ser más efectivos que los de tipo mecánico en razón a que ofrecen una garantía de acción independiente de partes mecánicas cuya vida útil depende del uso, del mantenimiento y del medio ambiente, además dependiendo de las magnitudes eléctricas aplicadas durante el frenado se puede controlar el tiempo de detención del rotor; normalmente el freno eléctrico se emplea requiriendo siempre el respaldo de los frenos mecánicos sobre todo en casos en donde se requiere elevar una carga.

Para el control de la detención del eje del rotor en la actualidad se dispone de tres técnicas de frenado siendo estas: freno regenerativo, freno a contracorriente y freno dinámico.

En el trabajo propuesto se pretende diseñar, simular e implementar el arranque y frenado eléctrico del motor de inducción jaula de ardilla y del motor de corriente continua excitación independiente. Para el frenado eléctrico se pretenden implementar las técnicas de frenado a contracorriente y freno dinámico (para los dos tipos de máquinas) y para el arranque en el motor de inducción se empleará el arranque

estrella-triángulo, mientras que para el motor de corriente continua el arranque se realizará por variación de la tensión de armadura.

El trabajo busca recuperar un gabinete metálico en el cual se encuentran algunos elementos en buen estado como lo son contactores, elementos de mando y señalización (desarrollado en el proyecto de grado MOTORES ELÉCTRICOS: FRENADOS DINÁMICO Y A CONTRACORRIENTE), los cuales se controlarán empleando uno de los autómatas programables disponibles en la escuela de la E3T de la UIS.

El módulo obtenido se empleará para el entrenamiento y la formación de los estudiantes del curso correspondiente a la asignatura accionamientos eléctricos, la cual es de carácter obligatorio en el plan de estudio de la carrera de ingeniería eléctrica.

En la realización del presente trabajo se emplea el autómata programable TWIDO de TELEMECANIQUE TWDLCAE40DRF, además de la útil herramienta de simulación MATLAB/SIMULINK para predecir el comportamiento de las máquinas a emplearse en este trabajo, también para el control de tensión de armadura se emplea un convertidor cc/cc, también conocido como troceador.

En el capítulo 1 se hace referencia a conceptos generales de las máquinas eléctricas rotativas y se establecen los modelos matemáticos con los cuales se representa el motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente. El capítulo 2 se presentan los métodos utilizados para la obtención de los parámetros del motor de inducción y de corriente continua excitación independiente que son necesarios para la simulación del arranque y frenado de los mismos. Los estudios teóricos basados en el sistema de cuatro cuadrantes de los frenados dinámico y a contracorriente del motor de inducción y del motor de corriente continua excitación independiente se encuentran consignados en el capítulo 3 del presente trabajo. Basados en los modelos matemáticos encontrados para los motores de interés y empleando los parámetros

encontrados en el capítulo 2 se procede a simular los procesos de arranque y frenado, los resultados se consignan en el capítulo 4. El capítulo 5 contiene los circuitos empleados en la realización del arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente. Por último las conclusiones y observaciones pertinentes se podrán apreciar en el capítulo 6.

1. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

1.1 CONCEPTOS GENERALES

Las máquinas eléctricas son dispositivos que tienen como función principal convertir energía mecánica en energía eléctrica (generadores), o convertir energía eléctrica en energía mecánica (motores). En este trabajo de grado las máquinas rotativas de interés son aquellas que convierten energía eléctrica en mecánica mediante la acción de un campo magnético.

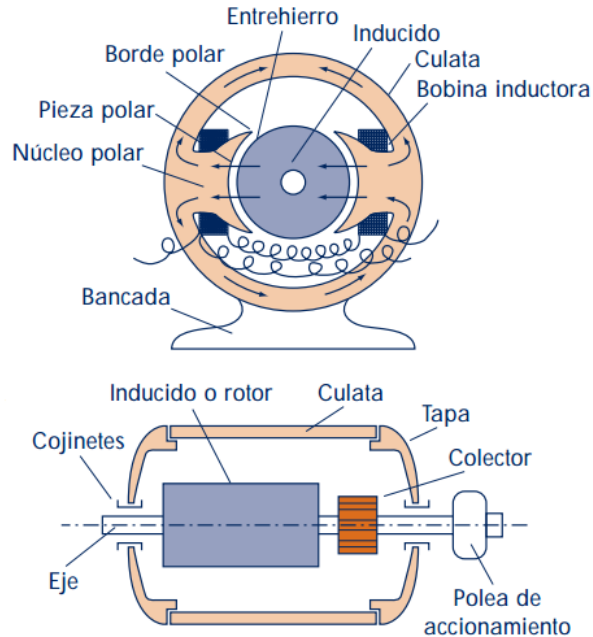
La construcción de toda máquina eléctrica rotativa es muy similar, a continuación se listan las partes más relevantes de dichos dispositivos:

Inductor o estator: Es la parte fija de la máquina, da soporte a toda su estructura, aloja los bornes de conexión, adicionalmente allí se produce y conduce el flujo magnético. El estator está compuesto a su vez por los siguientes elementos: pieza polar, núcleo (los cuales forman parte del circuito magnético); devanado inductor (formado por el conjunto de espiras que se fijan dependiendo del tipo de máquina y por donde circula la corriente que produce el flujo).

Inducido o rotor es la parte giratoria de la máquina, consta de: núcleo del inducido, formado a su vez por chapas magnéticas que se construyen generalmente de acero laminado al silicio para reducir las pérdidas en el circuito magnético, allí se alojan los hilos de cobre del devanado del inducido; devanado del inducido, aquí se da lugar a la conversión de energía, en algunos casos se encuentra conectado al circuito exterior de la máquina.

Entrehierro: espacio existente entre la parte fija y la parte móvil de la máquina, evita el rozamiento entre estas, almacena energía.

Figura 1. partes constitutivas de la máquina.



Fuente [1]

Las máquinas eléctricas rotativas tienen características comunes entre sí, y se asemejan al modelo representado en la figura 1.

La ecuación de torques o de momentos para la máquina viene dada por:

$$T_{em} - T_p - T_L = J_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (1)$$

Dónde:

T_{em} = Torque electromagnético.

T_p = Torque de pérdidas por rozamiento.

T_L = Torque resistente o de carga.

J_r = Momento de inercia en el eje del motor.

ω_r = Velocidad angular del rotor de la máquina

“El flujo puede ser descompuesto en dos componentes ortogonales α y β . Para representar el flujo producido en el motor se inyectan corrientes en las bobinas α_r y β_r ,

fijas en el rotor. El flujo del estator se obtiene inyectando corrientes en las bobinas α_e y β_e , fijas en el estator”¹

La posición relativa entre rotor y estator está dada por el ángulo θ , medido entre los ejes α_e, α_r . [2]

En resumen la máquina generalizada cuenta con cuatro ejes eléctricos ($\alpha_e, \alpha_r, \beta_e, \beta_r$) por los cuales se hará circular corriente, cuenta también con un eje de giro (eje mecánico). El flujo en el entrehierro cambiará su distribución al variar las corrientes $i_{\alpha}^e, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^e, i_{\beta}^r$.

i_{α}^e Corriente en el eje α de estator

i_{α}^r Corriente en el eje α de rotor

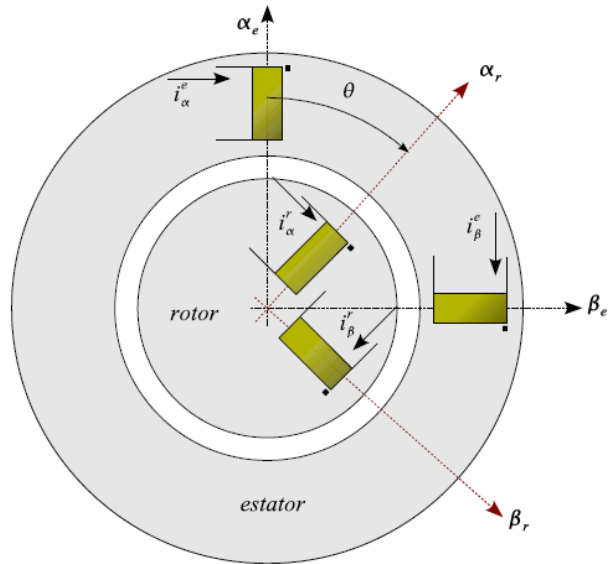
i_{β}^e Corriente en el eje β de estator.

i_{β}^r Corriente en el eje β del rotor.

En la figura 2 se aprecia el esquema de las bobinas ortogonales de una máquina rotativa.

ALLER, JOSE MANUEL, Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General. 2006, Editorial Equinoccio¹

Figura 2. Esquema de la máquina generalizada



Fuente [2]

Con esta descripción básica de una máquina eléctrica es posible plantear las ecuaciones que describen el comportamiento de las máquinas [2]:

$$[v] = [R][i] + \dot{\theta} [\tau(\theta)][i] + [L(\theta)] \frac{d}{dt} [i] \quad (2)$$

$$T_m = -\frac{1}{2} [i]^t [\tau(\theta)] [i] + J[\dot{\theta}] + \rho \dot{\theta} \quad (3)$$

Dónde:

$[v]$ = matriz de tensión.

T_m = Par mecánico en el eje de la máquina.

$[R]$ = Matriz de resistencias.

$[L(\theta)]$ = Matriz de impedancias en función del ángulo θ .

J = Inercia del eje de rotación.

$[\tau(\theta)]$ = Matriz de par.

$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ = Velocidad angular, también denominada ω_m .

θ = Ángulo, posición relativa entre rotor y estator.

$[i]$ = Vector de corrientes.

$[\rho]$ = Coeficiente de fricción.

Para el planteamiento de (2) y (3) es necesario determinar: matriz de resistencias $[R]$, matriz de impedancias $[L(\theta)]$, matriz de par $[\tau(\theta)]$. [2]

La matriz de resistencias es diagonal, en consecuencia a que las resistencias son propias de cada bobina, no existen resistencias mutuas.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{e\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{e\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{r\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{r\beta} \end{bmatrix}$$

Para la matriz de impedancias debe considerarse que la máquina posee un rotor cilíndrico y homogéneo que al girar no modificará la permeanza del camino magnético, lo cual implica que la inductancia propia del estator sea constante e independiente del ángulo θ . De la misma manera si el rotor es cilíndrico, la inductancia propia de este será un valor constante.

Al encontrarse α y β a 90° en el rotor se garantiza que las inductancias mutuas sean cero. De forma similar sucede con las inductancias mutuas del inductor.

La inductancia mutua entre la bobina de estator y rotor en el eje α es máxima cuando se encuentren alineadas, es decir con $\theta=0$, para otros valores se debe emplear el cálculo de la inductancia en función de $\cos \theta$.

Ahora la inductancia mutua entre las bobinas β de estator y β de rotor será máxima cuando entre ellas haya una separación de 90° , es decir con $\theta = \frac{\pi}{2}$, de manera similar

la inductancia mutua entre las bobinas α de estator y β de rotor estén con una diferencia de $\theta = -\frac{\pi}{2}$, por consiguiente deben emplearse funciones $\sin \theta$ y $-\sin \theta$ respectivamente. Quedando así la siguiente matriz de impedancias:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & 0 & L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta \\ 0 & L_e & L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta \\ L_{er}\cos\theta & L_{er}\sin\theta & L_r & 0 \\ -L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

La matriz de par se obtiene derivando la matriz de inductancias con respecto al ángulo θ , de lo que se obtiene

$$[\tau(\theta)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_{er}\sin\theta & -L_{er}\cos\theta \\ 0 & 0 & L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta \\ -L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta & 0 & 0 \\ -L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta & 0 & 0_r \end{bmatrix}$$

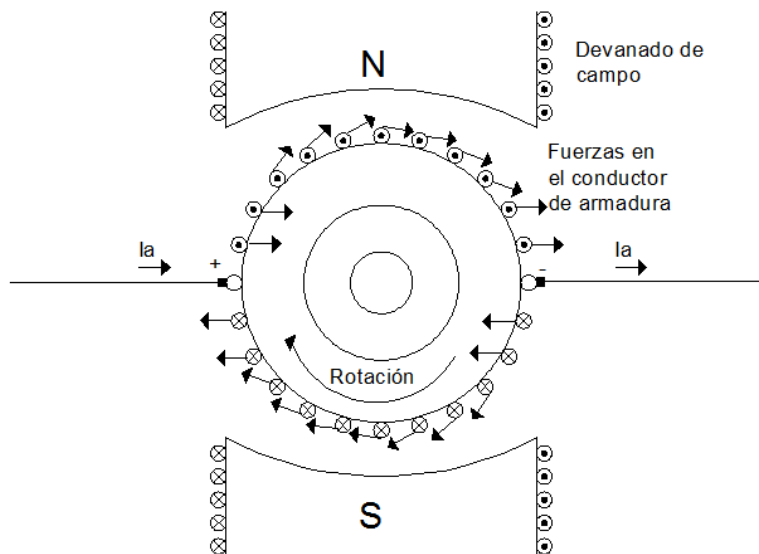
Las ecuaciones (2), (3), forman un grupo de ecuaciones que unidas a las limitaciones impuestas por la red hacia las variables eléctricas y mecánicas servirán para determinar el comportamiento de las máquinas bajo carga durante el arranque y frenado.

Hasta este punto se puede observar que es posible modelar matemáticamente una máquina eléctrica rotativa con parámetros que se pueden obtener mediante la medición, permitiendo la simulación del comportamiento de la máquina en determinada situación dentro de un sistema.

1.2 MODELO MATEMÁTICO MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

El principio de operación de un motor de DC consiste en la creación de un campo magnético uniforme por medio de los polos de la máquina, los conductores de la armadura se ven obligados a conducir corriente debido a la tensión aplicada en bornes, estos experimentan una fuerza que tiende a moverlos debido a que se encuentran inmersos en un campo magnético, dicha fuerza ocasiona que la armadura gire en un sentido definido por la dirección de la corriente en los conductores. La figura 3 muestra la fuerza que experimentan los conductores de la armadura de un motor de dos polos. [3]

Figura 3. Fuerza que experimentan los conductores del devanado de armadura en un motor de corriente continua.



Fuente [3]

Un motor de excitación independiente es aquel que emplea una fuente independiente para el devanado de campo, la figura 4 muestra el esquema eléctrico de dicho

dispositivo, partiendo de esta se obtienen las siguientes ecuaciones para el devanado de campo y la armadura:

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{\partial I_f}{\partial t} \quad (4)$$

Dónde:

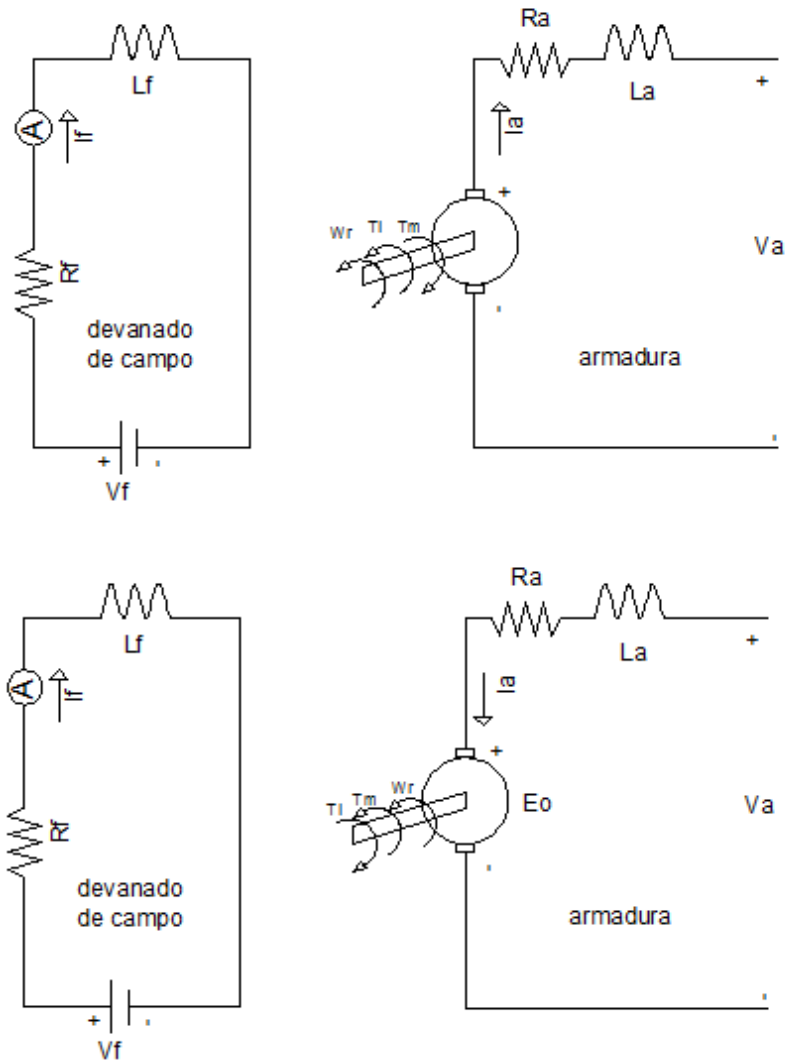
V_f = Tensión aplicada al campo de la máquina.

R_f = Resistencia del devanado de campo del motor.

I_f = Corriente de excitación.

L_f = Inductancia del devanado de campo de la máquina.

Figura 4. Modelo de la máquina de excitación independiente como motor , b como generador



Fuente.[4]

De la ecuación (3) para la armadura se tiene:

$$V_a - \Delta V - e_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (4)$$

Dónde:

V_a = Tensión aplicada a los bornes de armadura.

ΔV = Caída de tensión en las escobillas.

R_a = Resistencia del devanado de armadura.

I_a = Corriente de armadura de la máquina.

L_a = Inductancia del devanado de armadura.

e_a = Tensión inducida en la armadura por acción de flujo constante (f.c.e.m).

$e_a = K_m \omega$, considerando flujo constante.

Para una máquina de corriente continua con flujo constante el par electromecánico viene dado por:

$$T_{em} = K_m I_a \quad (5)$$

Considerando la ecuación (1), la ecuación de torques para una máquina de corriente continua está dada por:

$$K_m I_a - T_l - T_p = J_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (6)$$

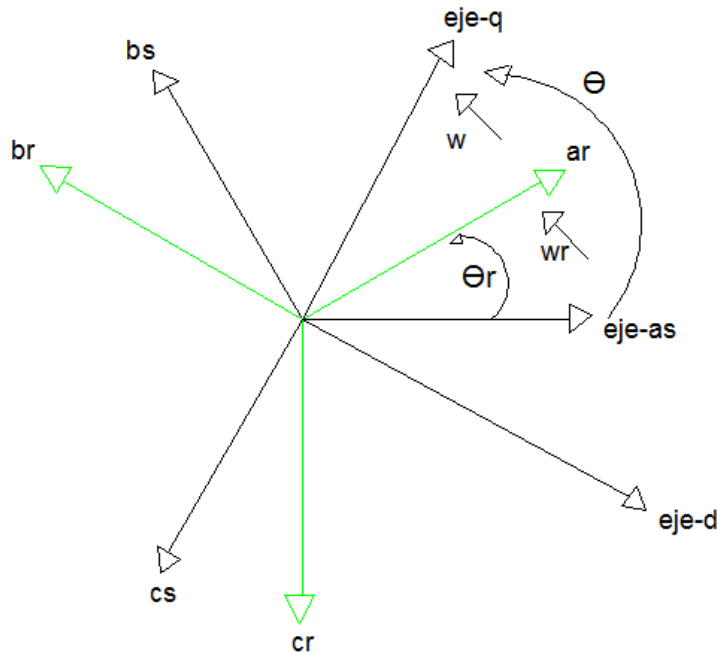
1.3 MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

El análisis del motor de inducción es más complejo, y las ecuaciones diferenciales que lo caracterizan tienen coeficientes variables en el tiempo, en atención a que las inductancias mutuas del rotor y del estator dependen de la posición en que se encuentre el rotor.

Con el fin de simplificar los cálculos se emplea la transformada dq0, encargada de convertir las cantidades de un sistema trifásico (fases a, b, c), en cantidades en un

sistema de dos ejes (q, d) perpendiculares entre sí; gráficamente se ilustra en La figura 5. [5]

Figura 5. Relación entre las cantidades a b c y qd0.



Fuente [7]

Las relaciones entre las cantidades expresadas en el marco de referencia abc y qd0, cuando el motor lleva una velocidad angular ω están dadas por [4]:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \hat{e}_a \\ \hat{e}_b \\ \hat{e}_c \end{bmatrix} &= [T_{qd0}] \begin{bmatrix} \hat{e}_q \\ \hat{e}_d \\ \hat{e}_s \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \hat{e}_a \\ \hat{e}_b \\ \hat{e}_c \end{bmatrix} &= [T_{qd0}]^{-1} \begin{bmatrix} \hat{e}_q \\ \hat{e}_d \\ \hat{e}_s \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{7}$$

fa, fb, fc representan las variables (tensiones, corrientes, flujos) referenciadas a los ejes a, b, c respectivamente y fq, fd, fo son las variables referidas a los ejes q, d, o respectivamente.

Dónde:

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}(\theta - 2\pi/3) & \text{sen}(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[T_{qd0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \text{sen}(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \text{sen}(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Las transformadas (8) y (9) se emplearán para simular en el capítulo 4 del presente trabajo el motor de inducción y fueron tomadas textualmente de CHEE-MUN ONG, Op. Cit, p. 19.

Para este trabajo de grado son variables de interés la corriente de estator y el torque del motor de inducción durante los procesos de arranque y frenado, en consecuencia se emplea la transformada qd0 estacionaria ecuaciones, el desarrollo matemático de transformación se encuentra en CHEE-MUN ONG, Op. Cit, p. 19 [5], adicionalmente de allí se toman el conjunto de ecuaciones para voltajes en estator y rotor de este aparte:

$$V_{qs}^s = \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{qs}^s}{dt} + r_s i_{qs}^s \quad (10)$$

$$V_{ds}^s = \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{ds}^s}{dt} + r_s i_{ds}^s \quad (11)$$

$$V_{0s}^s = \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{0s}^s}{dt} + r_s i_{0s}^s \quad (12)$$

$$V_{qr}^{s'} = \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{qr}^{s'}}{dt} - \frac{\omega_{re}}{\omega_b} \Psi_{dr}^{s'} + r_r' i_{qr}^{s'} \quad (13)$$

$$V_{dr}'^s = \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{dr}'^s}{dt} - \frac{\omega_{re}}{\omega_b} \Psi_{qr}'^s + r_r' i_{dr}'^s \quad (14)$$

$$V_{0r}'^s = \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{0r}'^s}{dt} + r_r' i_{0r}'^s \quad (15)$$

Ahora se establece la matriz que relaciona flujos: [4]

$$\begin{bmatrix} \Psi_{qs}^s \\ \Psi_{ds}^s \\ \Psi_{0s}^s \\ \Psi_{qr}'^s \\ \Psi_{dr}'^s \\ \Psi_{0r}'^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ls} + X_m & 0 & 0 & X_m & 0 & 0 \\ 0 & X_{ls} + X_m & 0 & 0 & X_m & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_m & 0 & 0 & X_{lr}' + X_m & 0 & 0 \\ 0 & X_m & 0 & 0 & X_{lr}' + X_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{lr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{0s}^s \\ i_{qr}'^s \\ i_{dr}'^s \\ i_{0r}'^s \end{bmatrix} \quad (16)$$

El torque electromagnético de la máquina de inducción corresponde a:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (17)$$

Dónde los subíndices q y r indican si la variable está referida al eje q ó d respectivamente, mientras que los subíndices s y r representan si son variables del estator o rotor respectivamente, el súper índice s indica que la variable ha sido transformada por medio de la transformada qd0 estacionaria y e súper índice '(apóstrofe) indica que la variable es referida a estator. Además

V=Tensión

Ψ =Flujo

ω_b =Velocidad angular

r=resistencia

i=corriente

Nota: ver súper índices y sub índices.

2. PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.

2.1 GENERALIDADES

La confiabilidad de cada uno de los sistemas eléctricos está ligada al conocimiento de los parámetros de las máquinas y los factores que influyen en la operación de las mismas. En este capítulo se busca obtener el valor más exacto posible de dichos parámetros tales como resistencias, inductancias, tensiones o corrientes entre otros, de los motores seleccionados para este trabajo de grado.

Debido a que existen varios métodos de medición para la obtención de los parámetros de las máquinas, se deben confrontar los resultados obtenidos por cada método para así seleccionar el más confiable para su respectiva simulación. En este trabajo, cada parámetro de los motores tanto de corriente continua como de inducción se evaluó con métodos confiables, luego se valoraron los resultados y se escogió el más aproximado a la realidad, utilizando elementos de juicio como:

Calidad de los instrumentos de medición utilizados en el método.

Leyes físicas que utiliza el método.

Literatura encontrada sobre el método de medición y estándares establecidos por los mismos.

Curvas de rendimiento, datos de placa y parámetros proporcionados por el fabricante. En cada uno de los métodos usados en este trabajo de grado se tomaron varias medidas y el número de cifras significativas según la calibración del instrumento de

medición, por lo cual se tienen en cuenta los errores que pueden suministrar los instrumentos al igual que los métodos usados.

2.2 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

2.2.1 Datos de placa y parámetros suministrados por el fabricante del motor de corriente continua de excitación independiente.

Tabla 1. Datos de placa del motor de corriente continua de excitación independiente.

MARCA	DE LORENZO
REFERENCIA	DL 1023PN
TENSIÓN NOMINAL DE ARMADURA	200 V
CORRIENTE NOMINAL DE ARMADURA	12 A
TENSIÓN NOMINAL DE CAMPO	220 V
CORRIENTE NOMINAL DE CAMPO	0,25 A
POTENCIA NOMINAL	1,8 kW
VELOCIDAD NOMINAL	1800 rpm

Fuente: Autor

2.2.2 Medición de la resistencia de armadura (R_a)

Para la obtención de la resistencia de armadura (R_a) se utilizaron dos métodos:

Óhmetro digital

Curva de tensión- corriente

2.2.2.1 Resultados con el óhmetro digital.

Las medidas fueron tomadas a una temperatura ambiente de 28°C y se consignaron en la tabla 2.

Tabla 2. Mediciones óhmetro digital para la resistencia de armadura del motor DC.

Medida#	Ra [Ω]
1	3.88
2	3.87
3	3.89
Promedio	3.88

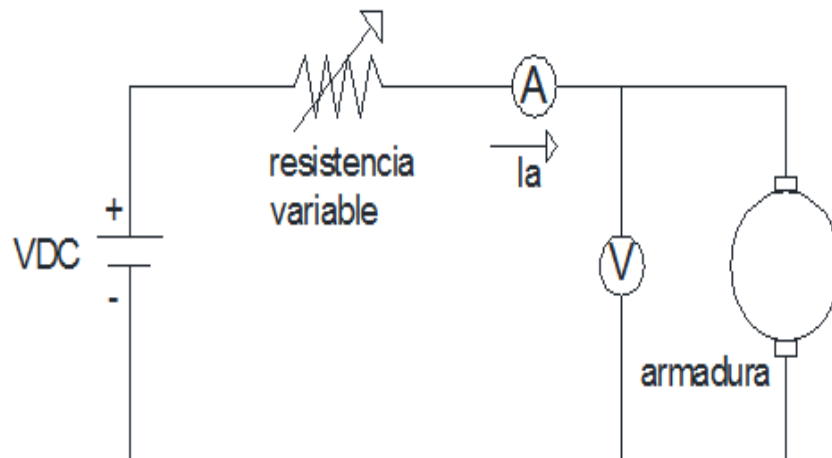
Fuente: Autor

Resistencia promedio medida por el óhmetro es de 3.88 Ω .

2.2.2.2 Resultados de medición de Ra con la curva tensión-corriente

Para la utilización de este método implementó el circuito de la figura 6.

Figura 6 Circuito para hallar la curva tensión-corriente de armadura



Fuente. [7]

Tabla 3. Medición de tensión- corriente para hallar la resistencia de armadura

Tensión [V]	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
16,9	4,6	3,67391304
18,25	5	3,65
20,05	5,4	3,71296296
Promedio		3,67895867

. Fuente: Autor

Las medidas para este motor se tomaron a una temperatura de 28° C y de manera progresiva hasta que la corriente de armadura alcanzo el valor de 5.4 [A], para así obtener el valor más confiable de Ra, teniendo en cuenta que para corrientes mayores a 1 [A] desaparece el efecto no lineal de la resistencia en las escobillas.

2.2.3 Medición de la inductancia de armadura (La)

2.2.3.1 Medición con el puente de impedancias

Este método consiste en conectar un aparato llamado puente de impedancias que posee el laboratorio de máquinas eléctricas directamente en los terminales de la armadura de la máquina de corriente continua, los resultados obtenidos en las pruebas se consignan en la tabla 4.

Tabla 4. Medición de la impedancia de armadura con el puente de impedancias

Medida #	La [mH]
1	70
2	70
3	70

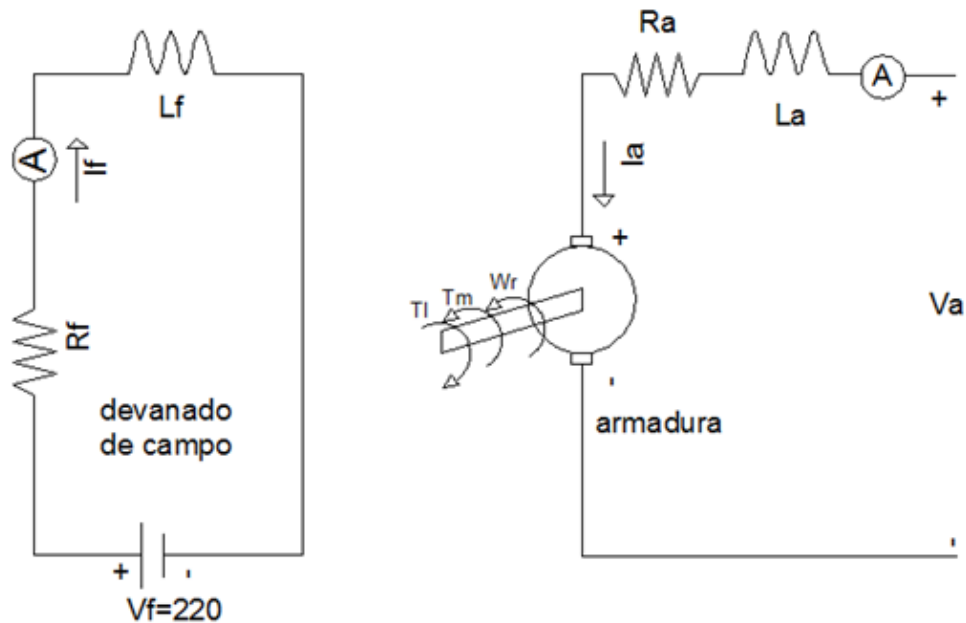
. Fuente: Autor

2.2.4 Obtención de la constante del motor (Km)

Esta constante (Km) se puede hallar por la relación $\frac{e_0}{\omega_0}$ de la máquina en vacío.

2.2.4.1 Relación $\frac{e_o}{\omega_o}$ de la máquina en vacío

Figura 7. Montaje para encontrar la constante K_m



Fuente. [7]

Para este método se utiliza el montaje de la figura 7, consiste en excitar el devanado de campo a su corriente nominal e ir modificando la velocidad hasta que la tensión inducida en su armadura sea igual a la tensión nominal. Se puede determinar el valor de la constante K_m , por medio de la relación $\frac{e_o}{\omega_o}$ y la ecuación:

$$K_m = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{\omega} \quad (18)$$

Se tomaron varios valores, los cuales se hicieron de manera intermitente y dejando descansar el motor primario 5 minutos antes de cada toma de datos a una temperatura ambiente de 28° C. los resultados se consignaron a en la tabla 5 y se eligió la constante K_m como el promedio de los datos obtenidos. Por consiguiente

$$K_m \text{ prom} = 1.01409162 \text{ [N-m/A]}.$$

Este valor se tomara como el mejor posible puesto que se tienen en cuenta los efectos de saturación en el entrehierro.

Tabla 5. Resultados medición de la constante K_m motor de excitación independiente.

Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Resistencia [Ω]	Km [N-m/A]
190	0,34	187,134202	3,67895867	1,00862991
180,1	0,35	176,452787	3,67895867	1,01337229
170	0,33	166,81857	3,67895867	1,01179349
160,1	0,32	156,765473	3,67895867	1,01376106
150,5	0,31	147,1316	3,67895867	1,01514238
140	0,3	135,926242	3,67895867	1,0218506
Promedio				1,01409162

Fuente: Autor

2.2.5 Constante de fricción

La constante de fricción se basa en la siguiente relación:

$$\beta = \frac{K_m * I_a}{\omega} \quad (19)$$

Se varía la corriente para obtener mayor cantidad de datos y una mayor precisión.

Tabla 6. Para la constante de fricción

Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Km	β
0,34	187,134202	1,00862991	0,00183256
0,35	176,452787	1,01337229	0,00201006
0,33	166,81857	1,01179349	0,00200153
0,32	156,765473	1,01376106	0,00206936
0,31	147,1316	1,01514238	0,00213886
0,3	135,926242	1,0218506	0,00225531
Promedio			0,00205128

Fuente: Autor

2.2.6 Medición del momento de Inercia del motor de corriente continua de excitación independiente.

Para el momento de inercia del motor de corriente continua de excitación independiente se toma el resultado obtenido corresponde a 0,00432341 Kg m². [18]

2.2.7 Parámetros del devanado de excitación o campo del motor de corriente continua de excitación independiente.

2.2.7.1 Resistencia devanado de campo.

Las medidas fueron tomadas mediante dos métodos, óhmetro digital y curva tensión-corriente, se realizan a una temperatura ambiente de 27 °C y los resultados se consignan en la tabla 7.

Tabla 7. Medición de la resistencia del devanado de excitación

Método de medición	Óhmetro digital	Tensión- corriente
Resistencia Rf (Ω)	840	837

Fuente: Autor

2.2.7.2 Inductancia del devanado de excitación

Se utiliza el puente de impedancias para hallar los valores de la impedancia de campo, los resultados se consignan en la tabla 8.

Tabla 8. Medición de la inductancia de campo.

Medida	Lf [H]
1	8.7
2	8.7
3	8.7

2.2.8 Resumen de los parámetros medidos para el motor DC.

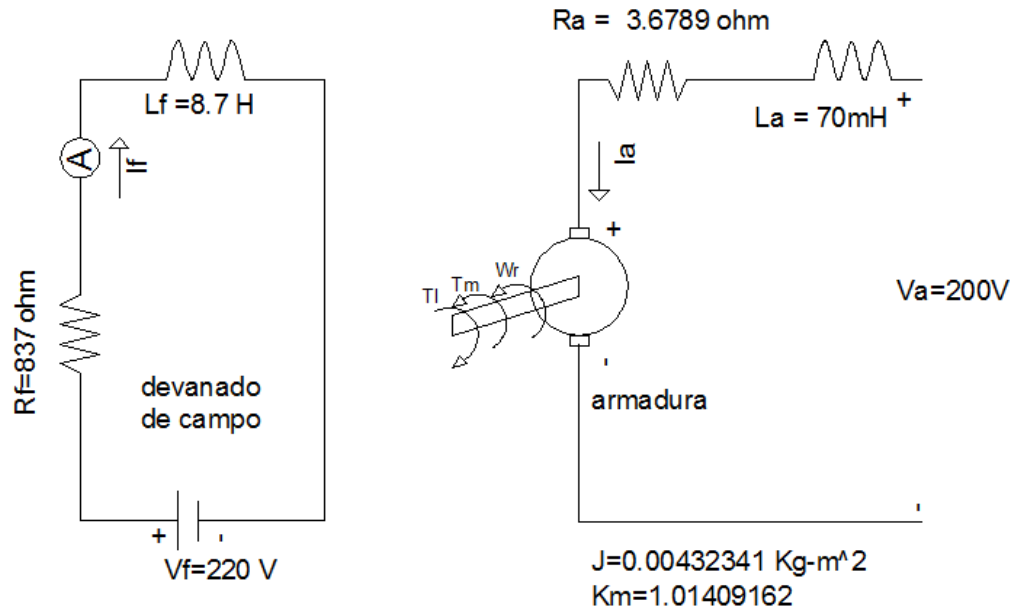
En la tabla 9 se resumen los resultados obtenidos de la parametrización del motor de corriente continua de excitación independiente, igualmente el gráfico del modelo del motor con los parámetros hallados.

Tabla 9. Resumen de los parámetros medidos al motor DC.

PARÁMETRO	VALOR MEDIDO	MÉTODO DE MEDICIÓN
Tensión nominal [V]	200	Datos de placa motor
Velocidad Nominal [rpm]	1800	Datos de placa motor
Potencia mecánica [KW]	1.8	Datos de placa motor
Resistencia de Armadura [Ω]	3,67895867	Curva tensión corriente
Inductancia de armadura [mH]	70	Puente de impedancias
Constante del motor Km [N-m/A]	1,01409162	relación $\frac{e_0}{w_0}$ de la máquina en vacío
Constante de fricción	0,002051	Relación $\beta = \frac{K_m * I_a}{\omega}$
Momento de Inercia rotor [Kg-m ²]	0,00432341	Método de pesas
Resistencia de campo [Ω]	837	Curva tensión corriente
Inductancia de campo [H]	8,7	Puente de impedancias

Fuente: Autor

Figura 8. Modelo del motor de corriente continua excitación independiente con los parámetros más relevantes



Fuente. [7]

2.3 MEDICION DE LOS PARÁMETROS EN EL MOTOR DE INDUCCION

Por medio de la prueba de vacío, prueba de rotor bloqueado, prueba de resistencia en DC para el devanado inductor y medición del momento de inercia, se establecerán los parámetros que permitan la simulación del motor, empleando las ecuaciones expuestas en el capítulo 1 del presente trabajo.

Para las diferentes pruebas realizadas al motor de inducción se emplea una conexión Áron, con la máquina trabajando en Y.

2.3.1 Datos de placa y parámetros suministrados por el fabricante del motor de inducción

Tabla 10. Datos de placa del motor de inducción.

MARCA	DE LORENZO
REFERENCIA	DL 1021N-3φ
TENSIÓN NOMINAL [V]	127/220 Δ/Y
CORRIENTE NOMINAL [A]	12/6,94 Δ/Y
FACTOR DE POTENCIA	0,77
POTENCIA NOMINAL [kW]	1,5
VELOCIDAD NOMINAL [rpm]	1700
FRECUENCIA [Hz]	60

Fuente: Autor

2.3.2 Medición de la resistencia en corriente continua del devanado inductor.

La prueba consiste en inyectar cierto valor de corriente continua al devanado del estator, y medir la tensión en bornes. Con los valores de tensión y corriente medidos, y aplicando la ley de Ohm se obtiene el valor de la resistencia. La tabla 11 muestra los resultados obtenidos en la prueba.

Tabla11. Medición de la resistencia de los devanados del estator.

Medida	devanado de la fase A			devanado de la fase B			devanado de la fase C		
	Vdc [V]	Idc[A]	R[Ω]	Vdc [V]	Idc[A]	R[Ω]	Vdc [V]	Idc[A]	R[Ω]
1	1,34	1	1,34	1,267	1	1,267	1,265	1	1,265
2	3,129	2,2	1,422273	3,041	2,2	1,38227273	3,465	2,4	1,44375
3	5,31	3,8	1,397368	5,33	3,8	1,40263158	6,19	4,2	1,47381
Resistencia promedio fase A [Ω]			1,386547	promedio fase B [Ω]		1,35063477	promedio fase C [Ω]		1,394187
Promedio de las resistencias Rf	1,377123								

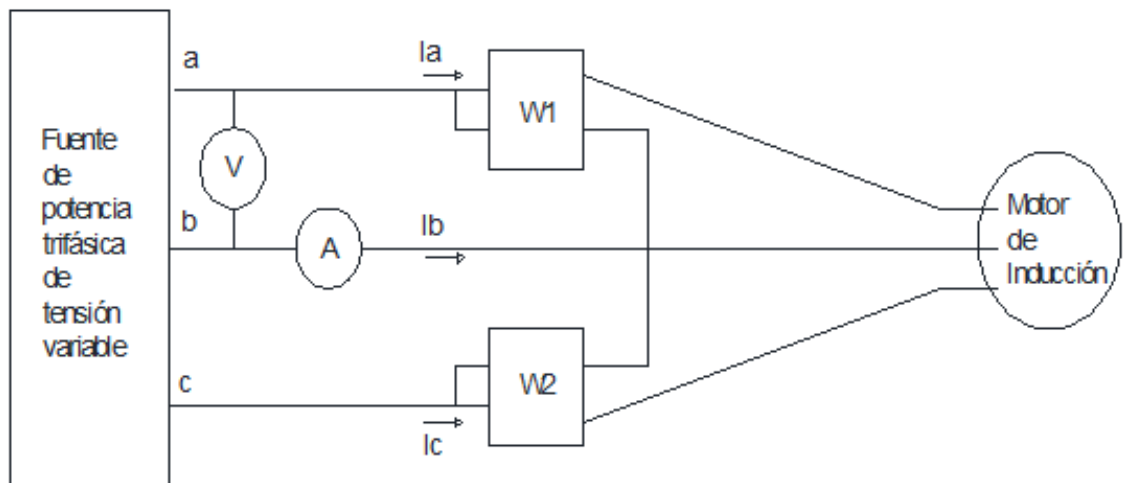
Fuente: Autor

2.3.3 Prueba de la máquina de inducción en vacío.

Para medir la potencia trifásica, se empleó la conexión Arón, adicionalmente se midió la corriente por línea y las tensiones de línea de la máquina de inducción, cuando esta se encontraba funcionando sin carga, la medición se realiza asumiendo una frecuencia de la red de 60 Hz y temperatura ambiente.

Para esta prueba se realiza el montaje de la figura 9, con estos valores se determinan las pérdidas por fricción y ventilación, así como las pérdidas en el entrehierro de la máquina y la inductancia de magnetización. Los resultados obtenidos de la prueba de vacío se consignan en la tabla 12.

Figura 9. Circuito para realizar el montaje para hallar los parámetros del motor de inducción.



Fuente [7]

$$W_f = W_1 + W_2$$

Tabla 12. Resultados del ensayo en vacío para el motor de inducción.

medida#	W1 [W]	W2 [W]	Wf [W]	Io (de fase) [A]	Vs(de linea) [V]
1	-360	568	208	4,5	220,8
2	-360	560	200	4,3	218,9
3	-370	580	210	4,6	221,7
Promedio			206	4,46666667	220,466667

Fuente: Autor

Nota los vatímetros se conectaron a través de un transformador de corriente cuya relación corresponde a $r = 20 / 5 = 4$, los resultados de la tabla 12, 13, 14 ya se encuentran corregidos por dicha relación.

Debido a la necesidad de encontrar las pérdidas en el entrehierro y la inductancia de magnetización es necesario acoplar un motor de corriente continua al motor de inducción y llevarlo hasta la velocidad de sincronismo, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 13. Resultados del ensayo motor acoplado a velocidad de sincronismo.

medida#	W1 [W]	W2 [W]	Wf [W]	Io' (de fase) [A]	Vs'(de linea) [V]
1	-480	540	60	2,5	220,8
2	-484	544	60	2,7	218,9
3	-476	536	60	2,3	221,7
Promedio			60	2,5	220,466667

Fuente: Autor

2.3.4 Prueba de rotor bloqueado para el motor de inducción.

La prueba de motor bloqueado consiste en llevar al motor de inducción a su corriente nominal sin que él se pueda mover, con estos datos se halla la suma de las resistencias del rotor y estator e igualmente la suma de las reactancias del rotor y del estator. Los resultados obtenidos se consignan en la tabla 14.

Relación de transformadores de corriente $r = 20 / 5 = 4$

$W_f = W_1 + W_2$

Tabla 14. Resultados prueba de rotor bloqueado para el motor de inducción

medida#	W1 [W]	W2 [W]	Wf [W]	Icc (de línea) [A]	Vcc(de línea) [V]
1	320	64	384	6,9	52,6
2	320	72	392	6,8	52,4
3	336	80	416	7	53,9
Promedio			397,33333	6,9	52,9666667

Fuente: Autor

2.3.5 Obtención de los parámetros del motor de inducción.

Las pérdidas en el hierro se obtienen de la prueba de vacío con el motor a la velocidad de sincronismo.

De esta prueba se tiene que:

Potencia entrada= Pérdidas en el cobre + pérdidas en el hierro

Pérdidas en el hierro= $P_o' - 3 \cdot (I_o')^2 \cdot R_f$

Pérdidas en el hierro = $60[w] - 3 \cdot (2,5)^2 \cdot (1,3771)$

Pérdidas en el hierro=34,17[w].

Las pérdidas de potencia por ventilación se obtienen de la primera prueba de vacío, es decir cuando el motor gira libremente:

Potencia consumida = pérdidas del cobre en el estator+ pérdidas en el hierro + pérdidas de ventilación + pérdidas adicionales.

Pérdidas adicionales + pérdidas por ventilación= 206[W] – 3*(4,466)²*(1,3771)-34,17[W].

Pérdidas adicionales y ventilación =89,43[W]

De la prueba de corto circuito o rotor bloqueado, obtenemos las reactancias y resistencias de los devanados estáticos y rotóricos:

$$Z_t = \frac{V_{cc}(fase)}{I_{cc}} = \frac{52,96}{\sqrt{3} * 6,9} = 4,4313 [\Omega]$$

Y de la misma prueba obtenemos los valores de la resistencia en los devanados de la maquina:

$$R_1 + R_2 = \frac{P_{cc}}{3 * I_{cc}^2} = \frac{397,333}{3 * 6,9^2} = 2,7818 [\Omega]$$

Por lo tanto la resistencia del rotor referida al estator es:

$$R_2 = 2,7818 - 1,3771 = 1,4047[\Omega]$$

Para hallar la reactancia de los devanados aplicamos la siguiente fórmula:

$$x_1 + x_2 = \sqrt{z_t^2 - (r_1 + r_2)^2} = 3,4499 [\Omega]$$

$$x_1 \approx x_2 = \frac{3,4499}{2} = 1,7246 [\Omega]$$

De la prueba de vacío, se obtiene la reactancia de magnetización y la resistencia de magnetización

$$|S_o| = |V_o| * |I_o| = 566.49 [VA]$$

$$|P_o| = \frac{206}{3} [W]$$

$$F_p = |P_o|/|S_o| = 0,1212$$

$$|Q_o| = |S_o| \sin(\cos^{-1} F_p) = 562.31 [VAR]$$

De las perdidas podemos hallar la resistencia de magnetización y la inductancia de magnetización:

$$R_m = \frac{V_o^2}{P_o}$$

$$R_m = \frac{\left(\frac{220,46}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{206}{3}}$$

$$R_m = 235,93 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_o^2}{Q_o}$$

$$X_m = \frac{\left(\frac{220,46}{\sqrt{3}}\right)^2}{562,31}$$

$$X_m = 28,81\Omega$$

2.3.6 Obtención del momento de inercia del motor de inducción.

Para la obtención del momento de inercia se siguen los pasos planteados en el trabajo de grado Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC (Controlador lógico programable), desarrollado por GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA- JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR- JOSÉ CARLOS BITAR RODRIGUEZ, UIS, los resultados se consignan a continuación:

Tabla 15. Resultados para τ_m . (tiempo el cual se tarda en alcanzar el 36,8% de la velocidad que llevaba la máquina).

Prueba	τ_m	τ_m Promedio
1	2,201	2,184
2	2,375	
3	1,976	

Fuente: Autor

Por lo que el momento de inercia del conjunto sería igual a:

$$J = \tau_m * B = 2,184 * 0,0036395 = 0,0079487 \text{Kg} * m^2$$

Por lo tanto el momento de inercia del motor de inducción corresponde a:

$$0,0036253 \text{Kg} * m^2$$

2.3.7 Resumen de los parámetros medidos para el motor de inducción.

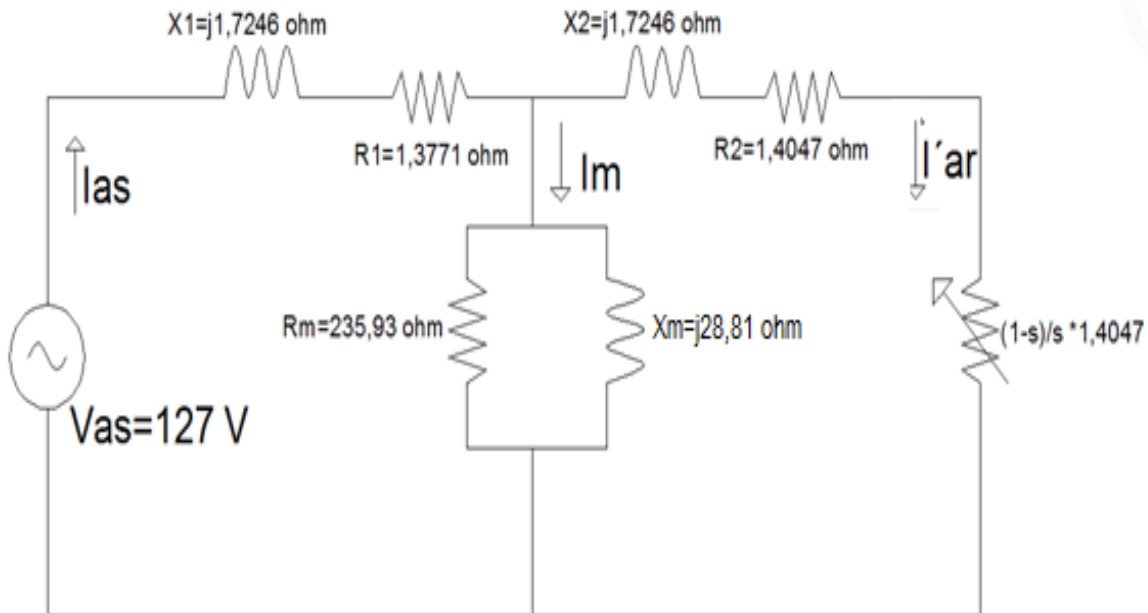
En la tabla 15 se listan todos los valores de los parámetros encontrados para el motor de inducción que se utilizó en el presente proyecto

Tabla 16. Resumen de los parámetros del motor de inducción

PARÁMETRO	VALOR MEDIDO	MÉTODO DE MEDICIÓN
Tensión nominal [V]	127/220, Δ / Y	Datos de placa del motor
Velocidad nominal [rpm]	1800	Datos de placa del motor
Potencia mecánica [kW]	1,5	Datos de placa del motor
Frecuencia de diseño [Hz]	60	Datos de placa del motor
Corriente nominal [A]	12 / 6,9 Δ / Y	Datos de placa del motor
Número de fases	3	Datos de placa del motor
Número de polos	4	Dato calculado
Factor de potencia nominal	0,77	Datos de placa del motor
Resistencia de fase del estator, $r_1[\Omega]$	1,3771	Método tensión- corriente
Resistencia de fase del rotor, $r_2[\Omega]$	1,4047	Prueba rotor bloqueado
Reactancia por fase del estator $X_1[\Omega]$	1,7246	Prueba rotor bloqueado
Reactancia por fase del rotor $X_2[\Omega]$	1,7246	Prueba rotor bloqueado
Reactancia de magnetización $X_m[\Omega]$	28,81	Prueba vacío
Resistencia de magnetización $R_m[\Omega]$	295,93	Prueba vacío
Momento de inercia del rotor [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0,0036253	Método de pesas
Perdidas en el hierro [W]	34,17	Prueba vacío
Pérdidas adicionales y por ventilación	89,43	Prueba vacío

Fuente: Autor

Figura 10. Modelo del motor de inducción con los parámetros más relevantes incluidos



Fuente. [7]

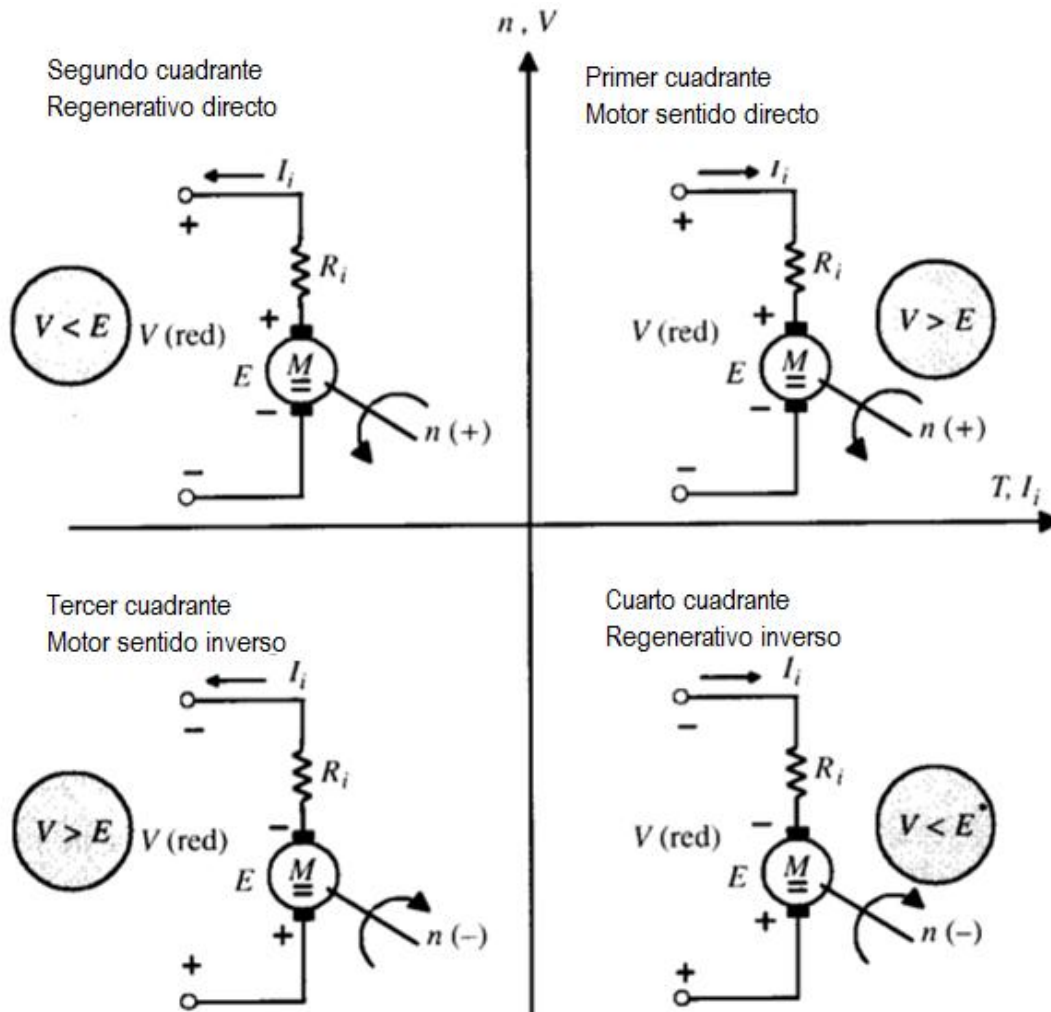
3. MARCO TEÓRICO DE LOS FRENADOS DINÁMICO Y A CONTRACORRIENTE

El modo de operación de las máquinas eléctricas rotativas es versátil y permite el control de velocidad y funcionamiento en ambos sentidos de giro, produciendo de esta manera pares electromagnéticos que pueden estar en contra o a favor del sentido de rotación de la máquina.

Para explicar el modo de operación es útil hacer uso de la representación de cuatro cuadrantes de la figura 11, donde el eje de las abscisas corresponde al par electromecánico, el cual sirve también para representar la corriente de inducido, mientras que el eje de ordenadas representa la velocidad de giro, bien sea esta en r.p.m. o rad/s.

En el primer y tercer cuadrante la velocidad y el par tienen el mismo signo, de este modo la potencia eléctrica que absorbe de la red será positiva, al igual que la potencia que entrega el eje del motor. A diferencia del segundo y cuarto cuadrante donde velocidad y el par tienen signos diferentes entre sí, por consiguiente la máquina entrega energía. [6]

Figura 11. Funcionamiento de la máquina en cuatro cuadrantes



Fuente [6]

En la figura 11, V representa la tensión de la red, E tensión inducida, n representa velocidad del motor.

En la tabla 16 se señalan los signos de las magnitudes eléctricas y mecánicas relacionadas en la operación de la máquina

Tabla 17. Signos de las diferentes magnitudes en los cuatro cuadrantes de funcionamiento de la máquina.

FUNCIONAMIENTO	CUADRANTE	VELOCIDAD	PAR	TENSIÓN	CORRIENTE	POTENCIA MECÁNICA $T\Omega$
MOTOR SENTIDO DIRECTO	1	+	+	+	+	+
FRENADO DIRECTO	2	+	-	+	-	-
MOTOR SENTIDO INVERSO	3	-	-	-	-	+
FRENADO INVERSO	4	-	+	-	+	-

Fuente: Autor

Es importante tener en cuenta que las máquinas podrán funcionar tanto como generador como motor, siempre y cuando no se sobrepasen los parámetros tanto eléctricos como mecánicos que impone el diseño de las máquinas.

Entre las limitaciones mecánicas se destacan:

El torque máximo que soporta el material del cual se compone el eje de la máquina.

Máxima velocidad de rotación recomendada.

Máxima velocidad que soportan los rodamientos de la máquina.

Las principales limitaciones eléctricas de las máquinas son:

Máxima corriente soportada por los conductores de los devanados de armadura y campo para no generar sobrecalentamiento.

Flujo máximo que no permita la saturación en el material ferromagnético del núcleo y que mantenga pérdidas en el hierro dentro del rango de valores aceptable.

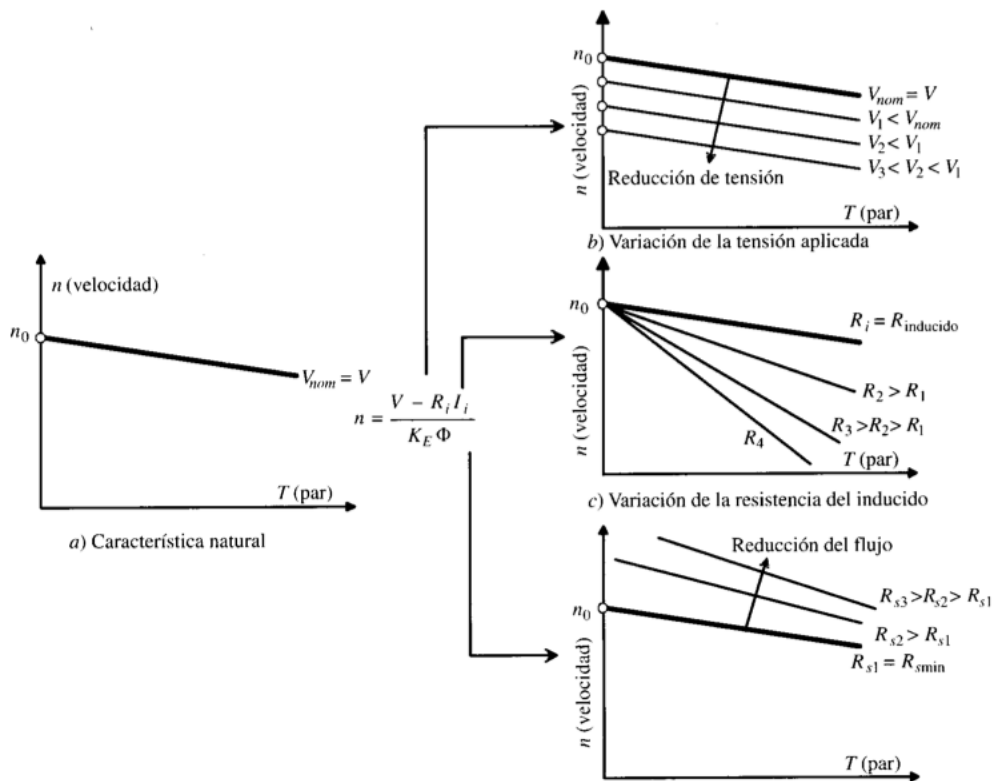
3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS EN ESTADO ESTABLE DE LOS MOTORES DE DC EXCITACIÓN INDEPENDIENTE Y DE INDUCCIÓN.

3.1.1 Curva característica de un motor de corriente continua de excitación independiente.

La característica natural de la máquina se rige según la ecuación [20] y corresponde a una línea recta para valores asignados de tensión aplicada.

$$\omega_r = \frac{V_a}{K_m} - \frac{R_a T_{em}}{K_m^2} \quad (20)$$

Figura 12. Características par-velocidad de un motor DC excitación independiente



a) Característica natural b) variación de la tensión aplicada c) variación de la resistencia de inducido. [6]

3.1.2 Curva característica de un motor de inducción

La ecuación (21) expresa el par electromagnético producido por la máquina en función de los parámetros del motor y donde es necesario tener en cuenta que el par es función del deslizamiento. El conjunto de ecuaciones expresadas a continuación es tomado de HUGO ALEJANDRO MARTINEZ RAMOS- DANIEL MEJIA URIBE. Motores eléctricos: frenado dinámico y a contracorriente. Trabajo de grado UIS.

$$T_{em} = \frac{1}{s \cdot \omega_{sm}} * \frac{3 \cdot V_{th} \cdot r_r'}{(r_{th} + \frac{r_r'}{s})^2 + (X_{th} + X_{lr})^2} \quad (21)$$

Dónde:

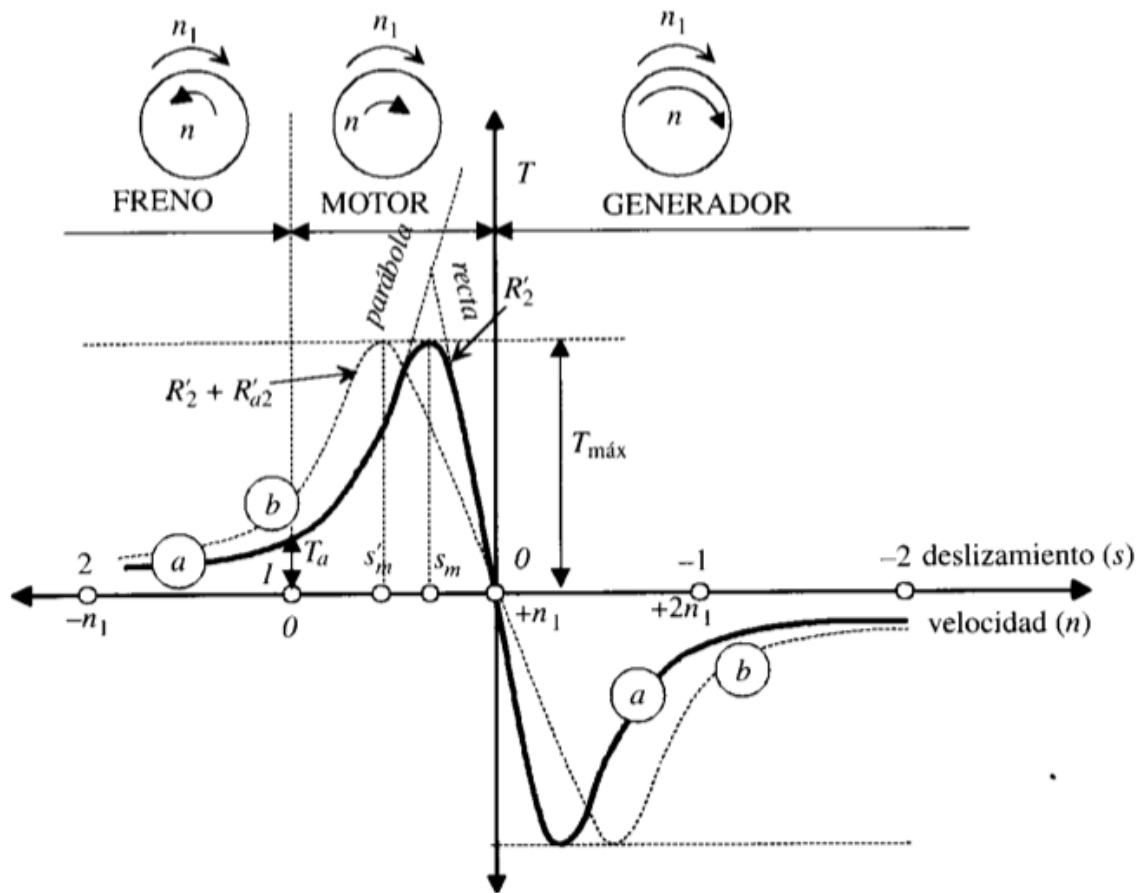
$$V_{th} = V_s \frac{j \cdot X_m}{r_s + (X_m + X_{ls})} \quad (22)$$

$$(r_{th} + jX_{th}) = \frac{jX_m \cdot (r_s + jX_{ls})}{r_s + j(X_m + X_{ls})} \quad (23)$$

La curva par-velocidad de la figura 12.a se construye para la resistencia propia de la armadura y se denomina característica natural del par

La figura 13 muestra las zonas de operación de un motor de inducción.

Figura 13. Zonas de operación de una máquina de inducción.



Fuente [6]

3.2 FRENADO ELÉCTRICO DE LOS MOTORES

3.2.1. Generalidades

El frenado eléctrico consiste en invertir el sentido del torque electromecánico, para que en este instante el torque vaya en dirección opuesta al movimiento del rotor, el objetivo es disipar la energía cinética almacenada en todas las masas giratorias que se encuentran acopladas al rotor.

A la hora de realizar un frenado eléctrico es necesario tener en cuenta que el resultado del torque electromagnético de frenado sumado con el torque de carga debe ser inferior al esfuerzo máximo que soporta el eje del motor. Debe considerarse también que la corriente que circule durante el frenado por los conductores de la máquina no produzca daños en la estructura de la misma.

3.3 FRENADO A CONTRACORRIENTE DEL MOTOR DC EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

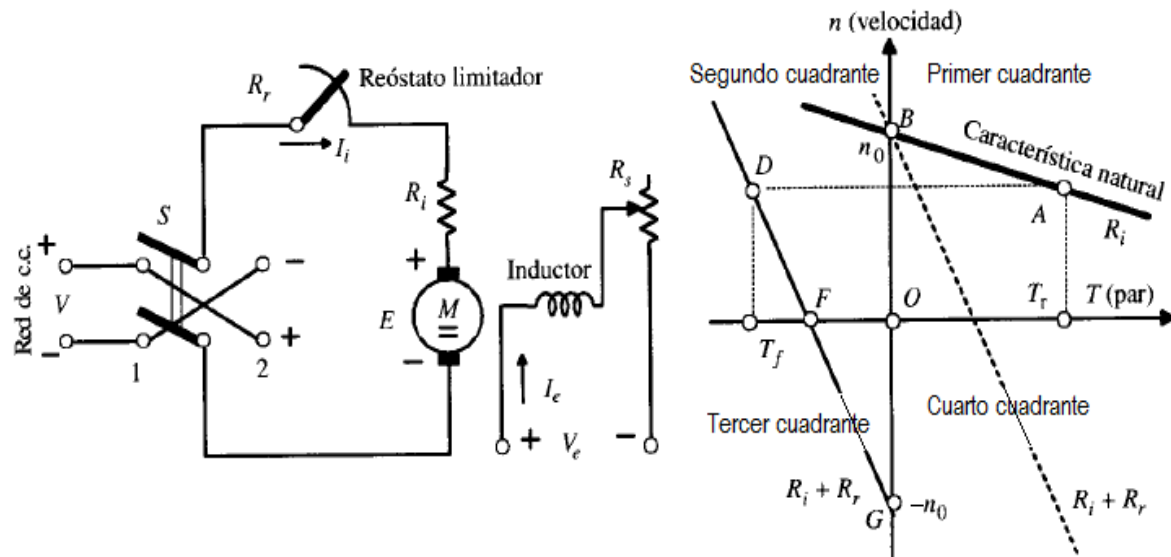
Procedimiento empleado principalmente cuando se necesita detener un motor y acto seguido ponerlo en marcha en sentido contrario al cual se encontraba girando. Por lo tanto, las aplicaciones de este método son control de motores DC en ascensores, trenes de laminación, entre otros.

El frenado a contracorriente o bloqueo consiste en invertir la dirección del flujo de la máquina mediante la inversión la polaridad de tensión en los bornes de la armadura, manteniendo sin alterar las conexiones del devanado inductor. A fin de proteger la armadura de un aumento de corriente considerable se introduce una resistencia en serie con el circuito de armadura.

La figura 14 representa el comportamiento del frenado a contracorriente del motor DC excitación independiente, cuando el conmutador se encuentra en la posición 1 la máquina actúa como motor en el punto de trabajo A, para un par resistente T_r .

Al pasar el conmutador a la posición 2, se invierte la polaridad de la tensión aplicada a la armadura, por lo tanto la máquina pasará al punto de operación D girando durante un tiempo más manteniendo la dirección y la velocidad, como consecuencia de esto aparecerá una corriente negativa, y la máquina seguirá la curva DF hasta alcanzar la velocidad cero. [6]

Figura 14. Frenado a contracorriente del motor DC excitación independiente.



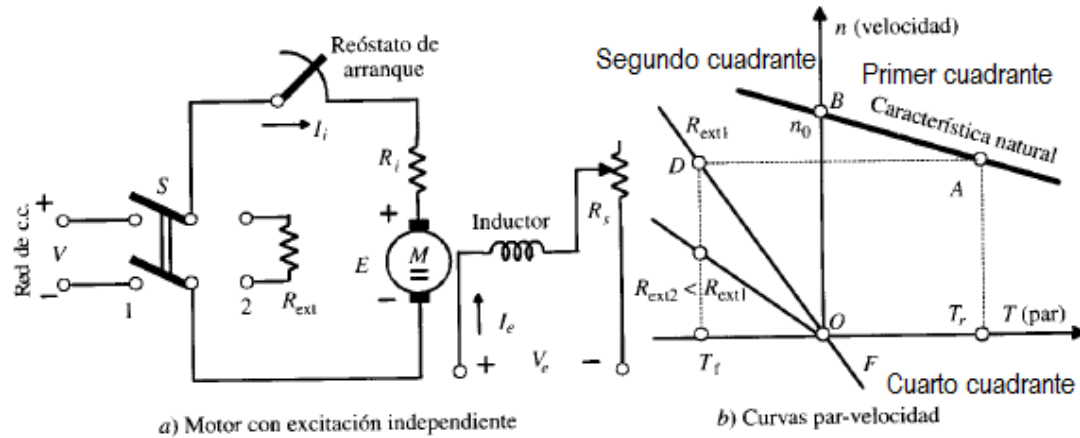
Fuente [6]

3.4 FRENADO DINÁMICO DEL MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

El frenado dinámico de un motor DC de excitación independiente consiste en desconectar el motor de la fuente de alimentación y conectar al devanado de armadura a una resistencia externa, como consecuencia se genera una corriente en dirección opuesta en el devanado de armadura que produce un par que se opone, obligando así a éste a detenerse.

El proceso de frenado puede verse en la figura 15, donde antes de introducir la resistencia externa el motor operaba en el punto A, una vez insertada la resistencia el motor pasa a operar en el punto D, donde velocidad la velocidad permanece constante y par tiene signo diferente s, en consecuencia se desacelera la máquina. Durante el frenado el motor sigue la curva DO.

Figura 15. Frenado dinámico del motor DC de excitación independiente.



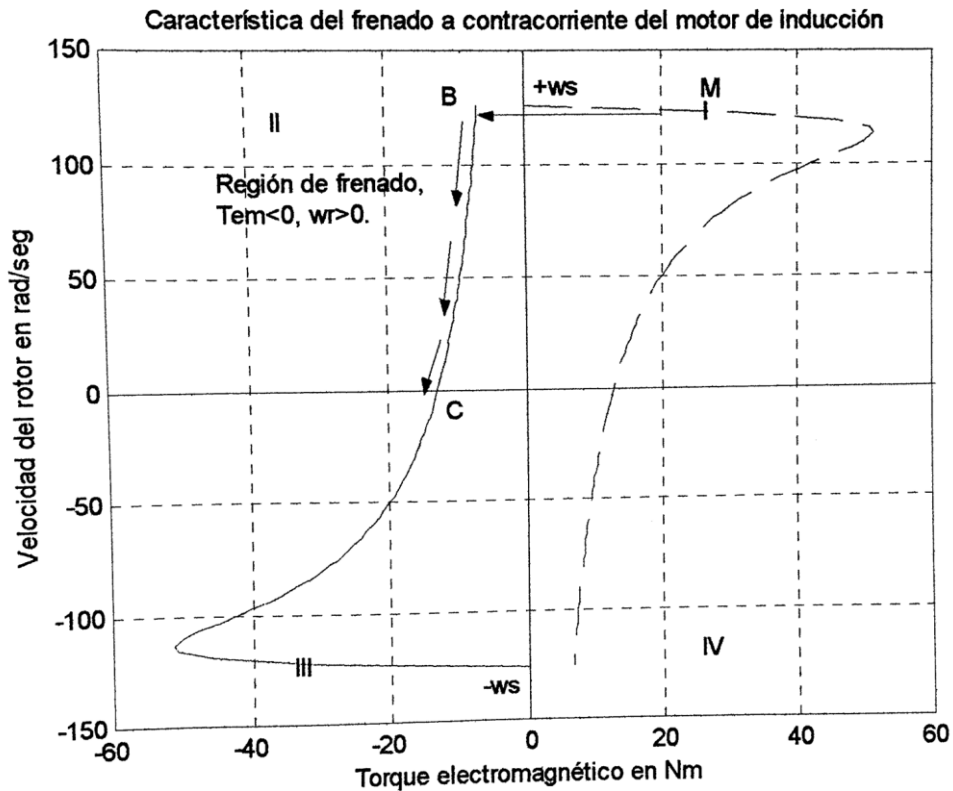
Fuente [6]

3.5 FRENADO A CONTRACORRIENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Consiste en cambiar la conexión de dos de las fases, para conseguir la inversión del sentido de giro del torque electromagnético. El proceso de frenado a contracorriente del motor de inducción figura 16, el motor trabaja en el punto M con una corriente cercana a la nominal y presenta un deslizamiento pequeño (justo antes de invertir la conexión de las fases), el punto de funcionamiento del motor se sitúa en el primer cuadrante, en donde la velocidad y el par electromagnético son positivos. Al invertir la conexión de las fases el motor pasará a un punto B, que se encuentra en el segundo cuadrante donde la velocidad sigue siendo positiva, y el torque electromagnético es negativo. La máquina debe desconectarse al llegar al punto C, donde la velocidad es 0 y el deslizamiento es 1, por consiguiente en C el motor alcanzará la corriente nominal de arranque.

En este tipo de frenado la energía que se encuentra en el rotor se disipa en forma de calor en los devanados de la máquina.

Figura 16. Proceso de frenado a contracorriente del motor de inducción.



Fuente [4]

3.6 FRENADO DINÁMICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

La figura 17 muestra el proceso de frenado dinámico en una máquina de inducción, en un principio el motor se encuentra operando en el punto M, donde la velocidad y el par son positivos. Se sustituye la conexión de la red de alterna que alimenta el estator por una fuente de corriente continua, acción que conlleva a generar un campo estático inductor, que produce un torque de frenado dado por:

$$T = K\phi I_r \quad (24)$$

Dónde:

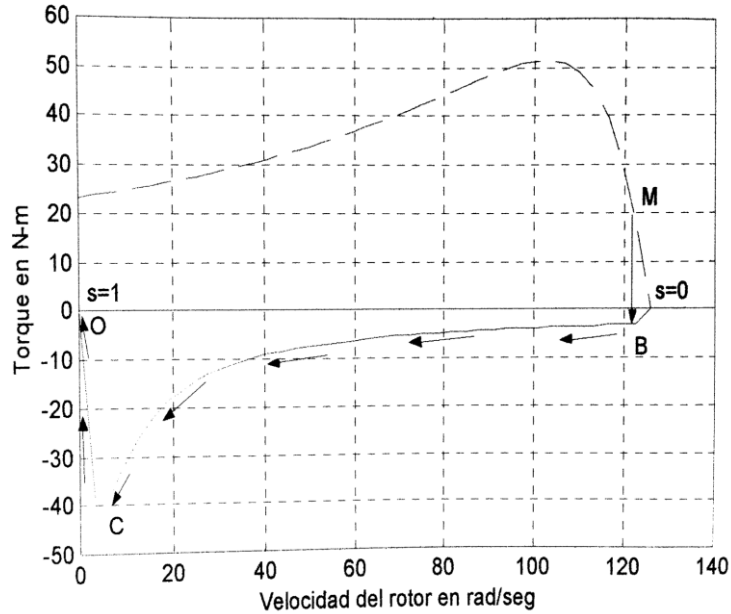
K = Constante.

I_r =Corriente que circula por los devanados del rotor

ϕ =Flujo en el entrehierro.

La máquina cambia de M a B de la figura 17. En este punto a medida que la velocidad del rotor disminuye aumenta el par de frenado, esto se debe a que la corriente del rotor y el factor de potencia han aumentado a causa del decrecimiento de la reactancia del rotor.

Figura 17. Proceso de frenado dinámico de un motor de inducción



Fuente. [4]

4. SIMULACIÓN DEL ARRANQUE Y FRENADO DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE Y UN MOTOR DE INDUCCIÓN.

4.1 GENERALIDADES

La simulación se realiza con el fin de conocer el comportamiento de los motores al pulsar arranque o frenado. Es por esto que en este trabajo se emplea la herramienta MATLAB/SIMULINK para resolver los modelos matemáticos compuestos de ecuaciones diferenciales que hacen viable la predicción de problemas que puedan presentarse en los sistemas ante estos accionamientos (arranques y frenados).

Otra de las finalidades de la simulación es observar la reacción de los sistemas ante cambios topológicos del circuito.

No hay que perder de vista que aunque la simulación es una herramienta útil y posee grandes ventajas no es más que un complemento a la construcción del prototipo del sistema real.

Una simulación es efectiva cuando:

Se determinan los objetivos de la simulación, se hace con el fin de elegir el modelo a ser utilizado. Es necesario resaltar que para un mismo sistema físico no existe un único modelo.

Una vez establecidos los objetivos de la simulación y los modelos que pueden ser empleados en esta, debe seleccionarse el modelo más simple para el sistema en cuestión.

Elegir un método matemático capaz de resolver el modelo matemático que se ha seleccionado.

El objetivo de la simulación en este trabajo es analizar el comportamiento de un motor de corriente continua de excitación independiente y un motor de inducción, existentes en el laboratorio de máquinas de la E3T, ante los diferentes procesos de arranque y frenado que se implementan en el módulo a ser construido.

Las variables de interés son: torque electromagnético, corriente y velocidad del rotor frente a los accionamientos de frenado y arranque, el modelado y la simulación se hacen con el fin de seleccionar adecuadamente tensiones y tiempos acordes a las máquinas de interés del trabajo de grado.

4.2 MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Durante los procesos de arranque y frenado de una máquina DC de excitación independiente es importante limitar la magnitud de la corriente con el fin de:

Evitar acortar la vida útil de la máquina mediante el establecimiento de límites para la corriente, garantizando así que durante los accionamientos de arranque y frenado no se presenten grandes esfuerzos térmicos.

Garantizar que la regulación de tensión durante los arranques y frenados no exceda el valor establecido por la norma, para así no causar daños a elementos que se encuentren conectados a la red.

Eliminar las sobretensiones que se puedan presentar y que ocasionarían daños a los semiconductores que controlan la potencia a la máquina.

Un parámetro importante es el tiempo que tarda el motor desde la velocidad cero hasta alcanzar la velocidad de trabajo, así como el tiempo que necesita una vez adquirida la velocidad de trabajo hasta detenerse, de estos tiempos depende el calentamiento de los devanados de la máquina, ya que se presentan pérdidas adicionales debidas a la aceleración.

Otra variable a tener en cuenta durante el arranque y frenado de un motor DC de excitación independiente es el torque electromagnético, ya que durante el del frenado irá en la misma dirección del par de carga del rotor, para de esta manera detener el rotor. Así pues al sumarse par de carga y par electromagnético la máquina experimentará un gran esfuerzo mecánico en el eje del rotor.

4.2.1 Resultados de las simulaciones del arranque del motor DC de excitación independiente

El arranque del motor DC de excitación independiente se realiza por medio de variación de la tensión de armadura, mediante un convertidor CC/CC también conocido como troceador, que se encarga de transformar la corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión variable.

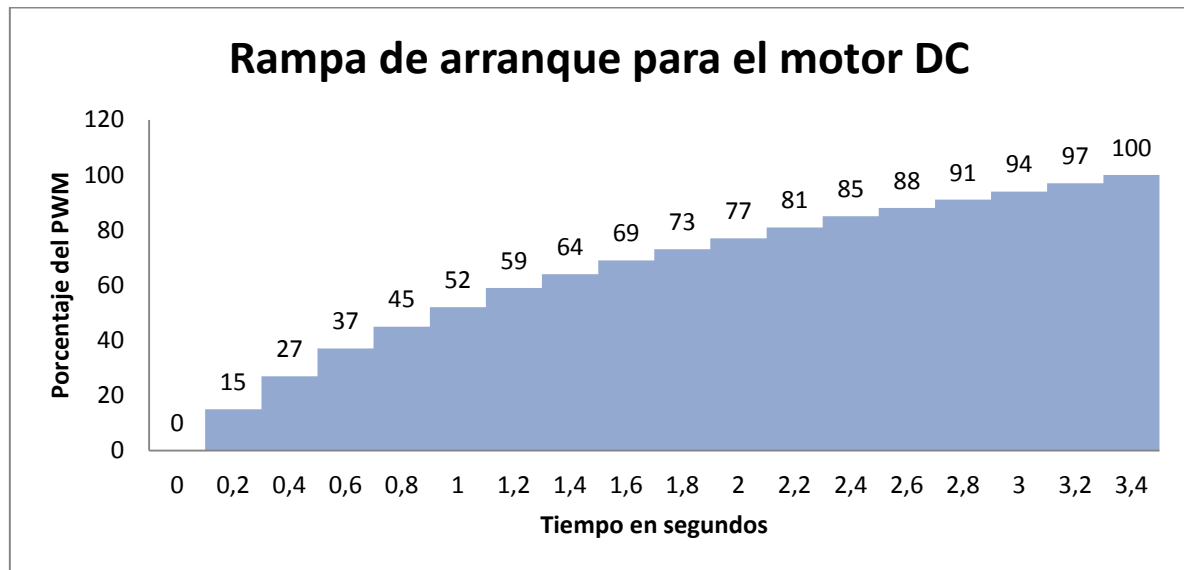
La rampa de arranque que se emplea en la simulación es de tipo logarítmica ya que con esta se logran tiempos adecuados para no sobrepasar los límites de corriente. Es decir que aún bajo diferentes condiciones de torque la rampa logra mantener la corriente de arranque en un valor no superior a 1.5 veces la corriente nominal del motor.

Una vez realizada la prueba en el laboratorio se corrobora que los datos sugeridos en la literatura ² son los más adecuados para el desarrollo de este trabajo de grado y corresponden a una frecuencia para el PWM de 250 [Hz] y 0,2 [ms] para realizar los

² Dewan, S.B: Slemon, G.R: Straughen, A.POWER SEMICONDUCTOR DRIVES. Singapur: John Wiley & Sons. 1984. Página 130.

cambios de tensión media en la armadura. La figura 18 muestra los porcentajes de trabajo del PWM empleados en la rampa de arranque del motor DC de excitación independiente, dichos porcentajes de tensión de trabajo garantizan que durante el arranque del motor empleado en este trabajo de grado la corriente no sobrepasa 1,5 veces la corriente nominal del mismo.

Figura 18. Rampa de arranque para el motor DC de excitación independiente.

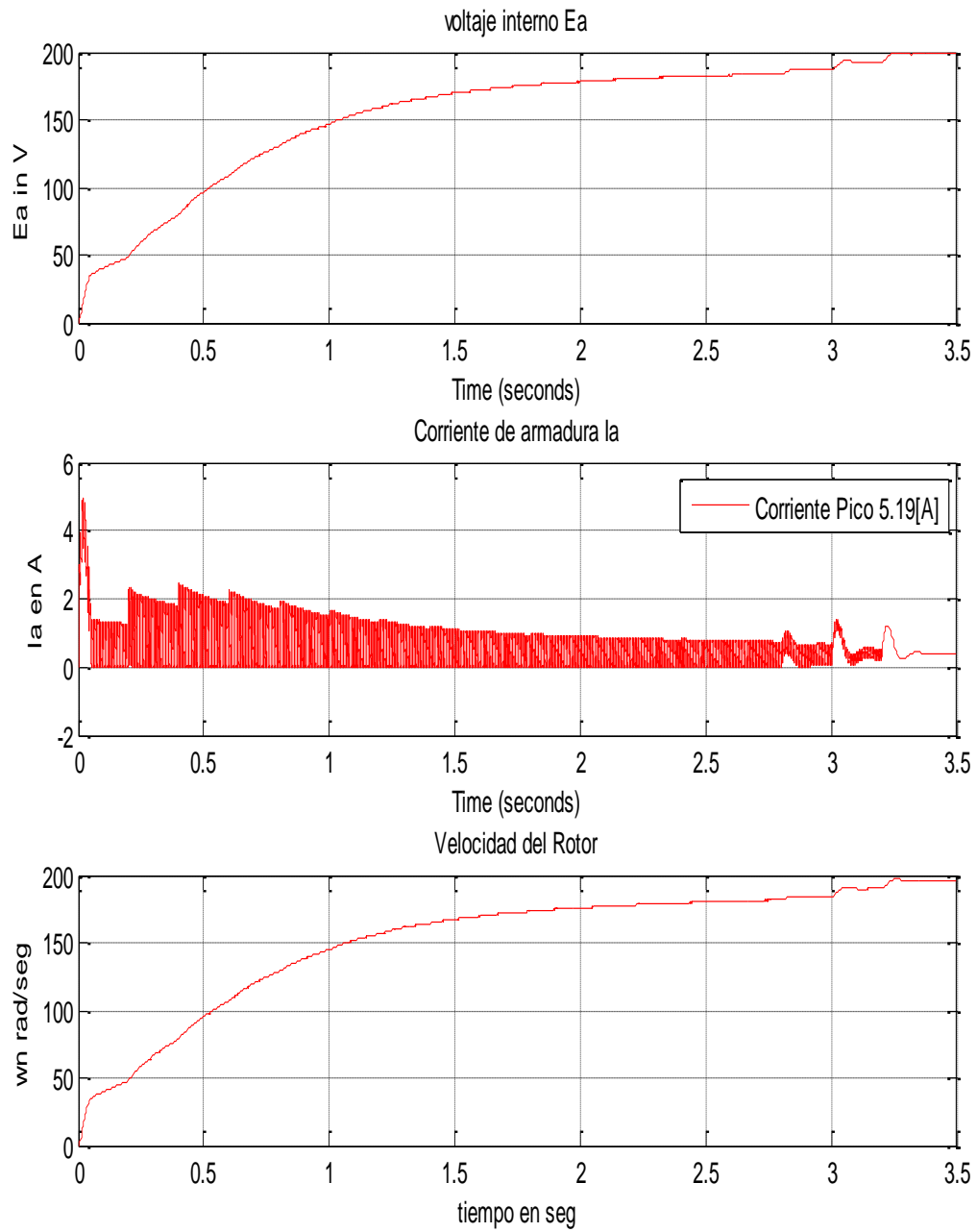


Fuente [7]

Ahora se muestran los resultados de la simulación obtenidos para el motor DC de excitación independiente disponible.

Simulación del arranque del motor DC de excitación independiente en vacío:

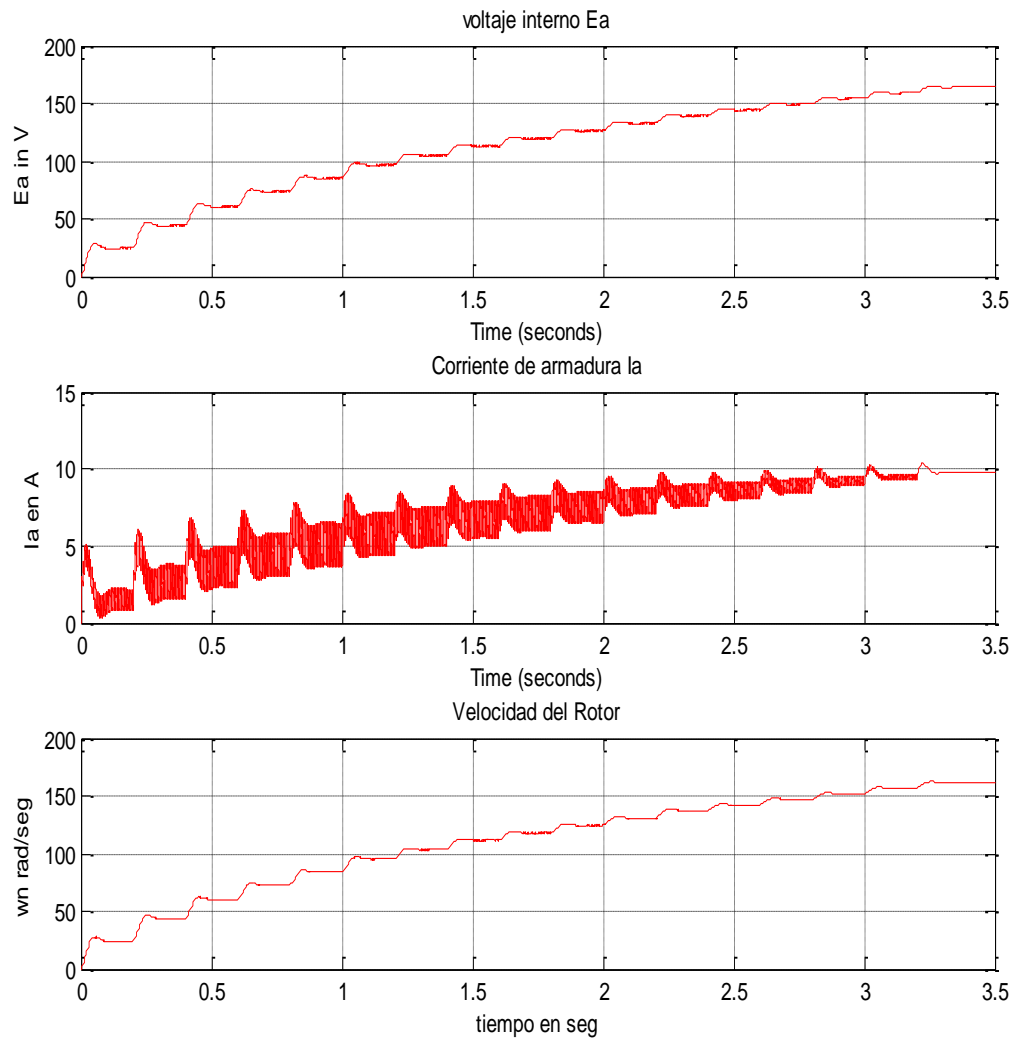
Figura 19. Simulación del motor DC de excitación independiente en condición de vacío



Fuente. [7]

Simulación del arranque del motor DC de excitación independiente bajo carga proporcional a la velocidad:

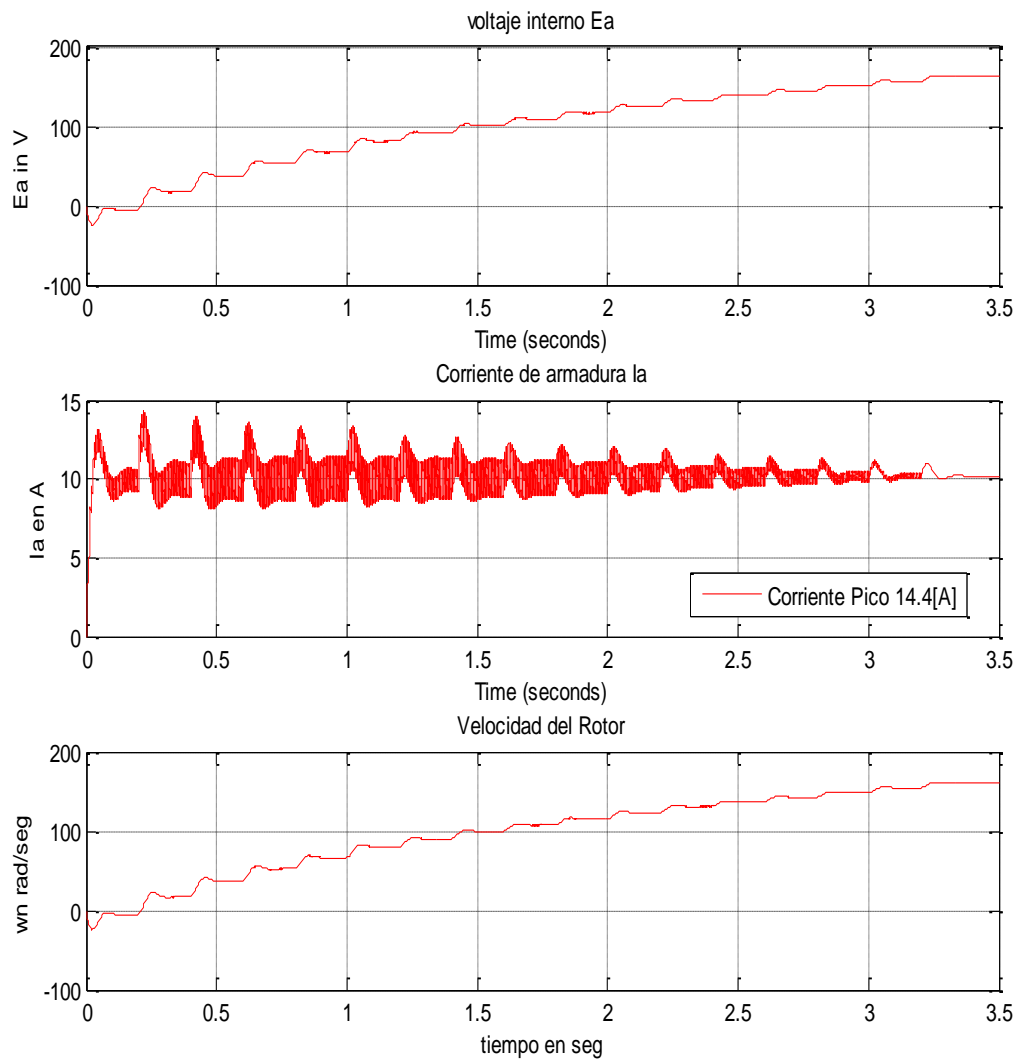
Figura 20. Simulación del arranque del motor DC de excitación independiente bajo carga proporcional a la velocidad



Fuente. [7]

Simulación del arranque del motor DC de excitación independiente a par constante:

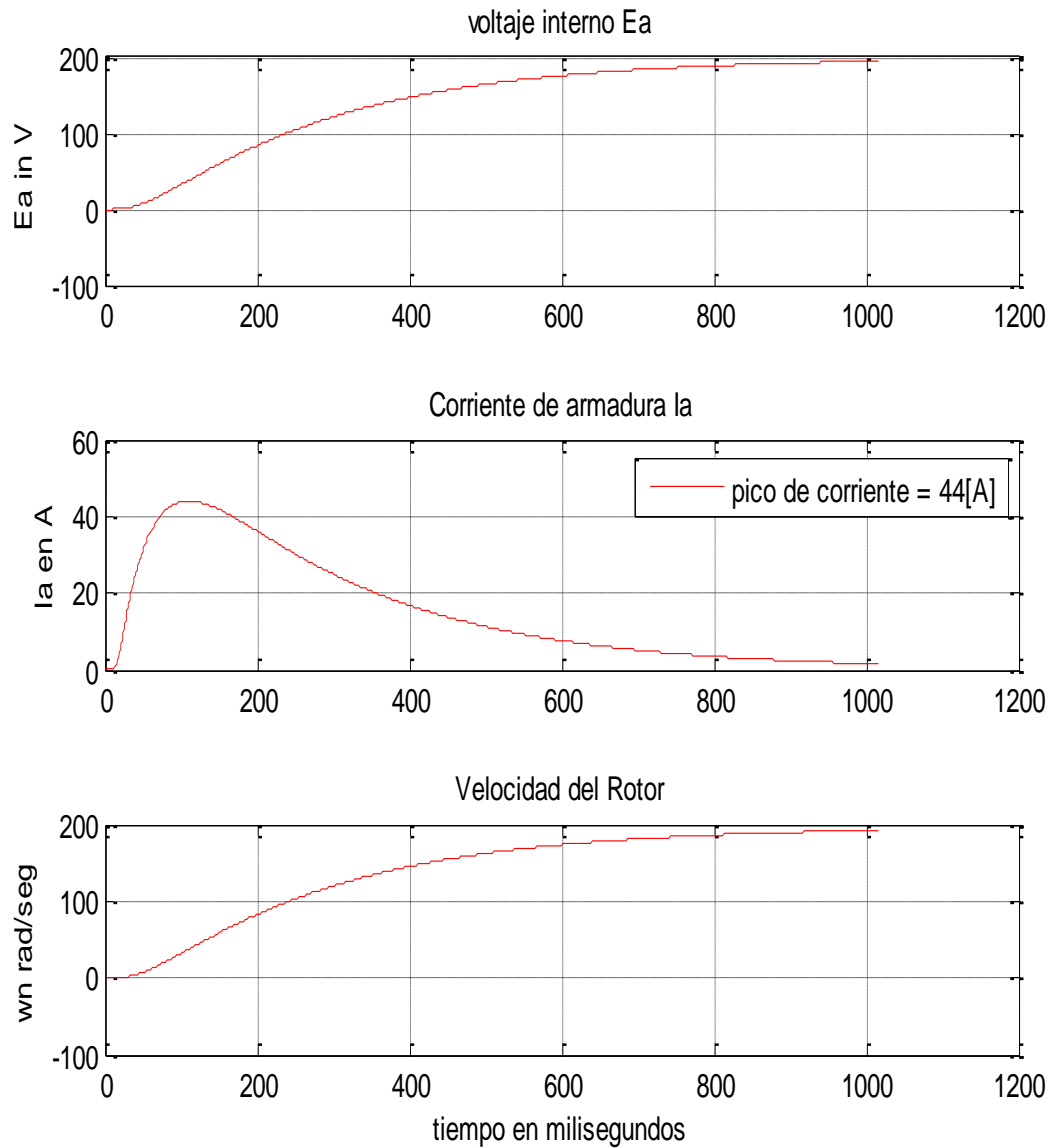
Figura 21. Simulación del arranque motor DC de excitación independiente a par constante.



Fuente [7]

Simulación del arranque directo del motor DC de excitación independiente.

Figura 22. Simulación del arranque directo motor DC de excitación independiente.



Fuente [7]

Según las figuras 19,20,21,22 para el arranque del motor de corriente continua es posible decir que:

Para un arranque directo en vacío el motor empleado en este trabajo presentaría un valor pico de corriente correspondiente a 44 [A], con una duración de 120 [ms], es decir alcanzaría una corriente de aproximadamente 3,5 veces la corriente nominal del motor. El objetivo será entonces, mediante el método de variación de tensión de armadura reducir el pico de corriente durante el arranque a un valor no mayor a 1,5 veces la corriente nominal del motor independientemente de que esté se encuentre operando en vacío o bajo carga.

El arranque del motor bajo par constante es la condición más desfavorable que se puede presentar, la simulación se realizó para un torque de 10 [N-m], para esta condición de carga se probaron distintos porcentajes de tensión de trabajo para la rampa de arranque, los valores más adecuados se consignan en la figura 18, con dichos valores el pico máximo de corriente durante el arranque equivale a 14,4 [A].

Para un arranque por variación de tensión de armadura estando el motor en vacío, presentaría un valor de 5.19 [A], siendo esta la condición menos desfavorable para la máquina puesto que solo debe vencer su inercia.

La simulación de la corriente en un arranque por variación de tensión de armadura con el motor trabajando a par proporcional a la velocidad no superará la corriente nominal.

El tiempo que tardaría el motor en estabilizar sus valores de corriente depende tanto del tiempo que tarda en alcanzar la velocidad de trabajo como de la tensión aplicada en la armadura. El tiempo que le tomaría estabilizarse al motor de este trabajo de grado equivaldría a 3,2 [s], debido a que son 17 porcentajes de tensión, cada uno con una duración de 0,2 [s].

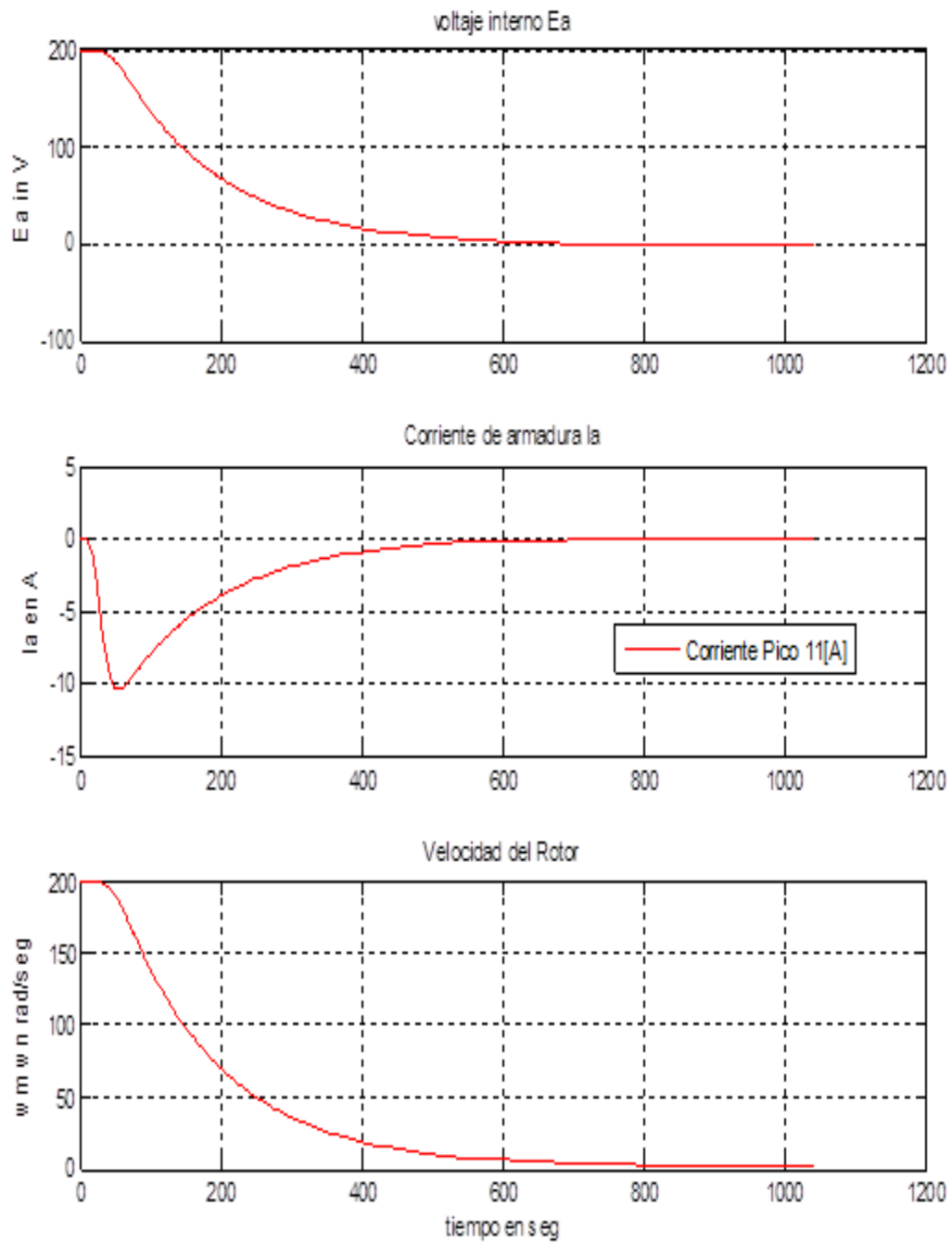
4.2.2 Simulación del frenado a contracorriente del motor DC de excitación independiente.

Para este tipo de frenado se hace necesario insertar una resistencia de $14[\Omega]$ a $30[W]$ en serie con el devanado de armadura, para así garantizar que la corriente se mantenga entre unos valores que no causen daños al troceador ni a los devanados de la máquina.

Variando la tensión aplicada o el valor de la resistencia externa en serie con la armadura del motor, se obtiene una variación directamente proporcional en el tiempo de frenado del motor.

A continuación los resultados del frenado a contracorriente, donde la figura 23 representa la corriente de armadura en el proceso de frenado, aplicando una tensión reducida correspondiente al 10% ($22 [V_{dc}]$), con el fin de tener control sobre la corriente que circula por el devanado de armadura de la máquina así como el tiempo de frenado del rotor del motor.

Figura 23. Resultados obtenidos en la simulación del frenado a contracorriente para el motor DC de excitación independiente.



Fuente [7]

Al variar los valores de resistencia externa, modificando el parámetro respectivo en la simulación a $7[\Omega]$, $14[\Omega]$ y $21 [\Omega]$, se obtendrían magnitudes de corrientes correspondientes a $17 [A]$, $11[A]$ y $8[A]$, tomando $420[ms]$, $700[ms]$ y $850 [ms]$ para detener el motor respectivamente. Para este trabajo se implementará una resistencia de $14[\Omega]$, puesto que se encontraba en el módulo a ser recuperado.

4.2.3 Simulación del frenado dinámico del motor DC de excitación independiente.

Es de gran importancia resaltar que en el frenado dinámico la velocidad y la corriente de armadura llagan a cero en el mismo instante.

El tiempo que tarda el motor en detenerse en el frenado dinámico depende de la resistencia que se inserta, a mayor resistencia, mayor tiempo de frenado, para efectos de comprobar esto, en la simulación se probaron distintos valores de resistencias (7 , 14 , $21 [\Omega]$), obteniendo valores de corrientes de 21 , 18 , $15 [A]$, y tiempos de frenado de 80 , 150 , $200 [ms]$ respectivamente.

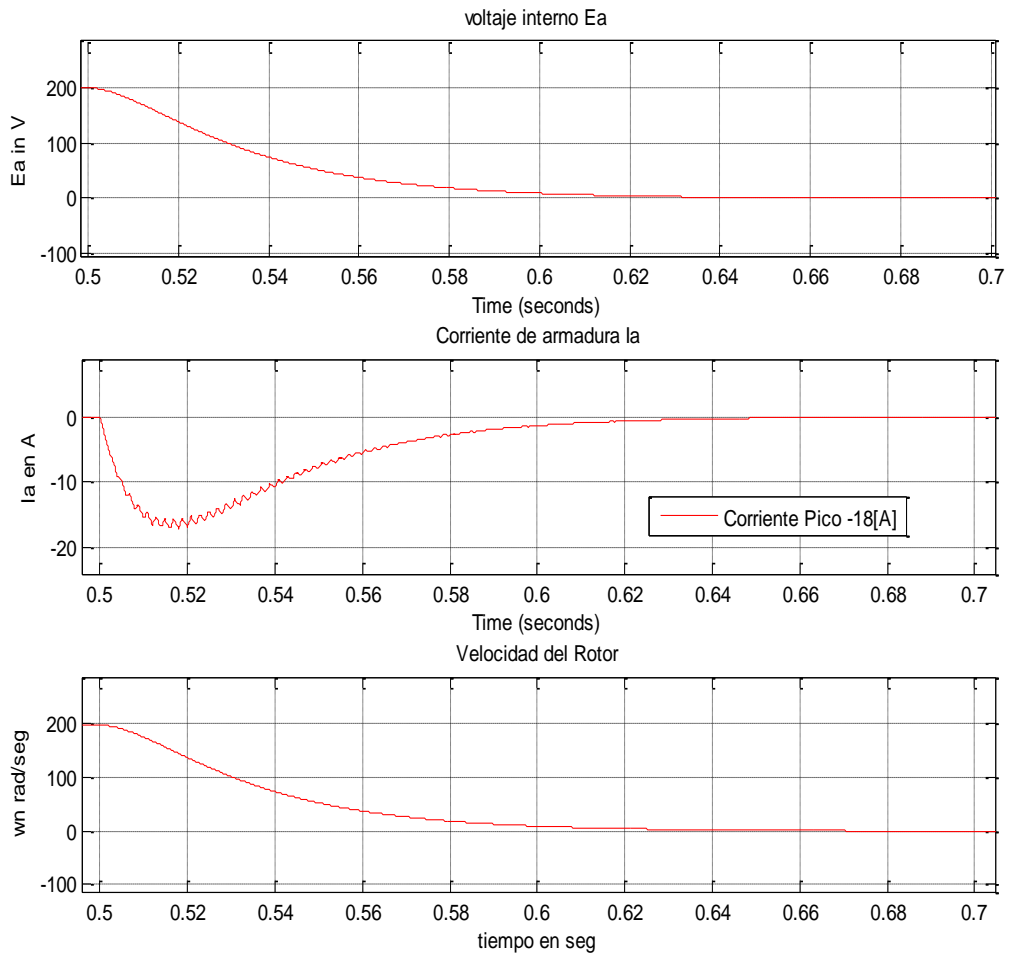
Mediante la simulación del frenado dinámico se determina que la resistencia existente ($14 [\Omega]$) limita la corriente a un valor de $18[A]$, por tanto no tiene efectos desfavorables sobre la vida útil del motor, puesto que la magnitud del pico de corriente no supera $1,5$ veces la corriente nominal y se decide continuar trabajando con ese valor de resistencia.

En el proceso de frenado el par de carga y el par de frenado tienen el mismo sentido, en consecuencia, el torque de carga ayuda a detener la máquina. Es por esto que al estar el motor en vacío el tiempo de frenado es mayor.

Se implementan dos tipos de frenado, el primero de ellos conocido como frenado lento, al cual se le impone una resistencia de 14Ω , y el segundo denominado frenado rápido con una resistencia reducida por medio de un transistor de potencia.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación

Figura 24. Resultados de la simulación del frenado dinámico del motor DC de excitación independiente.



Fuente [7]

4.3 MOTOR DE INDUCCIÓN.

Para el motor de inducción se realizan tres simulaciones, arranque tipo estrella-triángulo, frenado dinámico y frenado a contracorriente. El objetivo de estas

simulaciones es observar el comportamiento de la corriente del motor de inducción ante al arranque y los diferentes tipos de frenados.

4.3.1 Arranque estrella-triángulo del motor de inducción.

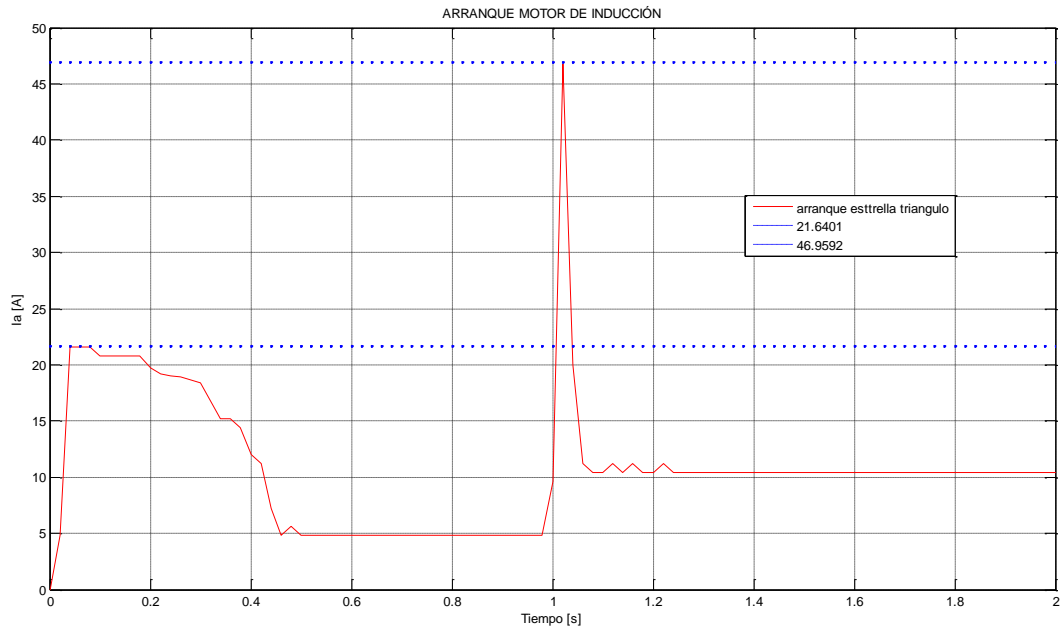
La simulación permite ver que durante el arranque estrella-triángulo un motor de inducción emplea la mitad de la corriente que usaría en un arranque directo.

El arranque estrella-triángulo debe hacer la transferencia de Y a DELTA cuando el motor haya alcanzado el punto de operación en estado estable en Y, para así garantizar que no ocurran sobrecorrientes que puedan afectar la vida útil de la máquina. En la simulación se determina que a mayor inercia más tarda en alcanzar el motor su condición de trabajo en Y, este tiempo que tarda en alcanzar la condición de trabajo es el tiempo que debe operar el motor antes de hacer la transición a DELTA, en consecuencia se establece que el tiempo adicional al tiempo del arranque debe ser el doble si la inercia de la carga dobla la inercia del motor.

El parámetro de interés es el tiempo que tarda el motor en llegar a la condición de operación de estado estable en Y, se manejará la misma corriente para diferentes condiciones de inercia.

La simulación se realiza con los parámetros encontrados en el capítulo 2 en la prueba de vacío y rotor bloqueado que permiten establecer las curvas características en estado estable del motor de inducción disponible en el laboratorio de máquinas de la E3T. La figura 25 muestra los resultados de la simulación.

Figura 25. simulación del arranque y- Δ del motor de inducción.



Fuente [7]

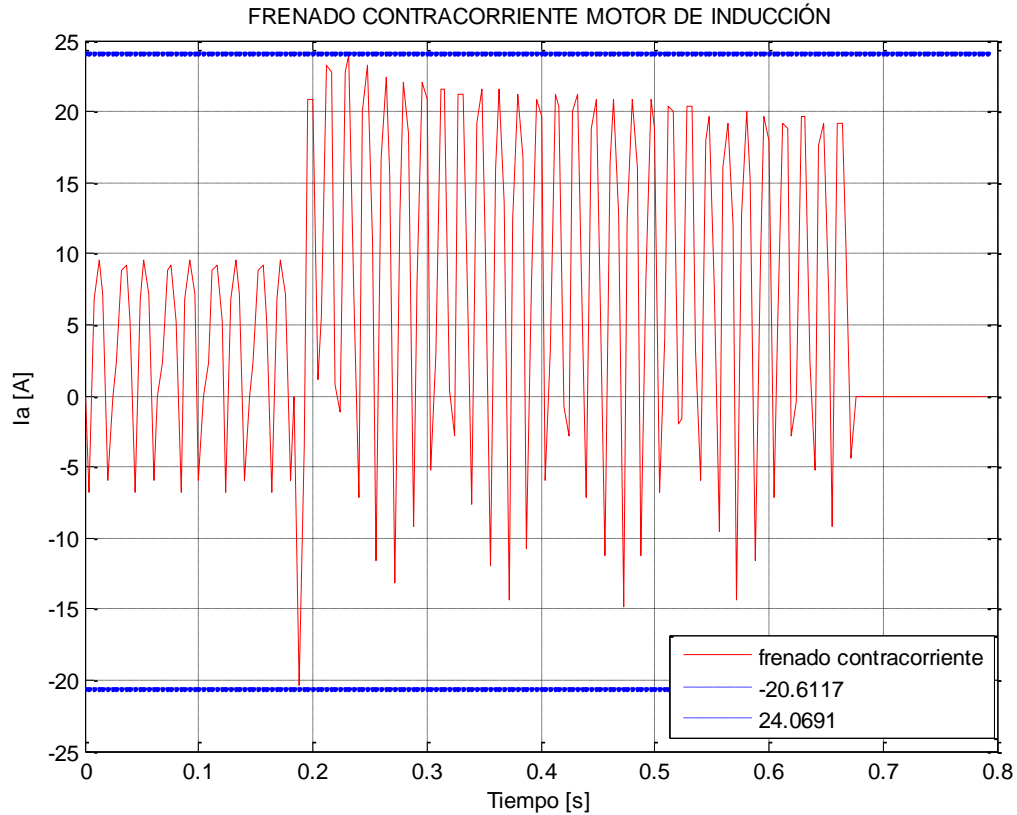
4.3.2 Frenado a contracorriente del motor de inducción.

Los parámetros a tener en cuenta en la simulación del frenado a contracorriente del motor de inducción son: momento de inercia, tensión aplicada durante el frenado, torque de carga, puesto que estos influyen en el tiempo que tarda el motor en detenerse. Para efectos de reducir la corriente durante el proceso del frenado, la tensión a aplicarse será de $127/\sqrt{3}$ V. (la tensión nominal en Δ corresponde a 127[V])

La simulación se hace con la finalidad de determinar el tiempo que tarda el motor en detenerse.

La figura 26 muestra los resultados obtenidos para el motor de inducción en la simulación del frenado a contracorriente, el motor experimentaría un pico de corriente de 24 [A] y tardaría en detenerse 0,5 [s] aproximadamente

Figura 26. Resultados de la simulación del frenado a contracorriente para el motor de inducción.



Fuente [7]

4.3.3 Frenado dinámico del motor de inducción.

El tiempo de frenado del motor de inducción varía con la tensión DC que es aplicada durante el accionamiento, a menor tensión DC el tiempo de frenado es mayor.

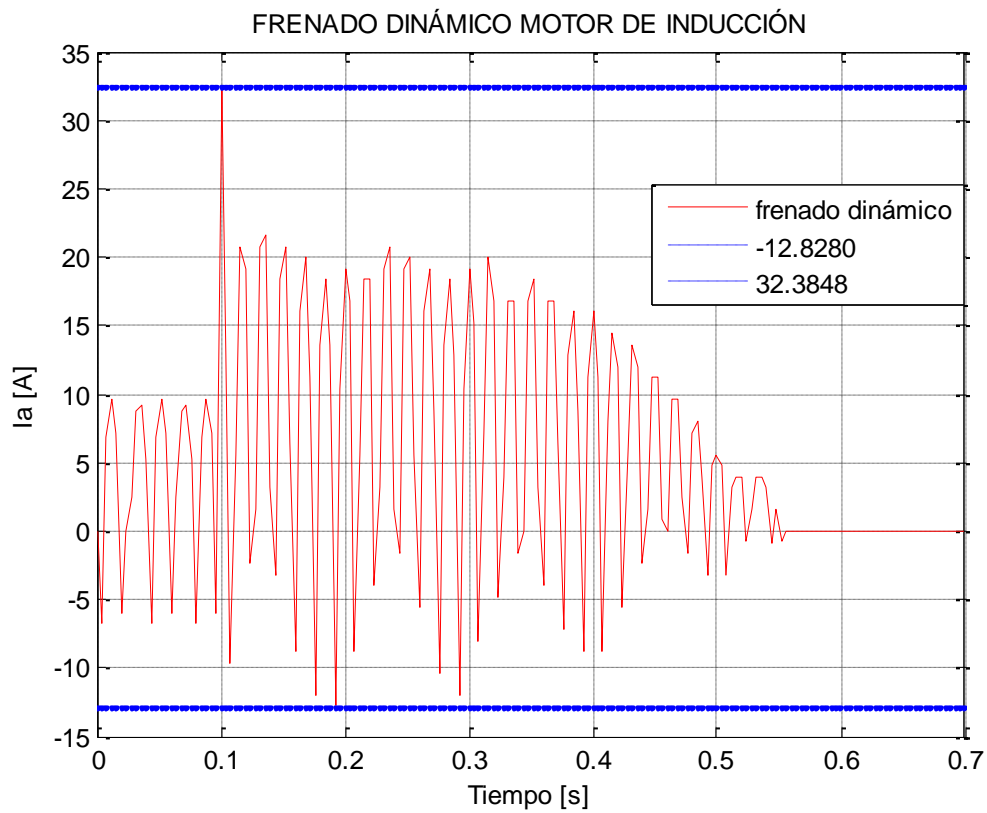
En el proceso de frenado dinámico tanto inercia como torque tienen el mismo impacto sobre el tiempo de parada.

Se busca un valor de corriente que garantice el no deterioro de la vida útil del motor bajo determinadas condiciones de inercia y carga.

La simulación se realiza con el motor conectado en Δ . La corriente DC durante el proceso de frenado equivaldría a 32,3 [A] y la duración del proceso de frenado sería de aproximadamente 0,45 [s].

La figura 27 muestra los resultados de la simulación del frenado dinámico del motor a emplearse en este trabajo de grado.

Figura 27. Resultados de la simulación del frenado dinámico para el motor de inducción



Fuente. [7]

5. DIAGRAMAS ELECTRICOS DE LOS CIRCUITOS IMPLEMENTADOS

Las tarjetas empleadas para la realización de este trabajo fueron las diseñadas e implementadas en el trabajo de grado “MOTORES ELÉCTRICOS: FRENADOS DINÁMICO Y A CONTRACORRIENTE” Desarrollado por Hugo Alejandro Martínez, Daniel Mejía, dichas tarjetas fueron modificadas y adecuadas para operar con los motores que se encuentran disponibles en el laboratorio de máquinas de la E3T.

5.1 CIRCUITO RECTIFICADORES DE ONDA COMPLETA (placa N° 1)

La tarjeta impresa o Placa N° 1 del módulo de arranque y frenado de motores, cuenta con 5 diferentes rectificadores de onda completa, los cuales se encuentran alimentados por el transformador N°1 del módulo, estos rectificadores son los encargados de energizar los diferentes circuitos que se encuentran en las demás tarjetas .

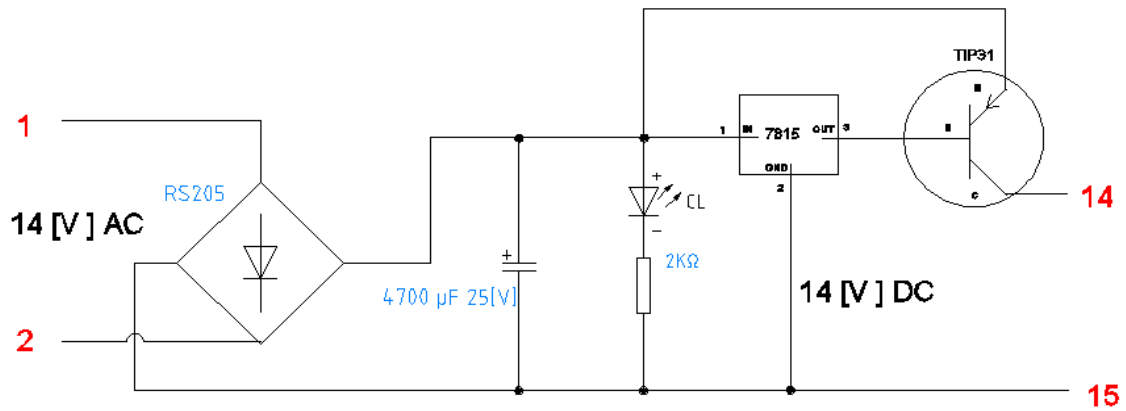
Figura 28. Fotografía de la Tarjeta N°1 del módulo de arranque y frenado



Fuente [7]

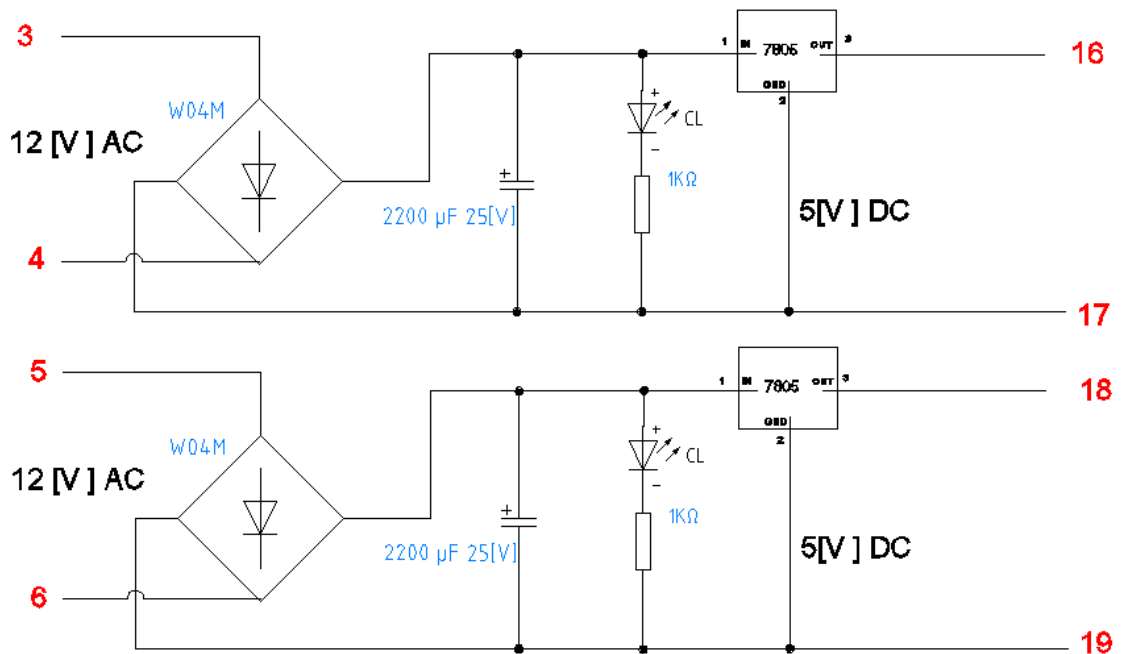
El circuito esquemático de los rectificadores de onda completa se muestra en la figura 29, la numeración dada en la figura 28 corresponde a numeración asignada en los circuitos esquemáticos.

Figura 29a. rectificador de onda completa salida 14[V]



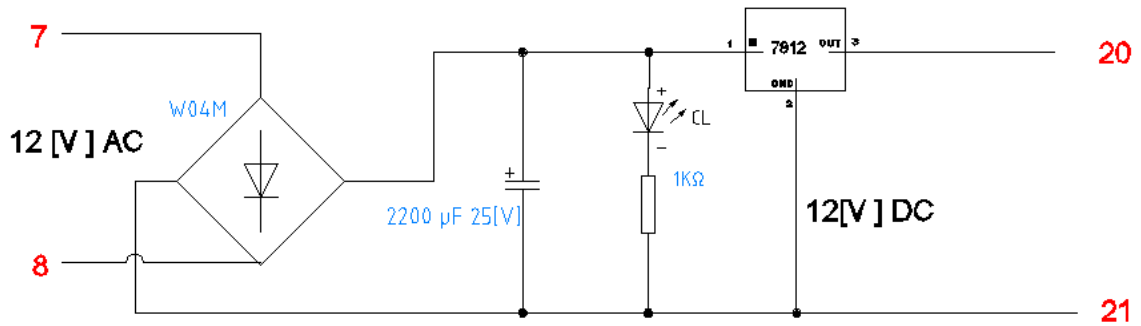
Fuente [7]

Figura 29b. Rectificador de onda completa salida 5 [Vdc]



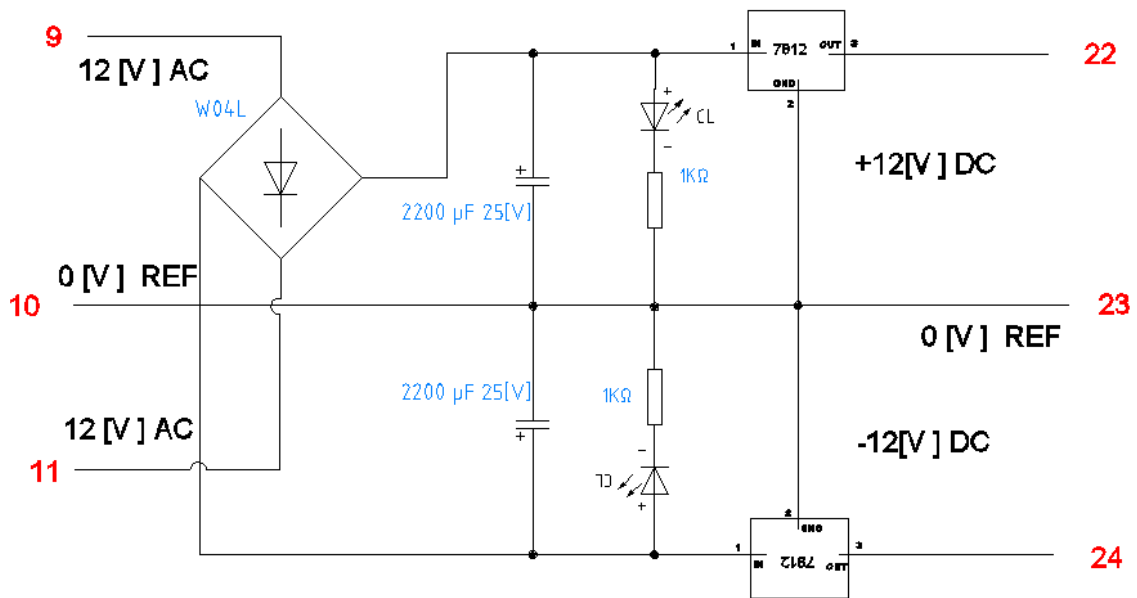
Fuente [7]

Figura 29c. Rectificador de onda completa salida 12 [Vdc]



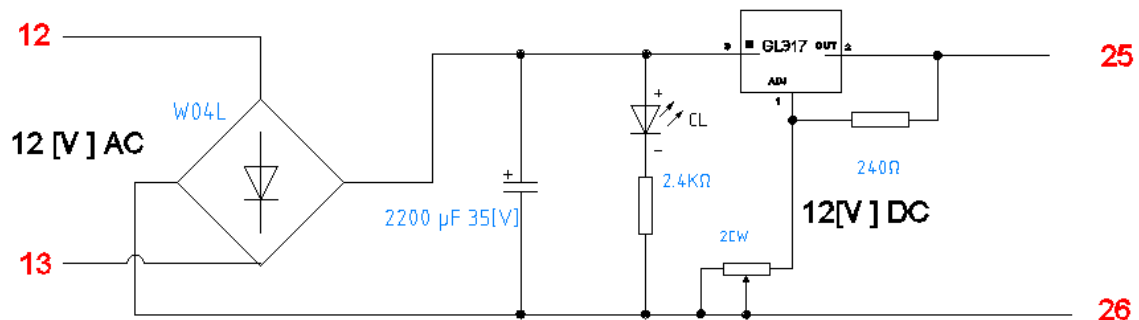
Fuente [7]

Figura 29d. Rectificador Dual de onda completa salida 12 y -12 [Vdc]



Fuente [7]

Figura 29e. Rectificador de onda completa salida 12 [Vdc]



Fuente [7]

5.2 CIRCUITO RECTIFICADOR PARA LA CORRIENTE DE CAMPO DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA (tarjeta N° 2)

La tarjeta N°2 es un circuito rectificador de onda completa el cual se encuentra alimentado por el transformador N°2 del módulo, la tensión de salida en el rectificador es de 220[Vdc], cuando la tensión entre fases a la entrada del módulo es de 127[Vac] como lo muestra la figura 31.

Este rectificador cuenta con un optoacoplador(4N26A), encargado de censar la presencia del devanado de campo del motor de excitación independiente. Cualquier valor de tensión por debajo de los valores de trabajo recomendados trae como consecuencia que el optoacoplador no cense la presencia de campo.

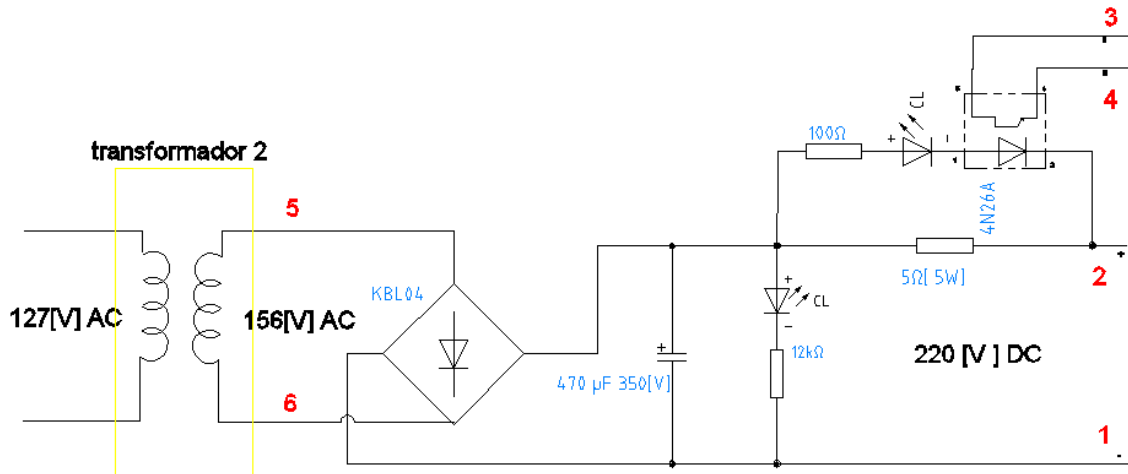
Figura 30. Fotografía de la tarjeta N°2 circuito rectificador para la corriente de campo del motor de corriente continua.



Fuente [7]

El circuito esquemático del rectificador de onda completa para la corriente de campo del motor de excitación independiente se muestra en la figura 30, la numeración dada en la figura 30 corresponde a numeración asignada en el esquemático.

Figura 31. Circuito rectificador para la corriente de campo del motor de corriente continua.



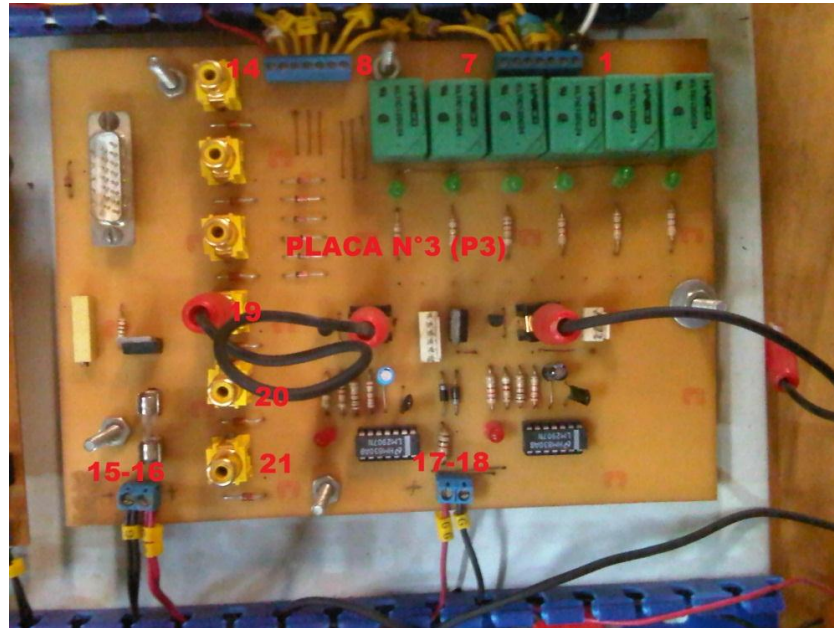
Fuente [7]

5.3 RELES AUXILIARES (tarjeta N° 3)

La tarjeta N° 3 está conformada por 3 circuitos, cada uno independiente del otro. Los circuitos 1 y 2 (Encoder y comunicación) no fueron utilizados en este trabajo de grado debido a que se utilizó otro tipo de PLC, entonces de la tarjeta N°3 solo se reutilizó el circuito 3 relés auxiliares, Los cuales accionan los elementos de señalización y refrigeración del módulo.

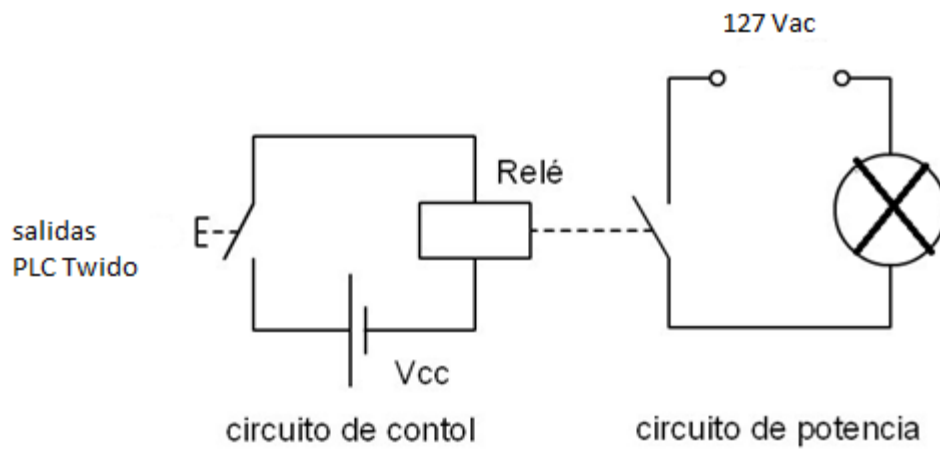
Los relés son una excelente manera de aislar las salidas del PLC TWIDO de cualquier sobrecarga o cortocircuito que pueda presentar en alguno de los circuitos de potencia.

Figura 32. Tarjeta N°3 del gabinete.



Fuente [7]

Figura 33. Funcionamiento de los relés auxiliares.

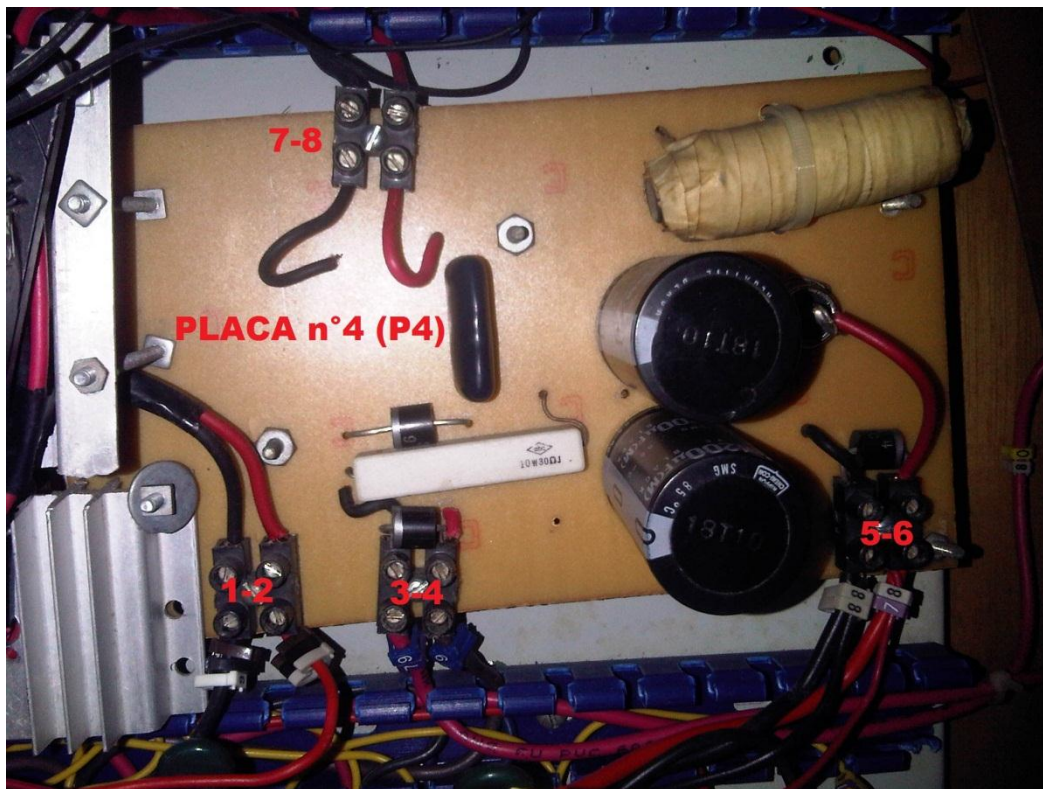


Fuente [7]

5.4 TROCEADOR O CHOPPER CLASE A (Tarjeta N°4)

El troceador o chopper es un circuito que transforma una tensión continua (por lo general no regulada) en otra Directa y regulada. En este trabajo de grado se modificó esta tarjeta de tal manera que se adaptara a la tensión y corriente del motor del motor de excitación independiente que existe actualmente en el laboratorio de máquinas.

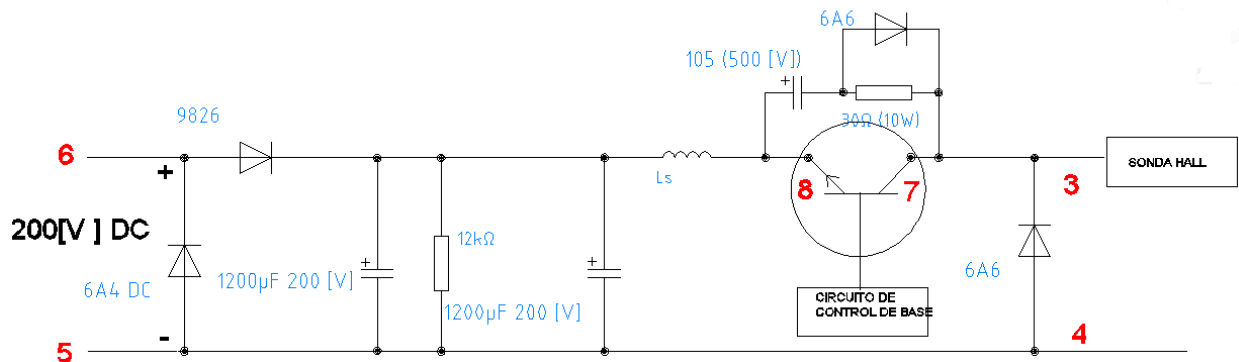
Figura 34. Fotografía de la tarjeta n°4 del gabinete de arranque y frenado de motores



Fuente Autor

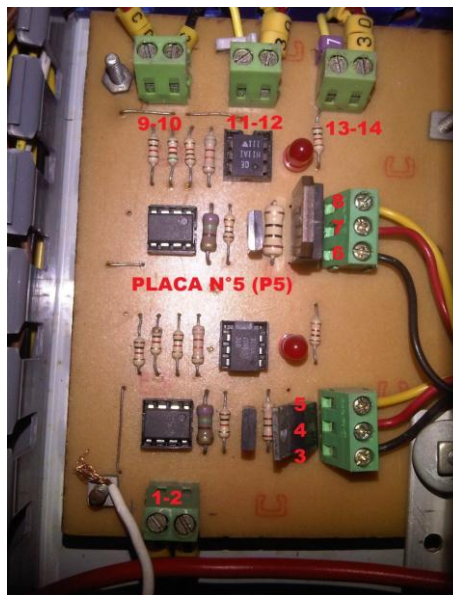
En la figura 35 se puede apreciar el esquema eléctrico del troceador el cual es accionado y controlado mediante una señal PWM del PLC TWIDO. La numeración dada en la figura 34 corresponde a numeración asignada en el esquemático.

Figura 35. Circuito eléctrico del troceador o chopper clase A.



5.5 CIRCUITO DE CONTROL DE LA BASE DEL BJT DEL CHOPPER Y CIRCUITO DEL INTERRUPTOR ESTÁTICO PARA LA RESISTENCIA DE FRENADO DINÁMICO. (TARJETA N°5)

Figura 36. Fotografía de la tarjeta N°5, circuito de control de la base del BJT del chopper y circuito del interruptor estático para la resistencia de frenado dinámico. (Placa N°5).



Fuente [7]

Figura 37. Circuito de control de la base del BJT del chopper

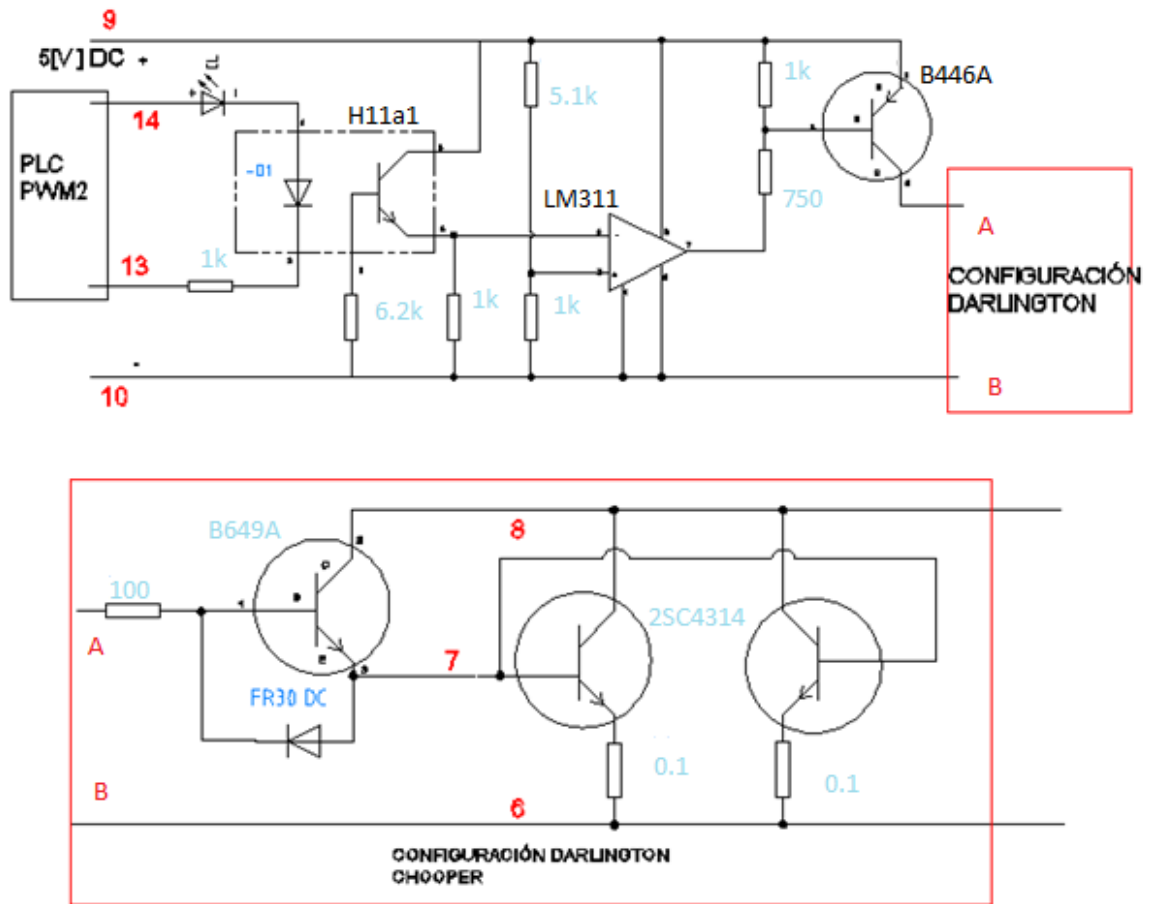
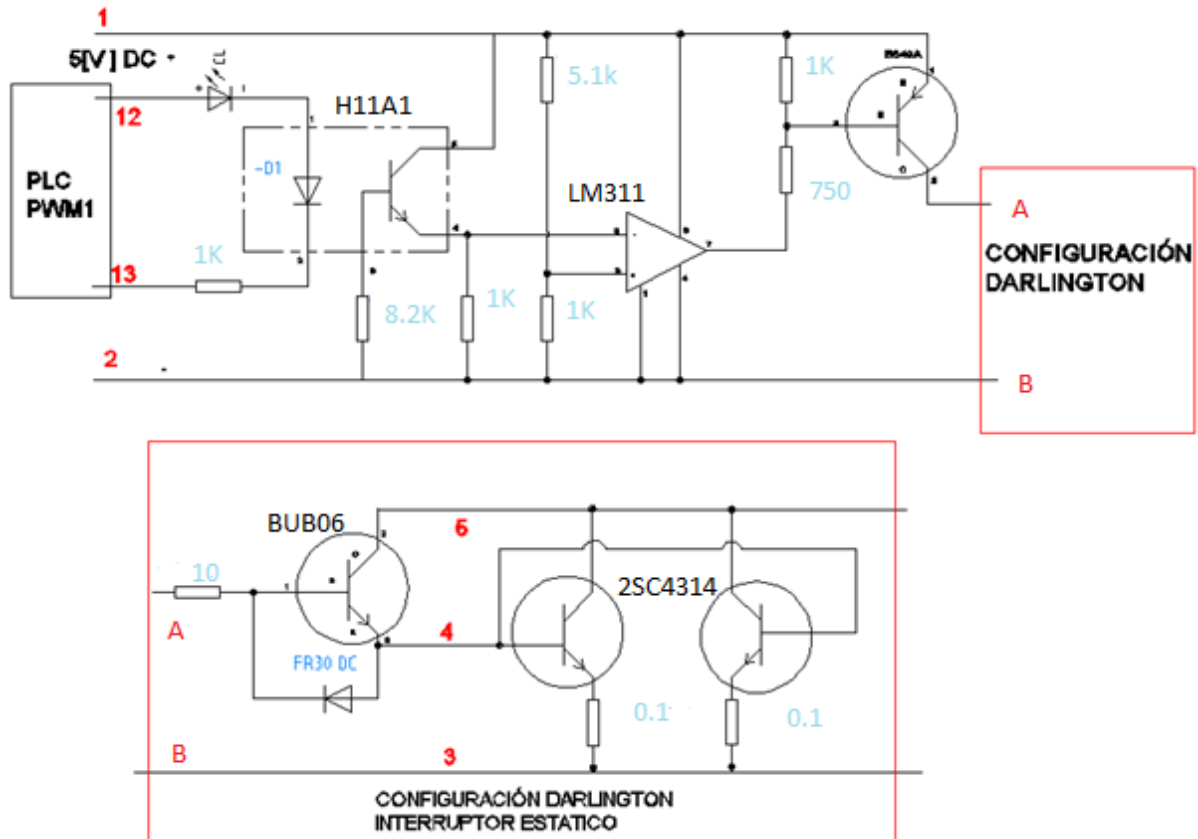


Figura 38. Circuito de control de la base del BJT del interruptor estático para el frenado dinámico



Para controlar el encendido- apagado del transistor de potencia del chopper clase A y del interruptor estático de frenado dinámico se construyó el circuito de la figura 37 y 38 el cual cuenta con dos optoacopladores(H11A1) encargados de aislar la señal de las salidas PWM del PLC TWIDO y transferirlas mediante amplificadores y transistores al circuito de potencia (CHOPPER).

El optoacoplador H11a1 aísla los circuitos del plc y el de la base del transistor 2N4314, el comprador LM311 sigue la señal PWM de la salida digital del PLC y activa el transistor B649A, el cual proporciona la suficiente corriente, desde la fuente de

alimentación de 5Vdc para saturar o llevar a corte la configuración Darlington conformada por los transistores BUV48B y los dos transistores de potencia 2N4314, las resistencias de 0.1Ω sirven para la distribución uniforme de la corriente que circula por el chopper. Este mismo proceso sucede para activar el transistor de potencia del interruptor estático el cual se encuentra conectado en paralelo con la resistencia de frenado dinámico y su esquema eléctrico se muestra en la figura 38 .

5.6 SONDA HALL (TARJETA N°6)

La sonda hall permite registrar la corriente de armadura a través de un conversor analógico-digital del PLC, esto para que los valores de corriente no estén por encima de su valor nominal y afecten los devanados de la máquina. La relación de transformación para esta sonda es $\lambda=1[A]/0.33[V]$ es decir que al registrarse 0.33 [V] en la sonda tendremos 1[A] la armadura del motor de excitación independiente.

Figura 39. Fotografía tarjeta N°6, Sonda Hall.

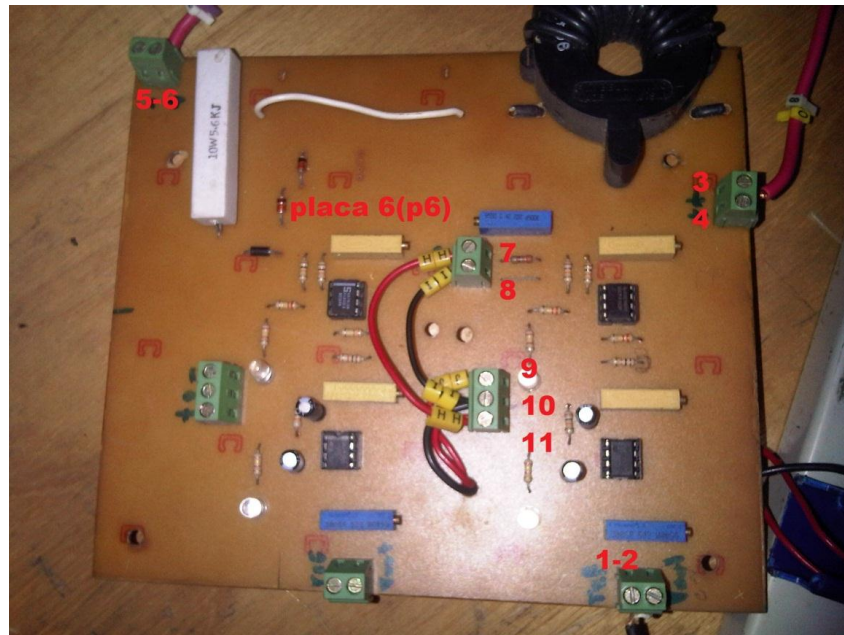
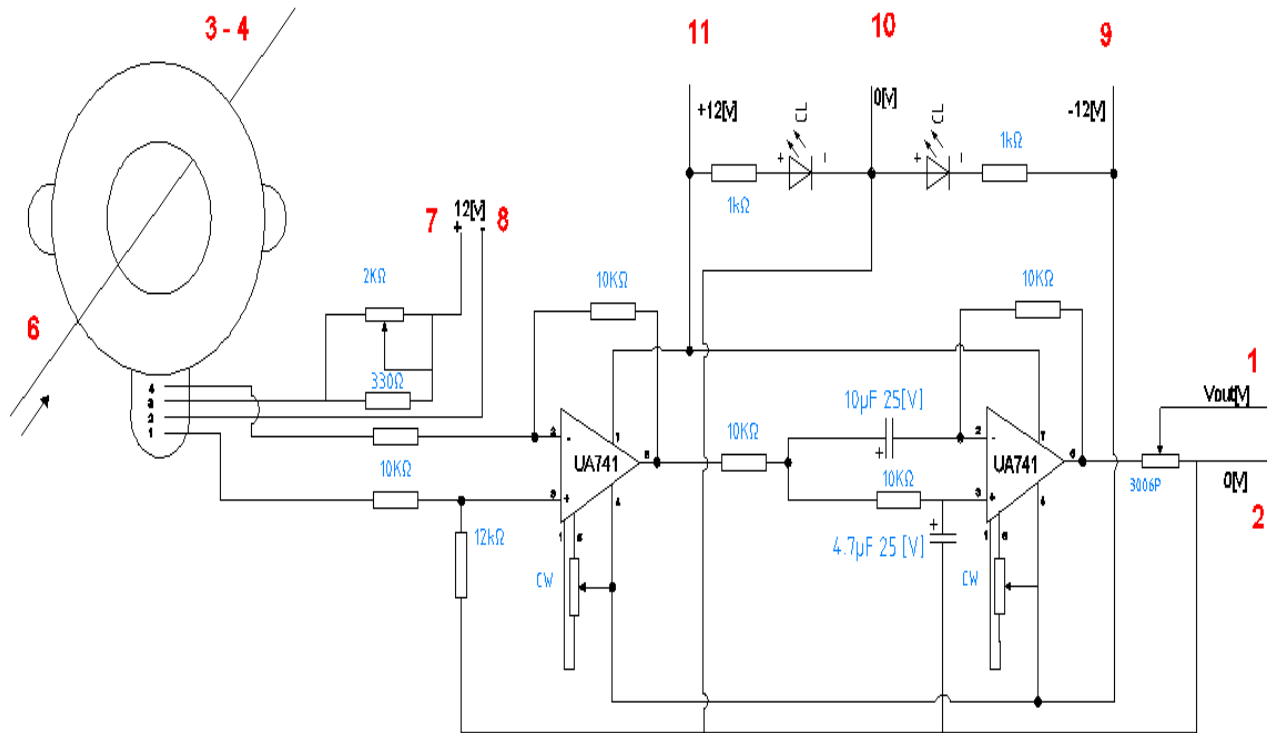
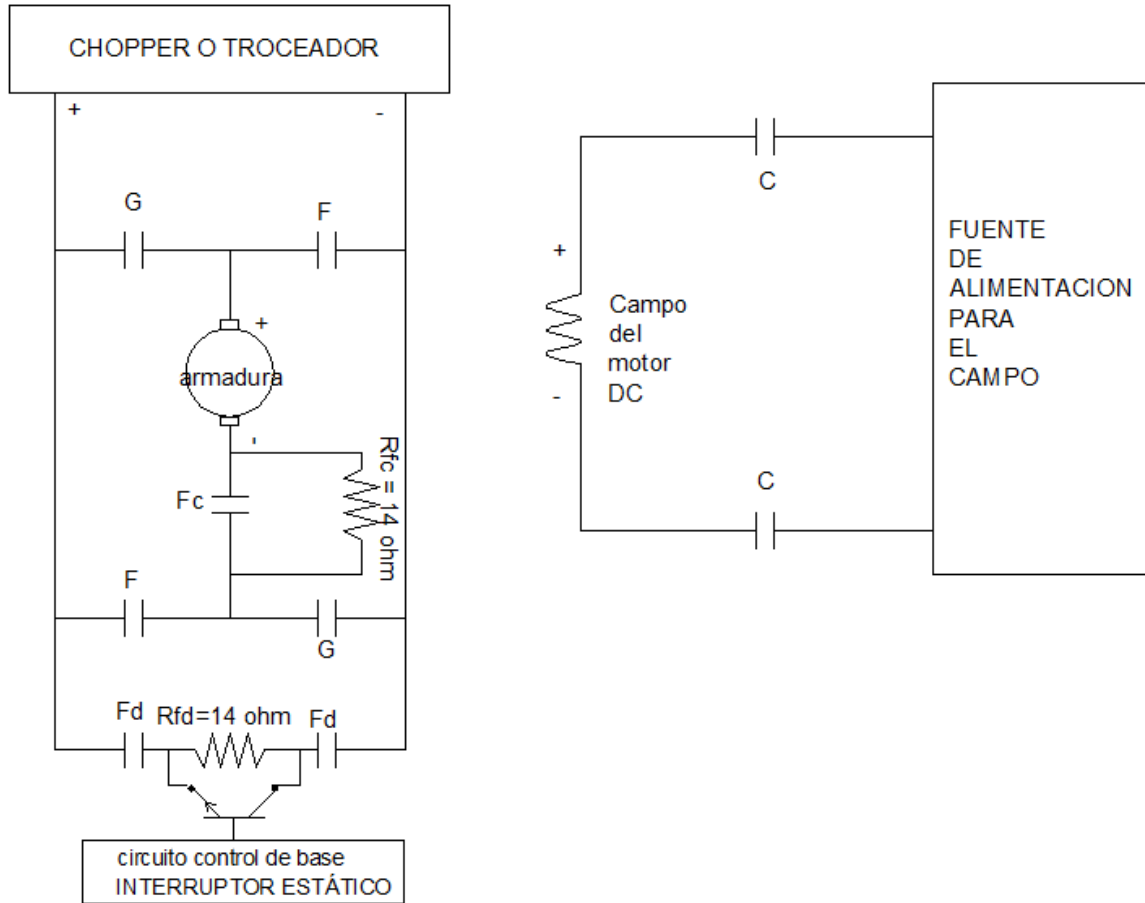


Figura 40. Sonda Hall



5.7 ACCIONAMIENTOS DE MANDO AL MOTOR DC.

Figura 41. Accionamientos para el control del campo, polaridad de la armadura, frenado dinámico y el frenado a contra corriente del motor de corriente continua de excitación independiente



.En la figura 41 se muestra el diagrama de los contactos para el control del campo, polaridad de la armadura, frenado dinámico y el frenado a contra corriente del motor de excitación independiente de corriente continua. Las resistencias R_{fc} y R_{fd} son de 14Ω a 30 [W] . El interruptor estático o transistor de potencia se encuentra conectado en paralelo con la resistencia R_{fd} y se encarga de variar el tiempo de frenado Dinámico. Su control es realizado mediante la salida PWM1 del PLC TWIDO.

Los contactos principales son accionados por las bobinas de los contactores designados así:

G : Contactor para el giro en sentido horario del motor DC

F: Contactor para el sentido anti-horario del motor DC

Fd: contactor que inserta la resistencia de frenado dinámico.

Fc: contactor que inserta la resistencia en el circuito de armadura durante el frenado a contracorriente

C: contactor para el control de la corriente en la bobina de campo

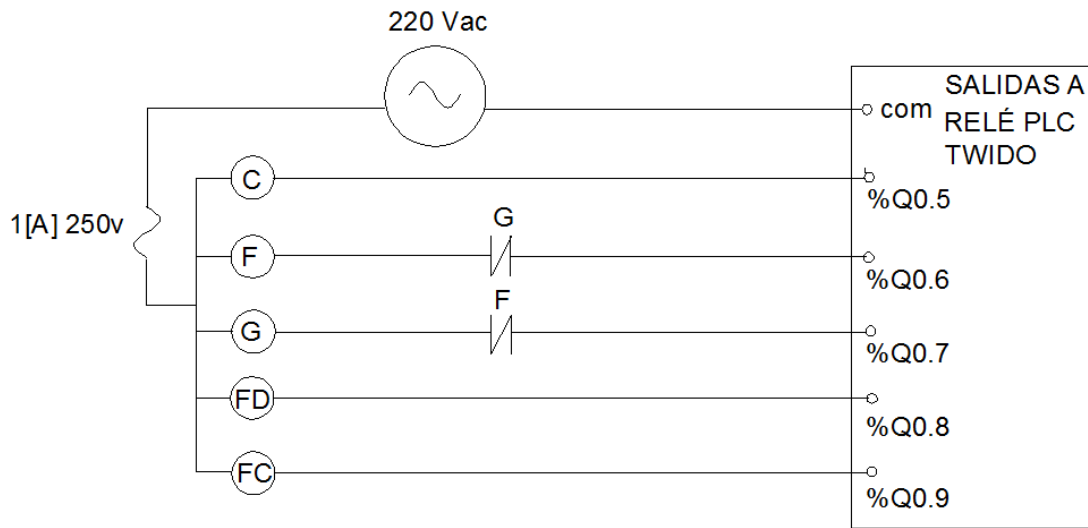
Las resistencias para los frenados se designan con la siguiente nomenclatura:

Rfd: Resistencia de frenado dinámico para el motor DC

Rfc: Resistencia de frenado a contra corriente para el motor DC

La figura 42 muestra la conexión al PLC implementado para el control de las bobinas de los contactores de la figura 41, todas las bobinas se alimenta a una tensión de 220Vac controladas por las salidas a relé del PLC TWIDO.

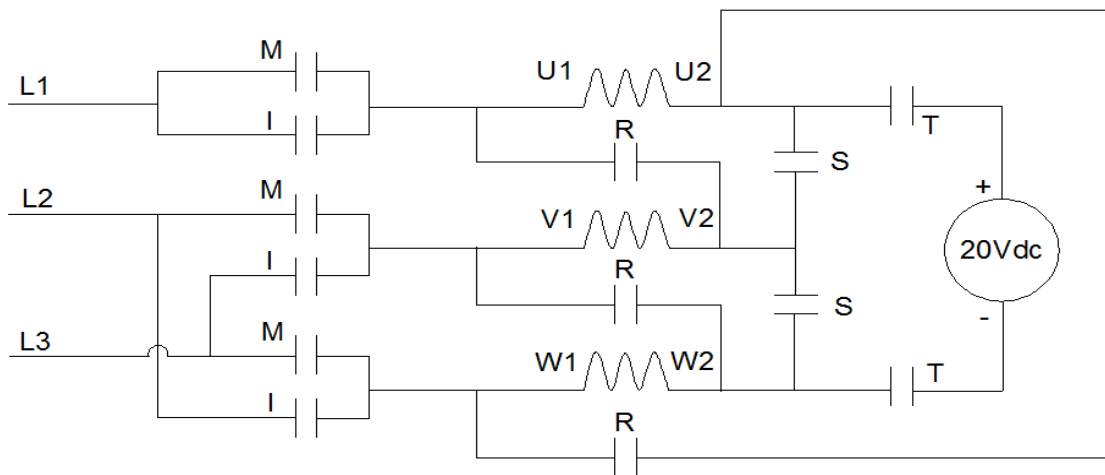
Figura 42. Circuito implementado para el control de las bobinas de los contactores.



Fuente [7]

5.8 ACCIONAMIENTOS DE MANDO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Figura 43. Circuito para controlar el arranque y los frenados del motor de inducción



Fuente [7]

La figura 43 muestra el circuito que se construyó para controlar el arranque y los frenados del motor de inducción. Los contactores M e I controlan el sentido de giro del motor. El contactor S realiza la conexión en estrella de los devanados del estator, mientras que el contactor R los conecta en triángulo el cual es el modo normal de operación del motor. El contactor T es accionado durante el frenado dinámico.

Los contactores M e I están enclavados eléctricamente, a través de los contactores auxiliares al igual que mediante la programación del PLC esto con el fin de que no exista en ningún momento un cortocircuito, lo mismo sucede durante el arranque estrella triángulo. Mediante la lógica del PLC se programó que el contactor T solo se pueda accionar cuando el motor se encuentre totalmente desconectado de la red y el motor se encuentre conectado en Delta.

La nomenclatura empleada es:

M: Contactor de giro en sentido horario del motor de inducción

I: Contactor de giro anti-horario motor de inducción

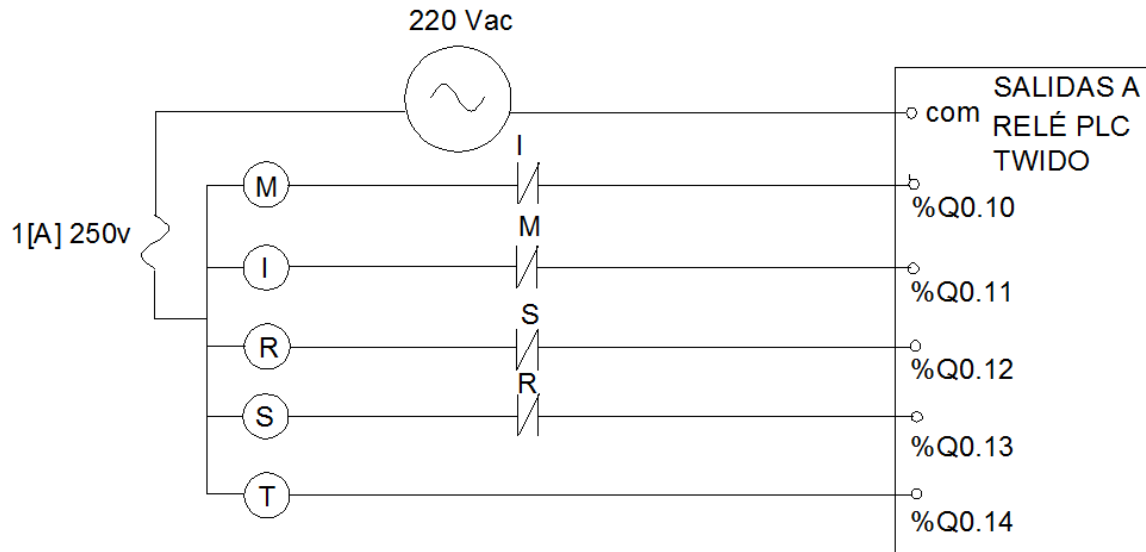
R: contactor para la conexión en delta de los devanados del estator

S: contactor para la conexión en estrella de los devanados del estator

T: Contactor para el accionamiento del frenado dinámico

La figura 43 muestra el circuito implementado para el control de las bobinas de los contactores de la figura 44, todas las bobinas se alimenta a una tensión de 220v controladas por las salidas a relé del PLC TWIDO.

Figura 44. Circuito de conexión de las bobinas de los contactores al plc twido.



6. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.

6.1 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.

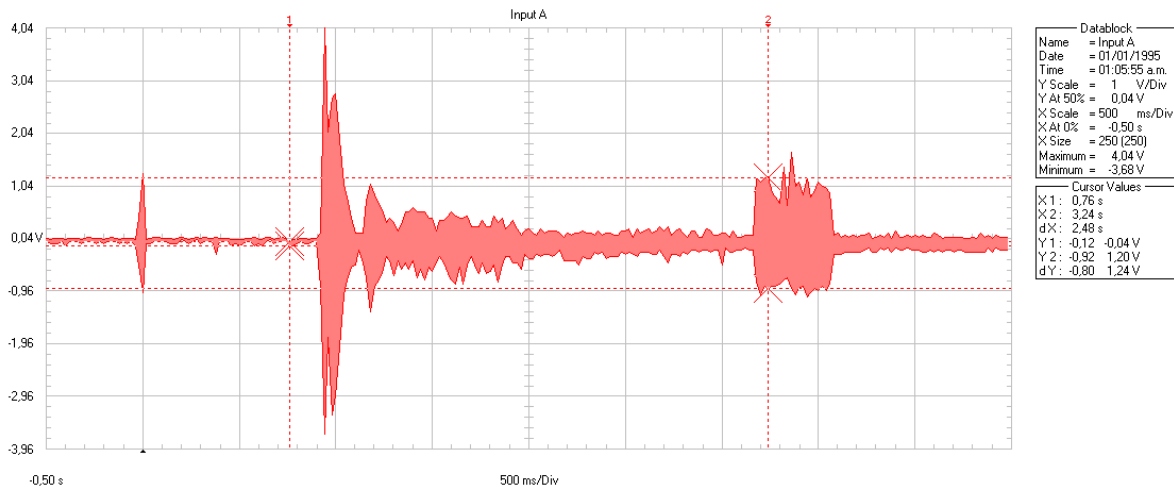
Durante los accionamientos de arranque y frenado del motor DC de excitación independiente, se registraron las formas de onda de la corriente, haciendo uso de un osciloscopio con memoria FLUKE serie 120, disponible en el laboratorio de máquinas de la E3T, esto se realizó con el fin de determinar los resultados reales y contrastarlos con los obtenidos de la simulación.

Para obtener la forma de onda de corriente en el motor de corriente continua de excitación independiente se empleó una pinza amperimétrica con una relación tensión corriente $\lambda=100\text{mV/A}$ y con una capacidad de registro de 0.01-10 [A]

La figura 45 muestra la forma de onda de la corriente durante el arranque por variación de tensión en la armadura, donde la corriente presenta un pico de 40,4[A] (una vez aplicada la relación de transformación de la pinza), la figura 20 del capítulo 4 representa la simulación de la corriente en el motor en el proceso de arranque, allí esta llega a un valor máximo de 5.19 [A], la diferencia entre estos dos valores pico de corriente se debe a que durante los primeros instantes del arranque, la maquina se energiza a su valor nominal, es decir como si existiera un arranque directo, por lo tanto el momento en el cual el motor vence la inercia se presenta un pico de corriente alto que la simulación no puede predecir ya que esta solo tiene en cuenta los valores de tensión reducidos aplicados a la máquina. Se concluye que a pesar de mostrar valores diferentes la simulación predice el comportamiento de la onda de corriente en la armadura de la máquina. En la figura, es posible observar que a los 2,5 [s] de inicio del arranque se presenta una fluctuación de corriente que para los autores de este trabajo de grado tiene dos posibles explicaciones: la primera de ellas es que el motor empleado en este trabajo tenga algún desperfecto en alguna de sus piezas puesto que

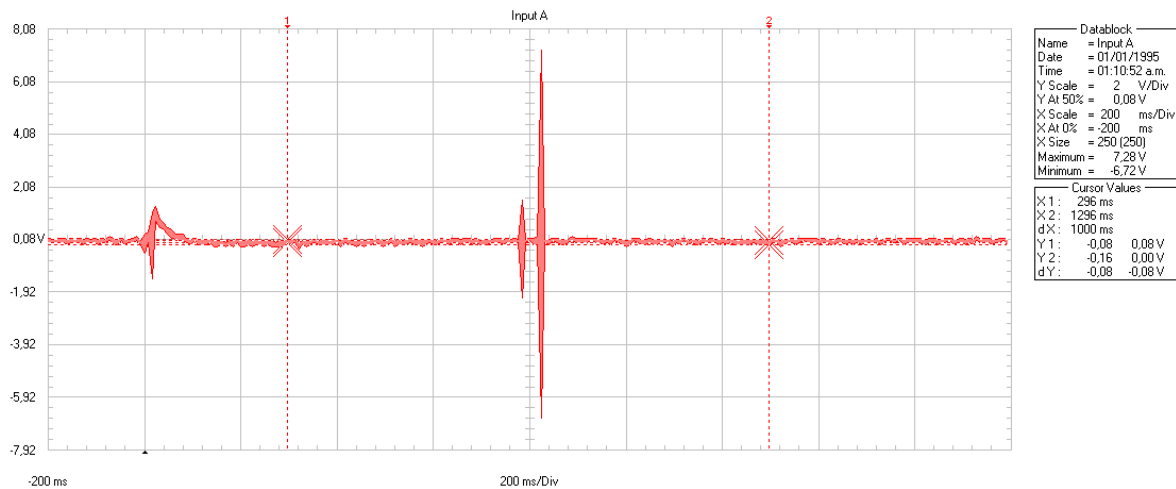
al presenta un ruido interno extraño, la segunda y no menos probable es que el oscilograma muestre algún ruido externo captado por la punta amperimétrica.

Figura 45. Forma de onda de la corriente durante el arranque del motor de corriente continua de excitación independiente



La figura 46 corresponde a la forma de onda de la corriente durante el frenado dinámico del motor, al contrastarla con la figura 24 del capítulo 4 , es posible afirmar que la forma de onda medida por medio del oscilograma era la esperada aunque los valores de corriente fueran mayores a las obtenidas en la simulación. El primer pico de corriente y forma de onda corresponde al frenado dinámico de la máquina, los demás son picos que aparecen debido a la desenergización del sistema.

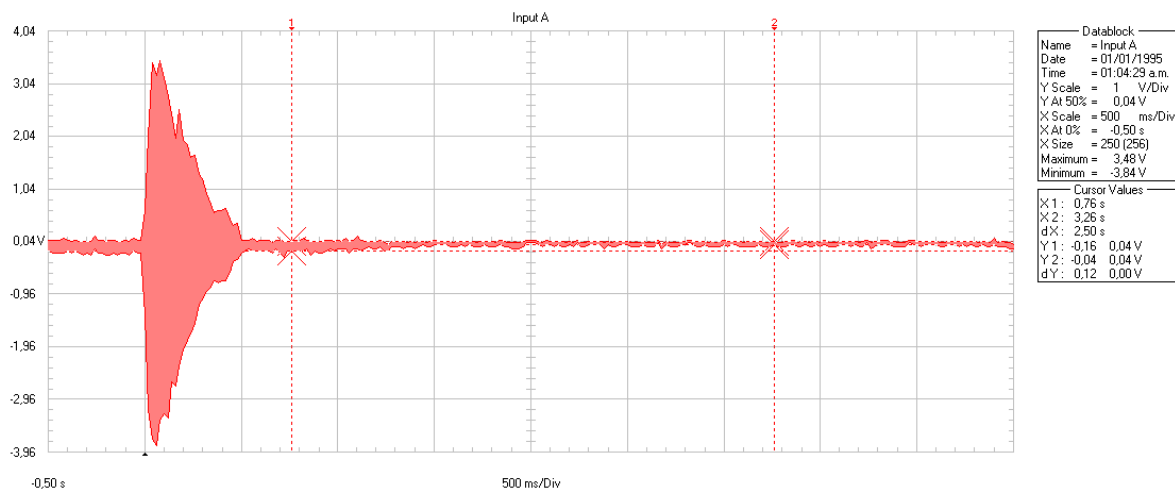
Figura 46. Forma de onda de la corriente durante el frenado dinámico del motor de corriente continua de excitación independiente.



De la figura 46 puede observarse que el oscilograma registra pico de corriente después del proceso de frenado lo cual según los autores de este trabajo de grado obedece a variaciones de corriente debido a la desenergización de la máquina. Los valores de corriente máximos durante el frenado Dinámico son de 17 [A] lo cual es un valor cercano al simulado que fue de 18[A].

En la figura 47 es posible observar el resultado obtenido de la corriente durante el frenado a contracorriente con tensión reducida en un 10% de la máquina de corriente continua, a pesar de diferir en los valores máximos de corriente de la figura 23 del capítulo 4, la forma de onda capturada por el oscilograma era la esperada con un pico de corriente de 33[A]; la variación que se presenta en la corriente pico con respecto a la simulada se debe a que el modelo empleado para simular estas máquina es una aproximación el cual solo dará una idea de que valores se pueden obtener, más nunca nos mostrara un valor exacto.

Figura 47. Forma de onda de la corriente durante el frenado a contracorriente del motor de corriente continua de excitación independiente.



Del presente trabajo con relación al motor de corriente continua de excitación independiente es posible concluir:

La forma más precisa de determinar la resistencia de armadura es empleando la curva de tensión-corriente, ya que este método no incluye el efecto de no linealidad de las escobillas.

Para la medición de los parámetros es recomendable emplear, de ser posible dos métodos de medida.

Los resultados obtenidos de las simulaciones haciendo uso de la herramienta MATLAB/SIMULINK predicen de una manera aproximada la forma de onda de la corriente en la máquina durante los procesos de arranque y frenado, el proceso simular es fundamental para la implementación del módulo de laboratorio, para evitar sobrecorrientes que puedan afectar la vida útil tanto de la máquina como de los elementos de mando y control.

Mayor exactitud en la determinación de los parámetros de la máquina implica resultados más confiables de la simulación.

El autómata programable o PLC se considera una herramienta útil para el control de los accionamientos eléctricos, que permitió en este trabajo no solo realizar los procesos de arranque y frenado, sino incluir alarmas que protejan el motor ante situaciones críticas sin necesidad de adicionar relés electromecánicos o contactores.

El frenado dinámico de la máquina de corriente continua permite el control del tiempo de frenado empleando un elemento de estado sólido, tal como se implementó en este trabajo de grado. Adicionalmente este tipo de frenado presenta ventajas frente al frenado a contracorriente, ya que detiene el eje del motor de manera rápida y con corrientes inferiores, en la práctica se demostró que el tiempo que tardaría la máquina en un proceso de frenado dinámico es de 0.8 [s] y la corriente llegaría hasta un valor de 17 [A], mientras que el frenado contracorriente toma un tiempo de 1,2[s] con un pico de corriente de 33[A].

El frenado a contracorriente somete los devanados de la máquina y los dispositivos de potencia a esfuerzos térmico que pueden acortar su vida útil, sin embargo este proceso es de gran utilidad cuando el tiempo en el que se requiere detener el motor es muy corto y en accionamientos donde la máquina debe cambiar de giro constantemente.

Un arranque por variación de tensión reduce la corriente que se presenta en el devanado de armadura debido a que la corriente es proporcional a la tensión aplicada en bornes de la máquina y a medida que vence su inercia y adquiere velocidad la tensión inducida en el rotor aumenta y la corriente disminuye.

La diferencia del frenado dinámico lento y rápido implementado en el módulo construido no es muy notoria en atención a que la resistencia de 14 [Ω] que se emplea no es exacta, por tanto los tiempos de frenado tienen diferencias en el orden de los

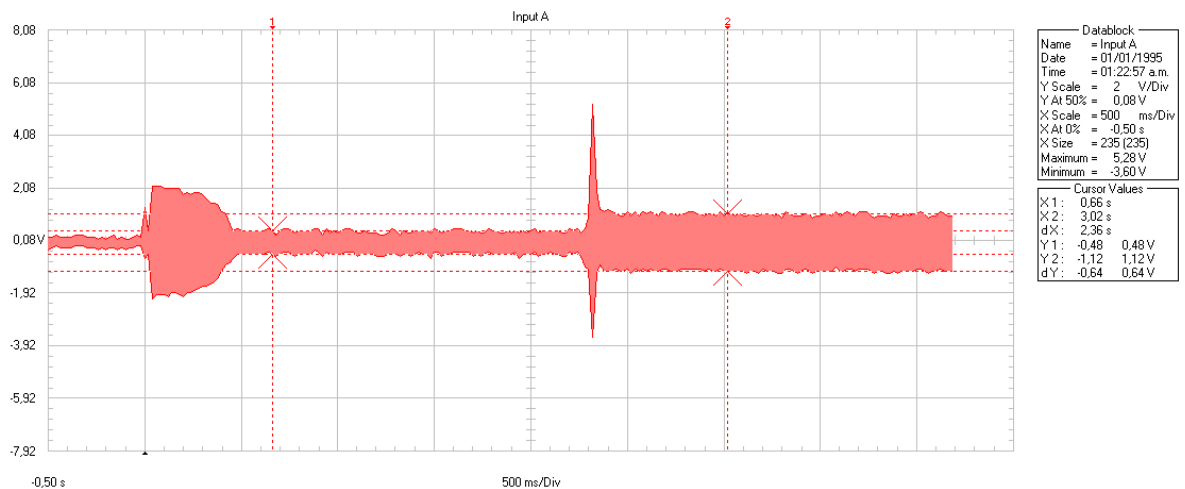
200[ms], despreciables al ojo humano, sin embargo se decidió trabajar con este valor de resistencia porque no representaba ningún riesgo, con este valor la corriente durante el proceso del frenado dinámico alcanza los 17 [A] es decir no supera en 1,5 veces la corriente nominal de la máquina.

6.2 MOTOR DE INDUCCIÓN

Las formas de onda para la corriente durante los procesos de arranque y frenado del motor de inducción se obtuvieron de la misma manera que para el motor de corriente continua (Numeral 6.1).

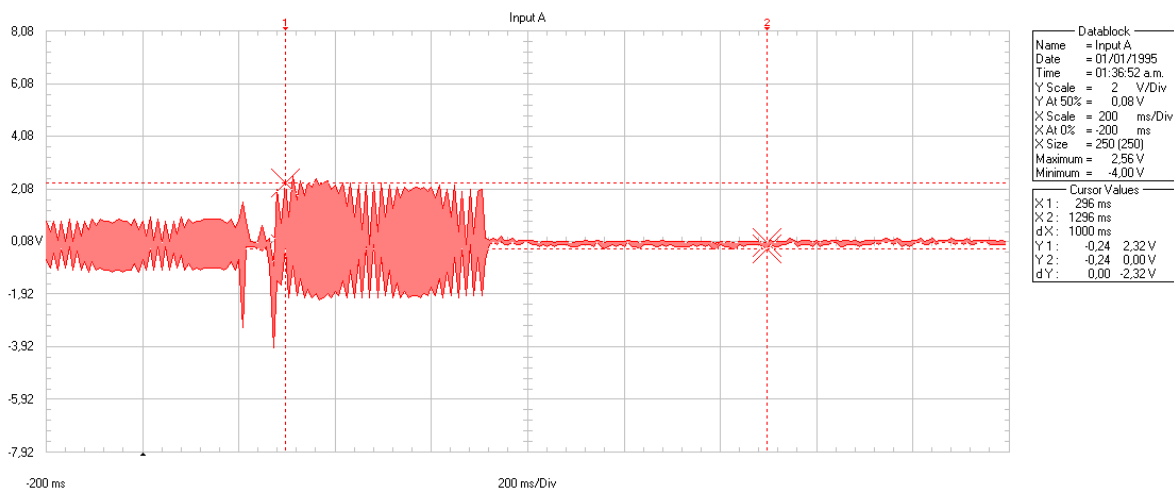
La figura 48 muestra la corriente durante el arranque estrella triángulo del motor, que al contrastarla con la figura 25 del capítulo 4 es posible concluir que el comportamiento del motor a este accionamiento corresponde al simulado, a pesar de que el tiempo de cambio de conexión (Y- Δ) tomó dos segundos más respecto al tiempo de la simulación. Los picos de corriente que se alcanzan durante el arranque corresponden a 22 (Y) y 46 (Δ) [A] para la simulación, y en la onda registrada en la figura 48 se ve que el motor tiene valores pico de 20,8 (Y) y 45(Δ) [A] de la red.

Figura 48. Forma de onda de la corriente durante el arranque estrella-triángulo del motor de inducción.



el comportamiento de la corriente era el esperado a pesar que la simulación no tiene en cuenta el tiempo de retardo de los contactores. Los picos de corriente alcanzados durante el arranque y el tiempo de frenados son aproximados a los valores simulados los cuales fueron de e 20.8 [A] y 250[ms] respectivamente.

Figura 50. Forma de onda de la corriente durante el frenado dinámico del motor de inducción



Del motor de inducción se concluye:

Las simulaciones realizadas empleando MATLAB/SIMULINK predicen el comportamiento de la corriente del motor de inducción en los procesos de arranque Y- Δ , frenado dinámico y frenado a contracorriente. Queda demostrado así que la simulación es una herramienta fundamental para implementar este tipo de accionamientos, con ella es posible predecir picos de corrientes y tiempos.

Al contrastar el frenado dinámico con el frenado a contracorriente se concluye que el frenado a contracorriente presenta menor tiempo de desaceleración del motor y picos de corriente durante el proceso elevados en comparación con el frenado dinámico.

El frenado a contracorriente no necesita una fuente de alimentación adicional para realizar el proceso, lo que lo hace más efectivo y económico para paradas de emergencia, sin embargo es importante que el motor se detenga antes de invertir el sentido de giro, por esta razón en este trabajo de grado se implementó un sensor inductivo el cual registra la velocidad del motor y lo desenergizara cuando cense valores inferiores a 300 [rpm].

Los valores de corriente y tiempos de frenado obtenidos en la práctica fueron aproximados a los valores simulados, esto debido que la práctica del motor de inducción no necesita dispositivos externos como resistencias, las cuales pueden variar los valores de corriente y de frenado. lo cual hace muy acertado el modelo matemático utilizado para las simulaciones.

El arranque estrella triangulo es muy útil para motores de potencias relativamente pequeñas, sin embargo para motores de mayor envergadura se sugiere utilizar métodos más efectivos como variación de tensión por pasos o dispositivos de estado sólido que varíen la tensión aplicadas para hacer un arranque suave.

6.3 RECOMENDACIONES

Para la prueba de vacío del motor de inducción con el motor de corriente continua acoplado se presenta dificultad en llevar el motor hasta la velocidad de sincronismo, ya que de sobrepasarse dicha velocidad el motor operaría como generador, y por tanto los valores de potencia, tensión y corriente no serían los apropiados para la obtención de las pérdidas de la máquina, por esto se recomienda utilizar dos instrumentos de medida de velocidad diferentes para garantizar que no se superen las 1800 [rpm] en el eje de acople.

Se sugiere de ser posible utilizar dos métodos o más para la obtención de los parámetros de las máquinas, para garantizar de esta manera una mayor precisión en los resultados de las simulaciones.

Para hacer uso del módulo recuperado por los autores del presente trabajo de grado se recomienda seguir el manual consignado en el anexo A, donde se fijan los pasos para el accionamiento del módulo así como los valores de tensión recomendados para el correcto funcionamiento del mismo. El programa para el control del módulo se consigna en el anexo B del cual depende el funcionamiento del banco.

FUENTE BIBLIOGRÁFICA

- [1] <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>
- [2] ALLER, JOSE MANUEL, Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General. 2006, Editorial Equinoccio.
- [3] BHAG S.GURU –HUSEYIN R. HIZIROGLU. Máquinas eléctricas y transformadores. Tercera edición, alfaomega grupo editor, 2003
- [4] HUGO ALEJANDRO MARTINEZ RAMOS- DANIEL MEJIA URIBE. Motores eléctricos: frenado dinámico y a contracorriente.2001. Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander.
- [5] ONG, CHEE-MUN, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, 1998.
- [6] FRAILE MORA, JESUS. Máquinas Eléctricas, quinta edición, Mc Graw Hill, 2003.
- [7] Autores: ÁNGELA MARÍA ARIAS LOZANO, CARLOS AUGUSTO RANGEL SEQUEDA.
- [8] Software de programación TwidoSuite V2.2 - Ayuda en línea
- [9] Ph.D. JUAN A. TAPIAS Conversión electromecánica de la energía. 2006 Apuntes de clase. <http://usuarios.multimania.es/pinohawk/Conversion/Cap%201%20-%20Principios%20de%20Conversion%20Electromecanica%20de%20la%20Energia.pdf>
- [10].CHAPMAN, STEPHEN J. Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill, 1987.

- [11] KOSTENKO M.–PIOTROVSKY L. Máquinas eléctricas, Tomo 1, editorial Mir
- [12] ORTEGA PLANA, D. JUAN MARIA, RAMIREZ VASQUEZ, D .JOSE. Máquinas de corriente alterna enciclopedia CEAC de electricidad. Editorial CEAC 1996
- [13] EDUARDO CABALLERO SERRANO-MANUEL ENRIQUE MURCIA CENTENO. Diseño y construcción de un equipo de frenado dinámico para motores de C.A. ajustable a diferentes tiempos de parada utilizable en las prácticas de laboratorio de controles eléctricos industriales. 1983. Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander
- [14] http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/Arranque_de_motores.htm
- [15] <http://www.die.eis.uva.es/~daniel/docencia/te/TEIQPractica9-2008.pdf>
- [16] KOSOW, I.L. Máquinas Eléctricas y Transformadores, Prentice-HALL, 2003.
- [17] DEWAN, S.B: SLEMON, GR: STRAUGHEN, A. Power Semiconductor Drives. Singapur: John Wiley & Sons. 1984.
- [18] GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA- JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR- JOSÉ CARLOS BITAR RODRIGUEZ. Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC (Controlador lógico programable), 2013, Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander.

BIBLIOGRAFÍA

ALLER, JOSE MANUEL, Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General. 2006, Editorial Equinoccio.

Arranque de motores. Disponible en: http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/Arranque_de_motores.htm

Arranque de los motores en inducción. Disponible en: <http://www.die.eis.uva.es/~daniel/docencia/te/TEIQPractica9-2008.pdf>

Autores: ÁNGELA MARÍA ARIAS LOZANO, CARLOS AUGUSTO RANGEL SEQUEDA.

BHAG S.GURU –HUSEYIN R. HIZIROGLU. Máquinas eléctricas y transformadores. Tercera edición, alfaomega grupo editor, 2003

CHAPMAN, STEPHEN J. Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill, 1987.

EDUARDO CABALLERO SERRANO-MANUEL ENRIQUE MURCIA CENTENO. Diseño y construcción de un equipo de frenado dinámico para motores de C.A. ajustable a diferentes tiempos de parada utilizable en las prácticas de laboratorio de controles eléctricos industriales. 1983. Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander

DEWAN, S.B: SLEMON, GR: STRAUGHEN, A. Power Semiconductor Drives. Singapur: John Wiley & Sons. 1984.

FRAILE MORA, JESUS. Máquinas Eléctricas, quinta edición, Mc Graw Hill, 2003.

GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA- JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR- JOSÉ CARLOS BITAR RODRIGUEZ. Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC (Controlador lógico programable), 2013, Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander.

HUGO ALEJANDRO MARTINEZ RAMOS- DANIEL MEJIA URIBE. Motores eléctricos: frenado dinámico y a contracorriente.2001. Bucaramanga, tesis de grado Universidad Industrial de Santander.

KOSOW, I.L. Máquinas Eléctricas y Transformadores,Prentice-HALL, 2003.

KOSTENKO M.–PIOTROVSKY L. Máquinas eléctricas,Tomo 1, editorial Mir

Maquinas eléctricas rotativas. Disponible en: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>

ONG, CHEE-MUN, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, 1998.

ORTEGA PLANA, D. JUAN MARIA, RAMIREZ VASQUEZ, D .JOSE. Máquinas de corriente alterna enciclopedia CEAC de electricidad. Editorial CEAC 1996

Ph.D. JUAN A. TAPIAS Conversión electromecánica de la energía. 2006 Apuntes de clase. <http://usuarios.multimania.es/pinohawk/Conversion/Cap%201%20-%20Principios%20de%20Conversion%20Electromecanica%20de%20la%20Energia.pdf>

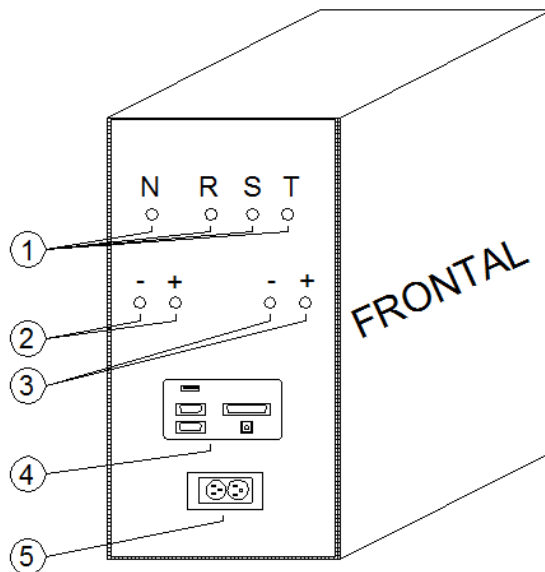
Software de programación TwidoSuite V2.2 - Ayuda en línea

ANEXOS

ANEXO A: MANUAL MÓDULO DE ARRANQUE Y FRENADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE CONTINUA.

VISTA LATERAL IZQUIERDA

Figura 51. Vista lateral izquierda del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua



Fuente [7]

Bornes de entrada de corriente alterna, tensión de trabajo 130 Vac entre fases.

Bornes de entrada para frenado dinámico del motor de inducción, 20 Vdc máximo.

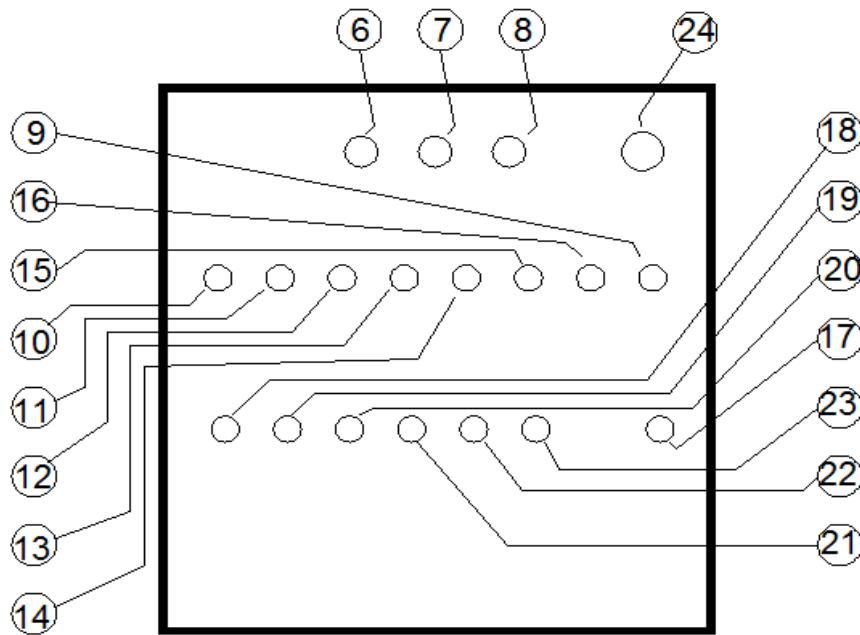
Bornes de entrada tensión de armadura motor D C. Tensión recomendada 200 Vdc.

Pines de entradas y salidas del PLC Twido y sensor inductivo.

Alimentación de corriente alterna PLC twido 120 Vac (Vfn).

VISTA FRONTAL

Figura 52. Vista frontal del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua.



Fuente [7]

Luz Verde, indica que el sistema se encuentra listo para iniciar el arranque del motor seleccionado o algún frenado, si el motor ya se encuentra en marcha.

Luz Roja, indica que ocurrió alguna falla en el sistema o se activó la parada de emergencia.

Luz Amarilla, piloto intermitente o valet, indica que el sistema se encuentra listo para elegir el tipo de motor a trabajar.

Pulsador de inicio DC, activa los mandos del motor de corriente continua.

Pulsador de arranque del motor DC sentido horario.

Pulsador de arranque del motor DC sentido anti-horario.

Pulsador de frenado dinámico motor DC para $R=14\Omega$.

Pulsador de frenado dinámico motor DC para $R=7\ \Omega$.

Pulsador de frenado a contra corriente motor DC.

Pulsador de inversión de sentido de giro motor DC.

Pulsador de parada libre DC. Motor desenergizado.

Pulsador de inicio AC, activa los mandos del motor de inducción.

Pulsador de arranque del motor AC sentido horario.

Pulsador de arranque del motor AC sentido anti-horario.

Pulsador de frenado dinámico.

Pulsador de frenado a contra corriente motor AC.

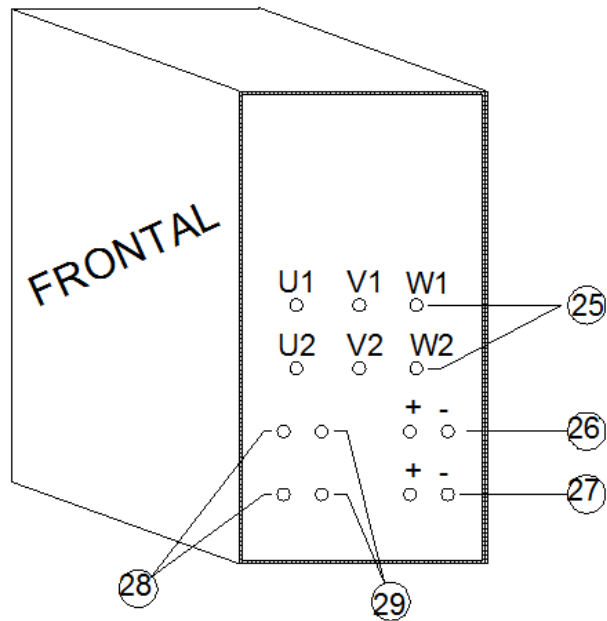
Pulsador de inversión de sentido de giro motor AC.

Pulsador de parada libre DC. Motor desenergizado.

Parada de emergencia

VISTA LATERAL DERECHA

Figura 53. Vista lateral derecha del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua



Fuente. [7].

Bornes de salida motor de inducción.

Bornes para la armadura del motor DC.

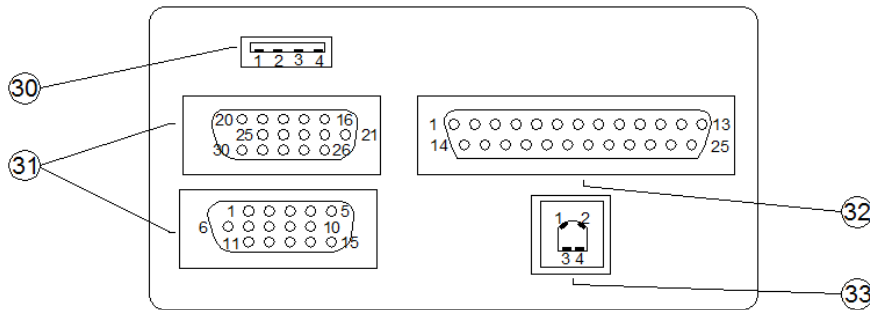
Bornes para el devanado de excitación del motor DC.

Bornes resistencia 14Ω frenado dinámico motor DC.

Bornes resistencia 14Ω frenado contra corriente motor DC

PLACA LATERAL DERECHA, PINES DE ENTRADAS Y SALIDA PLC TWIDO Y SENSOR INDUCTIVO

Figura 54. Placa lateral derecha del módulo de arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente.



Fuente [7]

Puerto USB, conector módulo de expansión analógico TM2AMM3HT de 2 entradas y 1 salida PLC twido Suite

Fuente De Alimentación 24V(+).

Entrada IN0 (+) módulo de expansión analógico.

Entrada IN0 (-) módulo de expansión analógico.

Neutro 0V(-)

Conector SVGA de 15 pines hembra y macho, conector entradas digitales del PLC twido TWDLCAE40DRF.

Pin +24V dc

Pin 0V out

Pin Com0 ---común grupo de entradas(0-11) PLC twido

Pin 0 -%I0.0

Pin 1 - %I0.1

Pin 2 - %I0.2

Pin 3 - %I0.3

Pin 4 - %I0.4

Pin 5 - %I0.5

Pin 6 - %I0.6

Pin 7 - %I0.7

Pin 8 - %I0.8

Pin 9 - %I0.9

Pin 10 - %I0.10

Pin 11 - %I0.11

Pin com1 --- común grupo de entradas (12-23) PLC twido

pin 12 - %I0.12

pin 13 - %I0.13

pin 14 - %I0.14

pin 15 - %I0.15

pin 16 - %I0.16

pin 17 - %I0.17

pin 18 - %I0.18

pin 19 - %I0.19

pin 20 - %I0.20

pin 21 - %I0.21

pin 22 - %I0.22

pin 23 - %I0.23

No conectado

No conectado

Conector Paralelo hembra 25 pines, conector de las salidas a transistor y relé del PLC
twido TWDLCAE40DRF

Pin V0(+) --- 12Vdc(+) salida a transistor

Pin V0(-) ----0Vdc(-) tierra salida a transistor
Pin 0 ---- %Q0.0
Pin V1(+) --- 12Vdc(+) salida a transistor
Pin V1(-) ----0Vdc(-) tierra salida a transistor
Pin 1 ---- %Q0.0
Pin com2 ---- 24Vdc(-), común grupo de salidas a relé (%Q0.2-%Q0.5)
Pin 2 ----%Q0.2
Pin 3 ---- %Q0.3
Pin 4 ----%Q0.4
Pin 5 ----%Q0.5
Pin com3 ----220Vac, común grupo de salidas a relé (%Q0.6-%Q0.9)
Pin 6 ----%Q0.6
Pin 7 ----%Q0.7
Pin 8 ----%Q0.8
Pin 9 ----%Q0.9
Pin com4 ----220Vac, común grupo de salidas a relé (%Q0.10-%Q0.13)
Pin 10 ----%Q0.10
Pin 11 ----%Q0.11
Pin 12 ----%Q0.12
Pin 13 ----%Q0.13
Pin com5 ----220Vac, común salida a relé (%Q0.14)
Pin 14 ----%Q0.14
Pin com6---- No conectado
Pin 15 -----No conectado

Conector USB tipo B de 4 pines, conector sensor inductivo, alimentación y señal de salida.

Salida sensor inductivo (Normalmente Abierto)
No conectado

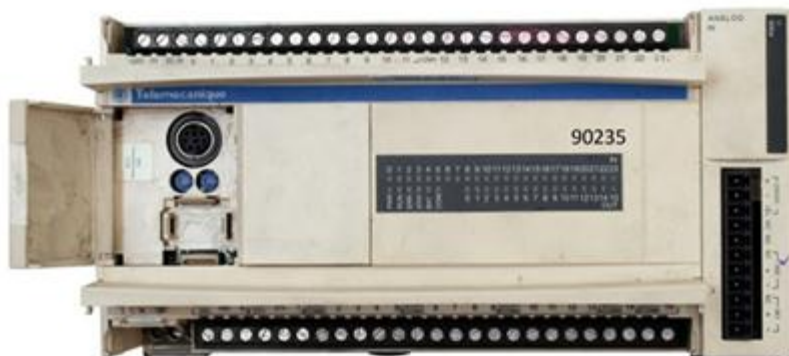
Fuente de alimentación 12 Vdc(+)

Neutro 0V (-)

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PLC TWIDO TWDLCAE40DRF

El PLC TWDLCAE40DRF es una base automática compacta, con una tensión de trabajo de 110Vac hasta 230 Vac, a una frecuencia de 60 Hz. Cuenta con 24 entradas de 24 Vcd, 14 salidas de relé a 2 A y 2 salidas de transistor a 1 A, reloj de fecha/hora. Ethernet 100base tx. Batería extraíble y Bloque de terminales de tornillo no extraíbles.

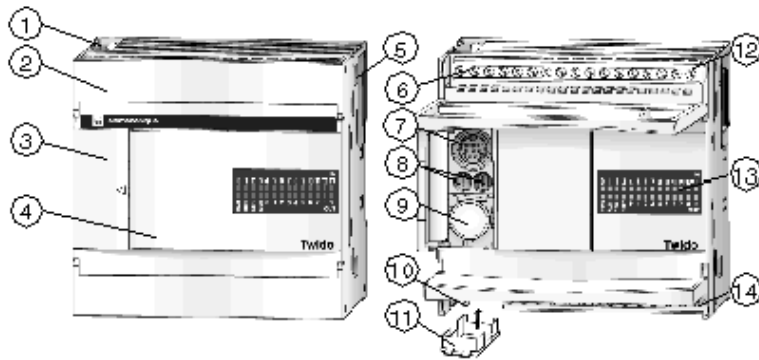
Figura 55. Base automática compacta Schneider (TWDLCAE40DRF).



Fuente [8]

Descripción de los componentes de una base compacta:

Figura 56. COMPONENTES AUTOMATA Schneider (TWDLCAE40DRF).



Fuente [8]

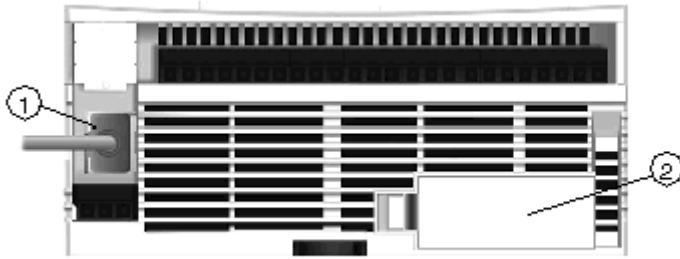
Tabla 18. Especificaciones técnicas del PLC TWIDO TWDLCAE40DRF.

	Descripción
1	Orificio de montaje
2	Cubierta de terminal
3	Tapa con bisagra
4	Cubierta extraíble del conector de monitor de operación
5	Conector de ampliación
6	Terminales de potencia del sensor
7	Puerto serie 1
8	Potenciómetros analógicos
9	Conector de puerto serie 2
10	Terminales de fuente de alimentación de 100 a 240 V CA en la serie TWDLCA•••DRF
11	Conector de cartuchos (ubicado en la parte inferior de la base)
12	Terminales de entradas
13	Indicadores luminosos
14	Terminales de salidas

Fuente: Ayuda TWIDO SUITE

Panel posterior de la base compacta

Figura 57. Panel posterior automático programable schneider (TWDLCAE40DRF).



Fuente [8]

Tabla 19. PANEL POSTERIOR automático programable SCHNEIDER (TWDLCAE40DRF).

	Descripción
1	Puerto Ethernet RJ45 100Base-TX
2	Compartimiento de batería externa reemplazable por el usuario

Fuente: Ayuda TWIDO SUITE

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MÓDULO DE EXPANSIÓN TWIDO TM2AMM3HT

El módulo de expansión TM2AMM3HT es un bloque que cuenta con 2 entradas analógicas y 1 salida analógica (0-10V , 4-20 mA), 12 bits y un bloque de terminales de tornillos extraíbles, alimentación a 24 Vdc independiente de la base compacta.

La siguiente tabla muestra las especificaciones generales del módulo de expansión Schneider TM2AMM3HT.

Figura 58. Módulo de expansión



Fuente. [7]

Características generales

Tabla 20. Características Generales del PLC. Fuente: Ayuda TWIDO SUITE

Características:	Característica
Tensión de alimentación nominal	24 Vcc
Rango de alimentación	19.2 ... 30 Vcc (ondulación incluida)
Durabilidad de conexiones y desconexiones del conector	100 veces como mínimo
Consumo de corriente interna 5 Vcc	50 Ma
Consumo de corriente interna 24 Vcc	0 mA
Consumo de corriente externa 24 Vcc	50 mA
Peso	85 g (85,05 g)

Especificaciones de las entradas

Tabla 21. Especificaciones de las entradas del PLC.

Características:	Entrada de tensión	Entrada de corriente
Rango de entrada	0...10 Vcc	4...20 mA
Impedancia de entrada	1 MΩ mín.	10 Ω
Duración del muestreo	10 ms como máximo.	
Tiempo total de transferencia del sistema de entradas	60 ms + 1 tiempo de ciclo	
Tipo de entrada	No diferencial	
Aislamiento entre entradas	Ninguna	
Aislamiento entre entradas y alimentación	500 Vca	
Aislamiento entre entradas, alimentación externa y circuitos de lógica interna	500 Vca, por fotoacoplador	

Sobrecarga continua máxima permitida (sin daños)	13 Vcc	40 mA
Selección del tipo de señal de entrada analógica	Mediante el software de programación. Es posible utilizar tipos de corriente y tensión.	
Calibración o verificación para mantener la precisión nominal	Aproximadamente 10 años	
<p>NOTA:</p> <p>Los datos de 12 bits (de 0 a 4.095) procesados en el módulo de E/S analógicas pueden convertirse de forma lineal a un valor comprendido entre -32.768 y 32.767. Los valores máximos y mínimos del rango opcional y de los datos de E/S analógicas pueden seleccionarse utilizando registros de datos asignados a módulos de E/S analógicas.</p> <p>Cuando se detecta un error de entrada, el código de error correspondiente se almacena en un registro de datos asignado al estado de funcionamiento de las E/S analógicas.</p>		

Fuente: Ayuda TWIDO SUITE

ESPECIFICACIÓN ENTRADAS Y SALIDAS DEL PLC Y EL MÓDULO DE EXPANSIÓN UTILIZADAS EN EL MÓDULO DE ARRANQUE Y FRENADO DE MOTORES

ENTRADAS PLC

Entrada 0 : Run Stop

Entrada 1 : Parada de emergencia

Entrada 2: Detector de presencia de tensión AC

Entrada 3: Pulsos suministrados por el sensor inductivo

Entrada 4: Detector de presencia de campo motor DC

Entrada 5: Giro horario del motor DC

Entrada 6: Giro anti-horario del motor DC

Entrada 7: Frenado dinámico Lento motor DC

Entrada 8: Frenado dinámico rápido motor DC

Entrada 9: Frenado a contracorriente motor DC

Entrada 10: Cambio de sentido de giro motor DC

Entrada 11: Frenado desacelerado motor DC

Entrada 12: Giro horario del motor AC

Entrada 13: Giro anti-horario del motor AC

Entrada 14: Frenado dinámico motor AC

Entrada 15: Frenado contracorriente motor AC
Entrada 16: Cambio de sentido de Giro motor AC
Entrada 17: frenado Desacelerado motor AC
Entrada 18: Selección programa para motor AC
Entrada 19: Selección programa para motor DC
Entrada 20: Detector de presencia de tensión DC

ENTRADAS MÓDULO DE EXPANSIÓN

Entrada 0: entrada de tensión de la sonda hall, la cual censa la corriente de armadura del motor de corriente continua.

SALIDAS PLC.

Salida 0: salida del PWM 1, control del troceador motor DC
Salida 1: salida del PWM 2, control del interruptor estático de frenado dinámico para el motor DC.
Salida 2: piloto amarillo (luz valet o intermitente)
Salida 3: piloto verde (en funcionamiento)
Salida 4: luz roja (Alarma)
Salida 5: contactor para la energización del campo motor DC
Salida 6: contactor de giro horario motor DC
Salida 7: contactor de giro anti-horario motor DC
Salida 8: contactor frenado dinámico
Salida 9: contactor frenado contracorriente
Salida 10: contactor de giro horario motor AC
Salida 11: contactor de giro anti-horario motor AC
Salida 12: contactor de conexión en estrella del motor de inducción
Salida 13: contactor de conexión en triangulo del motor de inducción

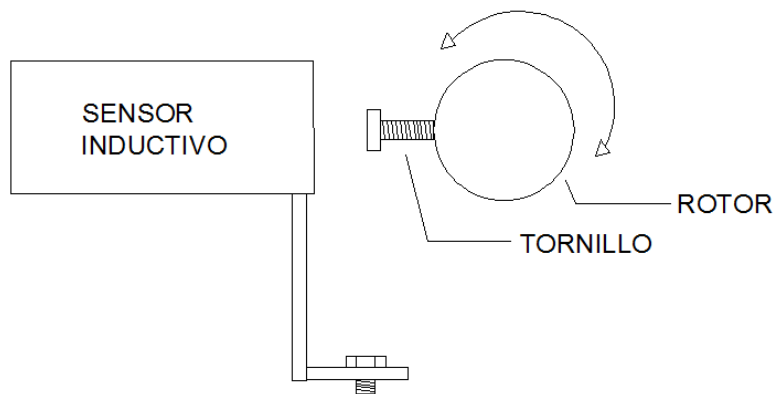
Salida 14 : contactor para conectar la tensión DC en el frenado dinámico del motor de inducción

PROCEDIMIENTO PARA EL USO DEL MÓDULO

Para la utilización del módulo se aconseja acoplar los dos motores, es decir el motor tipo jaula de ardilla de 2 Hp marca De Lorenzo y el motor de excitación independiente de la misma marca, esto se debe a que el tornillo necesario para que el sensor inductivo registre la velocidad del motor solo se puede acoplar al eje del motor de corriente continua.

Instalar el sensor inductivo en la base y el tornillo a censar en el rotor del motor de excitación independiente como lo indica la figura 59.

Figura 59. Procedimiento para el uso del módulo.



Fuente [7]

Conectar todos y cada uno de los bornes de entradas de la red de potencia tanto de corriente alterna como de corriente continua y las salidas a los terminales del motor respectivamente; Ajuste la tensión de alimentación mediante el autotransformador y fuentes de continua a los valores recomendados:

Tensión AC =125-130 [Vac] entre fases Tensión

Tensión de Armadura motor DC =200[Vdc]

Tensión Frenado dinámico motor de inducción= 20[Vdc]

Energice los dispositivos de control del banco accionando el interruptor automático (breaker o disyuntor) bipolar ubicado dentro del módulo. Conecte él toma corriente del PLC e Ingrese el programa diseñado para este módulo; Luego conecte los terminales al PLC twido y a la placa lateral derecha de este módulo; el conector azul a las entradas digitales del PLC y el negro a las salidas (ajustarlos de tal forma que no se pueda presentar ningún aislamiento). Se sugiere para este último paso desactivar el interruptor automático bipolar interno.

Al estar totalmente conectado el banco, verificar tensiones de entrada, después energizar todo el banco accionando los interruptores automáticos internos (bipolar y Tripolar); espere hasta que el piloto amarillo empiece a parpadear para empezar a dar cualquier orden manual o desde el computador.

PRACTICA CON EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.

Para dar inicio a los comandos del motor de corriente continua asegúrese de conectar las 2 resistencia de 14 Ω de los frenados a los terminales de salida que se encuentran en el costado lateral derecho, verificar la tensión entre fases (125-130 Vac) , la tensión de armadura (190-200 Vdc) y que el motor de corriente continua se encuentre correctamente conectado. Luego active los interruptores automáticos o breakers internos.

Si el piloto amarillo se encuentra en modo valet, es decir en forma intermitente presionar el pulsador verde que activa los mandos del motor de corriente continua y espere hasta que el piloto verde se encienda; luego active los pulsadores de arranque

según el sentido de giro deseado, después de que esté en marcha presione el frenado deseado.

PRACTICA CON EL MOTOR DE INDUCCIÓN

Para dar inicio a los comandos del motor de inducción, asegúrese que la tensión entre fases sea 125-130 Vac, la tensión de corriente continua para el frenado dinámico sea 20 Vdc y que los bobinados del motor de inducción se encuentren correctamente conectados. Luego active los interruptores automáticos o breakers internos.

Si el piloto amarillo se encuentra en modo valet, es decir en forma intermitente presionar el pulsador verde que activa los mandos de motor de inducción y esperar hasta que el piloto verde se encienda; luego active los pulsadores de arranque según el sentido de giro deseado, después de que esté en marcha presione el frenado deseado.

PROCEDIMIENTO EN CASO DE ALARMA.

La programación del PLC twido está diseñada de tal manera que al presentarse cualquier falla en la operación de los motores estos se desenergicen y no suceda ningún daño en los elementos o en los motores. Además se cuenta con una parada de emergencia que inhabilita cualquier mando y desenergiza todos los contactores del módulo.

Al encenderse el piloto rojo y la luz amarilla intermitente al mismo tiempo significan que el módulo sufrió alguna falla pero ya fue superada. Se aconseja verificar las tensiones de entrada y la ubicación del sensor inductivo antes de reiniciar cualquiera de los procedimientos.

Al encenderse exclusivamente el piloto Rojo significa que hay un problema latente o que el botón de parada de emergencia no ha sido desactivado. En caso de que este sea el problema, hay que solucionar cualquiera de los posibles casos de falla.

Los posibles casos de falla son:

Interruptor de parada de emergencia activado (para desactivarlo girarlo hacia la derecha)

Tensión de armadura por encima de la especificada

Ausencia de devanado de campo del motor de excitación independiente

Tensión entre fases por debajo de la recomendada

Ausencia de tensión en la armadura (sensor de tensión de armadura desenergizado)

Ausencia de tensión entre fases (sensor de tensión AC desenergizado)

Velocidad por debajo de la velocidad mínima requerida para el correcto funcionamiento (Nm < 1500 rpm)

Sensor inductivo mal ubicado o desconectado

interruptores automáticos y fusibles

RECOMENDACIONES Y PRECAUCIONES

Verificar todas y cada una de las conexiones, especialmente aquellas que llegan al PLC, confirmar que estén conectados de tal forma que no exista ningún pin por fuera, ya que esto ocasionaría daños irreversibles en el aparato. Al igual que trabajar única y exclusivamente con el programa diseñado para este módulo.

**ANEXO B: PROGRAMA PARA EL MÓDULO DE ARRANQUE Y FRENADO DEL
MOTOR DE INDUCCIÓN Y DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN
INDEPENDIENTE. PLC TWIDO**

El lenguaje de programación se presenta en modo lista y se exporta directamente de Twido Suite, para ver los comentarios es necesario abrir el archivo arranqueyfrenadodemotores.xpr que se encuentra en formato digital.

SECTION 1

(*SECTTITLE:ALIMENTACION FUENTES*)

(*SECTCOMMENT:*)

=*= 1

LD 1

MPS

ANDN %I0.0.2

AND %I0.0.18

2

MPP

ANDN %I0.0.2

ANDN %I0.0.20

AND %I0.0.19

3

(* ALIMENTACION DE CAMPO *)

-*- 3

LD %I0.0.4

4

SECTION 1

(*SECTTITLE:ARRANQUES DC*)

(*SECTCOMMENT:*)

(* ARRANQUE HORARIO *)

```

-- 4
LD 1
MPS
AND %I0.0.5
# 5
MPP
AND %I0.0.6
# 6
SECTION 1
(*SECTTITLE:EN FUNCIONAMIENTO*)
(*SECTCOMMENT:*)
-- 5
LD [ %PWM0.R = 100 ]
# 7
-- 6
LD [ %PWM0.R = 100 ]
# 8
SECTION 1
(*SECTTITLE:FRENADOS DC HORARIOS*)
(*SECTCOMMENT:*)
-- 7
LD 1
MPS
AND %I0.0.7
# 9
MRD
AND %I0.0.8
# 10
MRD
AND %I0.0.9

```

11
MRD
AND %I0.0.10
12
MPP
AND %I0.0.11
13
SECTION 1
(*SECTTITLE:FRENADOS DC ANTIHORARIOS*)
(*SECTCOMMENT:*)
-- 8
LD 1
MPS
AND %I0.0.7
14
MRD
AND %I0.0.8
15
MRD
AND %I0.0.9
16
MRD
AND %I0.0.10
17
MPP
AND %I0.0.11
18
SECTION 1
(*SECTTITLE:ARRANQUE INDUCCION*)
(*SECTCOMMENT:*)

-*- 2
LD 1
MPS
AND %I0.0.12
19
MPP
AND %I0.0.13
20
SECTION 1
(*SECTTITLE:EN FUNCIONAMIENTO AC*)
(*SECTCOMMENT:*)
-*- 19
LD %M77
21
-*- 20
LD %M77
22
SECTION 1
(*SECTTITLE: FRENADOS DE INDUCCION HORARIO*)
(*SECTCOMMENT:*)
-*- 21
LD 1
MPS
AND %I0.0.14
23
MRD
AND %I0.0.15
24
MRD
AND %I0.0.16

25
MPP
AND %I0.0.17
26
SECTION 1
(*SECTTITLE:FRENADO INDUCCION ANTIHORARIO*)
(*SECTCOMMENT:*)
-* - 22
LD 1
MPS
AND %I0.0.14
27
MRD
AND %I0.0.15
28
MRD
AND %I0.0.16
29
MPP
AND %I0.0.17
30
SECTION 1
(*SECTTITLE:REANUDAR PROCESO*)
(*SECTCOMMENT:*)
-* - 9
LD %M18
1
-* - 10
LD %M18
1

```
-*- 11
LD %M18
# 1
-*- 12
LD [%PWM0.R = 100 ]
AND %M44
# 6
-*- 13
LD %M50
# 1
-*- 14
LD %M18
# 1
-*- 15
LD %M18
# 1
-*- 16
LD %M18
# 1
-*- 17
LD [%PWM0.R = 100 ]
AND %M45
# 5
-*- 18
LD %M50
# 1
-*- 23
LD %M67
# 1
-*- 24
```

```
LD %M81
# 1
-*- 25
LD %M77
# 20
-*- 26
LD %M95
# 1
-*- 27
LD %M67
# 1
-*- 28
LD %M81
# 1
-*- 29
LD %M77
# 19
-*- 30
LD %M95
# 1
SECTION 1
(*SECTTITLE:MOTOR DE CONTINUA*)
(*SECTCOMMENT:*)
(* BOMBILLA AMARILLA ,VERDE Y FALLA *)
=*= POST
LD %X1
ST %M1
AND( %S0
OR %M5
)
```

```
ANDN %I0.0.19
ANDN %I0.0.18
ST %M5
ST %Q0.0.4
BLK %C0
LD %C0.D
OR %M60
OR %X4
R
LD %M2
OR %M1
AND %S6
CU
END_BLK
LD [ %C0.V >= 3 ]
AND %I0.0.1
ST %Q0.0.2
LD %M58
ST %Q0.0.5
(* PRESENCIA DE CAMPO *)
LD %X3
ST %M2
MPS
AND( %I0.0.2
OR %I0.0.20
)
ST %M13
MPP
S %M46
(* LUZ VERDE O LISTO PARA EL INICIO *)
```

```

LD %X4
S %M47
AND( %I0.0.2
ORN %I0.0.4
OR %I0.0.20
)
ST %M10
(* ARRANQUES MOTOR CD, HORARIO *)
LD %X5
S %M30
ST %M20
MPS
AND( %I0.0.2
OR %I0.0.20
ORN %I0.0.4
)
ST %M12
MPP
AND [ %IW0.3.0 > 5000 ]
ST %M11
BLK %PWM0
LD %Q0.0.6
ANDN %M9
OR( %Q0.0.7
ANDN %M9
)
IN
END_BLK
LD [ %TM0.V = 0 ]
[ %PWM0.R := 0 ]

```

```
LD [%TM0.V >= 1 ]
AND [%TM0.V <= 20 ]
[%PWM0.R := 15 ]
LD [%TM0.V > 20 ]
AND [%TM0.V <= 40 ]
[%PWM0.R := 27 ]
LD [%TM0.V > 40 ]
AND [%TM0.V <= 60 ]
[%PWM0.R := 37 ]
LD [%TM0.V > 60 ]
AND [%TM0.V <= 80 ]
[%PWM0.R := 45 ]
LD [%TM0.V > 80 ]
AND [%TM0.V <= 100 ]
[%PWM0.R := 52 ]
LD [%TM0.V > 100 ]
AND [%TM0.V <= 120 ]
[%PWM0.R := 59 ]
LD [%TM0.V > 120 ]
AND [%TM0.V <= 140 ]
[%PWM0.R := 64 ]
LD [%TM0.V > 140 ]
AND [%TM0.V <= 160 ]
[%PWM0.R := 69 ]
LD [%TM0.V > 160 ]
AND [%TM0.V < 180 ]
[%PWM0.R := 73 ]
LD [%TM0.V > 180 ]
AND [%TM0.V < 200 ]
[%PWM0.R := 77 ]
```

```

LD [%TM0.V > 200 ]
AND [%TM0.V < 220 ]
[%PWM0.R := 81 ]
LD [%TM0.V > 220 ]
AND [%TM0.V < 240 ]
[%PWM0.R := 85 ]
LD [%TM0.V > 240 ]
AND [%TM0.V < 260 ]
[%PWM0.R := 88 ]
LD [%TM0.V > 260 ]
AND [%TM0.V < 280 ]
[%PWM0.R := 91 ]
LD [%TM0.V > 280 ]
AND [%TM0.V < 300 ]
[%PWM0.R := 94 ]
LD [%TM0.V > 300 ]
AND [%TM0.V < 320 ]
[%PWM0.R := 97 ]
LD [%TM0.V = 320 ]
[%PWM0.R := 100 ]
BLK %TM0
LD %Q0.0.6
ANDN %M18
ANDN %M9
OR( %Q0.0.7
ANDN %M18
ANDN %M9
)
IN
END_BLK

```

```
(* ANTIHORARIO *)
LD  %X6
S   %M32
ST  %M21
MPS
AND( %I0.0.2
OR  %I0.0.20
ORN %I0.0.4
)
ST  %M15
MPP
AND [ %IW0.3.0 > 5000 ]
ST  %M14
LD  %M20
OR  %M21
S   %M31
(* FALLAS *)
LD  %M13
OR  %M15
OR  %M12
OR  %M10
OR  %M36
OR  %M37
OR  %M16
ST  %M55
LD  %M55
OR  %M53
OR  %M57
OR  %M64
OR  %M65
```

```
OR %M51
ST %M59
LD %M59
OR %M87
OR( %X21
OR %X22
AND %M81
)
OR %M86
OR %M100
OR %M66
ST %S0
BLK %TM1
LD %M14
OR %M25
OR %M11
OR %M52
OR %M54
OR %M28
IN
OUT_BLK
LD Q
ST %M16
END_BLK
LD %X7
MPS
AND( %I0.0.2
OR %I0.0.20
ORN %I0.0.4
)
```

```
ST %M51
MPP
AND [ %IW0.3.0 > 3500 ]
ST %M52
LD %X7
OR %X8
ST %M56
AND %M18
ST %M57
LD %X8
MPS
AND( %I0.0.2
OR %I0.0.20
ORN %I0.0.4
)
ST %M53
MPP
AND [ %IW0.3.0 > 3500 ]
ST %M54
(* FRENADO DINAMICO LENTO HORARIO *)
LD %X9
ST %M7
(* FRENADO DINAMICO LENTO ANTIHORARIO *)
LD %X14
ST %M8
(* FRENADO DINAMICO RAPIDO HORARIO *)
LD %X10
ST %M22
(* FRENADO DINAMICO RAPIDO ANTIHORARIO *)
LD %X15
```

```
ST %M23
LD %M7
OR %M23
OR %M22
OR %M8
ST %M9
LD %M9
ST %Q0.0.8
BLK %PWM1
LD %M22
OR %M23
AND %Q0.0.8
IN
END_BLK
LD %M22
OR %M23
[ %PWM1.R := 40 ]
BLK %TM2
LD %M9
OR %M24
OR %M27
OR %M56
ANDN %FC1.D
ANDN %M18
IN
OUT_BLK
LD Q
ST %M18
END_BLK
LD 1
```

```

[ %FC1.P := 5 ]
BLK %FC1
LD %I0.0.1
IN
LD %FC1.D
R
END_BLK
LD %M18
OR %M48
OR %M49
[ %PWM0.R := 0 ]
R %M47
R %M46
R %M30
R %M32
R %M31
LD %M18
R %M44
R %M45
(* FRENADO A CONTRACORRIENTE HORARIO *)
LD %X11
ST %M40
(* FRENADO A CONTRACORRIENTE ANTIHORARIO *)
LD %X16
ST %M41
(* CAMBIO DE GIRO HORARIO *)
LD %X12
ST %M42
AND( %M18
OR %M44

```

```

)
S   %M44
(* CAMBIO DE GIRO ANTIHORARIO *)
LD  %X17
ST  %M43
AND( %M18
OR  %M45
)
S   %M45
LD  %M40
OR  %M42
ST  %M24
ST  %M34
MPS
AND( %I0.0.2
OR  %I0.0.20
ORN %I0.0.4
)
ST  %M37
MRD
ANDN %Q0.0.7
[ %PWM0.R := 0 ]
MPP
AND [ %IW0.3.0 > 5000 ]
ST  %M25
LD  %M24
ANDN %Q0.0.6
ST  %M33
ANDN %M44
[ %PWM0.R := 10 ]

```

```

LD  %M41
OR  %M43
ST  %M27
ST  %M35
MPS
AND [ %IW0.3.0 > 5000 ]
ST  %M28
MRD
AND( %I0.0.2
ORN %I0.0.4
OR  %I0.0.20
)
ST  %M36
MPP
ANDN %Q0.0.6
[ %PWM0.R := 0 ]
LD  %M27
ANDN %Q0.0.7
ST  %M29
ANDN %M45
[ %PWM0.R := 10 ]
LD  %M29
OR  %M30
ANDN %M24
ST  %Q0.0.6
LD  %M32
OR  %M33
ANDN %M27
ST  %Q0.0.7
LD  %M31

```

ANDN %M34
ANDN %M35
ST %Q0.0.9
LD %M46
OR %M45
OR %M44
ANDN %M48
ANDN %M49
ST %M58
LD %M47
OR %M44
OR %M60
OR %M45
ANDN %M48
ANDN %M49
ST %Q0.0.3
(* DESACELERACION *)
LD %X13
ST %M48
LD %X18
ST %M49
BLK %TM3
LD %M48
OR %M49
IN
OUT_BLK
LD Q
ST %M50
END_BLK
SECTION 1

(*SECTTITLE:MOTOR DE INDUCCION*)

(*SECTCOMMENT:*)

LD %X2

S %M60

AND %I0.0.2

ST %M66

(* ARRANQUE HORARIO MOTOR DE INDUCCION *)

LD %X19

OR %M92

ST %M61

MPS

AND %I0.0.2

ST %M64

MPP

ST %M70

(* ARRANQUE ANTIHORARIO *)

LD %X20

OR %M90

ST %M63

MPS

AND %I0.0.2

ST %M65

MPP

ST %M72

LD %M61

OR %M63

ANDN %Q0.0.13

ST %M74

BLK %TM4

LD %M74

```
IN
OUT_BLK
LD Q
ST %M62
END_BLK
LD %M62
ST %M77
(* EN FUNCIONAMIENTO *)
LD %X21
ST %M82
ST %M84
AND %I0.0.2
ST %M86
LD %X22
ST %M83
ST %M85
AND %I0.0.2
ST %M87
(* FRENADO DINAMICO HORARIO Y ANTIHORARIO *)
LD %X23
OR %X27
ST %Q0.0.14
ST %M78
BLK %TM7
LD %Q0.0.14
IN
OUT_BLK
LD Q
ST %M67
END_BLK
```

(* FRENADO A CONTRA CORRIENTE HORARIO *)

LD %X24

OR %M89

ST %M80

MPS

AND %Q0.0.12

ST %M73

ST %M68

MPP

ANDN %Q0.0.13

ST %M75

(* FRENADO A CONTRA CORRIENTE ANTIHORARIO *)

LD %X28

OR %M91

ST %M79

MPS

ANDN %Q0.0.13

ST %M76

MPP

AND %Q0.0.12

ST %M71

ST %M69

(* CAMBIO DE GIRO HORARIO *)

LD %X25

MPS

ANDN %M90

ST %M89

MPP

AND(%M81

OR %M90

```
)  
ST %M90  
(* CAMBIO DE GIRO ANTIHORARIO *)  
LD %X29  
MPS  
ANDN %M92  
ST %M91  
MPP  
AND( %M81  
OR %M92  
)  
ST %M92  
(* FRENADO DESACELERADO HORARIO *)  
LD %X26  
ST %M93  
(* FRENADO DESACELERADO ANTIHORARIO *)  
LD %X30  
ST %M94  
BLK %TM6  
LD %M94  
OR %M93  
IN  
OUT_BLK  
LD Q  
ST %M95  
END_BLK  
LD %M70  
OR %M84  
OR %M71  
ST %Q0.0.10
```

```
LD %M72
OR %M85
OR %M73
ST %Q0.0.11
LD %M74
OR %M75
OR %M76
ST %Q0.0.12
LD %M82
OR %M83
OR %M78
ST %Q0.0.13
LD 1
[ %FC1.P := 5 ]
BLK %FC1
LD %I0.0.1
IN
LD %FC1.D
R
END_BLK
BLK %TM5
LD %M80
OR %M79
ANDN %FC1.D
ANDN %M81
IN
OUT_BLK
LD Q
ST %M81
END_BLK
```

```
LD  %M81
ANDN %X25
ANDN %X29
OR  %M95
R   %M60
LDN %I0.0.1
ST  %M100
END
```