



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA**

**TEMA: ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE MOTORES
TRIFÁSICOS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA ENSAYO DE MOTORES
ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE 2,2 KW CON
ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE VARIABLES
ELECTROMECAÁNICAS PARA EL LABORATORIO DE
CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS
FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATAACUNGA**

**AUTORES: JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA
CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ**

DIRECTOR: ING. FREDDY SALAZAR

LATAACUNGA

2017



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA ENSAYO DE MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE 2,2 KW CON ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE VARIABLES ELECTROMECAÁNICAS PARA EL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**” realizado por los señores **CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ** y **JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ** y **JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 23 de Enero del 2017

ING. FREDDY WILLIAM SALAZAR PAREDES

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ**, con cédula de identidad N° 1600608309, y **JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA**, con cédula de identidad N° 0502671084, declaramos que el presente trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA ENSAYO DE MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE 2,2 KW CON ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE VARIABLES ELECTROMECAÁNICAS PARA EL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”** ha sido desarrollado considerando métodos de investigación existentes, como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 23 de Enero del 2017

CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ

C.C.: 1600608309

JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA

C.C.: 0502671084



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ**, y **JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA ENSAYO DE MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE 2,2 KW CON ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE VARIABLES ELECTROMECAÁNICAS PARA EL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**” contenido con ideas y criterios que es de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 23 de Enero del 2017

CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ

C.C.: 1600608309

JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA

C.C.: 0502671084

DEDICATORIA

Con todo el Amor dedico este logro a DIOS, por ser el Ángel Supremo que guía cada uno de mis pasos y su luz divina me ha permitido superar aquellos obstáculos que en la vida se me han presentado.

A mis amados padres Carlos y Lidia quienes con su amor inquebrantable, su guía y paciencia me han brindado todo el apoyo y cariño para culminar de manera satisfactoria esta etapa de mi vida.

A mi esposa Alexandra por ser el pilar fundamental para culminar mis metas ya que gracias a su apoyo incondicional y su infinito amor me ha dado la fuerza necesaria para seguir adelante venciendo siempre los obstáculos que se nos presentan.

A mis hermanos Diego y Christian a mis amigos que de una u otra manera me han apoyado desinteresadamente pensando siempre en verme como un profesional honesto y responsable en servicio de la colectividad.

Carlos

Con mucho cariño para mi madre Piedad por su apoyo, consejos, comprensión, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar aunque hemos pasado momentos difíciles, me ha dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi coraje para conseguir mis objetivos, preferiste sacrificar tu tiempo para que yo pudiera cumplir con el mío. Por tu bondad y sacrificio me inspiraste a ser mejor, ahora puedo decir que esta tesis lleva mucho de ti.

A mis hermanos que con sus ejemplos y empuje me incentivaron y guiaron por el buen camino para lograr mis ideales pese a las adversidades. Pero en especial a mi hermano Ramiro quien fue mi inspiración el cual a pesar de haberlo perdido, ha estado cuidándome y guiándome desde el cielo

Jorge

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a Dios por darme lo más valioso de los seres humanos la vida y guiarme siempre para ser una persona respetuosa y profesional en cada una de mis actividades.

A mi familia y amigos por ser los seres más importantes de mi vida, quienes con amor, paciencia y sabiduría me motivan día a día para seguir adelante y culminar las metas que me propongo en la vida.

A mis docentes universitarios por todo el conocimiento que me han transmitido durante mi paso por las aulas de esta prestigiosa institución educativa de manera especial a Ing. Freddy Salazar por su dirección y apoyo en el desarrollo y ejecución de este trabajo de titulación.

A la Universidad, por abrirme sus puertas y en las cuales he pasado los mejores años de mi vida permitiéndome desarrollar mis conocimientos y habilidades a través de la práctica conjuntamente con sus excelentes docentes, así mismo dejo constancia de mi agradecimiento al Laboratorio de Control Industrial por permitirme desarrollar este proyecto y crecer profesionalmente.

Carlos

A Dios por haberme permitido llegar a este punto, por brindarme salud y fortaleza y por estar a mi lado en todos los pasos de mi vida.

A los ingenieros por todos los conocimientos brindados y de manera muy especial al Ing. Freddy Salazar por su valiosa colaboración en el desarrollo y culminación del trabajo de titulación.

Jorge

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi

CAPÍTULO I**PROBLEMA**

1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.1.1	Formulación del problema.....	2
1.2	Antecedentes	2
1.3	Justificación.....	3
1.4	Importancia	4
1.5	Objetivos	5
1.5.1	Objetivo General	5
1.5.2	Objetivos Específicos	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO	6	
2.1	Antecedentes Investigativos.....	6
2.2	Fundamentación teórica.....	7
2.2.1	Ingeniería eléctrica.....	7
2.2.2	Máquina eléctrica	7
2.2.3	Ingeniería en automatización	9
2.2.4	Control Industrial	10
2.2.5	Antecedentes de la Investigación.....	11
2.3	Fundamentación conceptual	12

2.3.1	Generalidades de motores eléctricos	12
2.3.2	Funcionamiento de los motores eléctricos, asíncronos trifásicos.....	23
2.3.3	Introducción a las variables eléctricas y electromecánicas de un motor de inducción trifásica.....	44
2.3.4	Sistemas de control, automatización y adquisición de datos	65
2.3.5	Circuito equivalente de un motor de inducción.....	66
2.3.6	Curvas características del motor de inducción	71
2.4	Fundamentación Legal.....	75
2.4.1	Norma IEC 60034-30	76
2.4.2	Eficiencia Energética.....	76
2.5	Sistema de variables.....	79
2.6	Hipótesis	80
2.7	Operacionalización de variables	81

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1	Modalidad de la investigación	82
3.2	Tipos de investigación.....	83
3.3	Niveles de la investigación	84
3.4	Población y muestra.....	85
3.5	Técnicas de recolección de datos	85
3.5.1	Instrumentos	86
3.5.2	Validez y confiabilidad.....	86
3.6	Técnicas de análisis de datos	87
3.7	Técnicas de comprobación de la hipótesis.....	87

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1	Análisis de resultados	88
4.1.1	Motor M3661TX convencional prueba en vacío	88
4.1.2	Motor EM3611T de alta eficiencia prueba en vacío	93
4.2	Discusión de los resultados.....	98
4.2.1	Resultado de prueba en vacío de los motores asíncronos trifásicos M3661TX y EM3611T	98

4.2.2	Resultado de la prueba de rotor bloqueado de los motores asincrónicos trifásicos M3661TX y EM3611T	98
4.3	Comprobación de hipótesis	98

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1	Datos informativos.....	104
5.2	Antecedentes de la propuesta.....	104
5.3	Justificación.....	105
5.4	Objetivos	106
5.5	Fundamentación propuesta.....	106
5.6	Diseño de la propuesta	107
5.6.1	Sistemas del prototipo.....	107
5.7	Metodología para ejecutar la propuesta	108
5.7.1	Diseño del módulo de control.....	108
5.7.2.	Práctica motor EM3611T alta eficiencia	118
5.7.3.	Práctica motor M3661TX baja eficiencia	124
5.7.4.	Resumen práctica motor EM3611T alta eficiencia y práctica motor M3661TX baja eficiencia.....	130
	CONCLUSIONES	131
	RECOMENDACIONES.....	131
	BIBLIOGRAFÍA:.....	132
	NETGRAFÍA:.....	132
	ANEXOS.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de máquinas eléctricas	8
Figura 2. Motor de cc de imanes permanentes.....	16
Figura 3. Armadura de núcleo de hierro	16
Figura 4. Armadura de devanado superficial	17
Figura 5. Armadura de bobina móvil	18
Figura 6. Partes constructivas de un motor de cc.....	19
Figura 7. Funcionamiento del motor cc como generador.....	20
Figura 8. Alternador	21
Figura 9. Generación de campo magnético	21
Figura 10. Principio de funcionamiento de motor asíncrono	25
Figura 11. Deslizamiento de un motor asíncrono.....	26
Figura 12. Partes del motor asíncrono.....	27
Figura 13. Estator	27
Figura 14. Rotor jaula de ardilla	28
Figura 15. Rotor bobinado	29
Figura 16. Carcasa	29
Figura 17. Placa de datos del motor M3661TX.....	31
Figura 18. Placa de datos del motor EM3611T.....	31
Figura 19. Curvas par / velocidad para diferentes tipos de motor.....	39
Figura 20. Corriente continua.....	45
Figura 21. Corriente alterna	45
Figura 22. Corriente eléctrica.....	46
Figura 23. Resistencia	47
Figura 24. Inductor.....	48
Figura 25. Resistor.....	49
Figura 26. Triángulo de potencias.....	52
Figura 27. Conexión de los terminales de un motor M3661TX	55
Figura 28. Fusibles	55
Figura 29. Interruptor Magnetotérmico.....	56
Figura 30. Sensor de corriente T201	57
Figura 31. Sensor de voltaje Z204.....	58

Figura 32. Encoder incremental	59
Figura 33. Controlador lógico programable.....	60
Figura 34. Plc Xinje XC3-24RT-E	60
Figura 35. Módulo de expansión.....	61
Figura 36. Acople mecánico tipo mordaza	62
Figura 37. Luces pilotos.....	62
Figura 38. Contactores	63
Figura 39. Pulsador de marcha y paro.....	64
Figura 40. Relés eléctricos	64
Figura 41. Modelo de sistema de adquisición de datos	65
Figura 42. Circuito equivalente por fase de un motor	67
Figura 43. Conexiones para ensayos de rotor libre	68
Figura 44. Circuito equivalente para ensayo en vacío	68
Figura 45. Conexiones para ensayos de rotor bloqueado	69
Figura 46. Circuito equivalente para ensayo a rotor bloqueado.....	70
Figura 47. Curva par – velocidad.....	72
Figura 48. Curva velocidad – potencia útil	73
Figura 49. Curva corriente – potencia útil	73
Figura 50. Curva factor de potencia – potencia útil.....	74
Figura 51. Curva rendimiento – potencia útil	74
Figura 52. Curva torque mecánico – potencia útil.....	75
Figura 53. Circuitos a y b equivalentes del motor M3661TX.....	90
Figura 54. Circuito equivalente del motor M3661TX a rotor bloqueado	93
Figura 55. Circuitos equivalentes a y b del motor EM3611T.....	95
Figura 56. Circuito equivalente del motor EM3611T a rotor bloqueado	98
Figura 57. Cola derecha	101
Figura 58. Cola izquierda (Cuantil)	101
Figura 59. Izquierda + cola derecha	102
Figura 60. Áreas (probabilidades).....	102
Figura 61. Tensión de Von Mises de la estructura.....	110
Figura 62. Desplazamiento estático de la estructura	111
Figura 63. Factor de seguridad de la estructura	111
Figura 64. Tensión de Von Mises de la plancha de 2 mm	112
Figura 65. Desplazamiento estático plancha 2 mm	113

Figura 66. Factor de seguridad de la plancha de 2mm.....	114
Figura 67. Tensión de Von Mises de la plancha de 6 mm	115
Figura 68. Desplazamiento estático plancha 6 mm	116
Figura 69. Factor de seguridad de la plancha de 6 mm.....	116
Figura 70. Curva de corriente motor EM3611T (Alta Eficiencia).....	118
Figura 71. Curva de velocidad motor EM3611T (Alta Eficiencia).....	119
Figura 72. Curva de torque motor EM3611T (Alta Eficiencia).....	120
Figura 73. Curva de potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)	121
Figura 74. Curva de factor potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)	122
Figura 75. Curva de eficiencia motor EM3611T (Alta Eficiencia).....	123
Figura 76. Curva de corriente motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	124
Figura 77. Curva de velocidad motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	125
Figura 78. Curva de torque motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	126
Figura 79. Curva de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)	127
Figura 80. Curva de factor de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)	128
Figura 81. Curva de eficiencia motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Marca de los 2 motores.....	32
Tabla 2. Nomenclatura de los 2 motores	32
Tabla 3. Identificación de los 2 motores.....	33
Tabla 4. Potencia de los 2 motores.....	33
Tabla 5. Voltaje de placa de los 2 motores	34
Tabla 6. Corriente de placa de los 2 motores	34
Tabla 7. Velocidades de placa de los 2 motores.....	35
Tabla 8. Frame de los 2 motores	35
Tabla 9. Sufijos para el frame según NEMA.....	36
Tabla 10. Frecuencia de placa para los 2 motores	36
Tabla 11. Fases de alimentación para los 2 motores.....	37
Tabla 12. Factor de servicio para los 2 motores	37
Tabla 13. Rangos de corrientes en motores para rotor bloqueado	38
Tabla 14. Código de servicio para los 2 motores	38
Tabla 15. Código NEMA curvas par - velocidad para los 2 motores.....	39
Tabla 16. Aislamiento térmico para los 2 motores	40
Tabla 17. Clasificación NEMA del tipo de aislamiento para motores	40
Tabla 18. Eficiencia nominal para los 2 motores.....	41
Tabla 19. Factor de potencia para los 2 motores.....	41
Tabla 20. Temperatura ambiente de funcionamiento para los 2 motores	42
Tabla 21. Certificado de cumplimiento Energético Estadounidense	42
Tabla 22. Tipo de carcasa para motores según clasificación NEMA.	43
Tabla 23. Conexiones para motores de 9 y 12 terminales.....	54
Tabla 24. Factores para dividir la reactancia del estator y rotor	71
Tabla 25. Eficiencia Energética para motores de inducción	79
Tabla 26. Sistema de variables.....	80
Tabla 27. Operacionalización de variables	81
Tabla 28. Conjunto de equipos	85
Tabla 29. Recolección de información	86
Tabla 30. Datos medidos prueba en vacío motor M3661TX.....	88
Tabla 31. Datos medidos prueba a rotor bloqueado motor M3661TX	90
Tabla 32. Datos medidos prueba en vacío motor EM3611T	93

Tabla 33. Datos medidos prueba a rotor bloqueado motor EM3611T	95
Tabla 34. Valores medidos de los motores EM3611T y M3661TX	100
Tabla 35. Prueba t para medidas de dos muestras emparejadas.....	100
Tabla 36. Colas t Student	101
Tabla 37. Áreas Probabilidades	102
Tabla 38. Criterios de selección del factor de seguridad	109
Tabla 39. Peso de la estructura	109
Tabla 40. Sujeción de la estructura.....	110
Tabla 41. Peso plancha 2 mm	112
Tabla 42. Peso plancha 6 mm	115
Tabla 43. Valores de corriente motor EM3611T (Alta Eficiencia)	118
Tabla 44. Valores de velocidad motor EM3611T (Alta Eficiencia)	119
Tabla 45. Valores de torque motor EM3611T (Alta Eficiencia)	120
Tabla 46. Valores de potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia).....	121
Tabla 47. Valores de factor potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)	122
Tabla 48. Valores de eficiencia motor EM3611T (Alta Eficiencia).....	123
Tabla 49. Valores de corriente motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	124
Tabla 50. Valores de velocidad motor M3661TX (Baja Eficiencia)	125
Tabla 51. Valores de torque motor M3661TX (Baja Eficiencia)	126
Tabla 52. Valores de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	127
Tabla 53. Valores de factor de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)	128
Tabla 54. Valores de eficiencia motor M3661TX (Baja Eficiencia).....	129
Tabla 55. Resumen práctica de motor EM3611T.....	130
Tabla 56. Resumen práctica de motor M3661TX.....	130

RESUMEN

La ejecución del presente trabajo de titulación abarca los principios elementales sobre el funcionamiento de los motores eléctricos especialmente trifásicos los cuales en la actualidad están a disposición de la gran mayoría de fábricas e industrias a nivel mundial; el análisis del funcionamiento de estos motores determinará las diferencias constructivas, funcionales y operativas, llegando a saber el porqué de su eficiencia, variable que se puede tener de cada uno de los motores a someterse a pruebas sin comprometer su integridad eléctrica y mecánica. Se debe enfatizar de manera técnica el diseño e implementación de un módulo didáctico para ensayos en el laboratorio de control industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, ya que de manera colectiva será utilizada por los alumnos como parte del proceso enseñanza – aprendizaje, de manera especial en los temas de motores eléctricos asíncronos trifásicos de 2,2 kW, con la ayuda de un generador de corriente continua que servirá para simular una carga controlada para los 2 motores trifásicos modelos EM3611T y M3661TX de la marca Baldor, complementándose con la obtención automática de las variables como: Voltaje, Corriente, Velocidad, Torque, Factor de Potencia, Eficiencia, siempre en condiciones de estado estable y la representación gráfica de cada una de estas variables en sus respectivas curvas. Finalmente este trabajo de titulación desencadenará en obtener una visión clara e integra del funcionamiento de este tipo de máquina rotatoria, identificando los parámetros técnicos comparados de cada tipo de motor, permitiendo deducir los parámetros que intervienen en la mejora de la eficiencia del motor.

Palabras claves:

- **MOTORES TRIFÁSICOS**
- **MOTORES ELÉCTRICOS – EFICIENCIA ENERGÉTICA**
- **MOTORES ELÉCTRICOS – SIMULACIÓN DE CARGAS**
- **LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL - MÓDULO DIDÁCTICO**

ABSTRACT

The execution of this research project covers the fundamental principles on the operation of electric motors, especially three-phase, which are currently available to the vast majority of factories and industries worldwide; The analysis of the operation of these engines will determine the constructive, functional and operational differences, arriving to know the reason of its efficiency, that can be had of each one of the motors to be tested without compromising its electrical and mechanical integrity. The design and implementation of a didactic module for tests in the industrial control laboratory of the University of the Armed Forces ESPE Latacunga extension should be emphasized in a technical way, since it will be collectively used by students as part of the teaching - learning process, Especially in the fields of 2.2 kW three-phase asynchronous electric motors, with the help of a DC generator to simulate a controlled load for the two Baldor EM3611T and M3661TX three-phase motors, complemented by the Automatic derivation of variables such as: Voltage, Current, Speed, Torque, Power Factor, Efficiency, always in steady-state conditions and graphical representation of each of these variables in their respective curves. Finally, this research work will trigger a clear and integrated vision of the operation of this type of rotary machine, identifying the technical parameters compared to each type of motor, allowing deducing the parameters involved in improving the efficiency of the engine.

Key words:

- **THREE-PHASE MOTORS**
- **ELECTRIC MOTORS - ENERGY EFFICIENCY**
- **ELECTRIC MOTORS - LOAD SIMULATION**
- **INDUSTRIAL CONTROL LABORATORY - DIDACTIC MODULE**

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad se estima que el 40% del consumo de energía eléctrica engloba a nivel mundial el uso de motores eléctricos (WEG, 2017), debido a la creciente poblacional y sus múltiples demandas de desarrollo social y de consumo; estos factores determinan en la sociedad la manera de satisfacer sus necesidades de consumo las cuales están ligadas a la generación de energía eléctrica, en este panorama el motor asíncrono de corriente alterna es el motor más usado en el mundo y el principal consumidor de energía eléctrica en las industrias manufactureras, incluso llegando su uso a edificios y en nuestros hogares, siendo en este último principalmente la utilización de artefactos eléctricos que disponen de este tipo de motores para su funcionamiento.

En el Ecuador la generación de energía eléctrica se da principalmente por las fuentes hidroeléctricas las cuales ofrecen según la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) el 97% de cobertura de suministro de servicio de energía eléctrica en el país, en este entorno energético la utilización de motores eléctricos es de vital importancia para el desarrollo tecnológico y social de la población; así la energía eléctrica que se consume es a través de los motores de inducción trifásicos por constituir la fuerza motriz principal de la industria moderna, los cuales día a día son diseñados de acuerdo a las normas internacionales, evidenciando en la última década la falta de centros especializados en monitorear y garantizar la eficiencia energética suministrada.

En la ciudad de Latacunga existen centros de educación superior que ofertan carreras relacionadas a la energía eléctrica y al campo electromecánico, por lo que se ve fundamental desarrollar métodos que

permitan conocer el comportamiento de los motores eléctricos asíncronos que se utilizan en las diferentes aplicaciones tanto de la industria como del hogar, es realmente indispensable la aplicación de nuevos métodos para optimizar el uso de la energía eléctrica mediante la realización de ensayos efectivos en las aulas universitarias en pro de generar profesionales altamente capacitados en el área de la Ingeniería Electromecánica.

1.1.1 Formulación del problema

¿Cuáles son los efectos y beneficios para los estudiantes y docentes mediante el diseño e implementación de los módulos didácticos para ensayos de motores eléctricos asíncronos trifásicos de 2,2 kW con adquisición automática de variables electromecánicas para el laboratorio de control industrial de la Universidad de las Fuerza Armadas ESPE extensión Latacunga?

1.2 Antecedentes

La industria mundial para generar todos sus procesos de producción requiere de la intervención desde uno hasta un conjunto complejo de banco de motores eléctricos, siendo de gran importancia conocer a profundidad el funcionamiento y el desempeño de esta máquina eléctrica rotatoria, mediante las variables electromecánicas que pueden ser medidas, a través de la implementación de un módulo didáctico para este efecto.

Hoy en día la industria busca eficiencia en todo los campos, calidad para ser competitivos y brindar una mejor alternativa en la gama de productos como los motores eléctricos mayor eficiencia y un mayor ahorro de energía eléctrica, sin embargo en Ecuador, gran parte de la sociedad usan máquinas eléctricas o tienen equipos ya descontinuados que ocasionan altas pérdidas eléctricas que desperdician recursos energéticos.

El presente trabajo de titulación se basa en la necesidad de generar un conocimiento más profundo y una idea más detallada en el análisis del funcionamiento de 2 motores trifásicos de 2.2 KW, en el Laboratorio de

Control Eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas, permitirá de manera más clara y concisa determinar el comportamiento en condiciones de estado estable del motor eléctrico marca Baldor, modelo M3661TX y del motor eléctrico marca Baldor, modelo EM3611T, con la ayuda del generador de corriente continua modelo CDPT3603 que servirá como carga controlada aplicada a los motores eléctricos trifásicos, este módulo didáctico servirá de base fundamental para el desarrollo académico de los estudiantes universitarios.

1.3 Justificación

El desarrollo de la sociedad en el siglo XXI, se ha caracterizado por la modernidad, avances tecnológicos y electrónicos, siendo el fluido eléctrico el principal factor para su desenvolvimiento; en la mayor parte de industrias del tipo público o privado se manejan los recursos eléctricos con la finalidad de buscar eficiencia. Siendo la operación de motores eléctricos monofásicos y especialmente trifásicos clave para la reducción de costos y aumento de la eficiencia de trabajo, por esta razón los fabricantes de este tipo de máquinas cada día tienen soluciones más apropiadas y efectivas para cada tipo de necesidad y por supuesto que cumpla estos requisitos de costo – eficiencia.

A través de este módulo se podrá censar, procesar, interpretar y visualizar las variables como: Voltaje, Corriente, Velocidad, Factor de Potencia, Torque Mecánico y Eficiencia, en condiciones del 100% de su carga nominal, la generación de las gráficas correspondientes de estas variables permitirá efectuar un análisis de sus valores y poder realizar un estudio comparativo entre un motor eléctrico de uso general y un motor denominado de eficiencia Premium, para verificar los valores obtenidos con los valores entregados por el fabricante en cada uno de sus correspondientes catálogos.

1.4 Importancia

Al ser la energía eléctrica responsable del funcionamiento de la mayoría de los artefactos eléctricos es indispensable conocer los principios de funcionamiento del motor, pues de esta forma se garantiza el manejo responsable de estas máquinas en los diferentes ámbitos de producción.

Las fábricas de equipos y artefactos eléctricos día a día buscan perfeccionar sus productos razón por la cual, centran sus diseños eléctricos en acuerdos internacionales para estandarizar los mismos, bajo los preceptos de eficiencia energética, es así que a partir del 2008 en la edición 1.0 de la norma IEC 60034-30 se establece una nueva clasificación para los niveles de eficiencia de los motores de inducción a 50 y 60 Hz a nivel mundial, como son las normas (IE=International efficiency), que permite evidenciar las mejoras para cada nivel de clasificación IE, permitiendo a los usuarios disponer de motores que garanticen una eficiencia de acuerdo al tipo de necesidad de trabajo que requieran.

Los motores eléctricos se encuentran cada vez más inmersos en los procesos de producción de industrias convirtiéndose en el corazón de las máquinas desde una simple taladradora hasta una completa máquina CNC. La diversidad de potencias con Normas IE así como los tipos de motores para cada ambiente de trabajo hace atractivo la utilización de motores eléctricos de eficiencia premium mejorando los niveles de producción y cuidando el bolsillo de las fábricas, industrias y talleres que requieran del uso de motor eléctrico especialmente en grandes potencias.

Con el análisis realizado a los motores eléctricos asíncronos trifásicos a través de este módulo didáctico, se vuelve más fácil especialmente para los estudiantes comprender el funcionamiento del motor funcionando en las condiciones de plena carga.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Analizar la operación de motores trifásicos mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico para ensayo de motores eléctricos asíncronos trifásicos de 2.2 kW (3HP) con adquisición automática de variables electromecánicas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el módulo para la adquisición de variables electromecánicas de motores de inducción trifásicos hasta de 2.2 KW (3HP).
- Implementar el sistema de adquisición de datos, para la operación en estado estable de la máquina.
- Comparar las variables electromecánicas obtenidas entre las 2 máquinas asíncronas giratorias con norma IE 1 y norma IE3.
- Analizar resultados obtenidos de la máquina en funcionamiento en estado estable y del estudio comparativo entre las máquinas IE1, IE3.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos

El presente trabajo de titulación se basa en la necesidad de generar el análisis de la operación de motores trifásicos mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico para ensayo de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2 kw con adquisición automática de variables electromecánicas para el laboratorio de control industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas, módulo que permitirá visualizar de una manera simple y rápida las curvas de torque, velocidad, potencia activa, corriente, eficiencia y factor de potencia para cada porcentaje de carga aplicada al motor de inducción en ensayo, este módulo didáctico servirá de base fundamental para el desarrollo académico de los estudiantes universitarios.

Como antecedentes para el desarrollo de este trabajo de titulación existen proyectos realizados por otros investigadores que dan valioso aporte en este estudio. (Cortez Fernández, Guevara Ganchozo, & Rodríguez Enríquez, 2015), postulantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, realizan el correspondiente diseño e implementación de un banco de prueba para una máquina asíncrona trifásica (motor de inducción trifásico, marca: Hampden, modelo: WRM – 300, rotor tipo jaula y devanado) para el laboratorio de máquinas eléctricas de la UPS - GUAYAQUIL, quienes al ejecutar las prácticas pertinentes del trabajo de titulación expresan que “Realizar el estudio por medio de la inducción completa del proyecto utilizando los elementos que lo conformaban, permitió demostrar que el comportamiento del motor de inducción tipo jaula de ardilla permite entender de igual manera a los motores asíncronos trifásicos en sus diferentes variantes”.

La ejecución de estas prácticas permitirá tener una base de acción al momento de diseñar el módulo didáctico para ensayo de motores eléctricos

y se podrá poner a disposición de los estudiantes y docentes una herramienta para la generación de proyectos relacionados a los motores eléctricos.

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Ingeniería eléctrica

La energía eléctrica es una de las ramas importantes dentro de la ingeniería, en donde involucra las matemáticas y la física para la construcción de un equipo para su mejor manejo de energía eléctrica y un funcionamiento óptimo que pueda satisfacer las necesidades y/o requerimientos de trabajo para cada tipo de industria.

En el siglo XVII la electricidad mostró interés, y en el siglo XIX la ingeniería eléctrica se convirtió en una carrera profesional ya que estaba asociada a la física, ya con el tiempo la ingeniería eléctrica se ha encargado de solucionar varios problemas enfocados con los sistemas eléctricos de alta potencia ya que los sistemas eléctricos transmiten energía y controlan los motores, todo profesional de esta rama será formado con conocimientos en matemáticas y física para poder comprender los fenómenos electromagnéticos, a la vez también tiene que tener conocimientos sobre mecánica y sobre ciencia de materiales para poder elegir los materiales correctos para cualquier aplicación.

2.2.2 Máquina eléctrica

La máquina eléctrica es todo equipo capaz de transformar energía eléctrica en otros tipos de energía o fuerza y viceversa, tiene una amplia clasificación que se detalla en la (figura 1), de máquinas eléctricas rotativas.

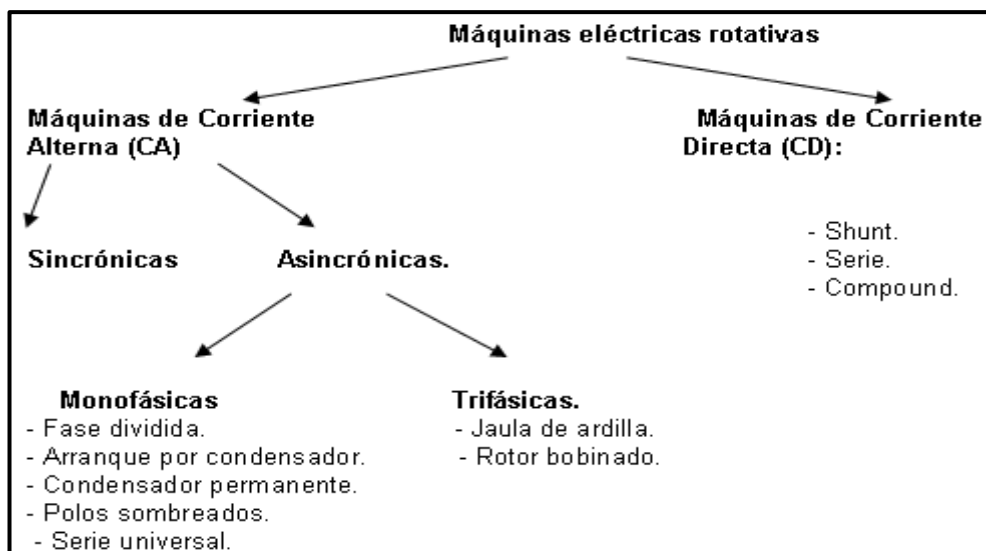


Figura 1. Clasificación de máquinas eléctricas

Fuente: (Revista Educativa, 2015)

En este Proyecto de titulación se utilizará la máquina de inducción de corriente alterna trifásica como elemento de estudio técnico – científico y el motor de corriente continua como actuador de carga controlada para las pruebas del motor, los equipos mencionados son de la marca Baldor del grupo ABB razón por la que se realiza un detalle de las máquinas mencionadas:

- Motor de inducción trifásico de corriente alterna de uso general tiene las siguientes especificaciones (ver anexo A):
- Es un motor de la Marca Baldor con el respaldo técnico de ABB.
- Modelo: M3661TX
- Potencia: 3 HP
- Voltaje: 208-230 / 460 Voltios
- Corriente a Plena Carga: 9,4-8,7 / 4,35 Amperios
- Velocidad: 1755 R.P.M
- Frecuencia: 60Hz
- NEMA B
- Número de Polos: 4

Motor de inducción trifásico de corriente alterna de eficiencia Premium tiene las siguientes especificaciones (ver anexo B):

- Es un motor de la Marca Baldor con el respaldo técnico de ABB, motor de eficiencia Premium Super E
- Modelo: EM3611T
- Potencia: 3 HP
- Voltaje: 230 / 460 Voltios
- Corriente a Plena Carga: 8,4 / 4,2 Amperios
- Velocidad: 1760 R.P.M
- Frecuencia: 60Hz
- NEMA B
- Número de Polos: 4

Motor de corriente continua de imanes permanentes tiene las siguientes especificaciones (ver anexo C):

- Es un motor de Corriente Continua de la Marca Baldor con el respaldo técnico de ABB, de imanes permanentes.
- Modelo: CDPT3603
- Potencia: 3 HP
- Voltaje Armadura: 180 Voltios
- Corriente Armadura: 14 Amperios
- Velocidad: 1750 R.P.M
- NEMA B
- Número de Polos: 3

2.2.3 Ingeniería en automatización

La ingeniería en Automatización integra conocimientos de: diseño mecánico, ciencias de la computación, desarrollo de hardware, ingeniería de control y redes de comunicación industrial; apoyándose en el desarrollo de las tecnologías modernas para generar proyectos que maximicen los estándares de productividad de los sistemas volviéndolos óptimos y eficientes, preservando la seguridad de las personas de quienes la operan.

Esta rama de la ingeniería se complementa con disciplinas como supervisión de datos, instrumentación industrial, redes de comunicación industrial, sistemas de control y control de procesos.

La Ingeniería en Automatización es una ingeniería que cada día se ve con mayor demanda en el ámbito industrial debido a los procesos de producción que tienen las empresas que están en una constante carrera contra el tiempo debido a que los retardos en los procesos de producción en algunas empresas pueden incluso generar grandes pérdidas de carácter monetario.

Entre las áreas donde se desarrolla la ingeniería en mención se destacan sectores industriales como la Minería, Celulosa, Metalmecánica, Automotriz, Textil, Alimentos, entre otras que requieran de una optimización como ya se dijo (Universidad de la Salle, 2010).

2.2.4 Control Industrial

El concepto de control industrial es extraordinariamente amplio, abarcando desde un simple interruptor que gobierna el encendido de una lámpara, hasta el más complejo computador de proceso, dicho en otras palabras es aquel que compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado y toma una acción de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en absoluto.

Los tipos de sistema de control se clasifican de acuerdo al tipo de señales que interviene en el proceso:

- Sistemas de control analógico: Señales analógicas.
- Sistemas de control digitales: Señales digitales
- Sistemas de control discretos: señales binarias
- Sistemas de control híbridos. (ISA-UMH, 2008)

2.2.5 Antecedentes de la Investigación

La universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, enfoca su accionar al crecimiento profesional de sus estudiantes en base a la práctica y aplicación de los conocimientos impartidos por su planta docente en modernos y sofisticados laboratorios para cada una de sus áreas de estudios; sin embargo el laboratorio de Control Eléctrico que sirve para formación de los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Electromecánica no cuenta con un adecuado módulo didáctico para ensayo de motores eléctricos, en tal virtud es necesario que este laboratorio cuente con un moderno módulo para pruebas de motores, el cual ofrezca herramientas de ingeniería actualizadas y acordes a los requerimientos del mundo laboral para realizar pruebas a los 2 tipos de motores trifásicos asíncronos que forman parte de este módulo de ensayos.

Este módulo permitirá formar mejores profesionales en cuanto al manejo, control y supervisión de máquinas eléctricas de inducción asíncronas, visualizando directamente el modelado y simulación de las curvas de cada una de las variables en estudio de los motores eléctricos a través de un adecuado manejo y procesamiento de datos que permitirán tanto a docentes como a los estudiantes interpretar los resultados obtenidos al final.

El mejoramiento continuo en busca de cumplir eficazmente los estándares internacionales ha permitido a la Universidad generar cambios tecnológicos en los diferentes laboratorios implementados en la carrera de Electromecánica, lo que ha evidenciado el mejoramiento y adecuación óptima de los mismos, a través de la aplicación e implementación de este proyecto sin lugar a duda contribuirá directamente al desarrollo profesional, técnico y práctico de todos los entes que intervienen en la carrera de Ingeniería Electromecánica.

Además este módulo permitirá efectuar simulaciones, pruebas y generación de datos del funcionamiento de los motores trifásicos asíncronos los cuales estarán ligados directamente a los conceptos y fundamentos

científicos vigentes en la actualidad; de la misma manera se generará información detallada del funcionamiento del módulo didáctico mediante un claro y detallado manual de funcionamiento (ver anexo R), que servirá de apoyo para el uso correcto del mismo por parte de los estudiantes universitarios.

2.3 Fundamentación conceptual

2.3.1 Generalidades de motores eléctricos

El constante desarrollo tecnológico ha desencadenado un avance en cuanto a la generación de energía limpia y renovable, este desarrollo se evidencia en la demanda creciente de generar energía eléctrica para atender las necesidades de desarrollo global, siendo los países denominados de primer mundo quienes han generado nuevas tecnologías energéticas para abastecer el crecimiento poblacional e industrial y su acceso a bienes de consumo que en su mayoría dependen del uso de motores eléctricos. Sin embargo en la construcción de motores eléctricos para los diferentes equipos y aplicaciones, implica el uso de los recursos naturales, así como una afectación a los medios ambientales.

Una de las metas de la industria energética es combatir el desperdicio y aumentar la eficiencia energética. Se estima, actualmente, que 40% del consumo global de energía está relacionado con el uso de motores eléctricos. (WEG, 2017). De esta manera, iniciativas en el sentido de utilizar motores eléctricos de alta eficiencia y convertidores de frecuencia para aplicaciones de velocidad variable son significativas cuando consideramos su representatividad en el consumo de energía global.

La mayor parte de motores eléctricos operan a través de la interacción entre un campo magnético y corrientes sinusoidales para generar fuerza dentro del propio motor, es decir es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos que generan sus bobinas, estos motores son utilizados con gran frecuencia en las

instalaciones industriales, comerciales y en los domicilios particulares, en la industria manufacturera y de producción de acero se requiere de motores de tracción para poder mover los ejes de extrusión y maquinarias de corte y doblado como ejemplos.

Otras máquinas transforman la energía mecánica en energía eléctrica siendo este el principio de un generador eléctrico, por ejemplo el uso de motores eléctricos de tracción se da en las locomotoras equipadas con frenos regenerativos, lo cual producen los dos tipos de energía, eléctrica en mecánica y de mecánica en eléctrica.

Los motores de inducción trifásicos son los principales consumidores de energía eléctrica en el planeta, por lo que la última década en diferentes países del mundo se han realizado estudios y proyectos para la disminución del consumo de energía mediante estos motores, cuantificando directamente su eficiencia y consumo; por tal motivo estos motores en la actualidad se fabrican en las más diversas potencias que pueden ir de una a miles de caballos de fuerza (HP), así como variabilidad en las tensiones y frecuencias (50 y 60 Hz), normalizadas de acuerdo a los estándares internacionales, ya que su uso está orientado para accionar máquinas industriales, máquina de torno, ventiladores, montacargas, grúas, bombas, maquinarias de elevación, sopladores, artefactos del hogar y un sin número de máquinas.

Existen además redes trifásicas de baja tensión las mismas que están formadas por tres conductores activos y pueden ejecutarse con o sin conductor neutro. Los conductores neutros están unidos al centro de la estrella del generador o del transformador en lado de baja tensión. Dos conductores activos, o a su vez uno de ellos y el neutro, constituyen un sistema de corriente alterna monofásica.

Motor de corriente continua

Máquina eléctrica giratoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, principio que aplica cuando funciona como motor y transforma la

energía mecánica en energía eléctrica cuando funciona como generador esto depende del sentido de giro al que se hará funcionar, actualmente los motores de corriente continua tienen un campo de aplicación diverso desde la industria náutica hasta la industria automotriz, motores que tienen la particularidad de torque – velocidad muy definidos o muy variables dependiendo del tipo de carga que va a manejar sin perder su alta eficiencia.

Existen 3 tipos de motores de corriente continua y estos son:

- Motor de Corriente Continúa en Serie.
- Motor de Corriente Continúa Shunt o derivación.
- Motor de Corriente Continua compuesto.

La potencia Eléctrica y Torque mecánico son 2 parámetros de gran importancia al momento de realizar una selección del motor, las ecuaciones (1) y (2) permiten realizar un cálculo rápido conociendo las variables básicas de funcionamiento del motor.

$$P = V_a * I_a \quad \text{Ec. (1)}$$

Considerando las pérdidas por el calor disipado en la armadura tenemos:

$$P = V_a * I_a + I_a^2 * R$$

El término $V_a * I_a$ es la potencia eléctrica útil que se convertirá en la potencia mecánica que se tiene en el eje del motor.

Dónde:

P: Potencia útil del motor en (W)

V_a: Voltaje suministrado en la Armadura (V)

I_a: Corriente suministrada a la Armadura (V)

El torque mecánico viene dado por la siguiente ecuación:

$$P = \omega * T \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde:

P: Potencia Mecánica (W)

ω: Velocidad angular ($\frac{rad}{s}$)

T: Torque mecánico (N.m)

Motor de imanes permanentes

En motores de corriente continua el campo magnético puede ser generado por los devanados de cobre o por la interacción de imanes permanentes, los motores de corriente directa de imanes permanentes pueden clasificarse según el diseño de la armadura y la forma de conmutación. Los motores de cc tradicionales poseen escobillas mecánicas y conmutadoras. Actualmente una clase importante de motores de cc la forma de conmutación se hace de forma electrónica, denominando a este tipo de motor “brushless” o sin escobillas. Según la construcción de su armadura estos motores se clasifican en 3 tipos:

- Armadura de núcleo de hierro
- Armadura de devanado superficial
- Armadura de bobina móvil.

En la (figura 2) se evidencia el motor de corriente continua de imanes permanentes que se utiliza en este proyecto para poder simular carga a cada uno de los motores trifásicos, parte del estudio de este proyecto (ver anexo C).



Figura 2. Motor de cc de imanes permanentes

Armadura de núcleo de hierro

En la (figura 3) se indica el rotor y estator del motor de corriente continua de imanes permanentes de núcleo de hierro, el material que se utiliza para los imanes permanentes son bario-ferrita. El campo magnético producido por el imán circula por el rotor ranurado. Una de las principales características de este motor es la alta inercia que tiene, así como un alto valor de inductancia, alta confiabilidad y un bajo costo de construcción. (Polanía Puentes, 2010).

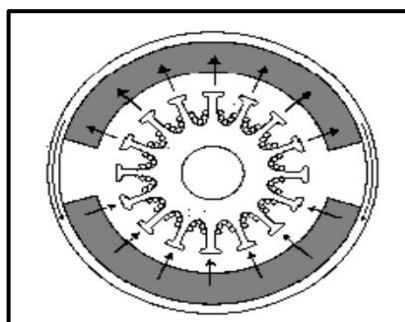


Figura 3. Armadura de núcleo de hierro

Fuente: (Polanía Puentes, 2010)

Armatura de devanado superficial

En la (figura 4) se representa al rotor de un motor de imán permanente de armadura de devanado superficial con la característica de que los conductores de armadura están sobre su superficie laminada sujeta al eje del motor, los conductores eléctricos se encuentran ubicados entre el entrehierro y el campo de imán permanente, por lo tanto su inductancia será menor con respecto al motor de armadura de núcleo de hierro, (Polanía Puentes, 2010).

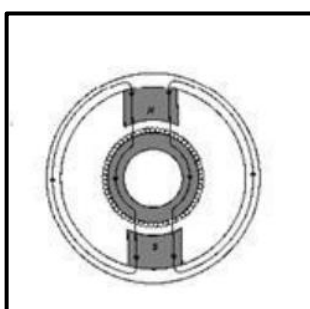


Figura 4. Armadura de devanado superficial

Fuente: (Polanía Puentes, 2010)

Armadura de bobina móvil

En la (figura 5), se muestra la representación del tipo de armadura de bobina móvil donde la armadura en el entrehierro se colocan entre el flujo estacionario y el imán permanente. El conductor eléctrico está apoyada por el tipo de material no magnetizante como las resinas epóxicas o fibra de vidrio formando de esta manera un cilindro hueco.

La característica principal de este tipo de motores es que tienen un momento de inercia e inductancia de valores muy bajos debido a que los conductores eléctricos para este tipo de bobina no se encuentran en contacto directo con el hierro, la inductancia tiene valores bajos. (Polanía Puentes, 2010).

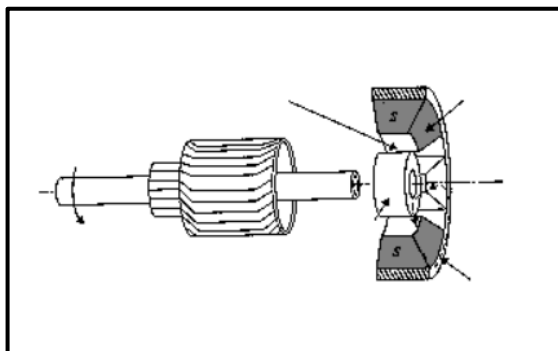


Figura 5. Armadura de bobina móvil

Fuente: (Polanía Puentes, 2010)

Partes de una máquina de corriente continua

En una máquina de corriente continua podemos identificar 2 partes principales: el estator y el rotor.

- **Estator**

En esta parte del motor se encuentran los polos que pueden ser de imanes permanentes o de bobinas de cobre (inductor) enrolladas sobre el núcleo de hierro, mecánicamente es la parte fija, de protección y de soporte del motor como tal, construido de acero curvado o de hierro fundido.

- **Rotor**

Parte del motor mecánicamente móvil construido con chapas de material acero al silicio formando las respectivas ranuras que permiten colocar los bobinados donde se encuentra el circuito del inducido, junto con el colector de las delgas.

- **Colector**

Formado por piezas planas tipo trapecoidal llamadas delgas, separadas cada una de estas por finas láminas de mica.

- **Devanado del inducido**

Bobinado que se encuentra conectado al circuito exterior de la máquina.

- **Cojinetes y rodamientos**

Piezas del motor que sirven para sujetar y apoyar el eje del inducido del motor, en la (figura 6) se indica en forma detallada las partes constructivas de una máquina de corriente continua.

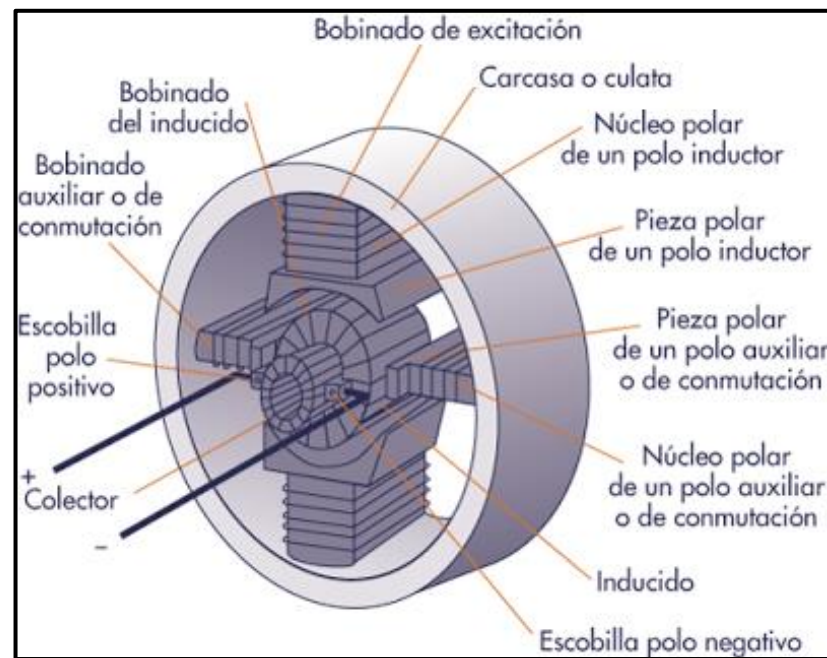


Figura 6. Partes constructivas de un motor de cc

Fuente: (Benitez, 2015)

Generadores eléctricos

Máquinas eléctricas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica mediante la inducción de un campo magnético sobre el estator de la máquina.

Generadores de corriente continua

Los generadores de corriente continua son máquinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica mediante el fenómeno de inducción magnética. Esta energía eléctrica tiene la característica de ser corriente

continua; de ahí se deriva el nombre de generador de corriente continua. En las máquinas de corriente continua el inducido está en el rotor y el inductor está en el estator, para el caso que esta máquina funcione como motor los bobinas del inductor y del inducido se encuentran alimentados con corriente continua y para el caso que funcione como generador al inductor se alimenta con corriente continua para obtener por el inducido la Fuerza Electromotriz denominada FEM. (Rodríguez Pozueta, 2015).

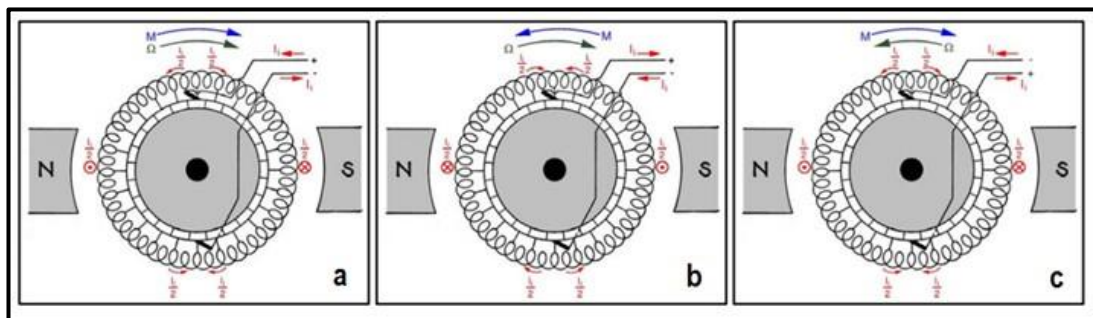


Figura 7. Funcionamiento del motor cc como generador

Fuente: (Rodríguez Pozueta, 2015)

Cuando la máquina de corriente directa trabajando como motor (a), funciona como generador en el mismo sentido de giro (b), la polaridad en los bornes del inducido no cambia, (ver figura 7) pero se invierten los sentidos de la corriente del inducido y del Par M. Mientras que la máquina de corriente directa trabajando como motor (a), funciona como generador cambiando el sentido de giro (c), se invierten la polaridad en el inducido, manteniendo los sentidos de la corriente del inducido y del par M. (Rodríguez Pozueta, 2015).

Generadores de corriente alterna

Según (Richardson & Caisse, 1997), “Los alternadores son generadores de corriente alterna cuyo fundamento es parecido al de los generadores de corriente continua, aunque existen algunas diferencias en su construcción.”

A diferencia de un generador de corriente continua (dínamo), el alternador no requiere de un colector, por lo que no es necesario que el

inducido sea el que gire. Los alternadores (ver figura 8) reciben el nombre de generadores síncronos por la relación entre la velocidad de giro y la frecuencia.

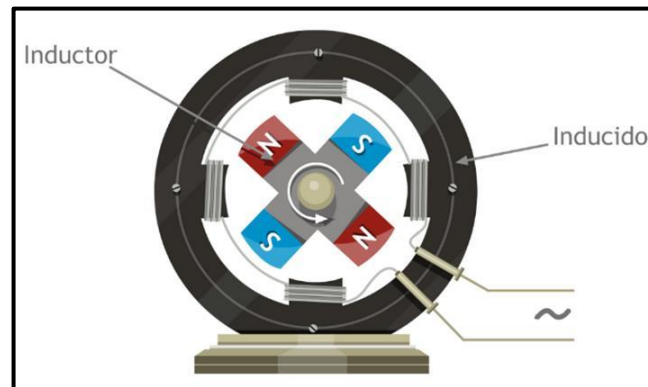


Figura 8. Alternador

Fuente: (Endesa Educa, 2014)

Los generadores pueden ser:

- **Monofásico**

Generador destinado a producir fuerza electromotriz sinusoidal entre dos terminales, empleando un conversor electromecánico de energía denominado generador sincrónico, que se construye enrollando un conductor de cobre sobre un núcleo de hierro. Por un conductor se hace circular corriente continua, lo cual produce un campo magnético; el hierro al magnetizarse permite obtener un valor mayor de la inducción magnética en las caras polares del electroimán (ver figura 9). Al mismo que se le añade un eje mecánico de giro y se lo impulsa mediante energía mecánica, proveniente de una turbina o motor. (Silva Bijit, 2009).

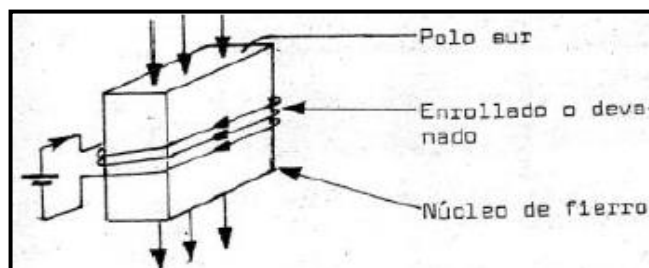


Figura 9. Generación de campo magnético

Fuente: (Silva Bijit, 2009)

Los generadores monofásicos tienen las siguientes características:

- Rápida respuesta.
 - Mejor parte de carga de eficiencia.
 - Mejor capacidad de control.
 - Menores costos de mantenimiento.
 - Costos muy accesibles.
 - Categorías habituales de control de la frecuencia de servicios auxiliares del generador monofásico.
-
- **Trifásico**

La transmisión alterna trifásica es la solución económica más empleada actualmente. Permite el uso de transformadores y pueden emplearse sólo tres conductores para transmisión a largas distancias. A igualdad de potencia, los motores monofásicos son más grandes, tienen menor rendimiento, un factor de potencia más bajo y menor capacidad para las sobrecargas que los trifásicos. Por esta razón las industrias suelen usar motores trifásicos. (Silva Bijit, 2009).

Generador asíncrono

A este tipo de generadores se los conoce también como generadores de inducción. (Matsch L. W., 1990) afirma que: “Un motor de inducción puede hacerse que genera potencia real impulsándola arriba de la velocidad sincrónica mientras recibe una excitación de c-a de la línea. Debido a esta salida de la velocidad sincrónica, la máquina se llama generador asíncrono.”

Las principales características de un generador asíncrono son:

- El generador asíncrono no puede generar una potencia reactiva ya que requiere de esta potencia para suministrar su excitación.

- Las operaciones del generador asíncrono requieren máquinas sincrónicas con su potencia reactiva necesaria.

2.3.2 Funcionamiento de los motores eléctricos, asíncronos trifásicos.

Motor asíncrono trifásico

Los motores asíncrónicos se consideran como motores de C.A, este tipo de motor está formado por un rotor y un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas separadas 120° en el espacio, al momento que circula las corrientes equilibradas, se induce un campo magnético giratorio sobre el rotor, produciendo una tensión eléctrica en el rotor. (MOTORTICO, 2015).

El campo magnético giratorio, que crea el estator, produce una fuerza electromotriz de inducción. Esta fuerza del campo magnético giratorio origina una fuerza electrodinámica sobre los conductores del rotor, haciendo que pueda girar el rotor del motor. La diferencia entre la velocidad del campo magnético y la velocidad del rotor se denomina deslizamiento. (SitesMáquinas, 2016).

La constitución del motor asíncrono trifásico se centra en los siguientes factores:

- Circuito magnético
- Circuitos eléctricos

Principios de funcionamiento de las máquinas asíncronas

El principio de funcionamiento se basa en el concepto de campo magnético giratorio, el cual se origina en el rotor y en este, se inducen directamente las corrientes necesarias para producir el giro, por consiguiente el rotor de los motores de inducción no se conecta a ninguna red eléctrica,

porque las corrientes que por él circulan son inducidas. (Cifp-Mantenimiento, 2016).

El motor asíncrono, o de inducción, funciona por la corriente que se induce en el rotor del motor por la acción del campo magnético, el principio de funcionamiento de los motores de inducción o motores asíncronos, sigue los siguientes pasos:

- A través de la red trifásica se conecta el estator originando un campo giratorio de velocidad (velocidad de sincronismo).
- Los conductores del rotor “ven” un flujo variable puesto que el campo magnético está girando, por tanto se induce en ellos una fem.
- Si los conductores del rotor forman un circuito cerrado, se inducen corrientes rotóricas.
- La interacción entre el campo magnético y las corrientes rotóricas produce el par de fuerzas responsable del giro, con lo cual el rotor comienza a girar a una velocidad inferior a la del campo magnético (ver figura 10). (Cifp-Mantenimiento, 2016).

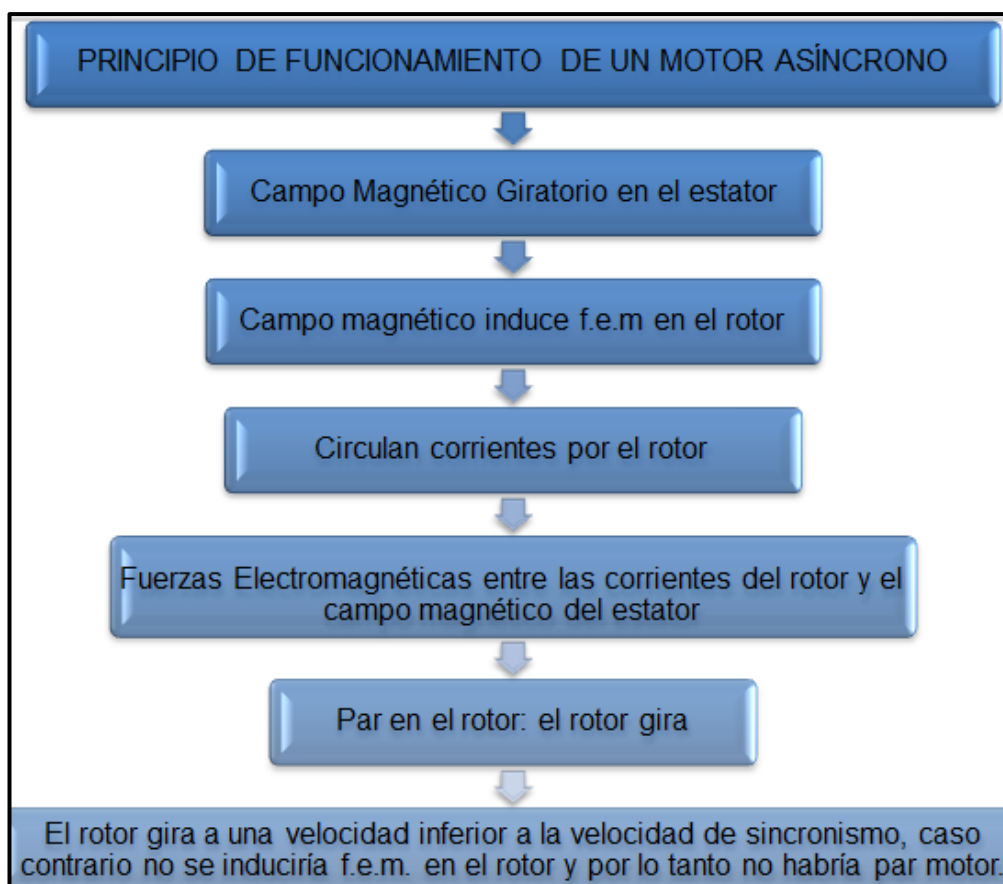


Figura 10. Principio de funcionamiento de motor asíncrono

Fuente: (Universidad Tecnológica Nacional, 2015)

Deslizamiento del motor de inducción

El deslizamiento del motor de inducción se define mediante la siguiente ecuación:

$$s = \frac{n_{sin} - n_r}{n_{sin}} \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

s : Deslizamiento del motor

n_{sin} : Velocidad de sincronismo

n : Velocidad del motor (datos de placa)

Entendiendo al deslizamiento como la diferencia entre la velocidad síncrona n_{sin} y la velocidad del rotor n_r , expresada en tanto por uno o en

porcentaje expresa en la (ecuación 4). Generalmente el desplazamiento está considerado en un 3% a 8% de la velocidad nominal a plena carga.

$$s\% = \frac{n_{sin} - n_r}{n_{sin}} * 100\% \quad \text{Ec. (4)}$$

En la (figura 11) se ilustra el deslizamiento que existe en una máquina asíncrona.

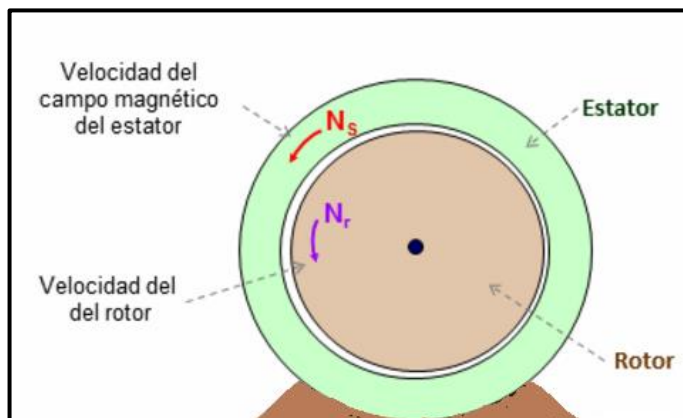


Figura 11. Deslizamiento de un motor asíncrono

Fuente: (Universidad Tecnológica Nacional, 2015)

Partes del motor asíncrono o de inducción

El motor asíncrono trifásico como se mencionó con los motores de corriente continua tienen 2 partes claramente identificadas como es el estator y rotor (ver figura 12), además se tiene las siguientes partes constructivas:

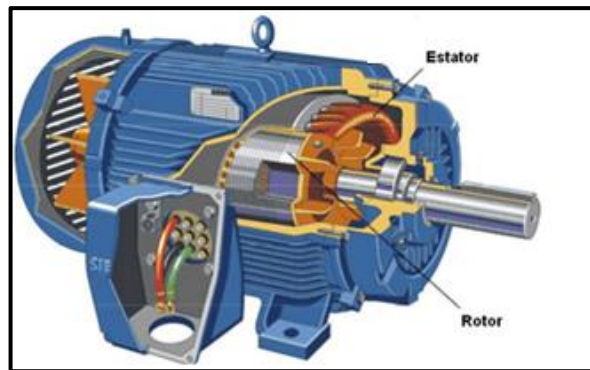


Figura 12. Partes del motor asíncrono

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Estator

Es la parte fija del motor y uno de los dos componentes fundamentales para la transmisión de potencia, el estator opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor, este no se mueve mecánicamente sino magnéticamente (ver figura 13).



Figura 13. Estator

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

El estator está formado especialmente de un conjunto de láminas de acero al silicio, mediante la cual pasa a través de ellas el flujo magnético; la parte metálica del estator y los devanados proporcionan los polos magnéticos. Los polos de un motor siempre son pares (2, 4, 6, 8, 10,...n), consecuentemente el mínimo de polos que puede tener un motor para funcionar es dos (Norte y Sur). (Rega, 2011).

El Rotor

Es el componente que gira en una máquina eléctrica, generalmente montada en un eje; existen dos tipos de rotores descritos a continuación:

- Rotor tipo jaula de ardilla
- Rotor tipo bobinado

Jaula de ardilla: en su interior contiene barras conductoras a lo largo, de aluminio o de cobre con ranuras y conectados juntos en ambos extremos; poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula. El conductor del rotor se encuentra igualmente distribuido en la parte exterior del rotor (ver figura 14). Con esta configuración de rotor ayuda a tener mejoras en el momento de arranque y en la disminución de los ruidos.

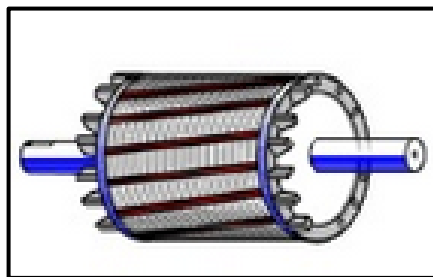


Figura 14. Rotor jaula de ardilla

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Rotor bobinado: tiene un rotor constituido, en vez de por una jaula, por una serie de conductores bobinados sobre él en una serie de ranuras situadas sobre su superficie. De esta forma se tiene un bobinado en el interior del campo magnético del estator, del mismo número de polos, y en movimiento. Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados (ver figura 15). (De Vandelvira, 2011)

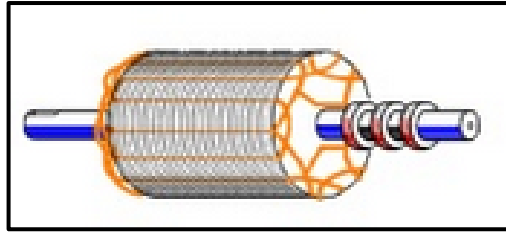


Figura 15. Rotor bobinado

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Carcasa: Es la cobertura de la máquina como tal y por lo tanto es la parte visible, con la función de proteger y servir de apoyo mecánico al bobinado y al rotor de distintos agentes externos que puedan ocasionar daños o un mal funcionamiento (ver figura 16). Otra de sus funciones es servir como un medio para poder disipar el calor del motor, mediante ranuras que toman temperatura mientras el motor trabaja, y la circulación de aire las enfría, logrando refrigerar el motor es de gran importancia al momento de realizar una adecuada selección de sus dimensiones mecánicas.

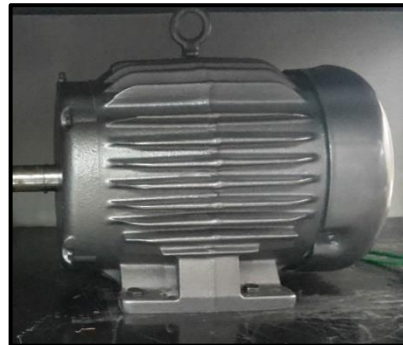


Figura 16. Carcasa

La carcasa de los motores se encuentra en 2 tipos: la ODP (Open Drip Proof) que es la carcasa a pruebas de goteo, este armazón tiene ranuras que permiten la circulación del aire, pero es susceptible al ingreso de partículas de polvo y lluvia. La carcasa del tipo TEFC (Totally enclosed fan cooled) carcasa totalmente cerrada con ventilación externa, construidos en láminas de acero o de hierro fundido ideales para trabajar en ambientes

industriales variables ya que impide el paso de polvo y el aire es expulsado a través del ventilador que viene incorporado en su estructura, por estas condiciones son motores de precio económico mayor en comparación con los anteriores.

Características básicas del motor asincrónico o de inducción

Como se ha descrito anteriormente, en una máquina a la que se induce electricidad en el rotor por medio de un campo magnético, permitiendo al rotor del motor generar potencia mecánica. Un motor de inducción es del tipo monofásico y trifásico siendo este último el más común.

La característica del motor asíncrono radica en la forma en que se suministra potencia al rotor por el estator primero para posteriormente convertirse en torque producto de la fuerza magnética del estator.

Datos de placa de un motor eléctrico asíncrono

La placa de características técnicas del motor tiene como función dar a conocer la mayoría de la información eléctrica y mecánica que se requiere para la identificación del motor, datos que sirven para realizar en muchos casos el dimensionamiento de las protecciones eléctricas adecuadas para su instalación. En la (gráfica 17 y 18) se muestran los datos de placa de los 2 motores eléctricos que serán parte del análisis de este proyecto.

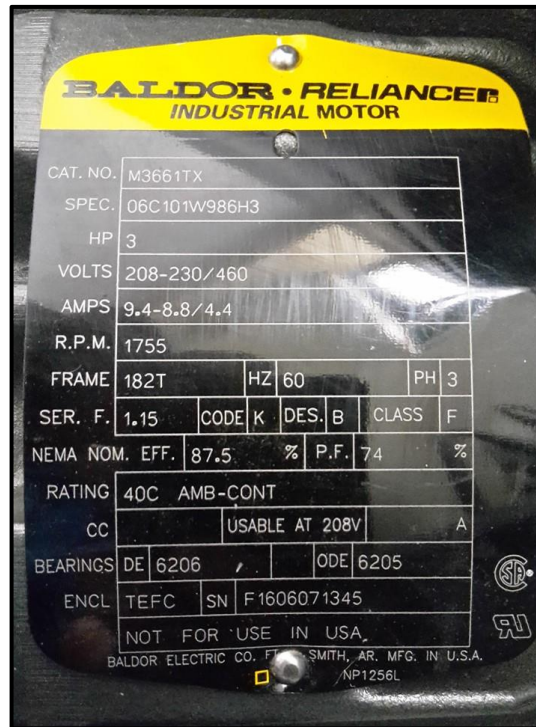


Figura 17. Placa de datos del motor M3661TX



Figura 18. Placa de datos del motor EM3611T

A continuación se realiza una descripción detallada de los datos de placa del motor EM3611T SUPER E – PREMIUM y del motor estándar M3661TX, ambos de la marca Baldor.

Marca del motor: En este campo se encuentra la marca del fabricante o algún distintivo que identifique al constructor (ver tabla 1).

Tabla 1.


Marca de los 2 motores

<p>Motor EM3611T</p>	
<p>Motor M3661TX</p>	

Cat. No: campo que identifica al número de catálogo o la nomenclatura propia del fabricante que sirva para representar su producto (ver tabla 2).

Tabla 2.

Nomenclatura de los 2 motores

<p>Motor EM3611T</p>	
<p>Motor M3661TX</p>	

Spec: Es el código de identificación del motor, sirve como referencial para conseguir los respectivos repuestos (ver tabla 3).

Tabla 3.

Identificación de los 2 motores

Motor EM3611T	SPEC. 36Q570S266G1
Motor M3661TX	SPEC. 06C101W986H3

HP: Potencia útil en el eje sin considerar las pérdidas, este dato puede indicarse en HP o en KW (ver tabla 4).

Tabla 4.

Potencia de los 2 motores

Motor EM3611T	HP 3
Motor M3661TX	HP 3

Volts: Se identifica el nivel de voltaje que funciona el motor, generalmente existe 2 niveles de voltaje de acuerdo a la configuración que admita sus motores en los terminales (ver tabla 5).

Tabla 5.

Voltaje de placa de los 2 motores

Motor EM3611T

VOLTS | 230/460

Motor M3661TX

VOLTS | 208-230/460

Amps: Indica el valor de corriente que consume el motor cuando trabaja a condiciones nominales de carga, en la placa indica la corriente consumida para cada configuración de voltaje (ver tabla 6).

Tabla 6.

Corriente de placa de los 2 motores

Motor EM3611T

AMPS | 8.4/4.2

Motor M3661TX

AMPS | 9.4-8.8/4.4

RPM: Indica las revoluciones por minuto que tiene el motor cuando funciona a condiciones de plena carga (ver tabla 7).

Tabla 7.

Velocidades de placa de los 2 motores

Motor EM3611T	R.P.M. 1755
Motor M3661TX	R.P.M. 1760

Frame: campo que indica el tamaño de la carcasa del motor, definiendo las dimensiones físicas del motor, en la mayoría de veces se indica con 4 caracteres alfanuméricos según normas IEC 60072 para motores europeos (medidas en milímetros) y normas NEMA MG-1 para motores norteamericanos (medidas en pulgadas). La nomenclatura 182T significa que podemos obtener la altura al eje dividiendo los 2 primeros dígitos para 4, esto es $18/4=4.5$ pulgadas, el tercer y cuarto dígito indica la longitud entre los agujeros de anclaje del motor, el término "T" indica que pertenece a la última revisión de la norma NEMA (ver tabla 8).

Tabla 8.

Frame de los 2 motores

Motor EM3611T	FRAME 182T
Motor M3661TX	FRAME 182T

En la (tabla 9) se indica algunos sufijos que se tiene para la norma NEMA.

Tabla 9.

Sufijos para el Frame según NEMA

SUFIJO	DESCRIPCIÓN
T	Última revisión de NEMA (1964)
U	Revisión NEMA (1952 – 1964)
Z	Eje especial consultar con fabricante
S	Eje más corto
C	Montaje con cara tipo C
D	Para montaje para flanger
V	Montaje vertical
J JM y JP	Para aplicaciones en bombas ejes más largos
Y	Montaje no Estándar

Fuente: (Santos, 2012)

Hz: Frecuencia de trabajo del motor, generalmente el valor de la frecuencia es de 60 Hz (ver tabla 10).

Tabla 10.

Frecuencia de placa para los 2 motores

Motor EM3611T	
Motor M3661TX	

PH: Sus siglas en inglés PHASE (fase), que indica el tipo de fuente de alimentación a la cual debe conectarse el motor, la mayoría es del tipo monofásico y trifásico (ver tabla 11).

Tabla 11.

Fases de alimentación para los 2 motores

Motor EM3611T	PH 3
Motor M3661TX	PH 3

Ser. F: Indica el factor de sobrecarga que se puede aplicar al motor, para este tipo de motor puede agregarse hasta un 15% más de sobrecarga (ver tabla 12).

Tabla 12.

Factor de servicio para los 2 motores

Motor EM3611T	SER. F. 1.15
Motor M3661TX	SER. F. 1.15

Code: Código que identifica la cantidad de corriente que requiere un motor (ver tabla 14), para las condiciones de rotor bloqueado, se especifica al detalle el valor de cada letra (ver tabla 13).

Tabla 13.


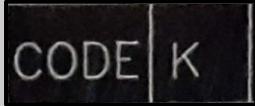
Rangos de Corrientes en motores para rotor bloqueado

Código	Potencia KVA / HP	Corriente (Amp)	Código	Potencia KVA / HP	Corriente (Amp)
A	0.00 – 3.15	1.6	L	9.0 – 10.0	9.5
B	3.15 – 3.55	3.3	M	10.0 – 11.2	10.6
C	3.55 – 4.00	3.8	N	11.2 - 12.5	11.8
D	4.0 – 4.5	4.3	P	12.5 – 14.0	13.2
E	4.5 – 5.0	4.7	R	14.0 – 16.0	15.0
F	5.0 – 5.6	5.3	S	16.0 – 18.0	17.0
G	5.6 – 6.3	5.9	T	18.0 – 20.0	19.0
H	6.3 – 7.1	6.7	U	20.0 – 22.4	21.0
J	7.1 – 8.0	7.5	V	22.4 - arriba	
K	8.0 – 9.0	8.5			

Fuente: (Santos, 2012)

Tabla 14.

Código de servicio para los 2 motores

Motor EM3611T	
Motor M3661TX	

Des: Código que indica la curva Par / Velocidad, que tiene el motor en el momento del arranque y en condiciones de trabajo con carga, en este caso el motor tiene asignado la letra B lo que implica que tiene una baja corriente de arranque y un bajo deslizamiento aproximadamente un 5% (ver tabla 15).

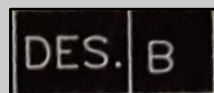
Tabla 15.

Código NEMA curvas Par - Velocidad para los 2 motores

Motor EM3611T



Motor M3661TX



En la (figura 19) se presenta las curvas características que define la norma NEMA para las relaciones de par y velocidad para cada clase de Motor, (Clase A, B, C, D).

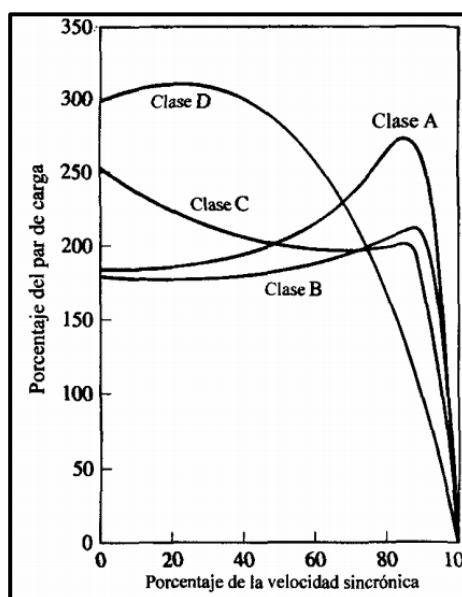


Figura 19. Curvas par / velocidad para diferentes tipos de motor

Fuente: (Catarina.udlap, 2012)

Class: Clasificación NEMA según el tipo de aislamiento térmico que indica los rangos de temperatura a los que puede trabajar el motor (ver tabla 16).

Tabla 16.

Aislamiento térmico para los 2 motores

Motor EM3611T	
Motor M3661TX	

En la (tabla 17) se indica los tipos de aislamiento y las tolerancias térmicas de trabajo para cada uno de los motores.

Tabla 17.

Clasificación NEMA del tipo de aislamiento para motores

Clase de aislamiento	Tipo de protección	Temp. Ambiente	Incremento Temp.	Tolerancia	
				sobre punto caliente	Temp. Total
A	Abierto	40°C	50°C	15°C	105°C
	Cerrado	40°C	55°C	10°C	105°C
B	Abierto	40°C	70°C	20°C	130°C
	Cerrado	40°C	75°C	15°C	130°C
F	Abierto	40°C	90°C	25°C	155°C
	Cerrado	40°C	95°C	20°C	155°C
H	Abierto	40°C	110°C	30°C	180°C
	Cerrado	40°C	115°C	25°C	180°C

Fuente: (Nuñez Mata, 2013)

Nema Nom Eff: representa la eficiencia del motor que tiene a la salida del eje (ver tabla 18).

Tabla 18.

Eficiencia Nominal para los 2 motores

Motor EM3611T	NEMA NOM. EFF. 89.5 %
Motor M3661TX	NEMA NOM. EFF. 87.5 %

P.F: Indica el porcentaje del factor de potencia, que mide la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo del motor. El factor de potencia es el ángulo que existe entre el desfase del voltaje y la corriente consumida (ver tabla 19).

Tabla 19.

Factor de Potencia para los 2 motores

Motor EM3611T	P.F. 75
Motor M3661TX	P.F. 74 %

Rating: Factor que representa la temperatura máxima ambiente a la que puede operar el motor en condiciones de plena carga y de forma continua, la calificación más común es del tipo 40°C AMB-CONT (ver tabla 20).

Tabla 20.

Temperatura ambiente de funcionamiento para los 2 motores

Motor EM3611T	RATING 40C AMB-CONT
Motor M3661TX	RATING 40C AMB-CONT

CC: Certificado de cumplimiento, (ver tabla 21) número que aparece en todos los motores que requieren cumplimiento con la ley Estadounidense de energía otorgada por el departamento de energía (Department Of Energy - DOE).


Tabla 21.

Certificado de cumplimiento energético estadounidense

Motor EM3611T	CC 010A
Motor M3661TX	CC

Encl: En este campo se identifica el tipo de carcasa del motor, siendo de gran importancia para la máquina debido a que la carcasa se encargará de proteger a los bobinados, cojinetes y otras partes mecánicas de la humedad, de los productos químicos, del polvo (ver tabla 22).

Tabla 22.**Tipo de carcasa para motores según clasificación NEMA.**

Motor EM3611T	
Motor M3661TX	

Se realiza una rápida explicación de cada tipo de carcasa y el ambiente de trabajo adecuado para cada uno de ellas.

Tipos de carcasas para motores según definiciones NEMA

- **Open Drip Proof (ODF)**

Tipo Abierto a prueba de Goteo: Permite que el aire circule a través de sus devanados para refrigeración.

- **Totally Enclosed Fan Cooled (TEFC)**

Totalmente Cerrado refrigerado con ventilador: Evita el libre intercambio de aire entre el interior y el exterior de la carcasa, pero no hace que la carcasa sea completamente hermética. Un ventilador se une al eje y empuja el aire sobre la misma durante su funcionamiento para ayudar en el proceso de enfriamiento. Este tipo de carcasa TEFC es el más versátil de todo y se puede utilizar en bombas, ventiladores, compresores, accionados por bandas de uso industrial o por equipos conectados directamente.

- **Totally Enclosed Non-Ventilated (TENV)**

Totalmente Cerrado Sin Ventilación: Similar a la carcasa tipo TEFC, pero no tiene ventilador para refrigeración y se basa en la refrigeración por convección.

- **Totally Enclosed Air Over (TEAO)**

Totalmente Aire Cerrado: El motor debe estar montado dentro del flujo de aire del ventilador, con sus ventiladores a prueba de polvo y diseñados para ser montados en el eje o a su vez ventiladores accionados por sistemas de bandas.

- **Totally Enclosed Wash Down (TEWD)**

Totalmente Cerrados y lavables: Diseñado para soportar lavados a alta presión u otros ambientes húmedos, químicos, hostiles y de ambientes severos.

- **Explosion - Proof enclosures (EXPL)**

Carcasas a prueba de explosión: El motor a prueba de explosión es una máquina totalmente cerrada y está diseñado para soportar una explosión de gas o vapor especificado dentro de la carcasa del motor y evitar el encendido fuera del motor por chispas, o explosiones.

- **Hazardous Location (HAZ)**

Las aplicaciones de motores de ubicación peligrosa se clasifican por el tipo de ambiente peligroso presente, por las características del material específico que crea el peligro, la probabilidad de exposición al medio ambiente y el nivel máximo de temperatura que se considera seguro para la sustancia que crea el peligro.

2.3.3 Introducción a las variables eléctricas y electromecánicas de un motor de inducción trifásica.

Para el análisis correspondiente al funcionamiento de los motores trifásicos es necesario conceptualizar los siguientes elementos que intervienen en su proceso de funcionamiento.

Corriente Continua (C.C. o D.C.)

Es aquella que circula siempre en el mismo sentido y con un valor constante. La producen dínamos, pilas, baterías, acumuladores (ver figura 20).

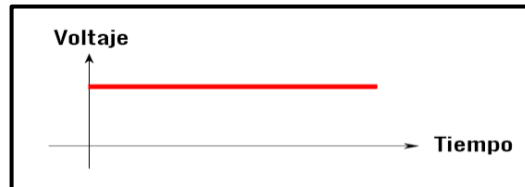


Figura 20. Corriente continúa

Corriente Alterna (C.A. o A.C.)

Es aquella que circula alternativamente en dos sentidos, variando al mismo tiempo su valor. La producen los generadores de C.A. Esta corriente es la que más se utiliza en la industria y la más consumida en los hogares (ver figura 21).

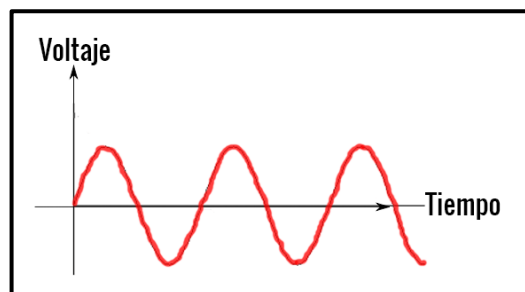


Figura 21. Corriente alterna

Tensión eléctrica o voltaje

La cantidad de energía o trabajo por unidad de carga. La diferencia en la energía potencial por carga es lo que comúnmente se conoce como diferencia de potencial. En circuitos eléctricos, la diferencia de potencial o tensión es la fuerza propulsora que obliga a establecer una corriente eléctrica y está representada por la siguiente fórmula:

$$V = R * I \quad \text{Ec. (5)}$$

Corriente eléctrica

Se define como el desplazamiento de electrones con respecto al tiempo; es decir, la velocidad del flujo de carga eléctrica negativa (ver figura 22).

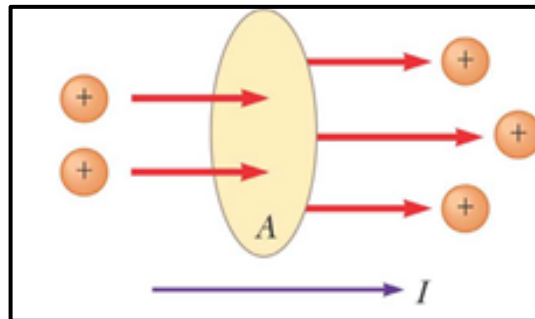


Figura 22. Corriente eléctrica

Fuente: (Serway, 2011)

Intensidad de la Corriente (I)

Es la cantidad de electricidad o carga eléctrica (Q) que pasa por un circuito en la unidad de tiempo por segundo (t), la unidad de intensidad de corriente en el Sistema internacional de unidades es el amperio (A). La diferencia de potencial o tensión eléctrica proporciona energía a los electrones, lo que les permite moverse a lo largo de una trayectoria cerrada o de un circuito. Este movimiento de electrones es la corriente eléctrica. Su fórmula es:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{Ec. (6)}$$

Resistencia (R)

Es la propiedad de un material de restringir u oponerse al flujo de electrones (ver figura 23); Su unidad es el Ohm (Ω).

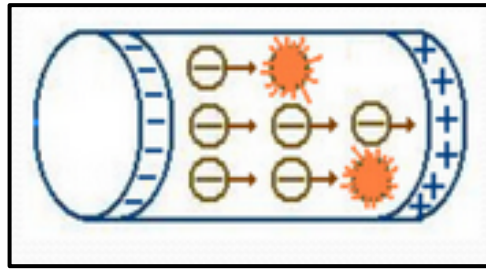


Figura 23. Resistencia

Fuente: (Serway, 2011)

Conductancia (G)

Representa la facilidad que presenta un cuerpo al paso de la corriente eléctrica, es decir es el inverso a la resistencia eléctrica, a mayor resistencia su conductancia será menor y a menor resistencia su conductancia será mayor, expresada de la siguiente manera en la ecuación siguiente:

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$G = \frac{I}{V} \quad \text{Ec. (8)}$$

La unidad de la conductancia es Siemens "S", equivale a $\frac{1}{R}$ o Ω^{-1} .

Capacitancia

Es una medida de la cantidad de carga que un capacitor puede almacenar entre sus placas por unidad de tensión. El capacitor por consiguiente es un dispositivo para almacenamiento de carga eléctrica. Su unidad es el Farad (F).

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{Ec. (9)}$$

Inductancia

Es la propiedad de un elemento en un circuito para poder guardar energía eléctrica en el campo magnético que rodea a sus alambres que transportan la energía siendo un inductor.

$$L = \frac{\phi}{I} \quad \text{Ec. (10)}$$

Un inductor (ver figura 24), es un dispositivo de dos terminales que consta de un alambre conductor embobinado. Una corriente que fluye a través del dispositivo produce un flujo magnético ϕ el cual forma trayectorias que encierran las bobinas construidas en el inductor.

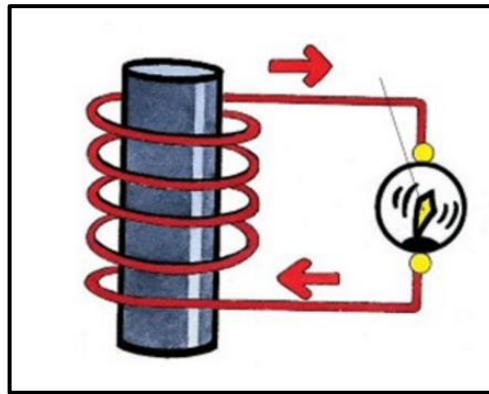


Figura 24. Inductor

Fuente: (Salazar, 2015)

Ley de Ohm

La corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia; su fórmula es:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ec. (11)}$$

Resistor

Su principal característica es limitar la corriente y dividir la tensión de un circuito (ver figura 25); existen resistores variables (Lineales) y Fijos (No lineales).

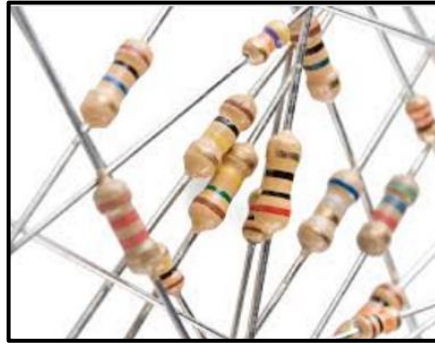


Figura 25. Resistor

Fuente: (Ingenielectrico.blogspot, 2015)

Corriente de arranque del motor

Esta corriente de arranque es del tipo transitorio que consume la máquina en el momento justo del arranque de valor mayor a la corriente nominal, esta corriente disminuye en valor conforme el rotor del motor comienza a girar más rápido, razón por la que las protecciones eléctricas deben estar dimensionadas para poder soportar este alto valor de corriente durante un periodo de tiempo muy corto.

Corriente a plena carga

Corriente que el motor eléctrico consume cuando alcanza su potencia nominal, este valor de corriente viene identificado en la placa de características técnicas del motor.

Potencia activa

Esta potencia se puede explicar cómo la rapidez en que se transforma una energía en otro tipo de energía en un intervalo de tiempo determinado, es decir la cantidad de energía eléctrica que consume o genera un equipo en un tiempo el aparato que mide la potencia es el vatímetro, las unidades de medición en el sistema internacional es el Watt (W), matemáticamente para un motor trifásico se expresa en la siguiente ecuación:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \text{Cos}\phi \quad \text{Ec. (12)}$$

La potencia activa se descompone en potencia reactiva (Q) y en potencia aparente (S) representándose en el respectivo triángulo de potencias con sus respectivo ángulo de desfase entre la variable de voltaje y corriente.

Potencia reactiva

Potencia que no es aprovechada y que no puede convertirse en potencia útil o mecánica, es la que regresa a la fuente de alimentación por la presencia de los condensadores y bobinas que existe en el circuito, causando pérdidas en los equipos que transportan la energía, generalmente representada por la letra Q y se mide en vatios reactivos (VAR). Por efecto de las cargas no lineales la corriente en el triángulo de potencias se adelanta o retrasa en 90° con relación al voltaje.

$$Q = \sqrt{3} * V * I * \text{Sen}\phi \quad \text{Ec. (13)}$$

Potencia aparente

Potencia que resulta de la suma de la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q) como se muestra en el triángulo de potencias, resulta del producto de la corriente y voltaje entregados por la red de distribución se representa con la letra (S) y la unidad de medición es el voltamperios (VA).

$$S = \sqrt{3} * V * I \quad \text{Ec. (14)}$$

Factor de Potencia

Se considera como el desfase que existe entre corriente con respecto al voltaje, indicando la cantidad de potencia activa que se tiene en un circuito con respecto a la potencia aparente, los valores del factor de potencia puede ser desde 0 a 1, siendo el valor 1 el factor ideal para comprender

que toda la energía consumida por las máquinas ha sido transformada en trabajo.

$$FP = \cos\phi = \frac{P(Kw)}{S(Kva)} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$\phi = \cos^{-1} \quad \text{Ec. (16)}$$

Un bajo factor de potencia implica un aumento en las pérdidas eléctricas como el efecto Joule $P = I^2R$ debido al aumento de la corriente aparente, provocando que la empresa eléctrica aumente la corriente para poder suministrar la potencia activa necesaria, repercutiendo en costos que se cobra al consumidor por el hecho de tener un bajo factor de potencia.

Mejorando el factor de potencia podemos tener las siguientes ventajas:

- Aumento de la vida de los equipos eléctricos conectados a la red ya que disminuye las pérdidas eléctricas.
- Se reduce considerablemente la corriente reactiva.
- Se reduce los costos que deben pagar por penalizaciones de tener un bajo factor de potencia.

La forma de mejorar el factor de potencia es compensando con la conexión de banco de condensadores en paralelo a los equipos que consumen potencia reactiva inductiva, ya que la potencia reactiva capacitiva llega anular a la potencia reactiva inductiva.

Triángulo de potencia

Es la representación fasorial de la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente, (ver figura 26), el ángulo del triángulo de potencia puede ser del tipo resistivo (igual a 1), inductivo (retrasado), capacitivo (adelantado) la corriente con respecto al voltaje.

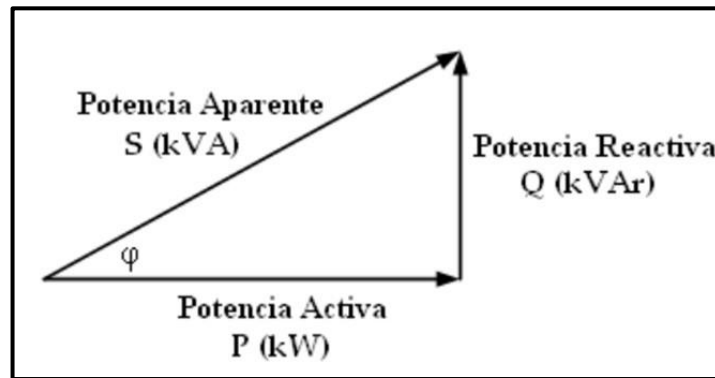


Figura 26. Triángulo de potencias

Fuente: (Edminister & Mahmood, 1997)

Velocidad de un motor

Representado con la letra n , la velocidad del eje se puede mencionar que corresponde al número de vueltas que gira en un tiempo de 1 minuto, matemáticamente la velocidad de sincronismo viene dado por la siguiente expresión.

$$n = \frac{120 * f}{\#P} \quad \text{Ec. (17)}$$

Dónde:

$n =$ velocidad rpm

$f =$ frecuencia de la línea

$\#P =$ número de polos

Par Motor

Se define como el esfuerzo de torsión involucrando la fuerza que realiza sobre el eje, las 2 fuerzas resultantes son las del campo magnético rotórico y del campo estático. Las unidades de medida son libras – pies (lb-ft), newton –metro (N-m).

$$\mathcal{T} = \frac{P}{\omega} \quad \text{Ec. (18)}$$

Dónde:

$T = \text{Torque o momento}$

$P = \text{Potencia (Watts)}$

$\omega = \text{velocidad angular } \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$

Par de Arranque

Se considera al par generado en el momento de arranque este par se considera un valor de 1,6 a 2 veces el par nominal ya que requiere que sea superior para que el motor pueda empezar a acelerar hasta llegar a las condiciones nominales de trabajo.

Par Nominal

Momento mecánico que desarrolla un motor eléctrico para alcanzar sus valores de carga nominal para los que fue diseñado.

Eficiencia de un motor

La eficiencia del motor se entiende como la relación que existe entre la potencia de salida sobre la potencia de entrada, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera considerando las pérdidas mecánicas que existe en el motor.

$$Eficiencia = \frac{\text{Potencia salida}}{\text{Potencia entrada}} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$Eficiencia = \frac{P.\text{entrada} - \text{pérdidas}}{P.\text{entrada}} = 1 - \frac{\text{pérdidas}}{P.\text{entrada}}$$

$$Eficiencia = \frac{\text{Potencia salida}}{\text{Potencia salida} + \text{pérdidas}} \quad \text{Ec. (20)}$$

Conexión en motores trifásicos asíncronos

Los fabricantes de motores identifican a los terminales de conexión de acuerdo a las normas I.E.C (Comisión Electrotécnica Internacional) y NEMA (Asociación de Fabricantes Eléctricos nacionales), siendo la marcación de los terminales para la norma NEMA del 1 al 12 y para norma I.E.C con las letras U, V, W y números del 1 al 6. (Ver tabla 23), la mayoría de motores eléctricos vienen con la opción para funcionar a 2 niveles de voltaje (alto y bajo) por ejemplo: 230 / 460 Voltios.

Tabla 23.

Conexiones para motores de 9 y 12 terminales

Conexión	Descripción	Observación
Triángulo / Estrella	Conexión en triángulo para el menor voltaje y conexión estrella para el alto voltaje.	Conexión muy pocas veces usada en las normas IEC y NEMA.
Estrella Doble / Estrella	Conexión Estrella doble para el menor voltaje y conexión estrella para el mayor voltaje.	Para Normas NEMA usado hasta motores de 20HP y en norma IEC usada en motores hasta 9HP.
Triángulo Doble / Triángulo	Conexión Triángulo doble para el menor voltaje y conexión triángulo para el mayor voltaje.	Para Normas NEMA usado para motores mayores a 20HP y en la norma IEC usado para motores mayores a 9HP.

Un motor de 9 terminales en realidad es también de 12 terminales ya que se eliminan 3 terminales haciendo un punto común en la conexión interna de los bobinados como se observa en la (figura 27), tomado de la conexión del motor M3661TX analizado en este módulo parte del trabajo de titulación (ver anexo A).

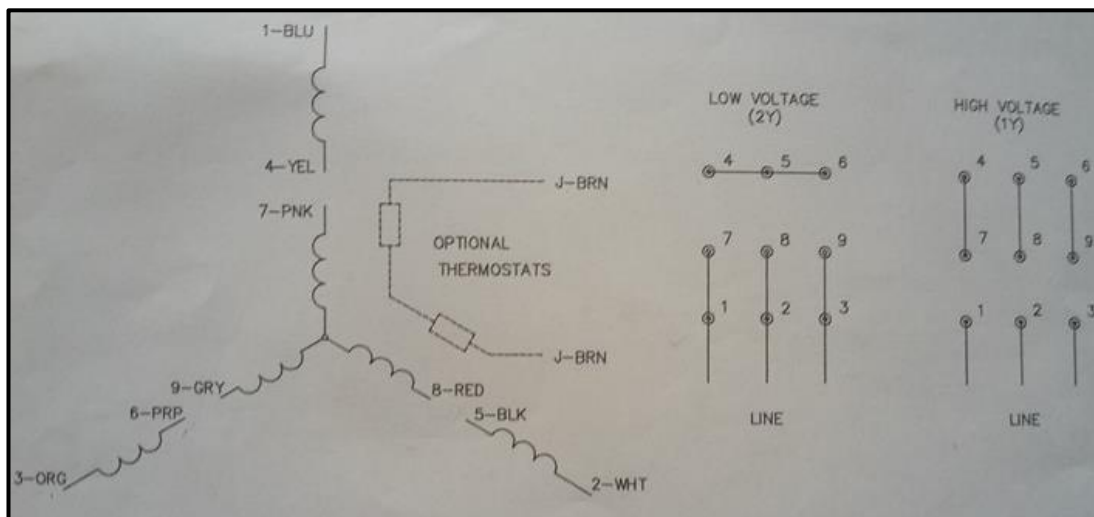


Figura 27. Conexión de los terminales de un motor M3661TX

Fusibles

Dispositivos que permiten realizar una protección del circuito eléctrico y sus componentes eléctricos contra sobre corrientes interrumpiendo el paso de la corriente cuando este valor supere el valor de la corriente de fusión del fusible en un tiempo determinado (ver figura 28).

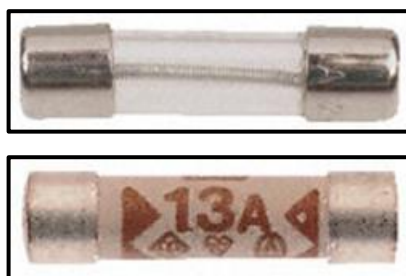


Figura 28. Fusibles

Fuente: (Palco Electrónica, 2015)

Interruptor magnetotérmico

Es un dispositivo eléctrico de encendido y apagado mecánico con la finalidad de cuando la intensidad de corriente supera cierto valor, este dispositivo se acciona para poder proteger al circuito en condiciones anormales. Existen disyuntores tipo compacto monofásicos, bifásicos y trifásicos (ver figura 29). (Ver anexo N), las características que definen a los disyuntores son:

- Corriente Nominal
- Intensidad máxima de corte
- Voltaje de trabajo
- Número de Polos
- Intensidad máxima de conexión
- Calibre de los conductores eléctricos



Figura 29. Interruptor magnetotérmico

Sensores

Se puede decir que es un equipo de carácter eléctrico o electromecánico que puede detectar, y convertir las señales de las variables físicas del medio ambiente en valores o señales medibles para poder ser procesadas por dispositivos electrónicos de control como en una PC.

Sensores de corriente

Básicamente es un transformador de corriente, (ver figura 30) que utiliza los principios de inducción magnética, transformadores construidos con un núcleo de alta permeabilidad magnética, permitiendo que el campo magnético que produce la corriente a ser censada enlace a las espiras del “secundario” para que pueda tener valores de la variable manejable en voltios, el sensor utilizado en este módulo cumple con este principio de funcionamiento (ver anexo E).

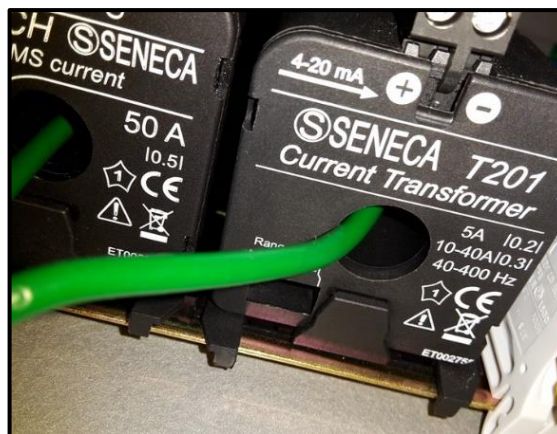


Figura 30. Sensor de corriente T201

Sensor de voltaje

Se recomienda utilizar sensores de muy alto rendimiento de valores de rms, y con opción para medición en circuitos del tipo monofásico y trifásico tiene salidas análogas en mA y en voltaje completamente aisladas en relación proporcional al voltaje nominal, (ver figura 31) con un principio de funcionamiento de características similares al sensor de corriente descrito anteriormente (ver anexo D).



Figura 31. Sensor de voltaje Z204

Encoders

Es un elemento que se encarga de convertir la velocidad mecánica que se tiene en el eje de los motores o el movimiento lineal a pulsos digitales o análogos para que pueda ser procesado de acuerdo al requerimiento de un controlador del movimiento. Se puede mencionar algunos tipos de encoders existentes (ver figura 32):

- Encoder incremental (ver anexo I).
- Encoder lineal
- Encoder óptico
- Encoder absoluto



Figura 32. Encoder incremental

Fuente: (Electricas Bogota, 2010)

Controlador lógico programable PLC

Dispositivo electrónico que permite realizar una programación por el operador con la única finalidad de poder realizar un control de máquinas o procesos lógicos y de manera secuencial, eliminando cableado innecesario, espacio y de sobremanera reduciendo costos. Un PLC está compuesto por las siguientes partes:

- Unidad lógica de proceso
- Fuentes de alimentación del tipo continua o alterna
- Módulos de entradas análogas y digitales
- Módulos de salidas
- Interfaz de comunicación y programación

En la (figura 33) se muestra el funcionamiento y diagrama estructural de un programador lógico, y en la (figura 34) se indica el tipo de programador que se utilizó para la construcción y automatización del módulo de ensayo (ver anexo F). El tipo de fuente de corriente continua de 24 Vdc que se utiliza se encuentra descrita en el (anexo H).

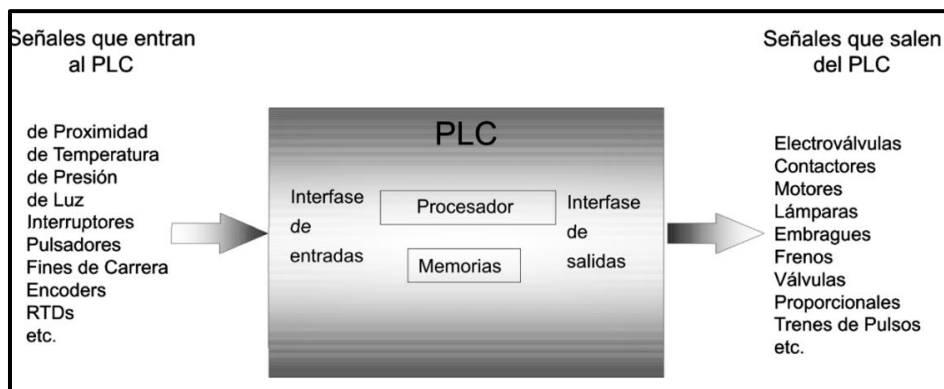


Figura 33. Controlador lógico programable

Fuente: (Automación Micromecánica s.a.i.c, 2015)



Figura 34. PLC xinje XC3-24RT-E

Módulos de entradas y salidas análogas

Módulos de expansión que complementan la funcionalidad de un PLC, sirve de interfaz para convertir señales analógicas a digitales para las entradas y convierten señales digitales a señales análogas en el caso de salidas. Entendiéndose como señales análogas a las entregadas por sensores de iluminación, desplazamiento, aceleración temperatura, velocidad, presión, posición, magnetismo, temperatura, presión, flexión, humedad (ver figura 35). En el (anexo G), se indica el modelo XC-E4AD2DA utilizado para realizar las lecturas de las señales análogas de voltaje y velocidad del módulo.

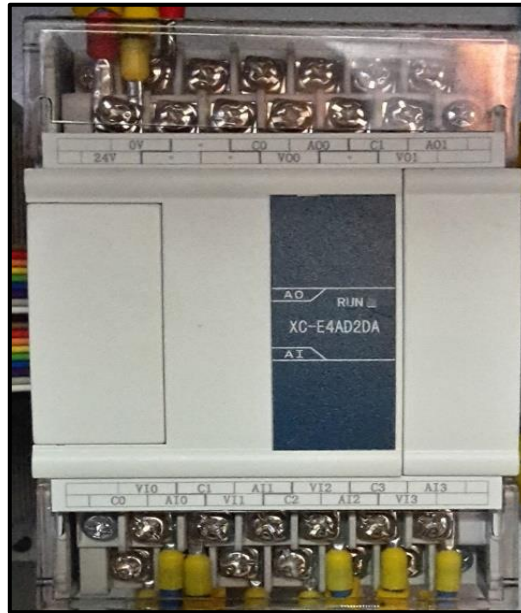


Figura 35. Módulo de expansión

Acoplamiento de mordaza estándar

Acoplamiento mecánico (ver figura 36), para poder enlazar el eje del generador y el motor trifásico a realizarse las pruebas, los acoplamiento tipo mordaza por su facilidad en combinaciones de diámetros interiores y chavetas, sin la necesidad de lubricación presentan eficientes y fiables servicios en aplicaciones de motores eléctricos, este acople constan de 2 cubos para uno de sus ejes a unirse, con la ayuda del elemento elastomérico conocido como amortiguador tipo goma, (en el anexo J) se identifica el modelo de acople utilizado para este conjunto motor – generador (ver anexo T-16).



Figura 36. Acople mecánico tipo mordaza

Fuente: (Lovejoy-Inc, 2013)

Luces Pilotos

Luz que representa el correcto funcionamiento de un sistema o equipo, así como indica el comportamiento anormal del mismo, no se debe considerar como una luz de emergencia, ya que esta luz de alarma debe ser de forma intermitente (ver figura 37).



Figura 37. Luces Pilotos

En el (anexo L), se indica el modelo ND16-22D/4 utilizado para representar el estado en funcionamiento de las resistencias que simulan a las cargas eléctricas.

Contactores

Dispositivo electromecánico que tiene la misión de abrir o cerrar sus contactos para impedir o permitir el paso de la corriente respectivamente, cuando su bobinado recibe la corriente eléctrica y funciona como electroimán permitiendo este cierre de sus contactos. Compuesto de contactos principales, auxiliares y del circuito electromagnético (ver figura 38).

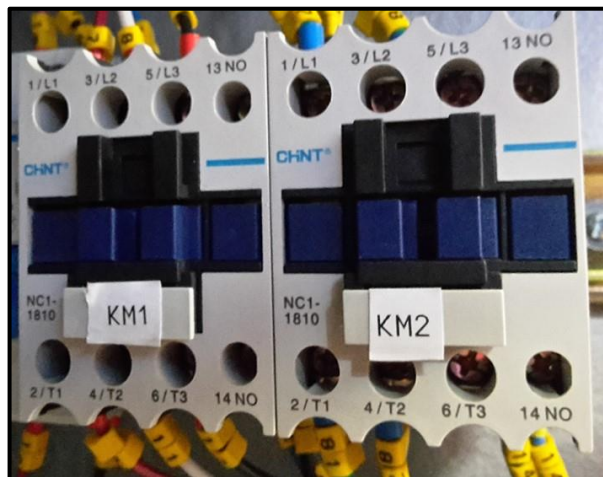


Figura 38. Contactores

En el (anexo P), se indica el modelo NC1-18 de contactor utilizado para el motor trifásico, para el generador de corriente de continua y para la resistencias.

Pulsador

Dispositivo encargado de permitir el paso o la interrupción de la corriente mientras se mantiene presionado, una vez que se deja de presionar su estado vuelve a la posición inicial, se utiliza el pulsador de color verde para iniciar el circuito o la marcha de la máquina y el pulsador de color rojo para realizar el paro del equipo en funcionamiento (ver figura 39). Existe pulsadores de tipos: planos, señalizados, circulares y de timbre.



Figura 39. Pulsador de marcha y paro

En el (anexo M), se indica el modelo NP2-EA3 y el modelo NP2-EA4 utilizado en la implementación del módulo.

Relé eléctrico

Es un elemento que funciona como interruptor activado por un electroimán, formado por un contacto fijo y un contacto móvil, para cuando actúe el electroimán el contacto móvil se desplace para poder hacer contacto con el fijo y permite tener continuidad en sus terminales que tiene configuraciones de normalmente abiertos y cerrados (ver figura 40) .



Figura 40. Relés eléctricos

En el (anexo O), se indica el modelo de relé miniatura JMK utilizado en la implementación del módulo.

2.3.4 Sistemas de control, automatización y adquisición de datos

Sistema de adquisición de datos

Según (National Instruments, 2017), la adquisición de datos (DAQ, Data Acquisition System), es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable (ver figura 41). Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de la PC estándar en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

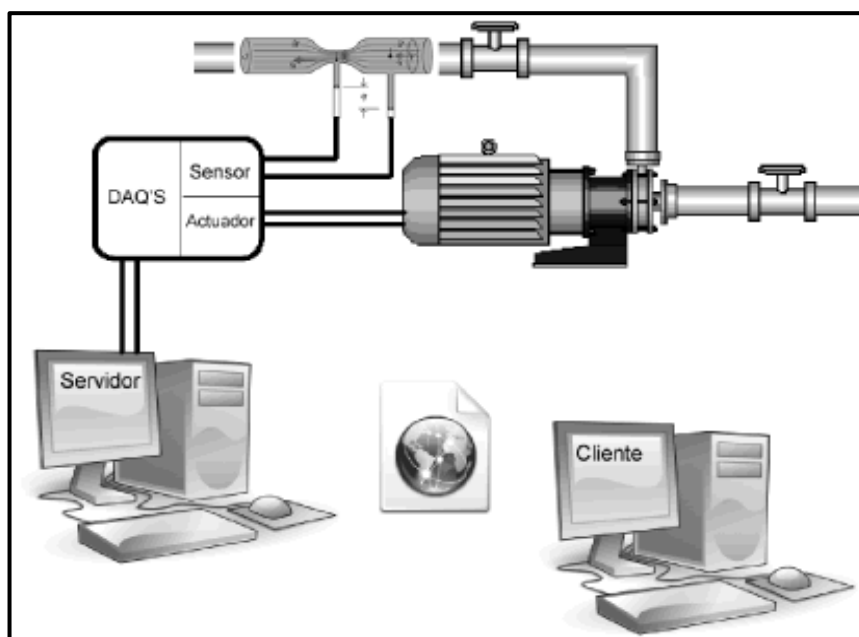


Figura 41. Modelo de sistema de adquisición de datos

Fuente: (National Instruments, 2017)

El Sistema de adquisición de datos es un conjunto que servirá para determinar las variables a controlar en un proceso para obtener un control adecuado del funcionamiento del equipo; este sistema puede estar conformado por los siguientes elementos:

- Sensores.

- Amplificadores operacionales.
- Amplificadores de instrumentación.
- Aisladores.
- Multiplexores analógicos.
- Multiplexores digitales.
- Circuitos Sample and Hold.
- Conversores A-D.
- Conversores D-A.
- Microprocesadores.
- Contadores.
- Fuentes de potencia.

COMPONENTES DE UN SAD

- Computadora.
- Hardware de adquisición de datos.
- Software.
- Sensores y actuadores.
- Acondicionadores de señal.

2.3.5 Circuito equivalente de un motor de inducción

El circuito equivalente de un motor de inducción es parecido al circuito equivalente de un transformador debido a la inducción de corriente que existe desde el estator al rotor. El circuito equivalente (ver figura 42), es necesario referir en el estator el modelo del rotor.

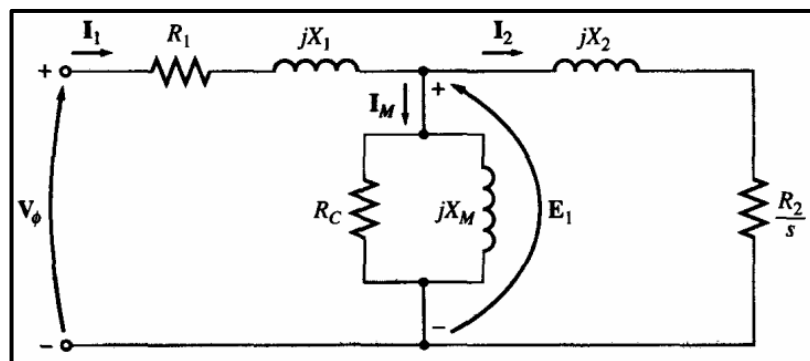


Figura 42. Circuito equivalente por fase de un motor

Fuente: (Catarina.udlap, 2012)

Dónde:

R_1 = Resistencia del estator

X_1 = Reactancia del estator

R_2 = Resistencia del rotor

X_2 = Reactancia del rotor

R_c = Resistencia de pérdidas en el hierro

X_m = Reactancia de magnetización

I_m = Corriente de magnetización

$\frac{R_2}{s}$ = Conversión electromecánica de la potencia

Las constantes del circuito equivalente del motor de inducción se pueden obtener mediante las pruebas de rotor lanzado o prueba en vacío y de rotor bloqueado o prueba de cortocircuito.

Prueba de vacío o rotor libre

Esta prueba consiste en aplicar el voltaje y frecuencia nominal al estator para que el motor pueda girar en vacío, siendo las únicas cargas en el motor las pérdidas por fricción y por rozamiento del aire, el motor estando en esta condición se procede a tomar las mediciones de voltaje, corriente y de potencia de entrada al motor como se indica en la (figura 43).

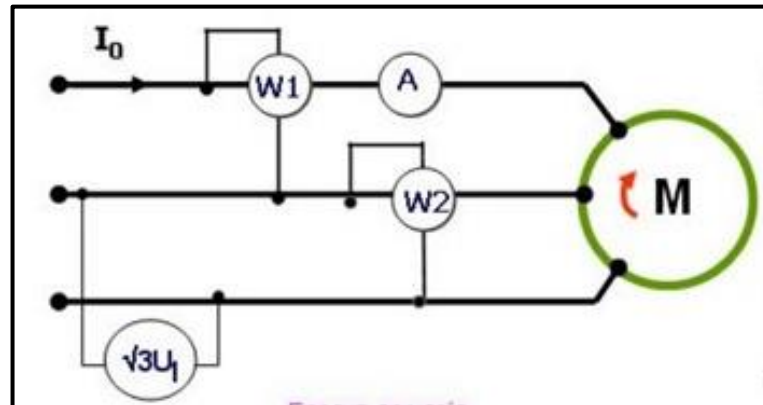


Figura 43. Conexiones para ensayos de rotor libre

Fuente: (Universidad Tecnológica Nacional, 2015)

En el ensayo en vacío el deslizamiento es aproximadamente cero, generando una reducción al circuito equivalente (ver figura 44).

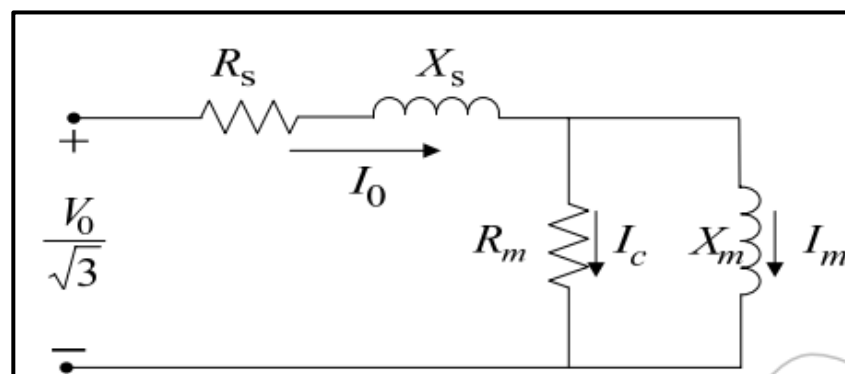


Figura 44. Circuito equivalente para ensayo en vacío

Fuente: (Terán, Strauss, & Ríos, 2007)

Con los valores de voltaje, corriente y ángulo de desfase se aplica la siguiente expresión para encontrar la potencia en vacío:

$$P_o = \sqrt{3} * V_o * I_o * \cos\phi \quad \text{Ec. (21)}$$

Pérdidas de cobre en el estator:

$$P_{pce} = 3 * I_1^2 * R_1 \quad \text{Ec. (22)}$$

Por la condición que al motor de inducción está girando en vacío, la potencia de entrada medida será igual a la potencia de pérdidas en el motor:

$$P_{entr} = 3 * I_1^2 * R_1 + P_{rot}$$

$$P_{rot} = P_{entr} - 3 * I_1^2 * R_1 \quad \text{Ec. (23)}$$

P_{rot} Son las pérdidas rotatorias del motor.

Prueba de cortocircuito o de rotor bloqueado

Esta prueba consiste en bloquear el rotor para impedir que empiece a girar, con la ayuda de una fuente de corriente variable se empieza a inducir corriente en el estator hasta llegar al valor de corriente a plena carga, una vez que se llega a este valor inmediatamente se mide la potencia de entrada, voltaje y corriente antes de que en el rotor se empiece a elevar la temperatura, la instalación de los equipos de medición se indica (ver figura 45).

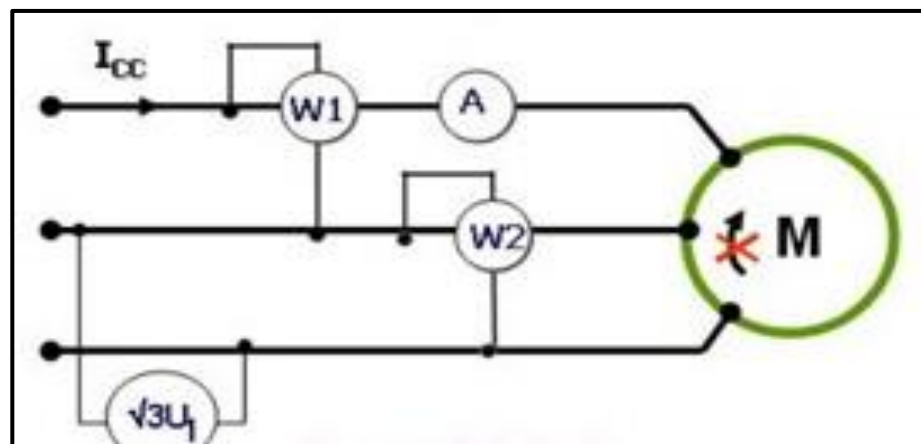


Figura 45. Conexiones para ensayos de rotor bloqueado

Fuente: (Universidad Tecnológica Nacional, 2015)

En el ensayo de rotor bloqueado el deslizamiento será de valor 1, y la resistencia de carga será valor 0, generando una reducción al circuito equivalente (ver figura 46).

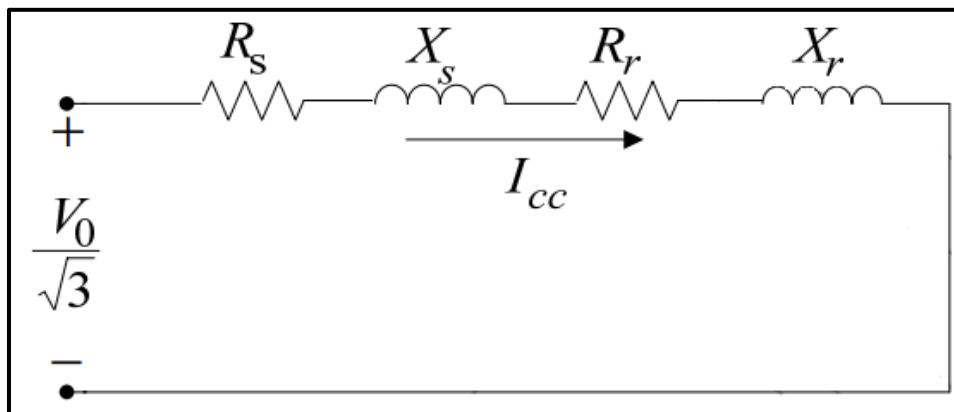


Figura 46. Circuito equivalente para ensayo a rotor bloqueado

Fuente: (Terán, Strauss, & Ríos, 2007)

A continuación se detalla las expresiones matemáticas para las siguientes variables eléctricas:

La potencia de entrada se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos\theta \quad \text{Ec. (24)}$$

El factor de potencia:

$$\cos\theta = \frac{P}{\sqrt{3} * V * I} \quad \text{Ec. (25)}$$

El ángulo de la impedancia θ es \cos^{-1}

La impedancia del circuito a rotor bloqueado es:

$$|Z_{RB}| = \frac{V_T}{\sqrt{3} I_L} \quad \text{Ec. (26)}$$

La resistencia de rotor bloqueado es:

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \quad \text{Ec. (27)}$$

La reactancia del roto bloqueado será igual a:

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2 \quad \text{Ec. (28)}$$

Donde X'_1 y X'_2 son las reactancias del estator y rotor con la frecuencia a prueba respectivamente. La reactancia total equivalente tomando en cuenta la frecuencia normal de operación es:

$$X_{RB} = \frac{f_{nom}}{f_{prueba}} X'_{RB} = X_1 + X_2 \quad \text{Ec. (29)}$$

Para poder dividir la reactancia del circuito del estator y rotor se utiliza las proporciones empíricas de las reactancias de dispersión de motor de inducción, que toma en cuenta el diseño del motor (ver tabla 24).

Tabla 24.

Factores para dividir la reactancia del estator y rotor

X_1 y X_2 en función de X_{LR}		
Diseño del motor	X_1	X_2
Rotor Devanado	$0.5X_{RB}$	$0.5X_{RB}$
Diseño A	$0.5X_{RB}$	$0.5X_{RB}$
Diseño B	$0.4X_{RB}$	$0.6X_{RB}$
Diseño C	$0.3X_{RB}$	$0.7X_{RB}$
Diseño D	$0.5X_{RB}$	$0.5X_{RB}$

Fuente: (Chapman, 2005)

2.3.6 Curvas características del motor de inducción

Las curvas propias de un motor de inducción servirán para poder realizar una correcta selección del motor y para poder comprender el comportamiento de este tipo de máquinas, a continuación se presenta las curvas características de un motor de inducción y una rápida explicación.

Curva par – velocidad

Con esta curva (ver figura 47), nos ayuda a determinar:

- Funcionamiento en sincronismo
- Funcionamiento con par máximo
- Análisis en estado de período de arranque
- Análisis en estado nominal

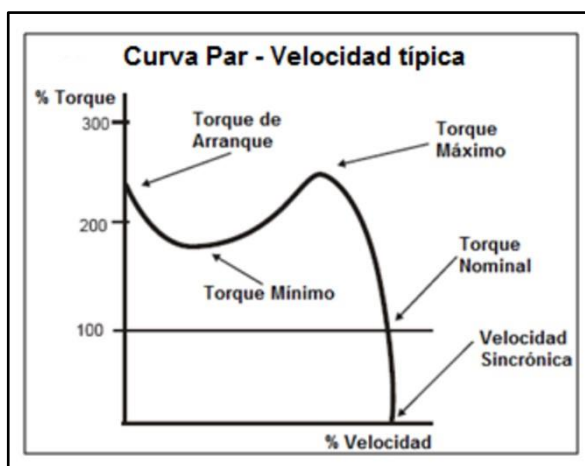


Figura 47. Curva par – velocidad

Fuente: (MOTORTICO, 2014)

Curva velocidad - potencia útil

Curva que permite saber la variación de la velocidad en función de la potencia útil durante cualquier momento de funcionamiento del motor (ver figura 48), manteniendo constante el voltaje y la frecuencia.

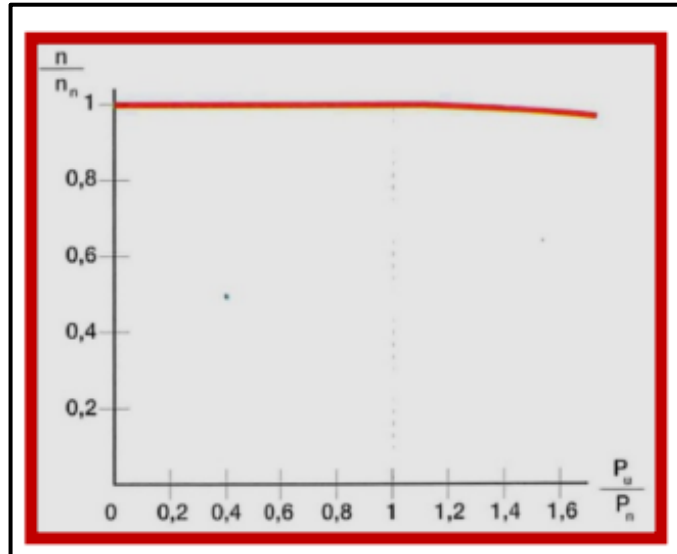


Figura 48. Curva velocidad – potencia útil

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Curva corriente - potencia útil

Curva que permite saber la variación de la corriente de consumo del motor en función de la potencia útil, girando el motor en condiciones de vacío, esta corriente estará comprendida en un rango del 0,25 al 0,5 % veces la corriente nominal de funcionamiento (ver figura 49).

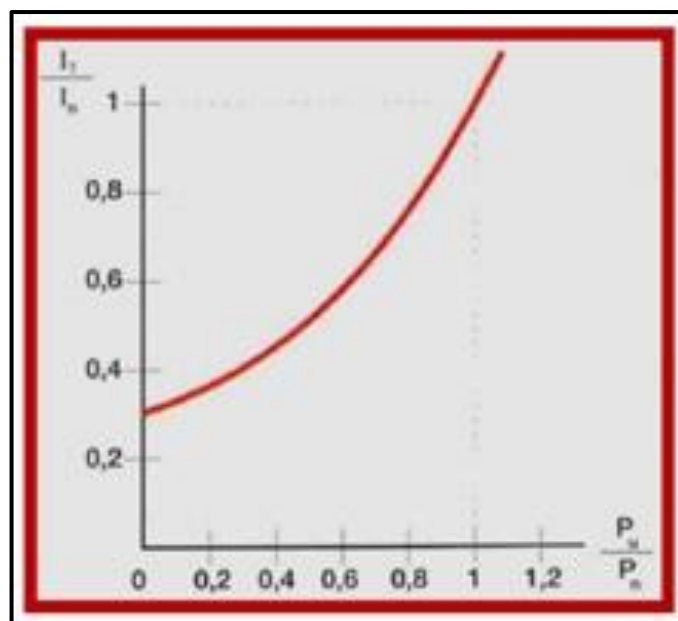


Figura 49. Curva corriente – potencia útil

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Curva factor Potencia - potencia útil

Curva que permite saber la variación del factor de potencia del motor en función de la potencia útil, cuando el motor alcanza su carga nominal el factor de potencia llegará a su valor máximo (ver figura 50).

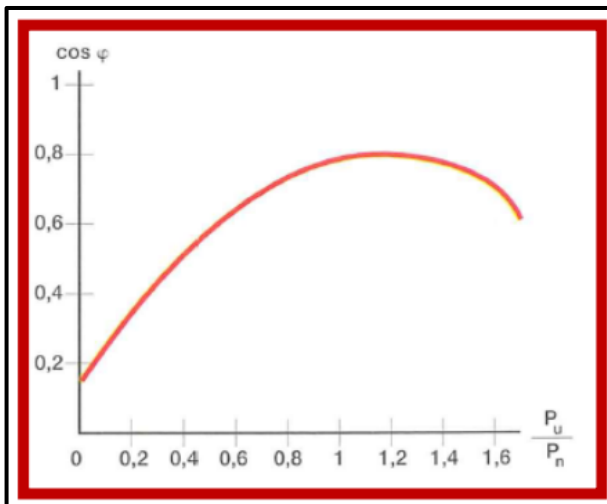


Figura 50. Curva factor de potencia – potencia útil

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Curva rendimiento - potencia útil

Curva que permite saber la relación del rendimiento del motor en función de la potencia útil, a voltaje y frecuencia constantes (ver figura 51).

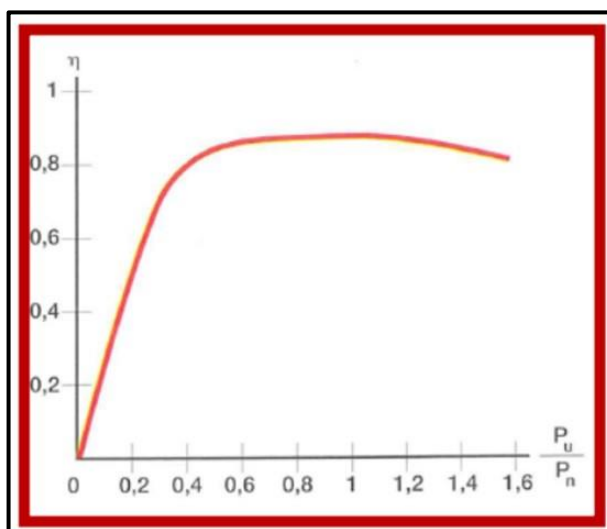


Figura 51. Curva rendimiento – potencia útil

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

Curva torque mecánico - potencia útil

Curva que permite relacionar el par mecánico del motor en función de la potencia útil, (ver figura 52) en términos de selección del motor es una de las curvas más importantes para el efecto.

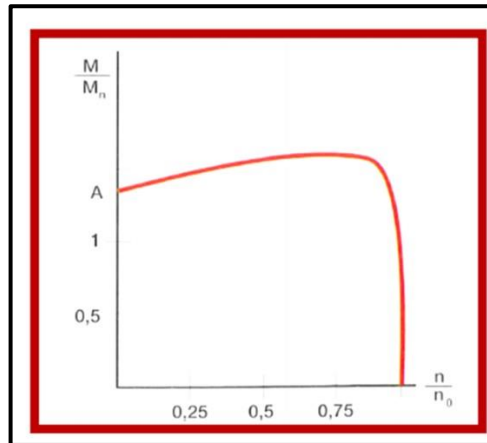


Figura 52. Curva torque mecánico – potencia útil

Fuente: (Instituto Andrés de Vandelvira, 2011)

2.4 Fundamentación Legal

Según el artículo 387, número 2 de la Constitución de la República del Ecuador establece que es responsabilidad del Estado promover la generación y producción de conocimiento, fomentar la investigación científica y tecnológica para así contribuir a la realización del buen vivir, al “Sumak Kawsay”; (Asamblea Nacional, 2008).

En el Art. 350 de la Constitución de la República del Ecuador señala que el Sistema de Educación Superior tiene como finalidad la formación académica y profesional con visión científica y humanista; la investigación científica y tecnológica; la innovación, promoción, desarrollo y difusión de los saberes y las culturas; la construcción de soluciones para los problemas del país, en relación con los objetivos del régimen de desarrollo. (Asamblea Nacional, 2008).

Para el presente proyecto de investigación se alinea en el plan nacional del buen vivir 2013-2017 (PNBV), que en su “Objetivo 11. Asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica”, específicamente el literal” 11.1.d Incentivar el uso eficiente y el ahorro de energía, sin afectar la cobertura y calidad de sus productos y servicios”.

Las normas de eficiencia se encuentran establecidas en las Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), en inglés: IEC (International Electrotechnical Commission), la cual es una organización que prepara y publica estándares internacionales de normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas, a las cuales se conocen colectivamente como "electrotécnica". Fue fundada en 1906 y hasta el 2015 eran miembros 83 países a nivel mundial. Dentro de estas normas se consideran la IEC 60034 que es la Norma Internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional para máquinas eléctricas rotativas.

2.4.1 Norma IEC 60034-30

Esta norma define, estandariza y especifica los niveles de eficiencia energética para motores de inducción eléctricos trifásicos de 50 y 60 Hz, de velocidad única, de jaula de ardilla con 2, 4 o 6 polos, la clasificación de rendimiento se norman en 3 niveles IE1 (estándar), IE2 (high) e IE3 (premium), para los motores de corriente trifásico, baja tensión, en todo el mundo. Este sistema maneja los códigos **IP, IM e IC** los cuales se utilizan desde hace mucho tiempo en la construcción de máquinas eléctricas.

2.4.2 Eficiencia Energética

La Eficiencia Energética consiste en realizar un aprovechamiento óptimo de la energía, y ello no implica renunciar a la calidad de vida sino obtener los mismos bienes, servicios y realizar las mismas actividades sin desperdiciarla. En Ecuador, la Eficiencia Energética se ha venido desarrollando a través de diferentes programas y proyectos promovidos por

el actual Gobierno a nivel de sustitución tecnológica (tales como el proyecto de Focos Ahorradores, Plan Renova, etc.) de gestión y con la transformación de los hábitos culturales de la población.

En ese contexto se puede manifestar que es la relación entre la cantidad de energía consumida, los productos y servicios finales obtenidos, siendo su principal objetivo el reducir la cantidad de energía para proporcionar y mejorar los mismos servicios y productos. La eficiencia energética busca además la generación de energías renovables y la protección del medio ambiente.

En la norma IEC 60034-30 se han definido nuevas clases de eficiencia (o rendimiento) para los motores de inducción (IE = International Efficiency) siendo estos los siguientes:

- IE1 Eficiencia Estándar
- IE2 Alta Eficiencia
- IE3 Eficiencia Premium

Eficiencia Estándar IE1

Es el estándar general y básico empleado en la construcción de motores eléctricos trifásicos los cuales en la actualidad presentan las siguientes consideraciones:

- Mayor potencia de consumo.
- Mayor consumo energético.
- Menor eficiencia en relación a su precursor (IE2, IE3).

Eficiencia Premium IE3

Es una nueva clase de eficiencia para motores eléctricos, esta clase presenta nuevos y mejorados estándares para su construcción; de sus principales ventajas y beneficios se pueden señalar los siguientes:

- Se reduce considerablemente el aumento de temperatura del motor, factor determinante en su vida útil.
- Por tener factores de servicio superiores, permite operaciones en regímenes intermitentes, con picos de carga superiores al nominal.
- Menor potencia de consumo.
- Tienen mayor reserva de potencia para operar en ambientes con temperaturas superiores a 40°C y en zonas de altitudes superiores.
- Son más adecuados en las aplicaciones con variadores de frecuencia.
- Reducido costo de mantenimiento.

En la (tabla 25), se puede realizar una apreciación de cómo mejora la eficiencia de un motor de la misma potencia de acuerdo a cada una de las normas IE1, IE2, IE3.

Tabla 25.

Eficiencia Energética para motores de inducción

Potencia [KW]	IE1 Eficiencia estándar			IE2 Alta eficiencia			IE3 Eficiencia Premium			IE4 Eficiencia Super Premium		
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9	84,9	85,6	83,1
1,1	75	75	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81	86,7	87,4	84,1
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5	87,5	88,1	86,2
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3	89,1	89,7	87,1
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6	89,7	90,3	88,7
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8	90,3	90,9	89,5
5,5	84,7	84,7	83,1	87	87,7	86	89,2	89,6	88	91,5	92,1	90,2
7,5	86	86	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1	92,1	92,6	91,5
11	87,6	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3	93	93,6	92,5
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2	93,4	94	93,1
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7	93,8	94,3	93,5
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93	92,2	94,2	94,7	93,9
30	90,7	90,7	90,2	92	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9	94,5	95	94,3
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3	94,8	95,3	94,6
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94	94,2	93,7	95,1	95,6	94,9
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1	95,4	95,8	95,2
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94	93,7	94,7	95	94,6	95,6	96	95,4
90	93	93	92,9	94,1	94,2	94	95	95,2	94,9	95,8	96,2	95,6
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1	96	96,4	95,6
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4	96	96,5	95,8
160	93,7	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6	96,2	96,5	96
200	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8	96,3	96,6	96,1
250	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8	96,4	96,7	96,1
315	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8	96,5	96,8	96,1
355	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8	96,6	96,8	96,1
375	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8	-400	96,6	96,8

Fuente: (ABB Group, 2013)

2.5 Sistema de variables

Variable dependiente

Análisis eléctrico de motores trifásicos con un error menor al 5%.

Variable independiente

Implementación de un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2kw con adquisición automática de variables electromecánicas.

Tabla 26.

Sistema de variables

DEFINICIÓN NOMINAL	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL
Al implementar el sistema de adquisición de datos es posible comparar las variables electromecánicas entre motores eléctricos asíncronos trifásicos para analizar sus resultados en estado estable.	Para adquirir las variables electromecánicas se utilizará equipos de medida eléctricos y mecánicos sus resultados se registrarán en informes para su posterior análisis.	En este proyecto se van analizar varios parámetros eléctricos y mecánicos, para determinar la eficiencia de los motores asíncronos trifásicos de 2,2 Kw (3HP).

2.6 Hipótesis

Se puede adquirir variables electromecánicas mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2kw para el Laboratorio de Control Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas - Espe.

2.7 Operacionalización de variables (ver tabla 27)

Tabla 27.

Operacionalización de variables

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	ÍTEMS
Independiente	Parámetros eléctricos	Voltaje	Sensor de voltaje	V
		Corriente	Sensor de corriente	A
		Potencia	Ecuaciones	W
	Parámetros mecánicos	Velocidad	Encoder	rpm
		Torque	Ecuaciones	Lb-ft
Dependiente	Indicadores de eficiencia eléctrica	Rendimiento eléctrico	Ecuaciones	%
		Factor de Potencia	Ecuaciones	%
	Indicadores de eficiencia mecánica	Potencia en pérdidas I^2R	Ecuaciones	W

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

El presente trabajo pretende realizar la medición de variables automáticas electromecánicas, utilizando para la adquisición de datos el sensor SENECA Z204-1(ver anexo D) para la medición de voltaje alterno, el sensor SENECA T201 (ver anexo E) para la medición de corriente y el sensor SENECA T201DCH (ver anexo E) para la medición de corriente continua y para medir la velocidad se utilizó un encoder E50S8-120-3-T-24 (ver anexo I), para obtener los datos para determinar los valores de eficiencia, torque, factor de potencia de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2 kw.

3.1 Modalidad de la investigación

Las modalidades utilizadas en la presente investigación son: bibliográfica y de campo, producto de ello se presentó la solución al problema que beneficia directamente a la adquisición de variables electromecánicas mediante un módulo de ensayo para motores asincrónicos trifásicos.

De campo

La investigación se realizó en la ciudad de Latacunga en el Laboratorio de Control Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

Bibliográfica

La investigación se fundamenta en los estudios técnicos referente al diseño y construcción de módulos para la adquisición de variables electromecánicas de motores asincrónicos trifásicos y respaldados en fuentes confiables que contribuye a la mejor guía en la ejecución del proceso investigativo.

3.2 Tipos de investigación

Cuantitativo

Para la medición de los datos obtenidos se realizó pruebas de adquisición de datos de voltaje y corriente mediante sensores SENECA y para poder adquirir la variable de velocidad se utilizó un encoder incremental E50S8-120-3-T-24 (ver anexo I) de acuerdo a las especificaciones del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) 2 498:2009 para la eficiencia energética en motores eléctricos estacionarios (Normalización, 2009).

Diseño de la investigación

El trabajo pretende realizar la medición de voltaje y corriente de motores asincrónicos trifásicos de 2,2 Kw, utilizar los SENSORES SENECA para determinar estos valores en el arranque y cómo se comportan en el tiempo utilizando el software Labview para su visualización.

Para ello se utiliza el enfoque Empirista-Inductivo, que consta de:

Método de hallazgo: Inductivo.- Se trata del análisis, donde al adquirir los valores de voltaje y corriente mediante los sensores SENECA, permite establecer los parámetros de diseño del módulo de adquisición de variables electromecánicas.

Método de contrastación: Experimental.- Para determinar los parámetros de diseño del módulo de variables electromecánicas, se debe experimentar en la adquisición de los datos de las variables electromecánicas de los motores asincrónicos trifásicos.

Una vez determinado las variables electromecánicas de los motores, es decir voltaje, corriente, velocidad, factor de potencia y eficiencia, se procede a diseñar el módulo de adquisición de estas variables, que permita satisfacer

las necesidades de adquisición de datos del Laboratorio de Control, al tratarse de diseño en este caso se utiliza el enfoque Racionalista-deductivo el cual consta de:

Método de hallazgo: Deductivo.- Debido a que se procede de la necesidad de adquisición de variables electromecánicas de voltaje, corriente, velocidad, torque, factor de potencia y eficiencia se procede a obtener estos datos mediante los sensores y ecuaciones de cálculo respectivas.

Método de contrastación: Experimental.- Para determinar el correcto diseño del módulo de adquisición de los datos de las variables electromecánicas de los motores asíncronos trifásicos, se debe medir en condiciones normales el motor de 2,2 Kw con sus diferentes cargas para visualizar mediante el software de Labview el comportamiento de las variables tanto de un motor asíncrono trifásico normal así como de uno de alta eficiencia.

3.3 Niveles de la investigación

Exploratoria

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de la ciudad de Latacunga no se dispone de un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asíncronos trifásicos de 2,2 Kw para la adquisición de variables electromecánicas en el Laboratorio de Control Industrial.

Descriptiva

En la investigación se recolectó datos, aspectos, medidas y características de la problemática a estudiar de forma independiente, relacionando con los conceptos de voltaje y corriente de arranque de un motor asíncrono trifásico de 2,2 Kw.

3.4 Población y muestra

No es considerada la población en la presente investigación porque está orientada al análisis de resultados de la medición de voltaje, corriente mediante los sensores SENECA y velocidad mediante el encoder incremental E50S8-120-3-T-24. Los equipos de toma de datos electromecánicos empleados en la construcción del módulo se detallan en la (tabla 28).

Tabla 28.

Conjunto de equipos

EQUIPOS	NÚMERO	DESCRIPCIÓN
Motor asincrónico trifásico normal	1	Motor de 2,2 Kw
Motor asincrónico trifásico de alta eficiencia	1	Motor de 2,2 Kw de alto rendimiento
Motor de cc	1	Motor de 2,2 Kw
Sensor SENECA Z204-1	2	Medición de voltaje alterno
Sensor SENECA T201	1	Medición de corriente alterna
Sensor SENECA T201DCH	1	Medición de corriente continua
Encoder Modelo E5058-120-3-T-24	1	Medición de velocidad
TOTAL	7	

3.5 Técnicas de recolección de datos

Será necesario contar con suficiente información como se detalla en la (tabla 29).

Tabla 29.

Recolección de información

PREGUNTAS BÁSICAS	EXPLICACIÓN
1. ¿Para qué?	Para investigar la percepción del personal respecto a la adquisición automática de variables electromecánicas
2. ¿De qué personas u objetos?	De equipos de medida voltaje, corriente, velocidad.
3. ¿Sobre qué aspecto?	Estudio de variables electromecánicas.
4. ¿Quién? ¿Quiénes?	Investigador.
5. ¿Cuándo?	2017
6. ¿Dónde?	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
7. ¿Cuántas veces?	Una vez
8. ¿Qué técnicas de recolección?	Mediciones
9. ¿Con que?	Bitácora
10. ¿En qué situación?	Normal

3.5.1 Instrumentos

Los instrumentos utilizados para registrar la información durante la ejecución del presente proyecto fueron de tipo estadístico se representaron en tablas que fueron registrados en bitácoras. Para el soporte estadístico se utilizó: las mediciones de voltaje, corriente de los sensores SENECA, la velocidad del encoder E5058-120-3-T-24.

3.5.2 Validez y confiabilidad

Para el procesamiento de la información se seguirán varios procedimientos en base a criterios establecidos como:

- Revisión crítica de la información recogida; es decir, limpieza de la información defectuosa: contradictoria, incompleta, no pertinente, etc.
- Repetición de la recolección, en ciertos casos individuales, para corregir fallas de medición.
- Tabulación o cuadros según variables de cada hipótesis: cuadros de una sola variable, cuadro con cruce de variables, etc.
- Manejo de información (mediante gráficos y diagramas que asocian a las variables y a los parámetros involucrados, y utilizando también tablas explicativas) con el apoyo de herramientas informáticas.
- Estudio estadístico de los datos para la presentación de resultados.

3.6 Técnicas de análisis de datos

Para el procesamiento de la información se seguirán varios procedimientos en base a criterios establecidos como:

- Revisión crítica de la información recogida; es decir, limpieza de la información defectuosa: contradictoria, incompleta, no pertinente, etc.
- Repetición de la recolección, en ciertos casos individuales, para corregir fallas de contestación.
- Tabulación o cuadros según variables de cada hipótesis: cuadros de una sola variable, cuadro con cruce de variables, etc.
- Manejo de información (mediante gráficos y diagramas que asocian a las variables y a los parámetros involucrados, y utilizando también tablas explicativas) con el apoyo de herramientas informáticas.

3.7 Técnicas de comprobación de la hipótesis

- Análisis de los resultados estadísticos, destacando tendencias o relaciones fundamentales de acuerdo con los objetivos e hipótesis.
- Interpretación de los resultados, en el aspecto pertinente.
- Comprobación de la hipótesis planteada.
- Establecimiento de conclusiones y recomendaciones en base a los objetivos de la investigación

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Motor M3661TX convencional prueba en vacío

El ensayo en vacío consiste en que funciona el motor, a tensión nominal sin carga mecánica acoplada al eje, trabajando la máquina a rotor libre, las magnitudes a medir en este ensayo de vacío son el valor de la tensión que alimenta a la máquina, V_{rms} , que debe coincidir con la tensión nominal, la potencia absorbida por el motor, KV y la corriente de vacío, I . (Fravedsa, 2014).

Para realizar las mediciones de esta prueba se utilizó el analizador de calidad FLUKE 1735 él mismo es un registrador que puede realizar estudios de voltaje, corriente y potencia tiene una utilidad de Windows Flash Update. (Corporation, 2006), los valores medidos con el analizador se muestran en la (Tabla 30) y (Tabla 31), ver anexo A-2.

Tabla 30.

Datos medidos prueba en vacío motor M3661TX

	A	B	C	TOTAL
KW				0,14
KVA				1,71
KVAR				1,70
PF				0,08
Arms	4,5	4,5	4,5	
	AB	BC	CA	
Vrms	219,3	219,9	220	

Datos del motor M3661TX:

$$P = 2.2KW$$

$$V = 208V$$

$$I = 9.4A$$

$$\#polos = 4$$

$$f = 60Hz$$

$$Clase = B$$

Datos medidos del motor M3661TX:

$$I_0 = 4,5A$$

$$V_L = 219,3V$$

$$P_{3\phi} = 140W$$

$$z_0 = \frac{V}{\sqrt{3} * I_0} = \frac{208V}{\sqrt{3} * 4,5A} = 26,6864\Omega$$

Dónde:

I_0 = Corriente de línea a cero carga

V_L = Voltaje línea – línea a cero carga

$P_{3\phi}$ = Potencia trifásica a cero carga

z_0 = Impedancia por fase a cero carga

Potencia de entrada

$$P_0 = 3I_0^2 r_0$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{140W}{3 * (4,5)^2 A} = 2.3045\Omega$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$$

$$x_0 = \sqrt{(26,6864)^2 - (2,3045)^2} = 26,5869\Omega$$

En la (figura 53 a y b) se muestra el circuito equivalente correspondiente a la prueba de rotor sin carga.

Dónde:

$r_0 =$ Resistencia de cero carga

$x_0 =$ Reactancia del estator a cero carga

$P_0 =$ Potencia de entrada a cero carga

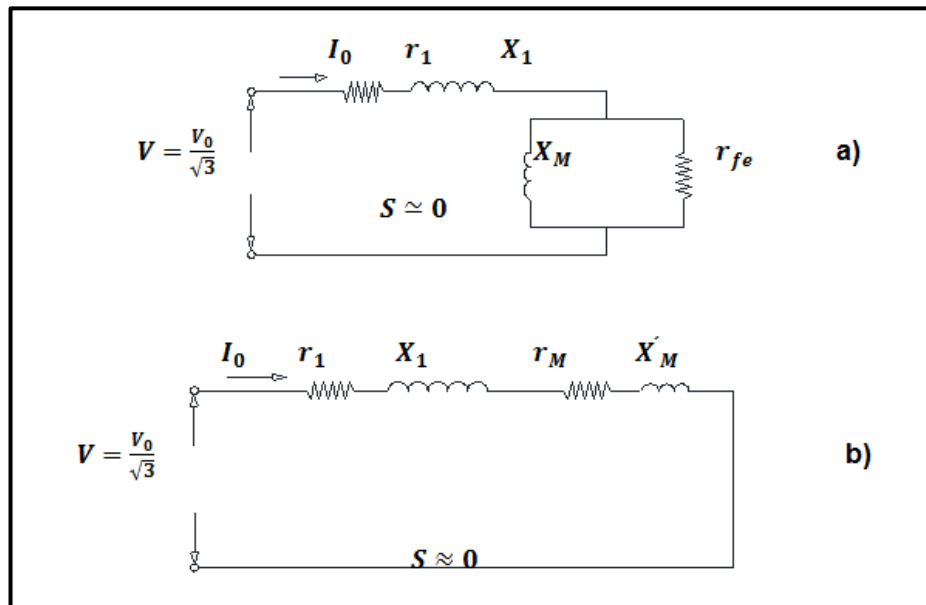


Figura 53. Circuitos a y b equivalentes del motor M3661TX

Tabla 31.

Datos medidos prueba a rotor bloqueado motor M3661TX

	A	B	C	TOTAL
KW				1,3
KVA				3,8
KVAR				3,5
PF				0,32
Arms	47	48	46	
	AB	BC	CA	
Vrms	47,82	47,38	47,59	

Prueba rotor bloqueado del motor M3661TX

Datos medidos del motor M3661TX

Para los cálculos de la presente prueba la Potencia activa y la Corriente de línea se divide para el número de vueltas en este caso 5, que se realizó a la sonda del analizador con el fin de mejorar la precisión de la medida.

$$I_L = 9,4A$$

$$V_{rb} = 47,38V$$

$$P_{3\phi} = 260W$$

$$r_1 = 0,68\Omega$$

Impedancia del motor a rotor bloqueado

$$z_{rb} = \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} * I_L} = \frac{47,38V}{\sqrt{3} * 9,4A} = 2,91\Omega$$

Dónde:

V_{rb} = Voltaje de línea – línea, a rotor bloqueado

I_L = Corriente de línea a rotor bloqueado

z_{rb} = Impedancia del motor a rotor bloqueado

Resistencia equivalente

$$r_{rb} = \frac{P_L}{3I_L^2} = \frac{260W}{3 * (9,4)^2A} = 0,9808\Omega$$

Dónde:

r_{rb} = Resistencia equivalente a rotor bloqueado

P_L = Potencia de entrada a rotor bloqueado

Reactancia equivalente a rotor bloqueado

$$x_L = \sqrt{Z_{rb}^2 - r_{rb}^2}$$

$$x_L = \sqrt{(2,91)^2 - (0,9808)^2} = 2,7397\Omega$$

De acuerdo a la (Tabla 24), donde se indica las proporciones empíricas de las reactancias de dispersión del motor de inducción se escoge la correspondiente a la CLASE B.

Reactancias de dispersión del motor de inducción

$$x_1 = 0,4 * x_L \qquad x_2 = 0,6 * x_L$$

$$x_1 = 0,4 * 2,7397\Omega \qquad x_2 = 0,6 * 2,7397\Omega$$

$$x_1 = 1,0958\Omega \qquad x_2 = 1,6438\Omega$$

Reactancia del estator

$$x_0 = x_1 + x_M$$

$$x_M = x_0 - x_1$$

$$x_M = 26,5869\Omega - 1,0958\Omega = 25,4911\Omega$$

Dónde:

x_M = Reactancia del estator a rotor bloqueado

x_1 = Reactancias de dispersión

Resistencia del rotor referido al estator

$$R_2 = (r_{rb} - r_1) \left(\frac{x_2 - x_M}{x_M} \right)^2$$

$$R_2 = (0,9808 - 0,68) \left(\frac{1,6938 + 25,4911}{25,4911} \right)^2$$

$$R_2 = (0,3008)(1,1373) = 0,3421(\Omega)$$

Dónde:

r_1 = Resistencia fase neutro del motor

En la (figura 54) se muestra el circuito equivalente correspondiente a la prueba de rotor bloqueado.

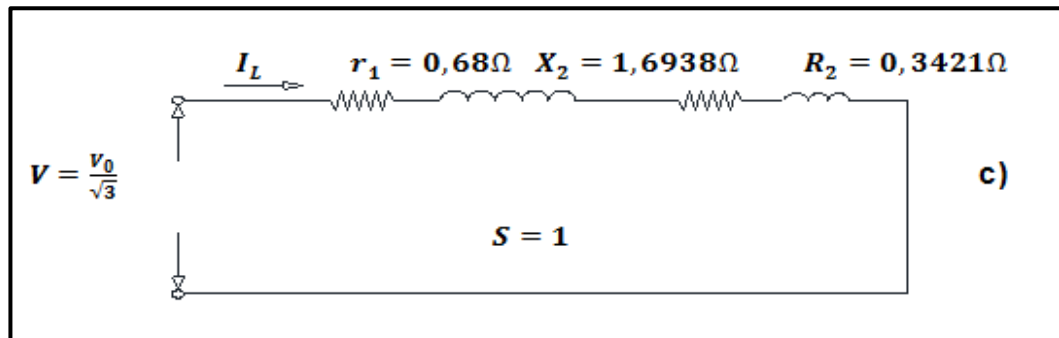


Figura 54. Circuito equivalente del motor M3661TX a rotor bloqueado

4.1.2 Motor EM3611T de alta eficiencia prueba en vacío

Para la prueba de este motor se realizó de igual forma que con el motor M3661TX utilizándose el analizador Fluke 1735 y obteniéndose los siguientes resultados que se muestran en la (Tabla 32) y (Tabla 33), ver Anexo B-B2.

Tabla 32.

Datos medidos prueba en vacío motor EM3611T

	A	B	C	TOTAL
KW				0,12
KVA				1,62
KVAR				1,61
PF				0,07
Arms	4,3	4,2	4,4	
	AB	BC	CA	
Vrms	217,9	218,6	219,4	

Datos del motor EM3611T:

$$P = 2.2KW$$

$$V = 230V$$

$$I = 8.4A$$

$$\#polos = 4$$

$$f = 60Hz$$

$$Clase = B$$

Prueba sin carga o al vacío del motor EM3611T**Datos medidos**

$$I_0 = 4,2A$$

$$V_L = 217,9V$$

$$P_{3\phi} = 120W$$

$$z_0 = \frac{V}{\sqrt{3} * I_0} = \frac{230V}{\sqrt{3} * 4,2A} = 31,6168\Omega$$

Dónde:

I_0 = Corriente de línea a cero carga

V_L = Voltaje línea – línea a cero carga

$P_{3\phi}$ = Potencia trifásica a cero carga

z_0 = Impedancia por fase a cero carga

Potencia de entrada

$$P_0 = 3I_0^2 r_0$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{120W}{3 * (4,2)^2 A} = 2,2675\Omega$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$$

$$x_0 = \sqrt{(31,6168)^2 - (2,2675)^2} = 31,5353\Omega$$

Dónde:

$r_0 =$ Resistencia de cero carga

$x_0 =$ Reactancia del estator a cero carga

$P_0 =$ Potencia de entrada a cero carga

En la (figura 55 a y b) se muestra el circuito equivalente correspondiente a la prueba de rotor sin carga.

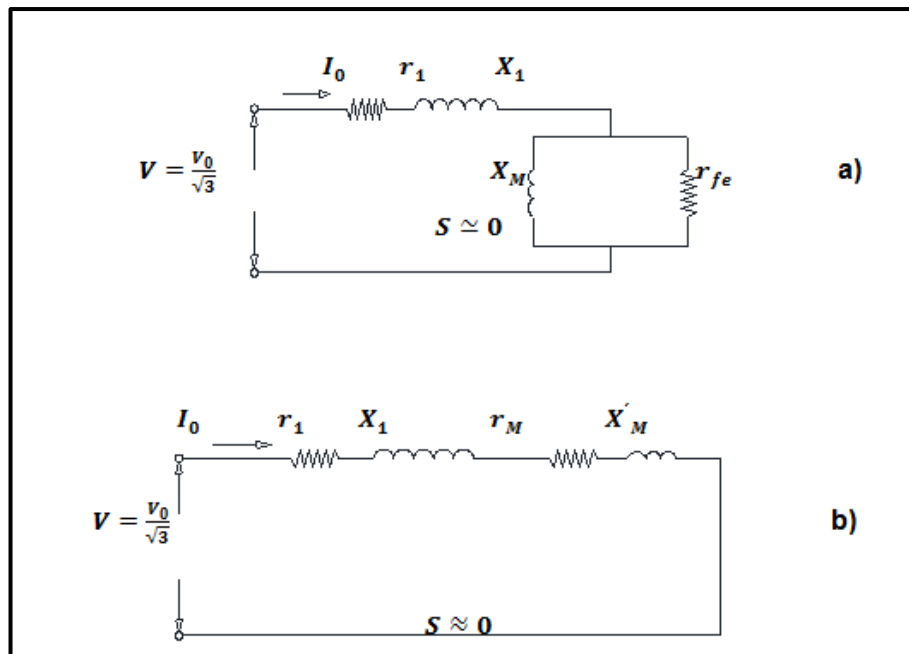


Figura 55. Circuitos equivalentes a y b del motor EM3611T

Tabla 33.

Datos medidos prueba a rotor bloqueado motor EM3611T

	A	B	C	TOTAL
KW				2,5
KVA				3,8
KVAR				2,8
PF				0,65
Arms	50	51	48	
	AB	BC	CA	
Vrms	44,79	44,11	44,25	

Prueba rotor bloqueado del motor EM3611T

Datos medidos del motor EM3611T

Para los cálculos de la presente prueba la Potencia activa y la Corriente de línea se divide para el número de vueltas en este caso 5, que se realizó a la sonda del analizador con el fin de mejorar la precisión de la medida.

$$I_L = 9,6A$$

$$V_{rb} = 44,11V$$

$$P_{3\phi} = 500W$$

$$r_1 = 0,75\Omega$$

Impedancia del motor a rotor bloqueado

$$z_{rb} = \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} * I_L} = \frac{44,11V}{\sqrt{3} * 9,6A} = 2,6528\Omega$$

Dónde:

V_{rb} = Voltaje de línea – línea, a rotor bloqueado

I_L = Corriente de línea a rotor bloqueado

z_{rb} = Impedancia del motor a rotor bloqueado

Resistencia equivalente

$$r_{rb} = \frac{P_L}{3I_L^2} = \frac{500W}{3 * (9,6)^2A} = 1,8084\Omega$$

Dónde:

r_{rb} = Resistencia equivalente a rotor bloqueado

P_L = Potencia de entrada a rotor bloqueado

Reactancia equivalente del motor a rotor bloqueado

$$x_L = \sqrt{z_{rb}^2 - r_{rb}^2}$$

$$x_L = \sqrt{(2,6528)^2 - (1,8084)^2} = 1,9408\Omega$$

De acuerdo a la (Tabla 24), donde se indica las proporciones empíricas de las reactancias de dispersión del motor de inducción se escoge la correspondiente a la CLASE B.

Reactancias de dispersión del motor de inducción

$$x_1 = 0,4 * x_L$$

$$x_2 = 0,6 * x_L$$

$$x_1 = 0,4 * 1,9408\Omega$$

$$x_2 = 0,6 * 1,9408\Omega$$

$$x_1 = 0,7763\Omega$$

$$x_2 = 1,1645\Omega$$

Reactancia del estator

$$x_0 = x_1 + x_M$$

$$x_M = x_0 - x_1$$

$$x_M = 31,5353\Omega - 0,7763\Omega = 30,759\Omega$$

Dónde:

x_M = Reactancia del estator a rotor bloqueado

x_1 = Reactancias de dispersión

Resistencia del rotor referido al estator

$$R_2 = (r_{rb} - r_1) \left(\frac{x_2 - x_M}{x_M} \right)^2$$

$$R_2 = (1,8084 - 0,75) \left(\frac{1,1645 + 30,759}{30,759} \right)^2$$

$$R_2 = (1,0584)(1,0378) = 1,0984\Omega$$

Dónde:

r_1 = Resistencia fase neutro del motor

En la (figura 56) se muestra el circuito equivalente correspondiente a la prueba de rotor bloqueado.

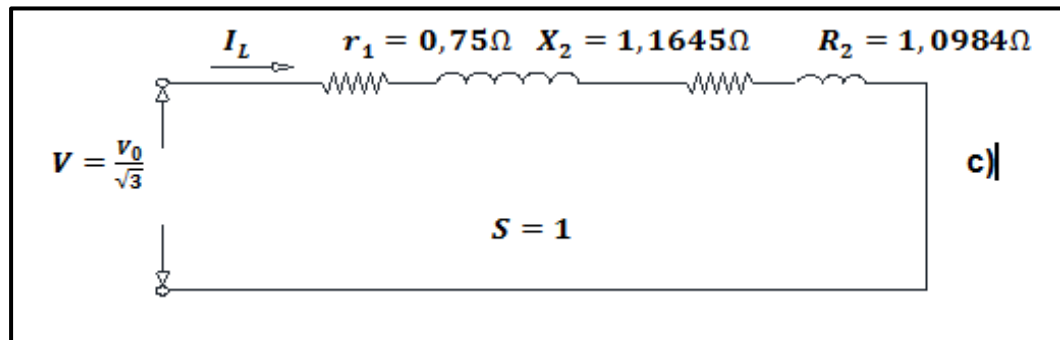


Figura 56. Circuito equivalente del motor EM3611T a rotor bloqueado

4.2 Discusión de los resultados

4.2.1 Resultado de prueba en vacío de los motores asincrónicos trifásicos M3661TX y EM3611T

Las pruebas realizadas en vacío a los motores asincrónicos trifásicos indican que la corriente del motor normal $I_0 = 4,5A$ es mayor al de alta eficiencia $I_0 = 4,2A$ lo que indica que hay un mayor desperdicio de energía por parte del motor normal.

4.2.2 Resultado de la prueba de rotor bloqueado de los motores asincrónicos trifásicos M3661TX y EM3611T

Las pruebas realizadas a rotor bloqueado a los motores asincrónicos trifásicos indican que la corriente del motor normal $I_L = 9,4A$ es menor a la de del motor de alta eficiencia $I_L = 9,6A$ lo que indica que hay un mayor consumo de corriente por parte del motor de alta eficiencia.

4.3 Comprobación de hipótesis

Para la comprobación de la hipótesis de la presente investigación se aplicara el método estadístico de una prueba t de Student, prueba que se realiza para comprobar si la hipótesis es nula o cierta. Los datos que se

tomarán en cuenta para este análisis son los: de voltaje, corriente, torque, velocidad, eficiencia y factor de potencia del motor asincrónico trifásico normal y de alta eficiencia.

Hipótesis Nula

No se puede adquirir variables electromecánicas mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2kw para el Laboratorio de Control Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Hipótesis Alternativa

Se puede adquirir variables electromecánicas mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2kw para el Laboratorio de Control Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Los datos que se tomaran en cuenta son las mediciones y valores calculados de los motores asincrónicos trifásicos M3661TX y EM3611T

En la (tabla 34) se presenta el resumen de los valores calculados para cada uno de los motores puestos a ensayo tanto para las pruebas de rotor en vacío y de rotor bloqueado.

Tabla 34.

Valores medidos de los motores EM3611T y M3661TX

Valor	Motor M3661TX	MOTOR EM3611T
I_0	4,5 A	4,2 A
V_L	219,3V	217,9V
z_0	26,6864 Ω	31,5168 Ω
x_0	26,5869 Ω	31,5353 Ω
I_L	9,4A	9,6A
z_{rb}	2,91 Ω	2,6529 Ω
x_1	1,0958 Ω	0,7763 Ω
x_2	1,6438 Ω	1,1645 Ω
x_M	25,4911 Ω	30,759 Ω
r_1	0,68 Ω	0,75 Ω
R_2	0,3421 Ω	1,0984 Ω

Tabla 35.

Prueba t para medidas de dos muestras emparejadas

	Motor M3661TX	MOTOR EM3611T
Media	134,4	72
Varianza	5676,8	1408
Observaciones	5	5
Coefficiente de correlación de Pearson	0,775331494	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	2,684870724	
P(T<=t) una cola	0,027474922	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	0,054949844	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

En la (tabla 36) se muestra los valores que se tiene para cada uno de las colas t student's.

Tabla 36.

Colas t Student

df	4		
α (Cola Derecha)	0,05	Figure 57	2,1318
Cola Izquierda (Cuantil)	0,95	Figure 58	2,1318
α (Izquierda + Cola Derecha)	0,1	Figure 59	2,1318

En la (figura 57) se representa la cola derecha de la curva t student's.

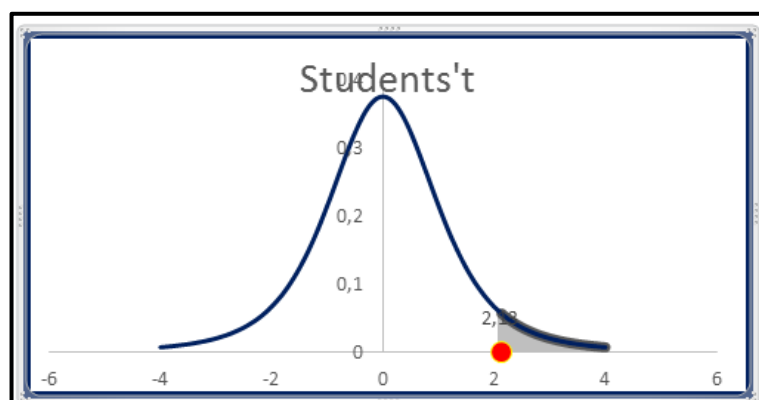


Figura 57. Cola Derecha

En la (figura 58) se representa la cola izquierda de la curva t student's.

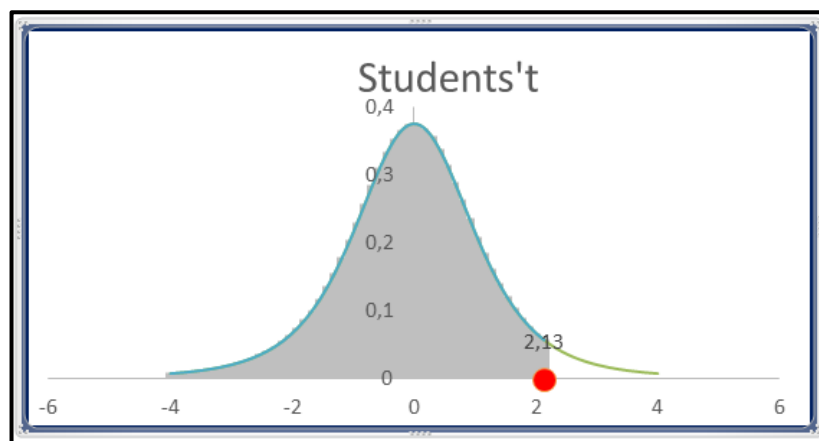


Figura 58. Cola Izquierda (Cuantil)

En la (figura 59) se representa la cola izquierda y derecha de la curva t student's.

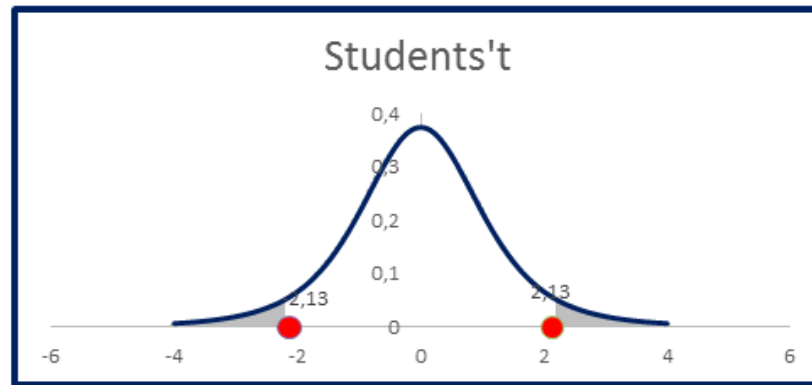


Figura 59. Izquierda + Cola Derecha

En la (tabla 37) se muestra los valores que se tiene para las áreas de probabilidades para t-valor.

Tabla 37.

Áreas Probabilidades

t-valor	A la Derecha	A la Izquierda
0,5	0,3217	0,6783

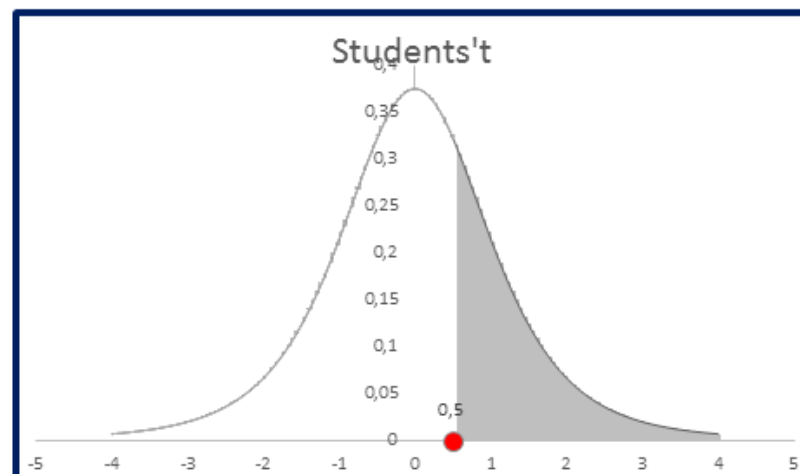


Figura 60. Áreas (probabilidades)

Para $n - 1 = 4$ (grados de libertad)

$$P(t > 2,1318) = 0.05$$

$$P(t < - 2,1318) = 0.05$$

Valor estadístico t > Valor Crítico t

$$2,6848 > 2,1318$$

El valor estadístico t calculado es de 2.6848, superó al valor de 95% de confianza con 4 grados de libertad que da 2.1318, por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, por lo que al diseñar un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2kw para el Laboratorio de Control Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se puede adquirir variables electromecánicas.

CAPÍTULO V

PROPUESTA

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA ENSAYO DE MOTORES ELÉCTRICOS ASINCRÓNICOS TRIFÁSICOS DE 2,2 KW CON ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE VARIABLES ELECTROMECAÑICAS PARA EL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA

5.1 Datos informativos

Nombre de la Empresa: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga

Dirección: Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Calle Quijano y Ordoñez y Hermanas Páez, Laboratorio de Control Industrial

Tipo de Empresa: Educación

Tamaño de Empresa: Grande

5.2 Antecedentes de la propuesta

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga tiene como uno de sus principios fundamentales **“Ser una Universidad que impulsa la gestión del conocimiento, el desarrollo de la tecnología, la innovación y el emprendimiento”** (ESPE, 2016), basados en este principio y con el resultado de la investigación se determinó que se debe implementar en el Laboratorio de Control Industrial un módulo didáctico para ensayos de motores eléctricos asincrónicos trifásicos de 2,2kw para el fortalecimiento de los conocimientos en los estudiantes de las diferentes carreras que oferta la Universidad como son Electrónica, Mecatrónica, Electromecánica.

La presente propuesta está orientada en la construcción de un módulo de adquisición de variables electromecánicas, dando lugar a la visualización de las curvas de torque, factor de potencia, eficiencia, corriente y velocidad de motores de 2,2 Kw. Se determinará mediante análisis la diferencia de estas variables entre un motor de características normales y uno de alta eficiencia.

5.3 Justificación

Los antecedentes señalados indican la necesidad de incorporar nuevos métodos de adquisición de variables electromecánicas para la visualización y análisis de comparación entre las curvas de motores trifásicos asíncronos de 2,2 Kw.

El objetivo actual de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga es fortalecer los conocimientos teóricos adquiridos en clase para poderlos desarrollar de una manera práctica por parte de sus estudiantes fomentando el desarrollo tecnológico en el centro del país.

Los estudiantes de las carreras de Ingeniería en Electrónica, Mecatrónica y Electromecánica de la Universidad podrán adquirir y visualizar mediante el módulo de adquisición de variables electromecánicas para motores asíncronos trifásicos las curvas de torque, factor de potencia, corriente, velocidad, eficiencia de esta manera se podrá realizar un análisis comparativo entre los motores normales y los de gama de alta eficiencia determinando cuál de los dos consume menor energía.

El impacto que va a tener el desarrollo de la presente investigación describirá la adquisición de variables electromecánicas que están encaminadas al fortalecimiento de los conocimientos de los estudiantes de la Universidad ESPE extensión Latacunga además se describirá el mantenimiento de estos equipos que están encaminadas a garantizar la disponibilidad y eficacia, asegurando la duración de su vida útil y

minimizando los costos de mantenimiento, dentro del marco de la seguridad y el medio ambiente.

5.4 Objetivos

- Desarrollar un módulo didáctico de pruebas para motor asíncrono de 2,2 Kw para la adquisición de variables electromecánicas, de fácil uso e interpretación para el Laboratorio de Control Industrial.
- Capturar los datos en tiempo real de las variables electromecánicas de los motores M3661TX y EM3611T, durante la realización de pruebas eficiencia, factor de potencia, voltaje, corriente, torque-velocidad, estas serán utilizadas para el análisis de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Permitir realizar ensayos rápidos y fáciles usando el módulo de adquisición de variables electromecánicas, siendo de fácil interpretación para los estudiantes de ingeniería electromecánica, electrónica y mecatrónica, así como brinde una facilidad para operar, interpretar el comportamiento del motor asincrónico de 2,2Kw.

5.5 Fundamentación propuesta

La presente propuesta, se realiza en el marco de la implementación de un módulo de adquisición de variables electromecánicas, como necesidad de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para visualizar mediante graficas en Labview, la corriente, velocidad, torque, potencia, factor de potencia y eficiencia de los motores asíncronos trifásicos de 2,2 Kw, de esta manera se podrá realizar un análisis de las diferencias entre un motor convencional y uno de alta eficiencia relacionado los conceptos teóricos con la práctica en el Laboratorio de Control Industrial.

El punto de partida será el dimensionamiento del sistema de control de los motores, el valor de las resistencias para simular cargas, protecciones,

mandos y la estructura del módulo de adquisición de las variables electromecánicas.

5.6 Diseño de la propuesta

5.6.1 Sistemas del prototipo

- Sistema de control
- Sistema de potencia: motor, generador
- Sistema de carga: resistencias

Sistemas de control

Para el presente módulo se utilizaron los equipos que se detallaron anteriormente, como es el PLC, sensores de voltaje, corrientes, dispositivo encoder para la velocidad, en los planos eléctricos (ver anexo U), se puede identificar la forma de conexión y los elementos eléctricos que intervienen para poder lograr el proceso de adquisición, validación, y visualización de datos. En el (anexo U-01) se muestra las conexiones del sistema de potencia del módulo, motor y del generador. En el (anexo U-02) se puede identificar las conexiones de los sensores, en el (anexo U-03) se visualiza el diagrama de conexión de los elementos de contactores, luces y resistencias que simularan las cargas eléctricas, en el (anexo U-04) se detalla la entradas del programador lógico controlable y en el (anexo U-05) se muestra las salidas que tiene el PLC para cada uno de sus actuadores.

5.7 Metodología para ejecutar la propuesta

5.7.1 Diseño del módulo de control

Selección de las resistencias

Para la selección de las resistencias se toma en cuenta la máxima corriente de conexión del motor que va ser 11,5 Amperios (A), a una potencia de 2,5 Kw del motor y una eficiencia del 91%.

$$P_{O_{real}} = P * eficiencia$$

$$P_{O_{real}} = 2,5 Kw * 91\%$$

$$P_{O_{real}} = 2,3 Kw$$

El banco se diseñara para una carga de 5 resistencias por lo tanto la corriente máxima se dividirá para 5.

$$I_{Resistencia} = \frac{I_{máx}}{\# Resistencias}$$

$$I_{Resistencia} = \frac{11,5 A}{5}$$

$$I_{Resistencia} = 2,3 A$$

La potencia de la niquelina es:

$$P_{Niquelina} = V * I_{Resistencia}$$

$$P_{Niquelina} = 220V * 2,3 A$$

$$P_{Niquelina} = 500 W$$

Diseño mecánico del módulo

Análisis de esfuerzos de la estructura de soporte

En la (tabla 38) se muestra los criterios de esfuerzo de diseño – esfuerzos normales directos.

Tabla 38.

Criterios de selección del factor de seguridad

Forma de carga	Material dúctil	Material frágil
Estática	$\sigma_d = \frac{S_y}{2}$	$\sigma_d = \frac{S_u}{6}$
Repetida	$\sigma_d = \frac{S_u}{8}$	$\sigma_d = \frac{S_u}{10}$
Impacto o choque	$\sigma_d = \frac{S_u}{12}$	$\sigma_d = \frac{S_u}{15}$

Fuente: (Mott, 2009)

El análisis de esfuerzos de la estructura para el soporte se realiza con ayuda del método de elementos finitos con el programa CAE (Informe Solidworks, 2015), para lo cual se tomará las siguientes condiciones que se muestran en la (Tabla 39):

Tabla 39.

Peso de la estructura

Peso de la estructura	
Masa	39,0966 kg
Peso	10,8905 N
Volumen	0.000141564 m ³
Densidad	7850 kg/m ³

En la (tabla 40) se muestra el detalle de la sujeción de la estructura de soporte para el módulo didáctico de los motores trifásicos.

Tabla 40.

Sujeción de la estructura

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		Entidades: 4 cara(s) Tipo: Geometría fija

Fuerzas resultantes

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.697346	8535.17	-2.36473	8535.17
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Resultados del estudio de la estructura

El resultado obtenido por Solid Works de la tensión de Von Mises (ver figura 61), generó una tensión máxima de 49,83 MPas, que se encuentra dentro del límite elástico del material que es de 205 MPas.

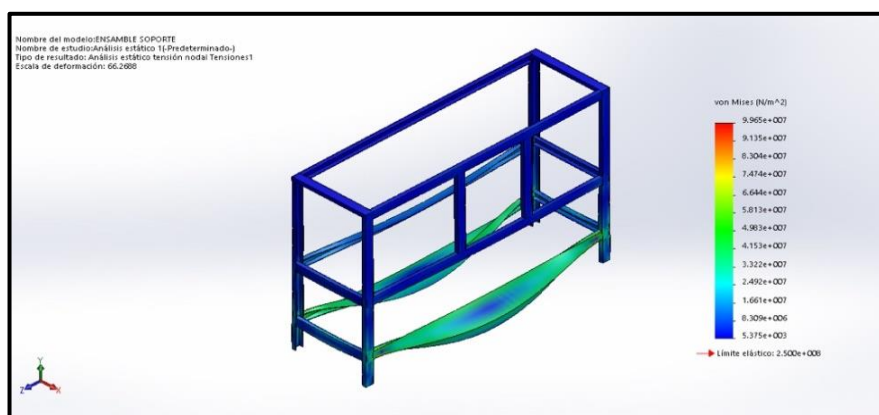


Figura 61. Tensión de Von Mises de la estructura

El resultado obtenido por Solid Works para el desplazamiento estático (ver figura 62), tiene como resultado un máximo desplazamiento de 0.208 mm, a causa de las cargas que está expuesto. Este valor indica que existirá una pequeña deformación, que no afectará a la estructura.

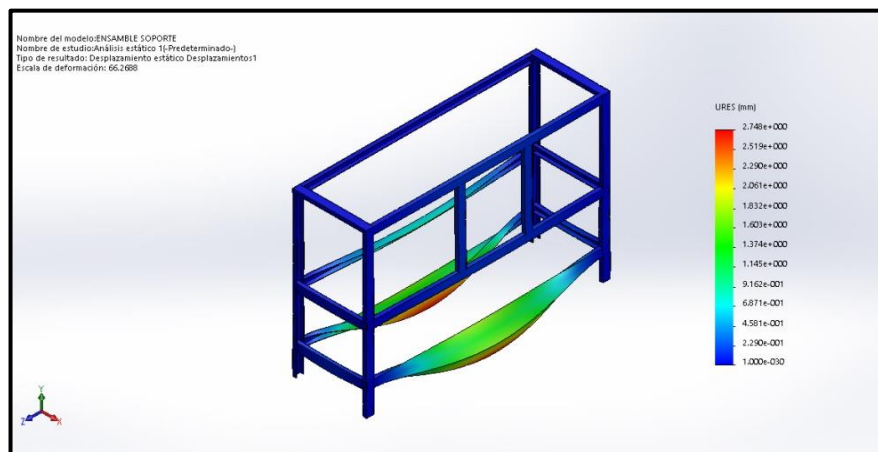


Figura 62. Desplazamiento estático de la estructura

El resultado obtenido por Solid Works al estudio estático tiene como resultado un factor de seguridad de 2,3 a lo largo de la estructura (ver figura 63), este es el punto más crítico y está sobre el factor de seguridad mínimo admitido que es de 2 para este tipo de estructuras.

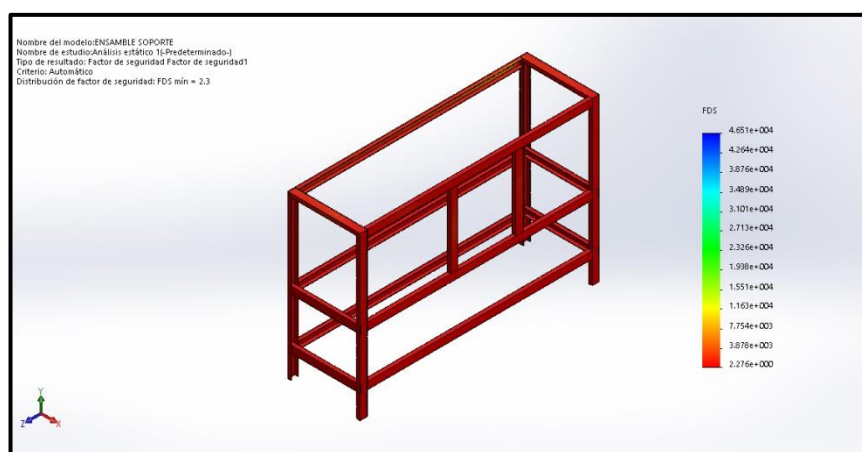


Figura 63. Factor de seguridad de la estructura

Con los análisis realizados se concluyó que el material seleccionado es adecuado para la construcción de la estructura y cumple con los requerimientos que se necesita (ver anexo K) y (ver anexo T-20).

Análisis de esfuerzos de la plancha de 2 mm

El análisis de esfuerzos de la plancha de 2 mm se realiza con ayuda del método de elementos finitos con el programa CAE (Informe Solidworks, 2015), para lo cual se tomará las siguientes condiciones que se muestran en la (tabla 41).

Tabla 41.

Peso plancha 2 mm

Peso de la estructura	
Masa	12,5272 kg
Peso	122,767 N
Volumen	0.00159582 m ³
Densidad	7850 kg/m ³

Resultados del estudio de la plancha de 2 mm

El resultado obtenido por Solid Works de la tensión de Von Mises (ver figura 64), generó una tensión máxima de 15,42 MPas, que se encuentra dentro del límite elástico del material que es de 250 MPas.

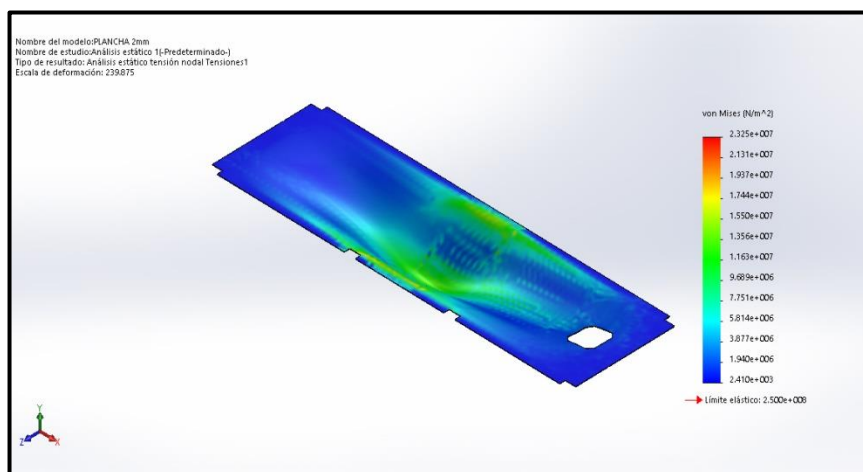


Figura 64. Tensión de Von Mises de la plancha de 2 mm

El resultado obtenido por Solid Works para el desplazamiento estático (Ver Figura 65), tiene como resultado un máximo desplazamiento de 0.6 mm, a causa de las cargas que está expuesto. Este valor indica que existirá una pequeña deformación, que no afectará a la estructura.

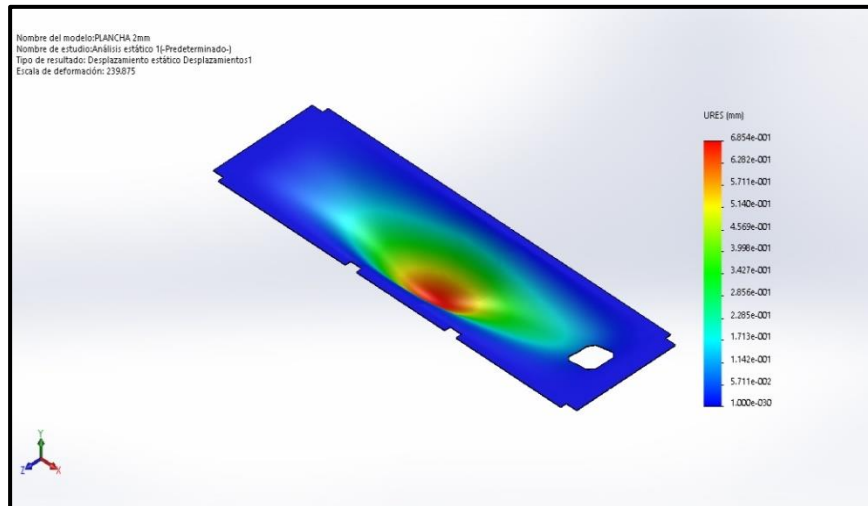


Figura 65. Desplazamiento estático plancha 2 mm

El resultado obtenido por Solid Works al estudio estático tiene como resultado un factor de seguridad de 11 a lo largo de la plancha (ver figura 66), este es el punto más crítico y está sobre el factor de seguridad mínimo admitido que es de 2 para este tipo de planchas. El factor de seguridad se obtiene con la fórmula descrita a continuación:

$$N = \frac{\text{Esfuerzo que produce la falla}}{\text{Esfuerzo máximo aplicado}} \quad \text{Ec. (30)}$$

Según la (tabla 38) se tiene:

Esfuerzo máximo aplicado

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N}$$

Esfuerzo que produce la falla

$$\sigma_d = \frac{S_u}{N}$$

Según el apéndice A-16 (Mott, 2009) se tiene el material ASTM A-36 que es el material que utilizamos en el módulo (ver anexo K), se tiene la resistencia máxima S_u y resistencia a la cadencia S_y .

$$\sigma_d = \frac{248 \text{ MPa}}{2} = 144 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = \frac{400 \text{ MPa}}{2} = 200 \text{ MPa}$$

Aplicando la Ec. (30) se tiene:

$$N = \frac{200 \text{ MPa}}{124 \text{ MPa}} = 1,61$$

Consideramos el factor de seguridad equivalente a 2 para nuestra estructura, este factor de seguridad se aplicará a todas las planchas y estructura a someterse al análisis de cargas estáticas.

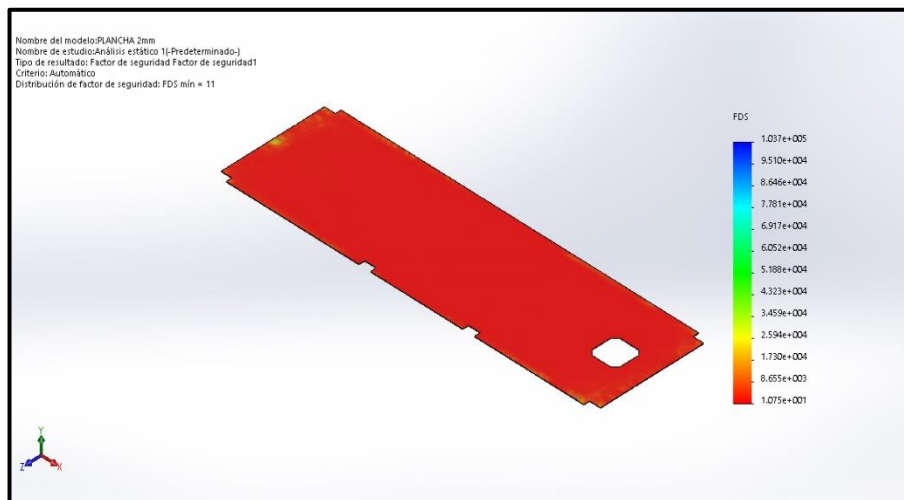


Figura 66. Factor de seguridad de la plancha de 2mm

Con los análisis realizados se concluyó que el material seleccionado es adecuado para la utilización en el módulo y cumple con los requerimientos que se necesita, (ver anexo T-11).

Análisis de esfuerzos de la plancha de 6 mm

El análisis de esfuerzos de la plancha de 6 mm se realiza con ayuda del método de elementos finitos con el programa CAE (Informe Solidworks, 2015), para lo cual se tomará las siguientes condiciones que se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42.

Peso plancha 6 mm

Peso de la estructura	
Masa	38,4375 kg
Peso	376,687 N
Volumen	0.00489649 m ³
Densidad	7850 kg/m ³

Resultados del estudio de la plancha de 6 mm

El resultado obtenido por Solid Works de la tensión de Von Mises (ver figura 67), generó una tensión máxima de 4,41 MPas, que se encuentra dentro del límite elástico del material que es de 250 MPas.

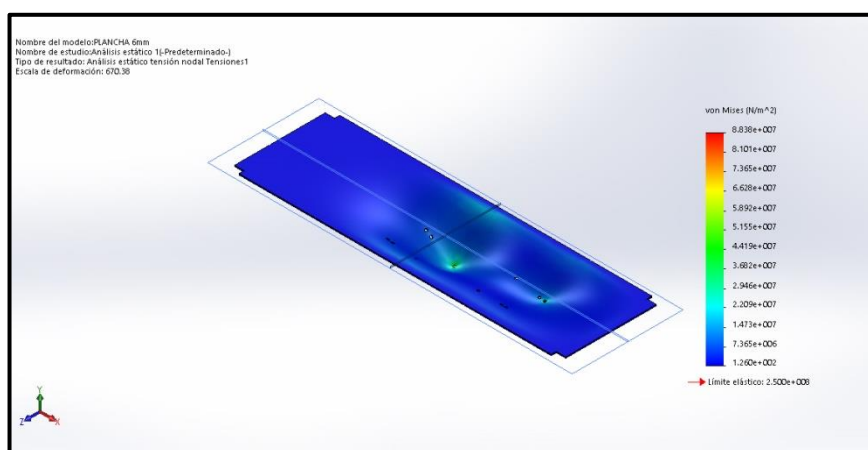


Figura 67. Tensión de Von Mises de la plancha de 6 mm

El resultado obtenido por Solid Works para el desplazamiento estático (ver figura 68), tiene como resultado un máximo desplazamiento de 0.25 mm, a

causa de las cargas que está expuesto. Este valor indica que existirá una pequeña deformación, que no afectará a la estructura.

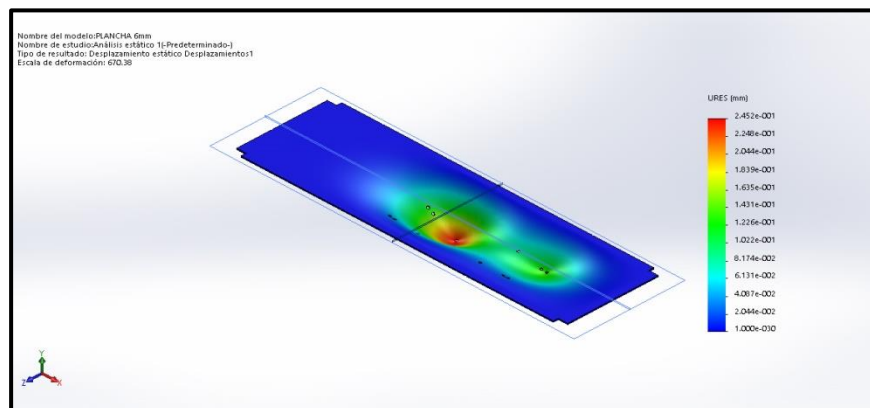


Figura 68. Desplazamiento estático plancha 6 mm

El resultado obtenido por Solid Works al estudio estático tiene como valor un factor de seguridad de 2,82 a lo largo de la plancha (ver figura 69), este es el punto más crítico y está sobre el factor de seguridad mínimo admitido que es de 2 para este tipo de planchas.

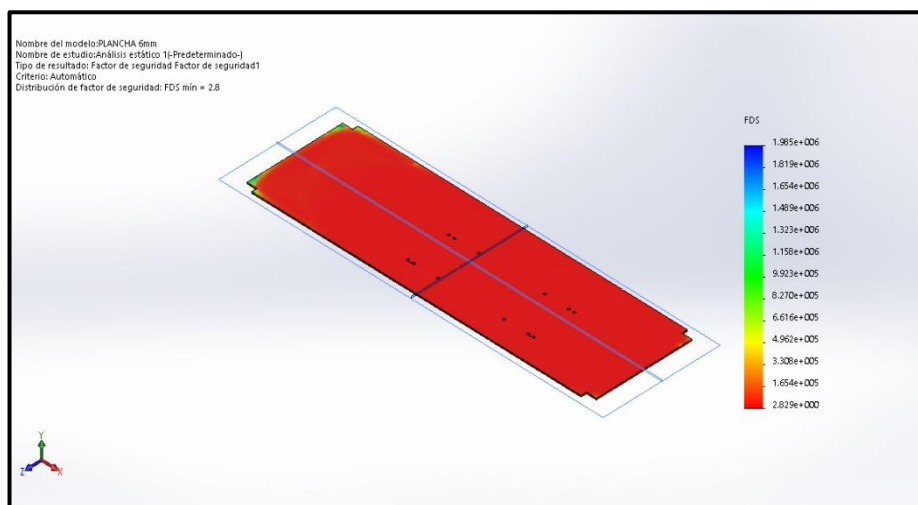


Figura 69. Factor de seguridad de la plancha de 6 mm.

Con los análisis realizados se concluyó que el material seleccionado es adecuado para la utilización en el módulo y cumple con los requerimientos que se necesita (ver anexo T-10).

En el (anexo T), se encuentra detallado todos los planos mecánicos de cada una las partes y estructuras que forman parte del módulo de ensayo para los motores, es así que:

- Anexo T-01: Soportes Horizontales 1
- Anexo T-02: Soportes Horizontales 2
- Anexo T-03: Soportes Horizontales 3
- Anexo T-04: Soportes Vertical 4
- Anexo T-05: Puerta Frontal 1
- Anexo T-06: Puerta Frontal 2
- Anexo T-07: Puerta Frontal 3
- Anexo T-08: Puerta Lateral 1
- Anexo T-09: Plancha divisor 1
- Anexo T-10: Plancha Inferior
- Anexo T-11: Plancha Intermedia
- Anexo T-12: Plancha Lateral 1
- Anexo T-13: Plancha Posterior 1
- Anexo T-14: Plancha Posterior 2
- Anexo T-15: Plancha Superior
- Anexo T-16: Acople L-950
- Anexo T-17: Lámina de Acrílico
- Anexo T-18: Estructura Puerta Inferior
- Anexo T-19: Módulo Didáctico Completo
- Anexo T-20: Despiece del módulo

5.7.2. Práctica motor EM3611T alta eficiencia

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

Practica #: 1 Motor EM3611T (Alta Eficiencia) **Fecha:** 21-01-2017

Docente: Ing. Freddy Salazar

Hora: 9:30 am

Operadores: Puco Jorge – Sánchez Carlos

Proyecto de Titulación

REPORTE DE PRUEBA

Corriente motor AC

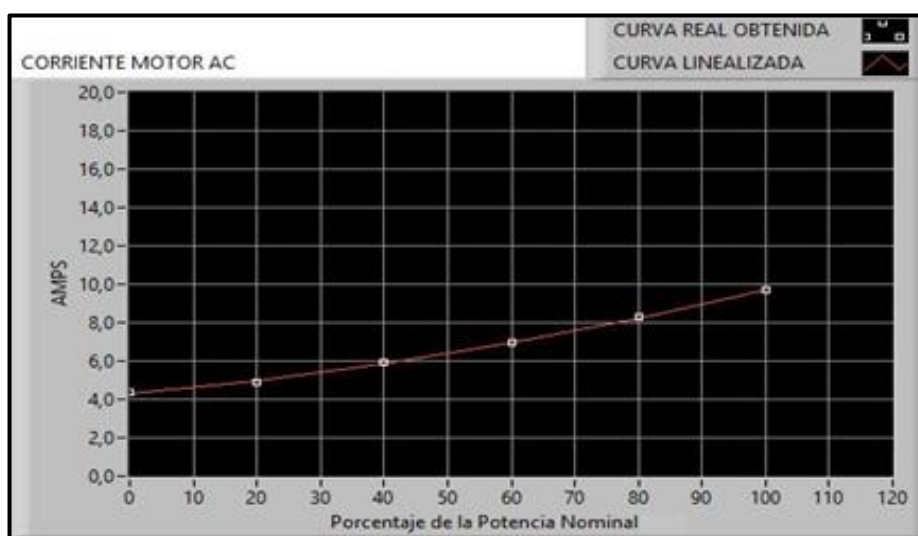


Figura 70. Curva de corriente motor EM3611T (Alta Eficiencia)

Tabla 43.

Valores de corriente motor EM3611T (Alta Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Corriente (Amperios)
Sin Carga	4,537
20	4,871
40	5,612
60	6,352
80	8,085
100	8,281

Velocidad motor AC

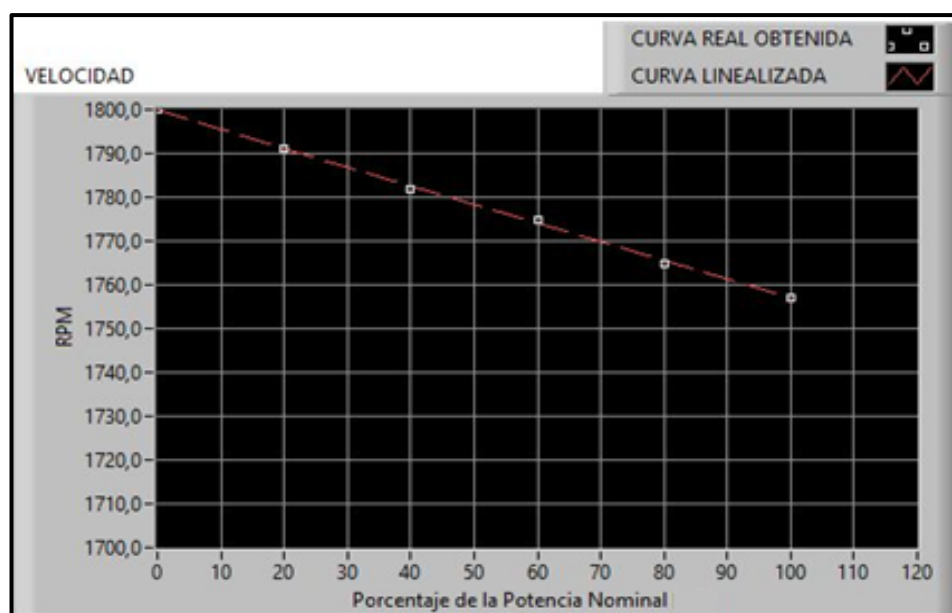


Figura 71. Curva de velocidad motor EM3611T (Alta Eficiencia)

Tabla 44.

Valores de velocidad motor EM3611T (Alta Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Velocidad (rpm)
Sin Carga	1798,000
20	1793,000
40	1787,000
60	1778,000
80	1769,000
100	1760,000

Torque motor AC

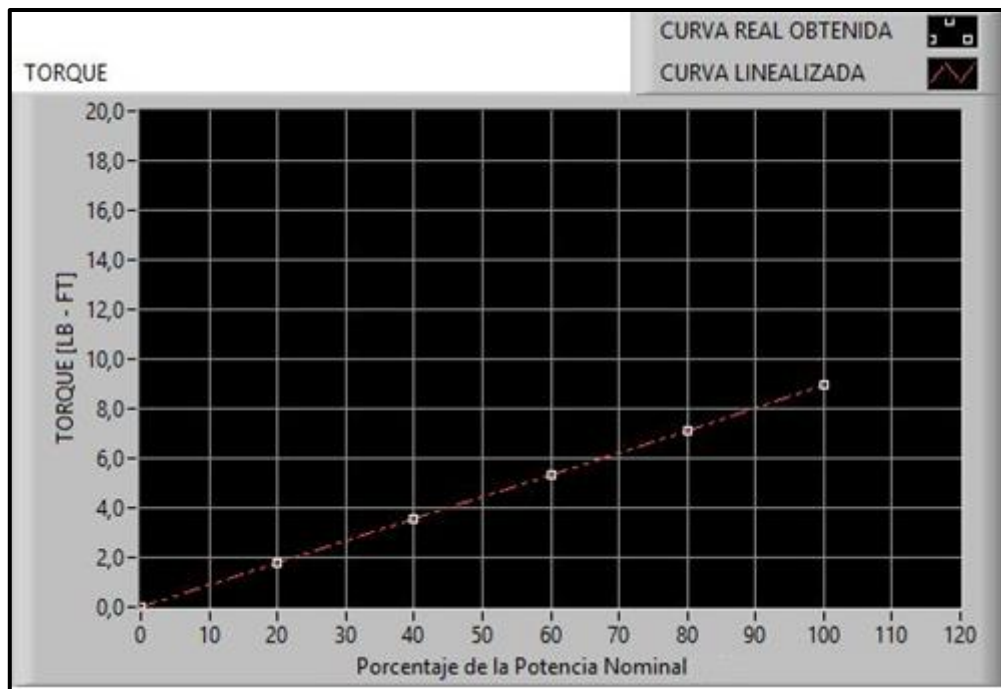


Figura 72. Curva de torque motor EM3611T (Alta Eficiencia)

Tabla 45.

Valores de torque motor EM3611T (Alta Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Torque (lb-ft)
Sin Carga	0,000
20	1,759
40	3,537
60	5,326
80	7,142
100	8,968

Potencia motor AC

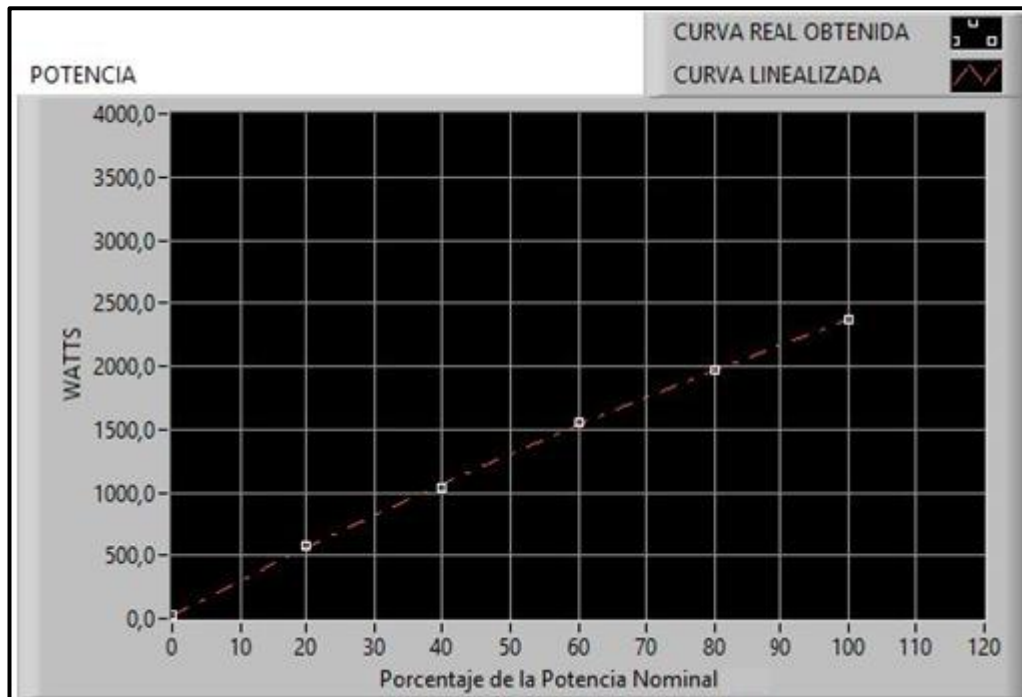


Figura 73. Curva de potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)

Tabla 46.

Valores de potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Potencia (Watts)
Sin Carga	120
20	580,375
40	1039,768
60	1558,401
80	1968,100
100	2187,120

Factor de potencia

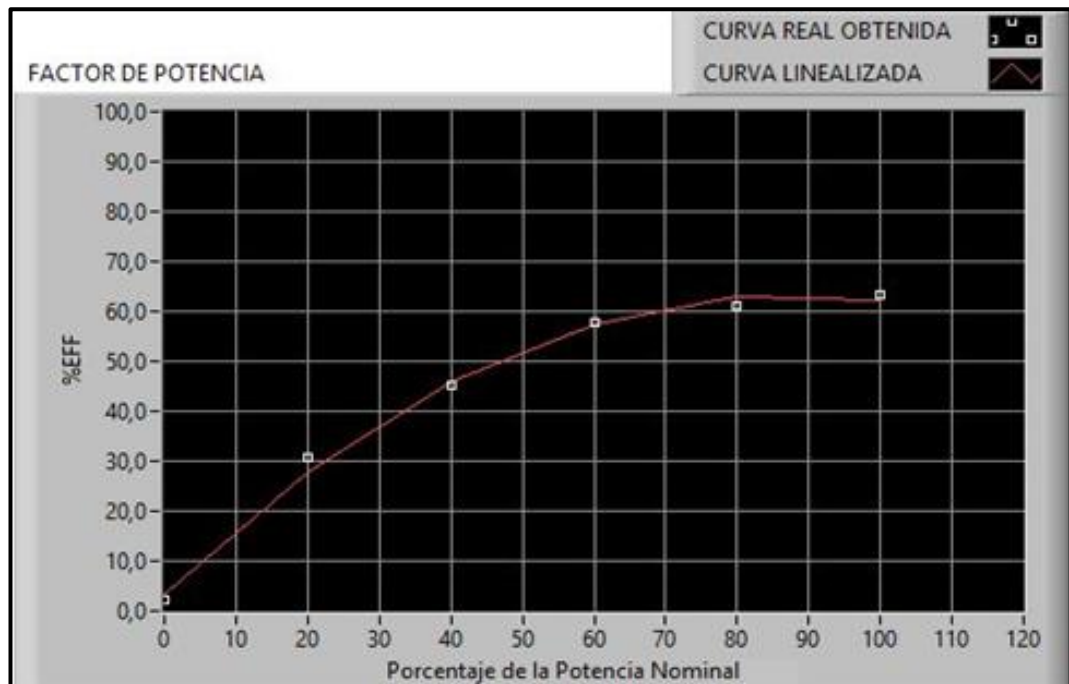


Figura 74. Curva de factor potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)

Tabla 47.

Valores de factor potencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Factor de Potencia %
Sin Carga	7,040
20	30,557
40	45,096
60	59,693
80	70,179
100	75,166

Eficiencia

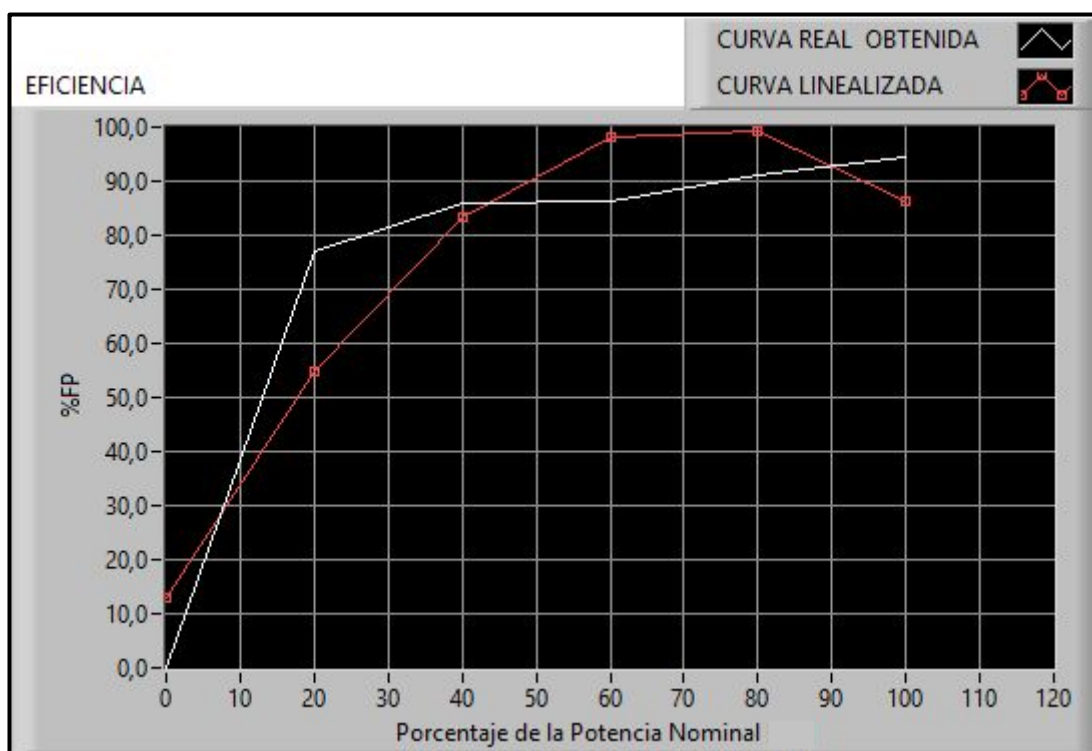


Figura 75. Curva de eficiencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)

Tabla 48.

Valores de eficiencia motor EM3611T (Alta Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Eficiencia (%)
Sin Carga	0,000
20	77,092
40	84,061
60	88,131
80	89,734
100	89,961

5.7.3. Práctica motor M3661TX baja eficiencia

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

Practica #: 2 Motor M3661TX (Baja Eficiencia) Fecha: 21-01-2017

Docente: Ing. Freddy Salazar

Hora: 10:30am

Operadores: Puco Jorge – Sánchez Carlos

Proyecto de Titulación

REPORTE DE PRUEBA

Corriente motor AC

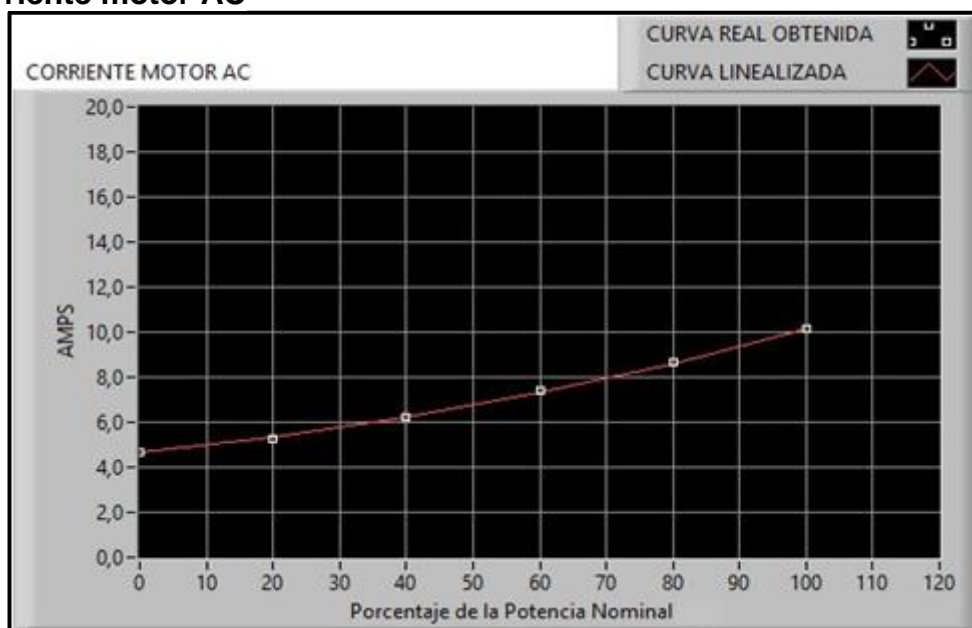


Figura 76. Curva de corriente motor M3661TX (Baja Eficiencia)

Tabla 49.

Valores de corriente motor M36611TX (Baja Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Corriente (Amperios)
Sin Carga	4,697
20	5,326
40	6,202
60	7,370
80	8,139
100	8,826

Velocidad motor AC

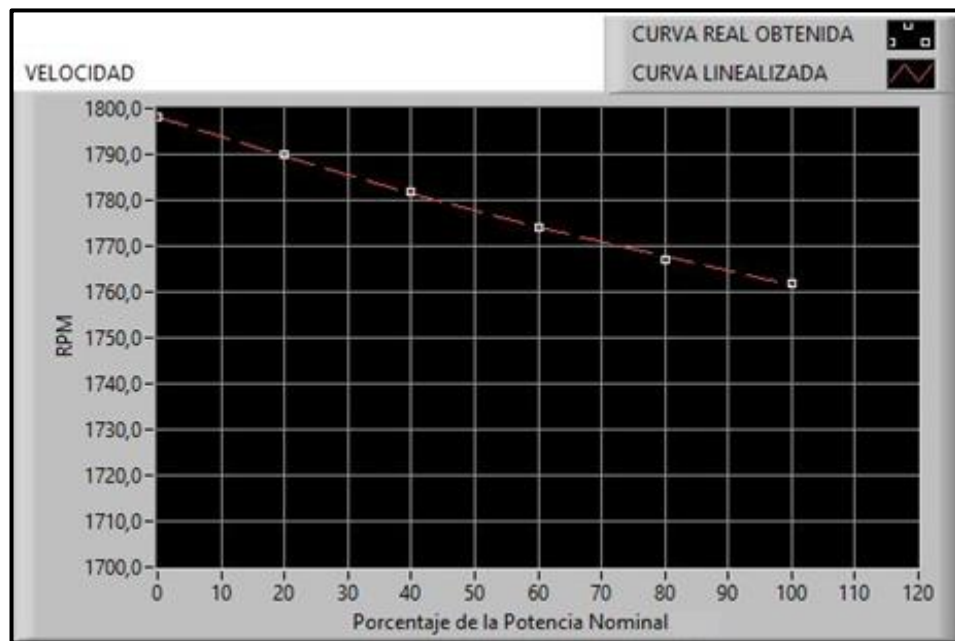


Figura 77. Curva de velocidad motor M3661TX (Baja Eficiencia)

Tabla 50.

Valores de velocidad motor M3661TX (Baja Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Velocidad (rpm)
Sin Carga	1798,000
20	1791,000
40	1784,000
60	1776,000
80	1763,000
100	1752,000

Torque motor AC

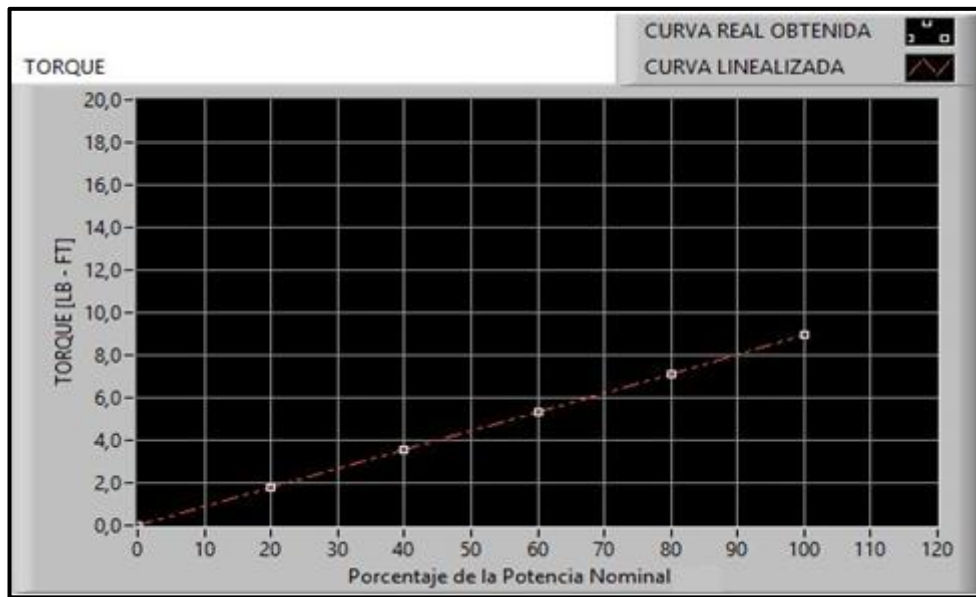


Figura 78. Curva de torque motor M3661TX (Baja Eficiencia)

Tabla 51.

Valores de torque motor M3661TX (Baja Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Torque (lb-ft)
Sin Carga	0,000
20	1,860
40	3,837
60	5,629
80	7,533
100	8,942

Potencia motor AC

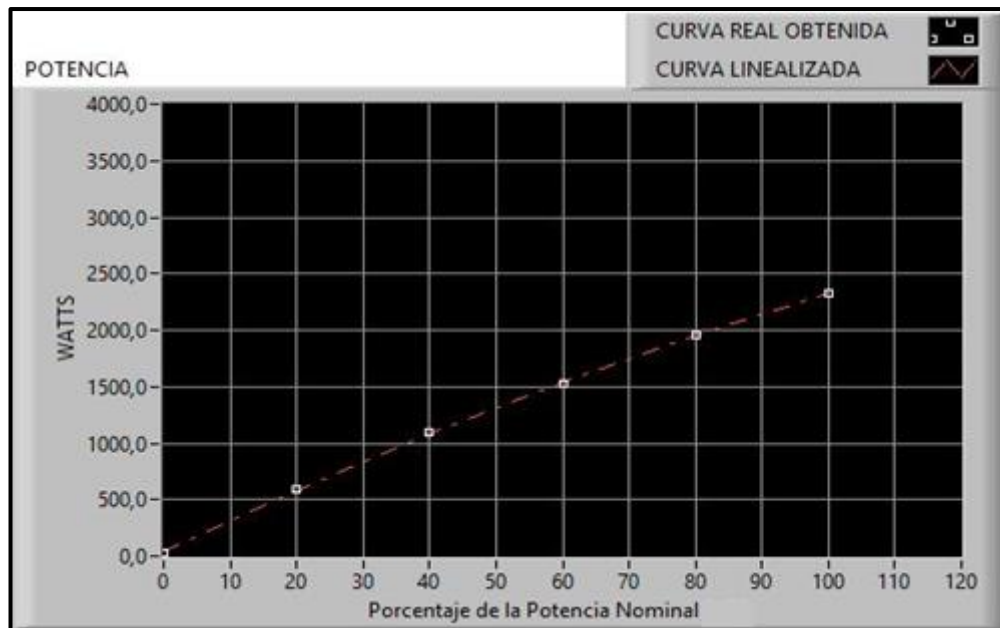


Figura 79. Curva de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)

Tabla 52.

Valores de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Potencia (Watts)
Sin Carga	140
20	588,236
40	1092,363
60	1531,216
80	1956,575
100	2332,759

Factor de potencia

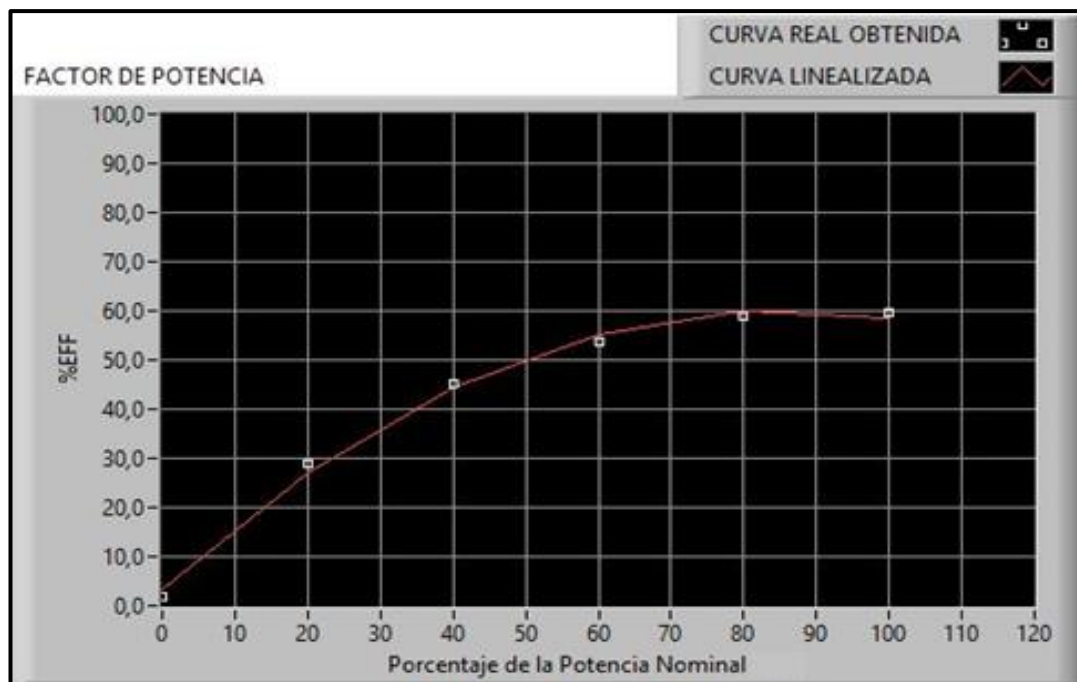


Figura 80. Curva de factor de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)

Tabla 53.

Valores de factor de potencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Factor de Potencia%
Sin Carga	1,931
20	28,949
40	45,351
60	53,783
80	58,746
100	61,608

Eficiencia

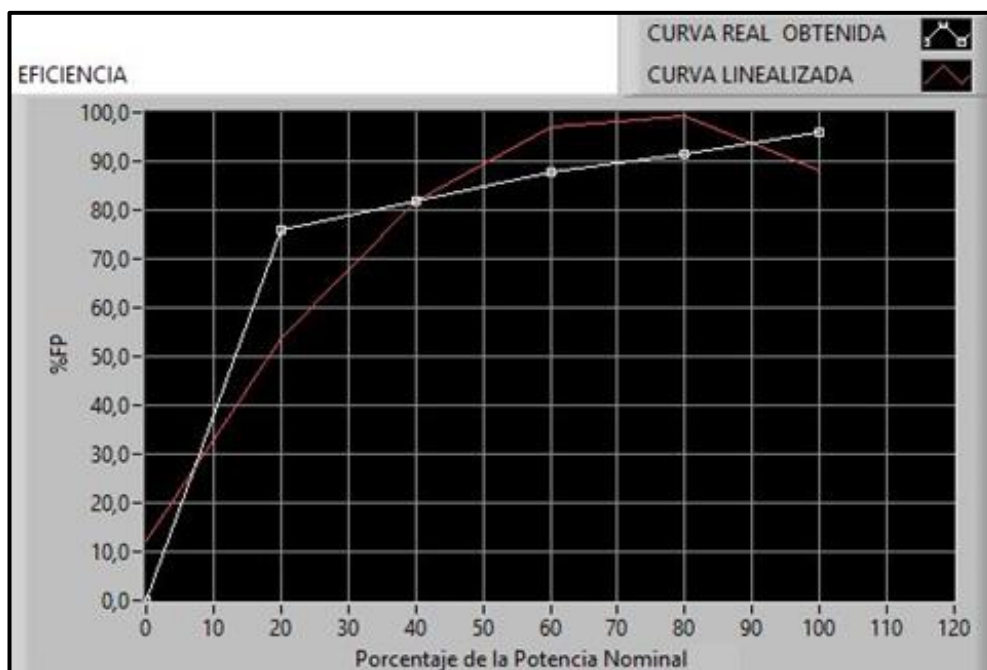


Figura 81. Curva de eficiencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)

Tabla 54.

Valores de eficiencia motor M3661TX (Baja Eficiencia)

% Potencia Nominal HP	Eficiencia (%)
Sin Carga	0,000
20	75,061
40	81,918
60	87,160
80	87,370
100	87,699

5.7.4. Resumen práctica motor EM3611T alta eficiencia y práctica motor M3661TX baja eficiencia.

Tabla 55.

Resumen práctica de motor EM3611T.

% Potencia Nominal HP	Corriente (A)	Velocidad (rpm)	Torque (lb-ft)	Potencia (Watts)	Factor de Potencia (%)	Eficiencia (%)
Sin Carga	4,537	1798	0	34,54	7,04	0
20	4,871	1793	1,759	580,375	30,557	77,092
40	5,612	1787	3,537	1039,768	45,096	84,061
60	6,352	1778	5,326	1558,401	59,693	88,131
80	8,085	1769	7,142	1968,1	70,179	89,734
100	8,281	1760	8,968	2187,12	75,166	89,961

Tabla 56.

Resumen práctica de motor M3661TX.

% Potencia Nominal HP	Corriente (A)	Velocidad (rpm)	Torque (lb-ft)	Potencia (Watts)	Factor de Potencia (%)	Eficiencia (%)
Sin Carga	4,697	1798	0	35,424	1,931	0
20	5,326	1791	1,86	588,236	28,949	75,061
40	6,202	1784	3,837	1092,363	45,351	81,918
60	7,37	1776	5,629	1531,216	53,783	87,16
80	8,139	1763	7,533	1956,575	58,746	87,37
100	8,826	1752	8,942	2332,759	61,608	87,699

En la (tabla 55) se puede observar a plena carga 100% el motor de alta eficiencia tiene un 89,961 sobre el valor del de baja eficiencia que se puede observar en la (tabla 56) de 87,699 sobre pasándolo en un 2,51% en eficiencia.

CONCLUSIONES

- Al adquirir las variables electromecánicas mediante el módulo didáctico de motores eléctricos asíncronos trifásicos de 2,2 kW se pudo determinar en la (tabla 53 y 54) que el motor de alta eficiencia EM3611T tiene una eficiencia del 89,961 en relación al 87,699 del motor X3661Tx de baja eficiencia determinado que el motor de alta eficiencia es mayor en un 2,51% que el de baja eficiencia.
- Para el diseño del módulo se tomó en cuenta la potencia real del motor de 2,2 kW determinando que cada una de las resistencias tenga una potencia de 500W colocando 5 en paralelo para simular la carga al 100%.
- Al implementar el sistema de adquisición de datos en el módulo didáctico se pudo observar las curvas de eficiencia, velocidad, torque, corriente potencia y las diferencias que existen entre un motor de alta eficiencia EM3611T y uno de baja eficiencia M3661TX

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un módulo didáctico de adquisición de variables electromecánicas para pruebas de motores asíncronos para otras potencias.
- Se recomienda variar el tipo de simulador de carga que se utiliza en el módulo didáctico de adquisición de variables electromecánicas de los motores asíncronos
- Se recomienda seguir los pasos del manual de usuario para la utilización del módulo de adquisición de variables electromecánicas para obtener los resultados esperados.
- Importante seguir los pasos del manual de mantenimiento para la utilización del módulo de adquisición de variables electromecánicas con la finalidad de poder tener operativo este equipo que servirá ampliamente al conocimiento de la planta estudiantil de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.

BIBLIOGRAFÍA:

- Chapman, S. J. (2005). *Máquinas Eléctricas*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Edminister, J. A., & Mahmood, N. (1997). *Circuitos Eléctricos*. Madrid: McGraw-Hill.
- Matsch, L. W. (1990). *Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas*. Mexico, D.F.: Alfaomega.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencias de materiales*. México, D.F.: Prentice - Hall.
- Richardson, D., & Caisse, A. (1997). *Máquinas eléctricas rotativas y transformadores*. México, D.F.: Prentice - Hall Hispanoamericana, S.A.

NETGRAFÍA:

- ABB Group. (2013, Junio 25). *Eficiencia en Motores*. Retrieved Diciembre 8, 2016, from <http://new.abb.com: http://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013---presentaciones/3-jos%C3%A9-simpson---eficiencia-en-motores-nuevos-desarrollos-y-tecnolog%C3%ADas-abb.pdf?sfvrsn=2>
- Asamblea Nacional. (2008). *Constitución de bolsillo*. Retrieved Noviembre 22, 2016, from http://www.asambleanacional.gob.ec: http://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/documents/old/constitucion_de_bolsillo.pdf
- Automación Micromecánica s.a.i.c. (2015, Agosto 25). *CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE PLC*. Retrieved Diciembre 12, 2016, from www.micro.com.ar: http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf
- Benitez, J. (2015, Octubre). *Bentz*. Retrieved Diciembre 20, 2016, from bentz5.blogspot: http://bentz5.blogspot.com/2015/10/maquinas-de-corriente-continua.html
- Catarina.udlap. (2012). *CATARINA*. Retrieved Diciembre 22, 2016, from http://catarina.udlap.mx/: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/salvatori_a_m/capitulo1.pdf

- Cifp-Mantenimiento. (2016, Enero). *CIFP-MANTENIMIENTO*. Retrieved Enero 9, 2017, from <http://www.cifp-mantenimiento.es>: http://www.cifp-mantenimiento.es/e-learning/index.php?id=9&id_sec=5
- Corporation, F. (2006). *Manual de uso Power Logger 1735* (Vol. Rev. 1). Everett, WA, EE.UU.: Fluke.
- Cortez Fernández, J. M., Guevara Ganchozo, H. I., & Rodríguez Enríquez, J. A. (2015, Agosto 05). *Universidad Politécnica Salesiana*. Retrieved Diciembre 05, 2016, from <http://dspace.ups.edu.ec>: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7383/1/GT000686.pdf>
- Electricas Bogota. (2010). *Encoders Autonicos*. Retrieved Diciembre 20, 2016, from <http://www.electricasbogota.com>: <http://www.electricasbogota.com/detalles/encoders/69-e50s8-60-3-t-24>
- Endesa Educa. (2014, Julio). *Endesa Educa*. Retrieved Diciembre 20, 2016, from <http://www.endesaeduca.com>: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores
- ESPE, U. d. (2016, 06 01). *Filosofía ESPE - EL*. (M. ESPE, Producer) Retrieved 01 05, 2017, from <http://espe-el.espe.edu.ec/?q=node/17>
- Fravedsa. (2014, 12 30). *Ingeniería Eléctrica*. Retrieved 01 12, 2017, from <http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com/2014/12/ensayo-vacio-motor-asincrono.html>
- Ingenielectrico.blogspot. (2015, Noviembre 9). Retrieved Diciembre 20, 2016, from <http://ingenielectrico.blogspot.com>: <http://ingenielectrico.blogspot.com/2015/11/componentes-electricos.html>
- Instituto Andrés de Vandelvira. (2011, Noviembre). *Departamento de Tecnología*. Retrieved Enero 11, 2017, from <http://platea.pntic.mec.es>: http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf
- ISA-UMH. (2008, Septiembre 28). Retrieved Diciembre 04, 2016, from ISA-UMH: http://isa.umh.es/asignaturas/asct/control/TranspASCT_IntroduccionControlSistemas.pdf
- Lovejoy-Inc. (2013, Febrero). *Acoplamientos elásticos*. Retrieved Diciembre 12, 2016, from www.citsa.com: www.citsa.com/dwn/PDFes/P3sp/lovejoy.pdf

- MOTORTICO. (2014, Febrero). *Diseño y Categoría en Motores Eléctricos*. Retrieved Diciembre 5, 2016, from <http://www.motortico.com: http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2014%20FEB%20-%20Diseno%20y%20Categoria%20en%20Motores%20Electricos.pdf>
- MOTORTICO. (2015, Julio). *MOTORTICO*. Retrieved Febrero 15, 2017, from <http://www.motortico.com: http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2015%20JUL%20-%20Principio%20del%20Campo%20Magnetico%20Rotatorio%20en%20Maquinas%20Trifasicas.pdf>
- National Instruments. (2017). *National Instruments*. Retrieved Enero 28, 2017, from <http://www.ni.com: http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- Normalización, I. E. (2009, Febrero 27). *Eficiencia energética en motores eléctricos estacionarios*. Retrieved Diciembre 14, 2016, from <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2498.2009.pdf>
- Nuñez Mata, O. (2013). *La Placa de Carcterísticas del motor eléctrico de inducción*. Retrieved Enero 12, 2017, from <http://www.motortico.com: http://www.motortico.com/biblioteca/Motores%20Corriente%20Alterna/La%20Placa%20de%20Caracteristicas.pdf>
- Palco Electrónica. (2015). *Fusibles*. Retrieved Diciembre 13, 2016, from <http://www.palcoelectronica.es: http://www.palcoelectronica.es/componentes/pasivos/fusibles/fusibles.html>
- Polanía Puentes, J. A. (2010, Abril 2). *Kimerius*. Retrieved Enero 7, 2017, from [Kimerius: kimerius.com/app/download/5783169335/Control+de+motores+eléctricos.pdf](http://www.kimerius.com/app/download/5783169335/Control+de+motores+eléctricos.pdf)
- Rega, P. (2011). *sites.google.com*. Retrieved Diciembre 11, 2016, from <https://sites.google.com: https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/partes-fundamentales-de-un-motor-electrico/2-1-estator>
- Revista Educativa. (2015, Noviembre). *Revista Educativa MasTiposde.com*. Retrieved Diciembre 28, 2016, from <http://www.mastiposde.com/maquinas-electricas.html>.

- Rodríguez Pozueta, M. A. (2015). *UNICAN*. Retrieved Enero 12, 2017, from <http://web.unican.es/>:
<http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Maquinas%20cc.pdf>
- Salazar, R. (2015). *Arquitectura de un Inductor* . Retrieved Diciembre 20, 2016, from <http://slideplayer.es>: <http://slideplayer.es/slide/8930166/>
- Santos, G. (2012, Octubre 13). *GRUPO IMFERRA*. Retrieved Enero 4, 2017, from <http://es.slideshare.net>: <http://es.slideshare.net/GersonSantosDubon/como-leer-la-placa-de-datos-de-un-motor-electrico>
- Serway, R. (2011). *Saunders College Publishers*. Retrieved Diciembre 12, 2016, from <http://depa.fquim.unam.mx>:
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Corriente_Electrica_y_Resistencia_7445.pdf
- Silva Bijit, L. (2009, Septiembre 21). *Universidad Técnica Federico Santa María*. Retrieved Enero 03, 2017, from <http://www2.elo.utfsm.cl>:
<http://www2.elo.utfsm.cl/~lsb/elo102/clases/c1re%2007092009.pdf>
- SitesMáquinas. (2016, Febrero). *sites.google*. Retrieved Enero 10, 2017, from <https://sites.google.com>:
<https://sites.google.com/site/201602maquinaselectricas/maquinas-de-corriente-alterna/motor-de-induccion/funcionamiento>
- Terán, R., Strauss, A., & Ríos, A. (2007, Octubre). *fglongatt*. Retrieved Diciembre 18, 2016, from <http://fglongatt.org>:
<http://fglongatt.org/OLD/Reportes/RPT2007-10.pdf>
- Universidad de la Salle. (2010, Diciembre 14). *Universidad de la Salle*. Retrieved Diciembre 26, 2016, from http://www.lasalle.edu.co/wps/portal/Home/Principal/ProgramasAcademicos/ProgramasdePregrado/IngenieriaAutomatizacion!/ut/p/a1/04_Sj9CPykyssy0xPLMnMz0vMAfGjzOIDPH0MPNxNDLwsXExNDBwNLBzNPA3dPd0dDfULsh0VAdc6Vkw!/
- Universidad Tecnológica Nacional. (2015). *UTN FRMza* . Retrieved Diciembre 14, 2016, from <http://www1.frm.utn.edu.ar>:
http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs/APUNTES_MAQUINAS_ELECTRICAS-_U_3_v1.1.pdf
- WEG. (2017, Enero). *Motores Eléctricos Weg catálogos* . Retrieved Febrero 4, 2017, from <http://ecatalog.weg.net>: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22->

motor-trifasico-tecnico-mercado-latinoamericano-50024297-catalogo-
espanol.pdf

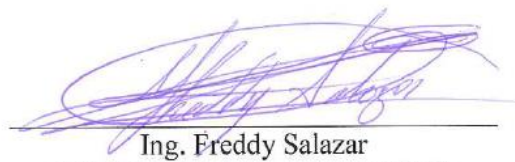
ANEXOS



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores:
CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ CRUZ, y JORGE LUIS PUCO TOAQUIZA.
En la ciudad de Latacunga, a los **6 días del mes de Febrero del 2017.**



Ing. Freddy Salazar
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:



Ing. Katya Torres
DIRECTORA DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO