



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO**  
**DIDÁCTICO PARA OBTENER LAS CURVAS**  
**CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO BAJO CARGA DE**  
**LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA MEDIANTE UNA**  
**INTERFAZ HMI, PARA EL LABORATORIO DE**  
**ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS**

**AUTORES: DIEGO ALEJANDRO BARRENO RAMÍREZ**

**CARLOS EDMUNDO RODRÍGUEZ CHACÓN**

**DIRECTOR: ING. JIMÉNEZ MARIO**

**LATACUNGA**

**2017**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO BAJO CARGA DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA MEDIANTE UNA INTERFAZ HMI, PARA EL LABORATORIO DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS**” 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 acreditarlos y autorizar a los señores **DIEGO ALEJANDRO BARRENO RAMÍREZ Y CARLOS EDMUNDO RODRÍGUEZ CHACÓN** para que lo sustente públicamente..

**Latacunga, 21 febrero del 2017**

**Ing. Mario Jiménez León**

**DIRECTOR**



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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

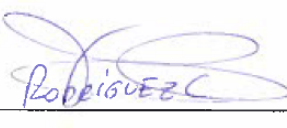
Nosotros, **DIEGO ALEJANDRO BARRENO RAMÍREZ Y CARLOS EDMUNDO RODRÍGUEZ CHACÓN** declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO BAJO CARGA DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA MEDIANTE UNA INTERFAZ HMI, PARA EL LABORATORIO DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS.**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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

**Latacunga, 21 febrero del 2017**

  
\_\_\_\_\_  
Diego Alejandro Barreno Ramirez

C.C.: 1724719354

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Edmundo Rodriguez Chacón

C.C.: 0503071300



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

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **DIEGO ALEJANDRO BARRENO RAMÍREZ Y CARLOS EDMUNDO RODRÍGUEZ CHACÓN**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO BAJO CARGA DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA MEDIANTE UNA INTERFAZ HMI, PARA EL LABORATORIO DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS.**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

**Latacunga, 21 febrero del 2017**

Diego Alejandro Barreno Ramirez

C.C.: 1724719354

Carlos Edmundo Rodriguez Chacón

C.C.: 0503071300

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres quienes con esfuerzo y entereza me han podido brindar la oportunidad de estudiar, sin la ayuda y consejos de ellos no hubiese sido posible lograr este objetivo.

**Diego**

Dedico este trabajo a mis padres que con mucho esfuerzo, sacrificio y paciencia supieron apoyarme en todo momento en el transcurso de mi formación como Ingeniero Electromecánico; a toda mi familia, amigos y María S. que de una u otra forma supieron aportar para superarme a mí mismo como persona y como profesional.

**Carlos**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por darme unos padres tan dedicados, a mis padres por su apoyo incondicional que me brindaron durante mis estudios, al Ing Mario Jiménez por sus enseñanzas, tiempo y asesoramiento durante el desarrollo del presente proyecto de investigación.

**Diego**

A mi familia, a mis amigos y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga que me supieron formar como profesional y me dieron la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa universidad, al Ing. Mario Jiménez por su apoyo y consejos durante el desarrollo de este Trabajo de Investigación, a todos los docentes que aportaron con sus conocimientos y sobre todo por la amistad demostrada durante el transcurso de mi formación para alcanzar este objetivo.

**Carlos**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CARÁTULA</b> .....	<b>i</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b> .....	<b>xviii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xx</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1. PROBLEMÁTICA</b> .....	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema .....	1
1.2. Antecedentes .....	1
1.3. Justificación e importancia .....	2
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo General .....	3
1.4.2. Objetivos Específicos .....	3
1.5. Alcance .....	4
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>5</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1. Fundamentación teórica.....	5
2.1.1. Motores de corriente continua.....	5
2.1.2. Principios de funcionamiento de motores de corriente continua .....	6
a. Fuerza contraelectromotriz.....	7
b. Velocidad de rotación.....	8
c. Potencia eléctrica y mecánica.....	9
d. Rendimiento del motor de corriente continua.....	9

e.	Par desarrollado por el motor de corriente continua .....	10
2.1.3.	Motor con excitación independiente .....	11
2.1.4.	Motor con excitación en derivación o shunt .....	12
2.1.5.	Motor con excitación serie.....	12
2.1.6.	Motor de excitación compound .....	13
2.1.7.	Curvas características de los motores de corriente continua .....	14
a.	Curvas características de funcionamiento de un motor en derivación (Shunt). .....	15
b.	Curvas características de funcionamiento de un motor con excitación serie .....	16
c.	Curvas características de funcionamiento de un motor compound .....	17
2.1.8.	Control de velocidad del motor con excitación independiente y en derivación (Shunt). .....	19
a.	Regulación de velocidad por cambio en la tensión aplicada al inducido.....	19
b.	Regulación de velocidad por cambio en la resistencia en serie con el inducido .....	20
c.	Regulación de velocidad por cambio en la resistencia en serie con el inductor.....	21
2.1.9.	Freno por corrientes de Foucault con dinamómetro.....	21
2.1.10.	Sensores y Transductores .....	22
a.	Sensor de corriente DC.....	22
b.	Convertidor de voltaje DC/DC .....	24
2.1.11.	Controladores.....	25
a.	Ventajas de las placas Arduino .....	25
b.	Hardware de Arduino .....	26
c.	Software de Arduino.....	26
2.1.12.	Interfaz hombre máquina .....	27
a.	Funciones de un HMI .....	28
2.1.13.	Estándar RS-485.....	28
2.1.14.	Protocolo de comunicación MODBUS.....	30
a.	Modo de transmisión ASCII.....	31
b.	Modo de transmisión RTU.....	31



<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>32</b>
<b>3. MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>32</b>
3.1. Antecedentes investigativos.....	32
3.2. Fundamentación legal.....	33
3.2.1. Modelo genérico para la evaluación del entorno de aprendizaje de las carreras. ....	33
a. Ambiente institucional .....	33
3.3. Variables de investigación.....	34
3.4. Operacionalización de variables .....	35
3.5. Modalidad de la investigación .....	36
3.5.1. Investigación bibliográfica .....	36
3.5.2. Investigación de campo.....	36
3.5.3. Investigación experimental.....	36
3.6. Tipos de investigación.....	36
3.6.1. Investigación aplicada.....	36
3.6.2. Investigación correlacional.....	37
3.7. Técnica de recolección de datos.....	37
3.7.1. La observación en laboratorio.....	37
3.8. Técnica de análisis de datos.....	37
 <b>CAPÍTULO IV .....</b>	 <b>38</b>
<b>4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>38</b>
4.1. Generalidades.....	38
4.1.1. Introducción.....	38
4.1.2. Arquitectura del proyecto .....	38
4.1.3. Características de los motores de corriente continua.....	39
a. Motor de corriente continua Barth 004.030 .....	39
b. Motor de corriente continua Barth 004.001 .....	40
c. Motor de corriente continua Barth 004.060 .....	40
4.2. Diseño del circuito de control del electrodinamómetro.....	40
4.3. Diseño de acondicionamientos de señales para sensores.....	44
4.3.1. Selección del transductor o sensor de corriente DC .....	44
a. Sensor de corriente ACS712ELCTR-05B-T .....	44

b.	Transductor de corriente T201DC SENECA .....	45
c.	Sensor de corriente H970LCA Hawkeye.....	45
d.	Transductor de corriente EDCC - CX(5A <sub>dc</sub> ) - E1 - XA.....	46
4.3.2.	Acondicionamiento de señal para transductor de corriente.....	48
4.3.3.	Selección del transductor de voltaje DC.....	49
a.	Divisor de voltaje .....	49
b.	Transductor de voltaje VTD 4 - 005 - 24U - DIN .....	50
c.	Convertidor de voltaje Phoenix Contact .....	50
d.	Transductor de voltaje EDCV-VX(300VDC)-E1-XA.....	51
4.3.4.	Acondicionamiento de señal para el sensor de voltaje.....	55
4.3.5.	Acondicionamiento de señal para el sensor de torque.....	55
4.3.6.	Acondicionamiento de señal para el sensor de velocidad.....	56
4.4.	Diseño del circuito impreso para el control del electrodinamómetro y acondicionamientos de señales .....	57
4.5.	Selección del controlador .....	59
a.	Arduino UNO.....	59
b.	Arduino MEGA 2560 .....	59
c.	Controlador BeagleBone Black .....	60
4.6.	Selección de pantalla HMI.....	61
a.	Paneles operadores Siemens .....	62
b.	Paneles operadores Delta.....	62
c.	Paneles operadores Red Lion.....	63
d.	Paneles operadores TouchWin Xinje .....	63
4.7.	Implementación de la interfaz y protocolo de comunicación .....	66
4.8.	Desarrollo del software en el controlador Arduino.....	67
4.8.1.	Configuración inicial .....	67
4.8.2.	Función void setup().....	69
4.8.3.	Función void loop().....	69
4.9.	Desarrollo de la interfaz gráfica.....	71
4.9.1.	Ventana de inicio para las pruebas de funcionamiento .....	73
4.9.2.	Ventana de selección del tipo de motor .....	74
4.9.3.	Ventana de parámetros del motor .....	74
4.9.4.	Ventana de adquisición de datos .....	75
4.9.5.	Ventana de gráficas de curvas características.....	77

4.9.6.	Ventana de datos obtenidos.....	78
4.9.7.	Ventana de histórico de alarmas.....	78
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>80</b>
<b>5.</b>	<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
5.1.	Prueba de la interfaz de comunicación .....	80
5.2.	Prueba del circuito de control del electrodinamómetro y acondicionamientos.....	81
5.3.	Pruebas del circuito impreso para control y acondicionamientos....	81
5.4.	Pruebas para obtención de curvas de funcionamiento en forma manual. ....	82
5.4.1.	Motor de excitación independiente.....	83
5.4.2.	Motor shunt .....	85
5.4.3.	Motor de excitación serie .....	87
5.4.4.	Motor compound aditivo .....	89
5.5.	Pruebas para obtención de curvas de funcionamiento con la aplicación del módulo.....	91
5.5.1.	Motor de excitación independiente.....	91
5.5.2.	Motor de excitación shunt .....	93
5.5.3.	Motor de excitación serie .....	95
5.5.4.	Motor compound aditivo .....	97
5.6.	Análisis de resultados .....	99
5.6.1.	Análisis de curvas del motor de excitación independiente 004.060. ....	99
5.6.2.	Análisis de curvas del motor shunt 004.060.....	101
5.6.3.	Análisis de curvas del motor serie 004.001.....	103
5.6.4.	Análisis de curvas del motor compound aditivo 004.030.....	105
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>108</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>110</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>111</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>115</b>

**ANEXO A:** DATOS DEL FABRICANTE DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA 004.060, 004.030 Y 004.001

**ANEXO B:** CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN EL MÓDULO DIDÁCTICO

**ANEXO C:** DIAGRAMAS DE CONEXIONES ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS IMPLEMENTADAS EN EL MÓDULO

**ANEXO D:** DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA PRUEBAS DE CARGA EN FORMA MANUAL Y AUTOMÁTICA DE LOS MOTORES 004.001, 004.030 Y 004.060

**ANEXO E:** LÍNEAS DE PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR ARDUINO

**ANEXO F:** GUÍAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA EL USO DEL MÓDULO DIDÁCTICO

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variable independiente .....	35
<b>Tabla 2</b> Operacionalización de variable dependiente .....	35
<b>Tabla 3</b> Características de los componentes del circuito de control .....	43
<b>Tabla 4</b> Especificaciones técnicas de transductores de corriente DC .....	46
<b>Tabla 5</b> Especificaciones técnicas de transductores de voltaje DC .....	52
<b>Tabla 6</b> Voltajes de salida del módulo 004.038b .....	55
<b>Tabla 7</b> Especificaciones técnicas de placas controladoras .....	61
<b>Tabla 8</b> Especificaciones técnicas de pantallas HMI .....	64
<b>Tabla 9</b> Descripción de pines del módulo conversor MAX485 .....	66
<b>Tabla 10</b> Prueba de carga manual para el motor con excitación independiente 004.060 .....	83
<b>Tabla 11</b> Prueba de carga manual para el motor shunt 004.060 .....	85
<b>Tabla 12</b> Prueba de carga manual para el motor serie 004.001 .....	87
<b>Tabla 13</b> Prueba de carga manual para el motor compound 004.030 .....	89
<b>Tabla 14</b> Prueba de carga con el módulo para el motor de excitación independiente 004.060 .....	91
<b>Tabla 15</b> Prueba de carga con el módulo para el motor shunt 004.060 .....	93
<b>Tabla 16</b> Prueba de carga con el módulo para el motor serie 004.001 .....	95
<b>Tabla 17</b> Prueba de carga con el módulo para el motor compound aditivo 004.030 .....	97
<b>Tabla 18</b> Error entre curvas del motor shunt bajo corriente nominal .....	103
<b>Tabla 19</b> Error entre curvas del motor serie bajo corriente nominal .....	105
<b>Tabla 20</b> Error entre curvas del motor compound bajo corriente nominal .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Constitución de la máquina de corriente continua. ....	5
<b>Figura 2</b>	Motor de corriente continua elemental. ....	7
<b>Figura 3</b>	Conexión de un motor C.C. con excitación independiente.....	11
<b>Figura 4</b>	Conexión de un motor C.C. con excitación en shunt .....	12
<b>Figura 5</b>	Conexión de un motor C.C. con excitación en serie .....	13
<b>Figura 6</b>	Conexión de un motor C.C. con excitación en compound .....	14
<b>Figura 7</b>	Curvas características de un motor shunt.....	15
<b>Figura 8</b>	Curvas de características de un motor serie.....	16
<b>Figura 9</b>	Curvas características de $n=f(I_a)$ de los motores DC.....	17
<b>Figura 10</b>	Curvas características $T=f(I_a)$ de los motores DC .....	18
<b>Figura 11</b>	Característica $n=f(T)$ al variar el voltaje de armadura .....	20
<b>Figura 12</b>	Característica $n= f(T)$ al variar la resistencia de armadura .....	20
<b>Figura 13</b>	Característica $n=f(T)$ al variar la resistencia del inductor .....	21
<b>Figura 14</b>	Modelo de un freno por corrientes de Foucault.....	22
<b>Figura 15</b>	Resistencia shunt de 50A .....	23
<b>Figura 16</b>	Principio de funcionamiento de un sensor de efecto Hall.....	23
<b>Figura 17</b>	Convertidor reductor DC-DC.....	24
<b>Figura 18</b>	Partes principales de un Arduino UNO .....	26
<b>Figura 19</b>	Pantalla HMI DELTA DOP B.....	27
<b>Figura 20</b>	Conexión diferencial.....	29
<b>Figura 21</b>	Interferencia de señal diferencial .....	29
<b>Figura 22</b>	Señales eléctricas por la interface RS-485 .....	30
<b>Figura 23</b>	Arquitectura del proyecto .....	39
<b>Figura 24</b>	Circuito de control del electrodinamómetro.....	41
<b>Figura 25</b>	Circuito implementado para el control del electrodinamómetro ..	42
<b>Figura 26</b>	Sensor de corriente ACS712 Allegro .....	44
<b>Figura 27</b>	Transductor de corriente T201DC.....	45
<b>Figura 28</b>	Sensor de corriente H970LCA Hawkeye.....	46
<b>Figura 29</b>	Sensor de corriente EDCC - CX(5A <sub>dc</sub> ) - E1 – XA.....	46
<b>Figura 30</b>	Conexiones eléctricas SENECA T201DC .....	47
<b>Figura 31</b>	DIP-switches del transductor de corriente T201DC .....	48
<b>Figura 32</b>	Acondicionamiento de señal para sensores de corriente.....	49

<b>Figura 33</b> Ejemplos esquemáticos de divisores de voltaje .....	49
<b>Figura 34</b> Transductor de voltaje DC VTD3-420-24U-DIN .....	50
<b>Figura 35</b> Convertidor de voltaje Phoenix Contact .....	51
<b>Figura 36</b> Sensor de voltaje EDCV-VX(300VDC)-E1-XA .....	51
<b>Figura 37</b> Conexiones internas del convertidor de voltaje.....	52
<b>Figura 38</b> Partes del convertidor de voltaje .....	53
<b>Figura 39</b> Procedimiento para la configuración zero/span .....	54
<b>Figura 40</b> Bornes utilizados del convertidor .....	54
<b>Figura 41</b> Acondicionamiento de señal para el sensor de voltaje .....	55
<b>Figura 42</b> Acondicionamiento de señal para el sensor de torque.....	56
<b>Figura 43</b> Acondicionamiento de señal para el sensor de velocidad.....	57
<b>Figura 44</b> Circuito impreso de la placa de control y acondicionamientos de señales.....	58
<b>Figura 45</b> Placa de control y acondicionamientos de señal .....	58
<b>Figura 46</b> Arduino UNO.....	59
<b>Figura 47</b> Arduino MEGA 2560 .....	60
<b>Figura 48</b> Controlador BeagleBone .....	60
<b>Figura 49</b> Paneles operadores Simatic .....	62
<b>Figura 50</b> Delta Touch Panels HMI .....	63
<b>Figura 51</b> Paneles HMI Red Lion .....	63
<b>Figura 52</b> Touch Panel TH765 .....	64
<b>Figura 53</b> Vista frontal de pantalla delta modelo DOP- B07E515.....	65
<b>Figura 54</b> Vista trasera de pantalla delta modelo DOP- B07E515 .....	65
<b>Figura 55</b> Conversor MAX485.....	66
<b>Figura 56</b> Interfaz de comunicación .....	67
<b>Figura 57</b> Flujograma de configuración inicial .....	68
<b>Figura 58</b> Diagrama de flujo de la función void loop() .....	70
<b>Figura 59</b> Primeras acciones al iniciar las pruebas de funcionamiento.....	71
<b>Figura 60</b> Modo de funcionamiento automático .....	72
<b>Figura 61</b> Modo de funcionamiento manual .....	73
<b>Figura 62</b> Pantalla principal.....	73
<b>Figura 63</b> Ventana de selección de motores de corriente continua.....	74
<b>Figura 64</b> Mensaje de advertencia al seleccionar un motor energizado .....	74
<b>Figura 65</b> Ventana de parámetros del motor seleccionado .....	75

<b>Figura 66</b>	Ventana de adquisición de datos en modo automático.....	76
<b>Figura 67</b>	Ventana de adquisición de datos en modo manual .....	77
<b>Figura 68</b>	Ventana principal de curvas características.....	77
<b>Figura 69</b>	Ventana principal de datos obtenidos .....	78
<b>Figura 70</b>	Ventana de histórico de alarmas.....	79
<b>Figura 71</b>	Circuito para prueba de comunicación.....	80
<b>Figura 72</b>	Prueba de comunicación entre HMI y Arduino.....	80
<b>Figura 73</b>	Pruebas del circuito de control y acondicionamientos.....	81
<b>Figura 74</b>	Prueba del circuito impreso de control y acondicionamiento .....	82
<b>Figura 75</b>	Curva $n=f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida manualmente .....	83
<b>Figura 76</b>	Curva $I_a=f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida manualmente .....	84
<b>Figura 77</b>	Curva $P_u=f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida manualmente .....	84
<b>Figura 78</b>	Curva $\eta=f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida manualmente .....	84
<b>Figura 79</b>	Curva $n=f(M)$ del motor shunt obtenida manualmente .....	85
<b>Figura 80</b>	Curva $I_a=f(M)$ del motor shunt obtenida manualmente .....	86
<b>Figura 81</b>	Curva $P_u=f(M)$ del motor shunt obtenida manualmente.....	86
<b>Figura 82</b>	Curva $\eta=f(M)$ del motor shunt obtenida manualmente .....	86
<b>Figura 83</b>	Curva $n=f(M)$ del motor serie obtenida manualmente .....	87
<b>Figura 84</b>	Curva $I_a=f(M)$ del motor serie obtenida manualmente .....	88
<b>Figura 85</b>	Curva $P_u=f(M)$ del motor serie obtenida manualmente.....	88
<b>Figura 86</b>	Curva $\eta=f(M)$ del motor serie obtenida manualmente .....	88
<b>Figura 87</b>	Curva $n=f(M)$ del motor compound obtenida manualmente .....	89
<b>Figura 88</b>	Curva $I_a=f(M)$ del motor compound obtenida manualmente .....	90
<b>Figura 89</b>	Curva $P_u=f(M)$ del motor compound obtenida manualmente.....	90
<b>Figura 90</b>	Curva $\eta=f(M)$ del motor compound obtenida manualmente .....	90
<b>Figura 91</b>	Curva $n=f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida con el módulo.....	92
<b>Figura 92</b>	Curva $I_a=f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida con el módulo.....	92



<b>Figura 93</b> Curva $P_u = f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida con el módulo.....	92
<b>Figura 94</b> Curva $\eta = f(M)$ del motor de excitación independiente obtenida con el módulo.....	93
<b>Figura 95</b> Curva $n = f(M)$ del motor shunt obtenida con el módulo .....	94
<b>Figura 96</b> Curva $I_a = f(M)$ del motor shunt obtenida con el módulo .....	94
<b>Figura 97</b> Curva $P_u = f(M)$ del motor shunt obtenida con el módulo .....	94
<b>Figura 98</b> Curva $\eta = f(M)$ del motor shunt obtenida con el módulo .....	95
<b>Figura 99</b> Curva $n = f(M)$ del motor serie obtenida con el módulo .....	96
<b>Figura 100</b> Curva $I = f(M)$ del motor serie obtenida con el módulo .....	96
<b>Figura 101</b> Curva $P_u = f(M)$ del motor serie obtenida con el módulo .....	96
<b>Figura 102</b> Curva $\eta = f(M)$ del motor serie obtenida con el módulo .....	97
<b>Figura 103</b> Curva $n = f(M)$ del motor compound obtenida con el módulo.....	98
<b>Figura 104</b> Curva $I_a = f(M)$ del motor compound obtenida con el módulo....	98
<b>Figura 105</b> Curva $P_u = f(M)$ del motor compound obtenida con el módulo ..	98
<b>Figura 106</b> Curva $\eta = f(M)$ del motor compound obtenida con el módulo.....	99
<b>Figura 107</b> Curvas $n = f(M)$ para el motor de excitación independiente .....	100
<b>Figura 108</b> Curvas $I_a = f(M)$ para el motor de excitación independiente ....	100
<b>Figura 109</b> Curvas $P_u = f(M)$ para el motor de excitación independiente ..	100
<b>Figura 110</b> Curvas $\eta = f(M)$ para el motor de excitación independiente .....	101
<b>Figura 111</b> Curvas $n = f(M)$ para el motor shunt .....	101
<b>Figura 112</b> Curvas $I_a = f(M)$ para el motor shunt .....	102
<b>Figura 113</b> Curvas $P_u = f(M)$ para el motor shunt .....	102
<b>Figura 114</b> Curvas $\eta = f(M)$ para el motor shunt .....	102
<b>Figura 115</b> Curvas $n = f(M)$ para el motor serie .....	104
<b>Figura 116</b> Curvas $I = f(M)$ para el motor serie .....	104
<b>Figura 117</b> Curvas $P_u = f(M)$ para el motor serie .....	104
<b>Figura 118</b> Curvas $\eta = f(M)$ para el motor serie .....	105
<b>Figura 119</b> Curvas $n = f(M)$ para el motor compound.....	106
<b>Figura 120</b> Curvas $I_a = f(M)$ para el motor compound .....	106
<b>Figura 121</b> Curvas $P_u = f(M)$ para el motor compound.....	106
<b>Figura 122</b> Curvas $\eta = f(M)$ para el motor compound.....	107

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> Fuerza contraelectromotriz .....	7
<b>Ecuación 2</b> Velocidad de rotación de un motor de corriente continua .....	8
<b>Ecuación 3</b> Potencia eléctrica suministrada a la armadura .....	9
<b>Ecuación 4</b> Voltaje de armadura.....	9
<b>Ecuación 5</b> Potencia suministrada a la armadura en función de $R_a$ .....	9
<b>Ecuación 6</b> Potencia mecánica desarrollada por el motor .....	9
<b>Ecuación 7</b> Rendimiento del motor de corriente continua.....	9
<b>Ecuación 8</b> Potencia total absorbida por el motor.....	10
<b>Ecuación 9</b> Potencia mecánica en función del torque .....	10
<b>Ecuación 10</b> Par desarrollado por el motor de corriente continua .....	11
<b>Ecuación 11</b> Corriente de armadura del motor shunt .....	15
<b>Ecuación 12</b> Velocidad del motor serie.....	16
<b>Ecuación 13</b> Velocidad del motor compuesto acumulado .....	18
<b>Ecuación 14</b> Velocidad del motor compuesto diferencial.....	19
<b>Ecuación 15</b> Velocidad del motor shunt en función del torque .....	21
<b>Ecuación 16</b> Relación de trabajo de un convertidor reductor DC-DC.....	24

## **RESUMEN**

El presente trabajo de titulación describe el diseño e implementación de un módulo didáctico para la obtención de curvas características de funcionamiento bajo carga de los motores de corriente continua, el sistema consta de 5 partes: la primera consiste en sensar las magnitudes físicas, como voltaje DC, corriente DC, velocidad y torque, además del acondicionamiento de señales eléctricas; la segunda consiste en la programación de la placa Arduino para el escalamiento de las señales y presentación de estas en unidades de ingeniería; la tercera está relacionada con el control del electrodinamómetro disponible en el laboratorio; la cuarta está relacionada con la comunicación y establecimiento del protocolo MODBUS entre la placa Arduino y la pantalla HMI; la quinta consiste en la visualización de los datos y curvas características de los motores mediante la respectiva configuración y programación de la pantalla HMI industrial. La implementación del módulo se realiza para que el estudiante optimice tiempos de estudio en un ambiente laboral de seguridad y confianza a la hora de realizar las pruebas ya que el sistema brinda un mejor control del electrodinamómetro, además de obtener y procesar los datos con mayor exactitud y precisión en comparación a las prácticas realizadas manualmente con los instrumentos tradicionales. Para demostrar las ventajas que brinda el módulo se realizan pruebas de carga en forma automática o manual y así obtener las curvas de velocidad, corriente de armadura, potencia y rendimiento en función del torque aplicado; resultados que se contrastan con las curvas dadas por el fabricante.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **LABORATORIO DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS - MÓDULO DIDÁCTICO**
- **MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA**
- **ELECTRODINAMÓMETRO**
- **TECNOLOGÍA ARDUINO**
- **PROTOCOLO MODBUS**

## **ABSTRACT**

The present research project describes the design and implementation of a didactic module to obtain characteristic curves of operation under load of DC motors, the system consists of 5 parts: the first consists in sensing the physical quantities such as DC voltage , DC current, speed and torque, in addition to the conditioning of electrical signals; the second consists in the programming of the Arduino board for the scaling of the signals and their presentation in engineering units; the third is related to the control of the electrodyamometer available in the laboratory; the fourth is related to the communication and establishment of the MODBUS protocol between the Arduino board and the HMI screen; the fifth consists in the visualization of data and characteristic curves of the motors by means of the respective configuration and programming of the industrial HMI screen. The implementation of the module is done so that the student optimizes study times in a work environment of safety and confidence when carrying out the tests as the system provides a better control of the electrodyamometer, in addition to obtaining and processing the data with greater accuracy compared to the manual practice with traditional instruments. In order to demonstrate the advantages of the module, load tests are carried out automatically or manually to obtain the velocity curves, armature current, power and performance depending on the applied torque; results that contrast with the curves given by the manufacturer.

### **KEYWORDS:**

- **LABORATORY OF ELECTRICAL DRIVES - DIDACTIC MODULE.**
- **MOTORS OF DIRECT CURRENT**
- **ELECTRODYNAMOMETER**
- **ARDUINO TECHNOLOGY**
- **MODBUS PROTOCOL**

## **CAPÍTULO I**

### **1. PROBLEMÁTICA**

#### **1.1. Planteamiento del Problema**

Actualmente el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga no dispone de un equipo o módulo con las condiciones y características necesarias para la adquisición de datos y procesamiento de los mismos para la inmediata generación de curvas características de operación bajo carga de motores de corriente continua por lo que las prácticas, consisten en armar el circuito con el motor correspondiente, aplicar carga mediante un electrodinamómetro y luego obtener datos o mediciones de: corriente, voltaje, velocidad y torque; todo esto manualmente induciendo muchas veces en error de paralaje ya que el laboratorio consta con algunos instrumentos analógicos, posteriormente se analizan estos datos, se calcula la potencia útil, potencia total y rendimiento para finalmente obtener las curvas respectivas de operación del motor.

Muchas de las veces todo este procedimiento se lo realiza en un grupo de trabajo de 4 a 5 estudiantes dificultando aún más el proceso de aprendizaje ya que lo ideal sería contar con una mesa de trabajo por estudiante, además la parte más importante de la práctica, que es el análisis de datos por lo general no se lo alcanza a realizar en el laboratorio forzando al estudiante a realizar esta tarea en casa a los 3 o 4 días de realizada la práctica lo cual dificulta y frena el proceso de aprendizaje.

#### **1.2. Antecedentes**

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga dispone en sus instalaciones el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos, el cual permite a los estudiantes interactuar y desarrollar prácticas con las máquinas existentes, entre ellas motores de corriente continua y de esa manera complementar el aprendizaje al combinar los conocimientos teóricos con la práctica. Las máquinas existentes en el Laboratorio son dispositivos

reales de pequeña potencia que permiten la medición y análisis de sus características de operación bajo carga.

A nivel nacional son pocas las universidades que cuentan con laboratorios de máquinas eléctricas de primer nivel debido al alto costo que representa adquirir módulos de pruebas de motores eléctricos ya sean estos de corriente continua o de corriente alterna, que permitan la adquisición y procesamiento de señales para posteriormente presentar estos datos al usuario; por esta razón una de las opciones para mejorar y actualizar los laboratorios ha sido diseñar y construir esta clase de módulos o banco de pruebas. La mayoría de los fabricantes de motores DC tienen sus respectivos bancos de pruebas para caracterizar los motores que fabrican y de esa manera dar a conocer las características técnicas de los mismos.

En la actualidad existen muchas técnicas y proyectos basados en la adquisición de datos y procesamiento de señales analógicas para los cuales se usan diversos tipos de controladores dependiendo del campo de aplicación como, por ejemplo: PLC, Microcontroladores, Single Board Computer SBC, etc. Todos estos controladores pueden tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, y controlar varios actuadores o elementos de control final.

### **1.3. Justificación e importancia**

Todos los aspectos citados anteriormente influyen directamente en la calidad de la educación y por ende en el proceso de acreditación y evaluación de la universidad ya que uno de los criterios a calificar por el CEAACES es precisamente laboratorios, centros de simulación y talleres. “Este subcriterio evalúa los laboratorios, centros de simulación y/o talleres, que deben ser funcionales, debidamente equipados y con espacios/equipos suficientes en relación con el número de estudiantes para garantizar el adecuado desarrollo de las actividades académicas planificadas” (CEAACES, 2015)

En el aspecto de equipamiento se calificará la existencia, condiciones y características de los equipos, mobiliario e insumos de cada uno de los laboratorios, centros de simulación y talleres con los que cuenta la carrera.

Se considera importante actualizar los equipos que se encuentran en los laboratorios al utilizar tecnología de vanguardia, abaratando costos de construcción. En el proyecto de investigación se diseñará y construirá un módulo didáctico para determinar las curvas características de funcionamiento en operación bajo carga de los motores de corriente continua ya que el laboratorio de Accionamientos Eléctricos no cuenta con un módulo flexible de estas características. De esta manera se justifica la importancia del presente proyecto de investigación.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo General**

Realizar el diseño e implementación de un módulo didáctico que permita obtener las curvas características de funcionamiento en operación bajo carga de los motores de corriente continua, para ser visualizadas en un interfaz HMI industrial, en el laboratorio de Accionamientos Eléctricos.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Obtener datos de magnitudes físicas como: corriente de armadura y de campo, voltaje de alimentación, velocidad del motor y par aplicado a la máquina.
- Acondicionar todas las señales de salida de los transductores implementados, para poder ser ingresadas en el controlador.
- Implementar un circuito electrónico que permita el control de carga desde el controlador correspondiente.
- Desarrollar un programa en el entorno o lenguaje de programación específico del controlador, para permitir la lectura, escritura, procesamiento, control y comunicación, por medio de una interfaz HMI.
- Desarrollar una interfaz HMI amigable con el usuario que permita el control, adquisición, visualización de datos y curvas de funcionamiento de los motores DC.

- Comparar las curvas obtenidas por el módulo didáctico de motores de corriente continua con las curvas obtenidas manualmente, tomando como referencia las curvas proporcionadas por el fabricante para determinar el error que existe entre ellas.

### **1.5. Alcance**

Mediante el diseño e implementación del módulo didáctico se actualizará el laboratorio de Accionamientos Eléctricos, contribuyendo al proceso de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes, agilitando el análisis y validación de resultados obtenidos en las prácticas de máquinas eléctricas.



## CAPÍTULO II

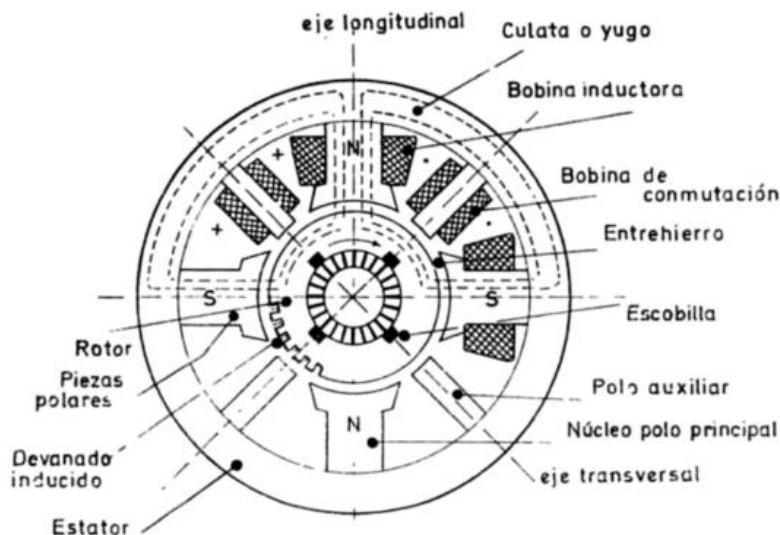
### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Fundamentación teórica

##### 2.1.1. Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua son máquinas eléctricas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, la ventaja principal de estos motores con respecto a los motores de inducción es su flexibilidad para el control de velocidad y torque, por lo que tienen algunas aplicaciones en diversos accionamientos industriales. Sin embargo, debido al desarrollo de la electrónica de potencia, su aplicación en estos campos se ha ido reduciendo ya que el motor de corriente alterna tiene un coste de fabricación y mantenimiento más reducido. (Mora, 2003)

El motor de corriente continua posee una constitución física muy similar a las máquinas eléctricas giratorias en general, además de poseer en su constitución ciertas particularidades que las diferencian de otros motores. En la Figura 1 se observa las partes principales de un motor DC.



**Figura 1 Constitución de la máquina de corriente continua.**

**Fuente:** (Cortes Cherta, 1994)

- **Estator:** Formado por una corona de material ferromagnético, fundición de acero magnético o tubo de hierro, denominado culata o

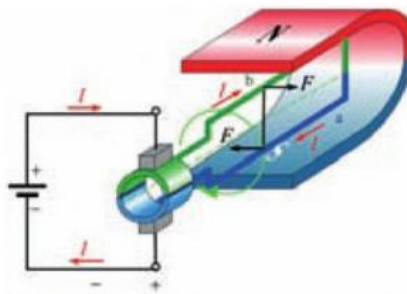
yugo, en cuyo interior, distribuidos y en número par van dispuestos unos salientes, acuñaos y apilados, con una expansión en sus extremos llamados polos, alrededor de los polos se encuentran unas bobinas de hilo de cobre aislado.

- **Rotor:** Formado por material ferromagnético, a base de chapas de hierro con poco contenido de silicio, aisladas unas de otras con una capa de barniz, en la chapa magnética va alojado el devanado del inducido de la máquina.
- **Colector de delgas:** Se encuentra fijado al eje, cada delga va unida eléctricamente al punto de conexión de una bobina con otra del devanado, la función del colector es la de convertidor de frecuencia.
- **Portaescobillas:** Constituido por hierro o por un material metálico, en el cual van sujetos las cajas portaescobillas de bronce o de latón que retienen a las escobillas.
- **Escobillas:** Son las que se encargan de establecer el contacto eléctrico entre las delgas del colector y el circuito de corriente continua exterior.

### 2.1.2. Principios de funcionamiento de motores de corriente continua

Su funcionamiento se basa en la generación de un par de fuerzas que aparecen en los conductores de la armadura o inducido cuando estos son recorridos por una corriente eléctrica, siempre y cuando estos estén sometidos a la acción de un campo magnético producido por el circuito inductor.

En la Figura 2 se ha representado el aspecto de un motor de corriente continua elemental para su entendimiento. Los polos magnéticos del imán, situados siempre en el estator, son los encargados de producir el campo magnético del inductor. La espira, que se ha situado en el rotor, es recorrida por una corriente continua que se suministra a través de un anillo de cobre cortado por la mitad (delgas). Las dos mitades se aíslan eléctricamente y se sitúan sobre ellas unos contactos deslizantes de carbón (escobillas), de tal forma que la corriente aplicada por la fuente de alimentación pueda llegar a los conductores del rotor. (Alcalde San Miguel, 2011)



**Figura 2 Motor de corriente continua elemental.**

**Fuente:** (Alcalde San Miguel, 2011)

Las corrientes que circulan por ambos lados de la espira son contrarias, aparecen fuerzas también contrarias a cada lado activo de la espira. Para que el sentido de giro siempre sea el mismo, el par de fuerzas siempre deberá actuar en el mismo sentido. Con el colector de delgas se logra este objetivo haciendo que la corriente siempre circule en el mismo sentido respecto al campo magnético. Para conseguir que el motor gire en uno u otro sentido hay que lograr invertir el sentido de par de fuerzas, esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente del motor y manteniendo fijo el campo magnético inductor. (Alcalde San Miguel, 2011)

#### a. Fuerza contraelectromotriz

Cuando el motor gira, impulsado gracias al par de giro desarrollado por los conductores del rotor cuando son recorridos por una corriente, dichos conductores cortan en su movimiento a las líneas de campo magnético de la armadura, lo que hace que se induzca en ellos una fuerza contraelectromotriz  $E_0$  (es como si el motor se comportara como un generador de CC). El sentido de dicha fuerza tiende a oponerse a la fuerza que la produjo, es decir, a la corriente del rotor y a la tensión aplicada al motor.

Esta llamada fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.), produce un efecto de limitación de corriente del rotor. El valor de la f.c.e.m. se calcula exactamente igual que la f.e.m. de un dínamo C.C. (Alcalde San Miguel, 2011)

$$E_0 = \frac{Zn\Phi}{60} = K_E n\Phi = V - I_a R_a$$

EC.1

**Donde:**

$E_0 =$  Fuerza conraelectromotriz [V]

$K_E =$  Es una constante que depende del número de espiras en la armadura y del tipo de devanado

$n =$  Velocidad de rotación del motor[rpm]

$\Phi =$  Flujo por polo [mWb]

$V =$  Voltaje aplicado [V]

$I_a =$  Corriente de armadura [A]

$R_a =$  Resistencia de armadura [ $\Omega$ ]

**b. Velocidad de rotación**

Cuando un motor de C.C. impulsa una carga la caída  $IR$  provocada por la resistencia de la armadura siempre es pequeña comparada con el voltaje de suministro  $V$ . Esto indica que la f.c.e.m.  $E_0$  es casi igual a  $V$ . La velocidad de rotación de un motor de corriente continua se puede determinar despejando  $n$  de la Ecuación 1 sin tener en cuenta la caída de tensión producida en las escobillas.

$$n = \frac{60 E_s}{Z\Phi} = \frac{V - I_a R_a}{K_E \Phi} \quad \text{EC.2}$$

**Donde:**

$E_s =$  Voltaje de armadura[V]

$K_E =$  Es una constante que depende del número de espiras en la armadura y del tipo de devanado

$n =$  Velocidad de rotación del motor[rpm]

$\Phi =$  Flujo por polo [mWb]

$V =$  Voltaje aplicado [V]

$I_a =$  Corriente de armadura [A]

$R_a =$  Resistencia de armadura [ $\Omega$ ]

Como se observa en la Ecuación 2 la velocidad de giro de un motor de C.C. puede aumentar de tres formas: incrementando el voltaje de armadura, disminuyendo la corriente del inducido por medio de una resistencia (método poco usado debido a las pérdidas por efecto Joule) y disminuyendo el flujo producido por el campo de excitación. (Alcalde San Miguel, 2011)

### c. Potencia eléctrica y mecánica

La potencia eléctrica  $P_a$  que es suministrada a la armadura es igual al voltaje de suministro del motor  $V$  multiplicado por la corriente de armadura  $I_a$ .

$$P_a = VI_a \quad \text{EC.3}$$

Sin embargo,  $V$  es igual a la suma de  $E_0$  más la caída  $IR$  en la armadura.

$$V = E_0 + I_a R_a \quad \text{EC.4}$$

Deducimos que:

$$P_a = (E_0 + I_a R_a) I_a$$

$$P_a = E_0 I_a + I_a^2 R_a \quad \text{EC.5}$$

El término  $I_a^2 R_a$  representa el calor disipado en la armadura, por lo que el término importante es  $E_0 I_a$  ya que representa la potencia eléctrica que es convertida en potencia mecánica, por lo tanto, la potencia mecánica del motor resulta ser igual al producto de la f.c.e.m multiplicado por la corriente de armadura como se observa en la Ecuación 6. (Wildi, 2007)

$$P = E_0 I_a \quad \text{EC.6}$$

*Donde:*

$P = \text{Potencia mecánica desarrollada por el motor [W]}$

### d. Rendimiento del motor de corriente continua

El rendimiento de un motor indica la relación porcentual que existe entre la potencia mecánica del motor y la potencia total absorbida por el mismo como se observa en la Ecuación 7.

$$\eta = \frac{P}{P_T} (100) \quad \text{EC.7}$$

**Donde:**

$P_T =$  Potencia total absorbida por el motor [W]

La potencia total se puede expresar mediante la Ecuación 8.

$$P_T = VI_g \quad \text{EC.8}$$

**Donde:**

$I_g =$  Corriente total absorbida por el motor [A]

Dependiendo del tipo de motor  $I_g$  puede ser igual a la suma de la corriente de armadura y la corriente de excitación en caso de tratarse de un motor shunt o compound mientras que para un motor serie  $I_g$  es igual a la corriente de armadura o de excitación. En muchos casos no se conoce la potencia que el motor toma de la red eléctrica para su funcionamiento, sin embargo, sí se conoce la potencia mecánica que el mismo puede entregar en su eje y el rendimiento con el que lo hace. (Alcalde San Miguel, 2011)

#### e. Par desarrollado por el motor de corriente continua

Para los diferentes tipos de motores de corriente continua la potencia mecánica  $P$  en función del torque viene determinada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{nT}{9.55} \quad \text{EC.9}$$

**Donde:**

$P =$  Potencia mecánica desarrollada por el motor [W]

$n =$  Velocidad de rotación[rpm]

$T =$  Par o momento de torsión[Nm]

Combinando las ecuaciones 6 y 9 se obtiene la Ecuación 10.

$$\frac{nT}{9.55} = E_0 I_a$$

$$\frac{nT}{9.55} = K_E n \Phi I_a$$

Así que el par o momento de torsión desarrollado por el motor está dado por la siguiente expresión:

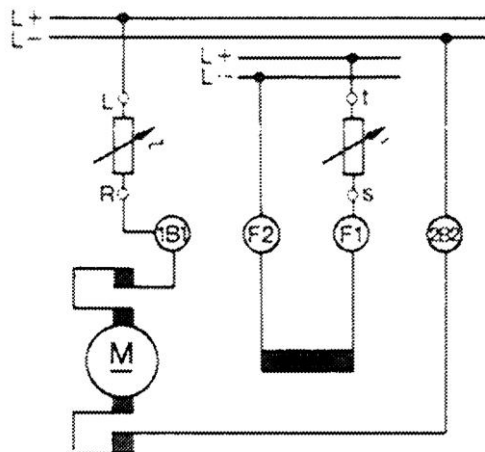
$$T = K_T \Phi I_a$$

EC.10

En consecuencia, la ecuación a ser utilizada depende en gran medida de los datos de partida para el cálculo del par o de los datos de placa que proporcione el fabricante del motor. (Wildi, 2007)

### 2.1.3. Motor con excitación independiente

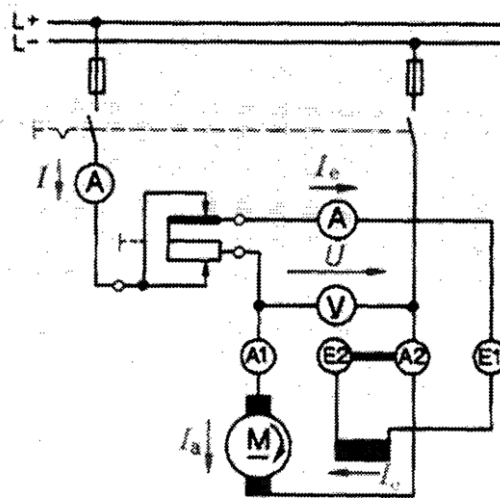
El devanado de excitación y el de inducido de un motor de corriente continua con excitación independiente se alimentan mediante dos fuentes de voltaje diferentes, cuyos voltajes suelen también ser valores distintos como se muestra en la Figura 3. Los motores de corriente continua cuyo campo magnético se obtiene mediante imanes permanentes deben considerarse también como motor con excitación independiente. Los motores con excitación independiente presentan un comportamiento de régimen análogo a los motores con excitación en derivación, o sea, que su velocidad angular es prácticamente constante e independiente de las variaciones de la carga. Su velocidad se puede gobernar mediante el voltaje del devanado del inducido o mediante la intensidad de la corriente de excitación. (Müller, 1987)



**Figura 3 Conexión de un motor C.C. con excitación independiente**  
Fuente: (Alcalde San Miguel, 2011)

#### 2.1.4. Motor con excitación en derivación o shunt

El motor con excitación en derivación también es llamado motor shunt, en este motor el devanado del inducido y el de excitación se encuentran conectados en paralelo como se observa en la Figura 4. Por tanto, el devanado del inductor, o sea, el de excitación, está sometido directamente al voltaje de la red, con lo cual su campo magnético es prácticamente independiente de la velocidad angular y de la carga.



**Figura 4 Conexión de un motor C.C. con excitación en shunt**

**Fuente:** (Alcalde San Miguel, 2011)

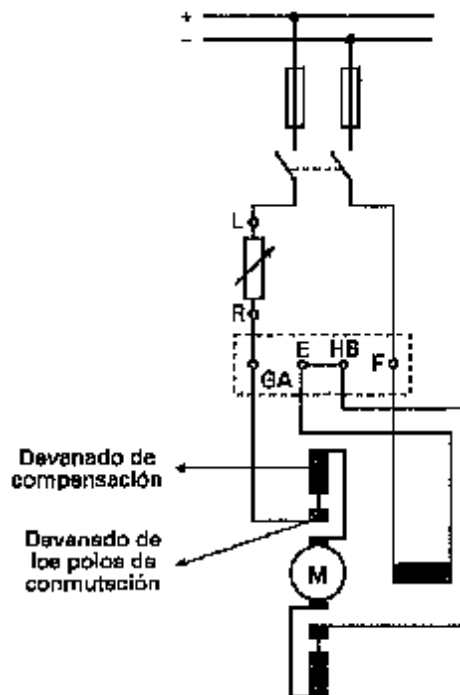
El comportamiento de un motor de excitación en derivación se caracteriza por una ligera reducción de las revoluciones  $n$  cuando aumenta la carga. El rendimiento es relativamente bajo para cargas pequeñas, pues las pérdidas de excitación, que son constantes e independientes de la carga, se ponen claramente de manifiesto. (Müller, 1987)

#### 2.1.5. Motor con excitación serie

En el motor de corriente continua con excitación en serie, o simplemente motor serie, todos los devanados están conectados en serie como se muestra en la Figura 5, por lo que la corriente que circula por todos ellos es la misma, por esta razón las revoluciones  $n$  dependen en gran medida de la carga aplicada. Cuando al motor se le aplica carga aumenta la intensidad de corriente del inducido, y también aumenta la corriente de excitación. Al reducir la carga aplicada aumenta de manera brusca las revoluciones. En



vacío la velocidad crece excesivamente, y el motor se embala, los motores con excitación en serie no deberán funcionar si no se encuentran con carga.



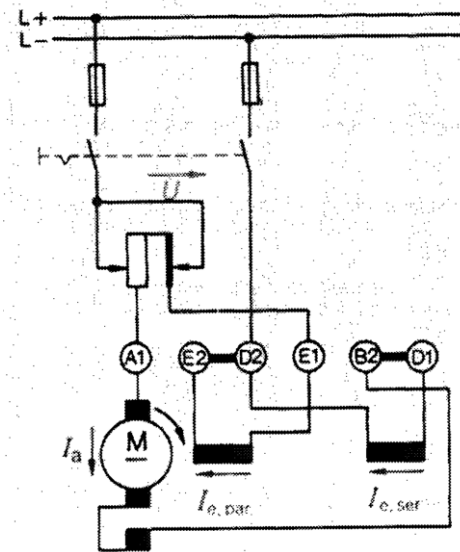
**Figura 5 Conexión de un motor C.C. con excitación en serie**

**Fuente:** (Alcalde San Miguel, 2011)

Un motor serie se caracteriza por presentar un gran par de arranque y por tener una velocidad angular  $n$  que depende mucho de la carga. Los motores con excitación en serie deben ponerse en marcha a través de un reóstato de arranque para limitar la intensidad de su corriente de arranque. (Müller, 1987)

### 2.1.6. Motor de excitación compound

En los motores de corriente continua de excitación compound se divide el devanado de excitación en dos partes, una de ellas se conecta en serie con el inducido y la otra en derivación como se lo muestra en la Figura 6. Los motores compound se utilizan en aquellos casos en los que el par de arranque de los motores shunt no es capaz de mover la carga en los primeros momentos, como, por ejemplo, en dispositivos de elevación. (Alcalde San Miguel, 2011)



**Figura 6 Conexión de un motor C.C. con excitación en compound**

**Fuente:** (Alcalde San Miguel, 2011)

El motor compound reúne las propiedades de los motores serie y shunt, pues posee un devanado serie y el otro en paralelo. El motor compound presenta comportamientos de régimen diferentes según como se haya proyectado. Un motor compound normal presenta un par de arranque ligeramente inferior al de un motor serie equivalente, mientras que al cargarlo su velocidad angular  $n$  se reduce algo más que un motor shunt; en vacío no se embala. (Müller, 1987)

### 2.1.7. Curvas características de los motores de corriente continua

Las curvas características de un motor en general permiten determinar o predecir el comportamiento que tendrá este al variar la carga mecánica aplicada al eje, en el presente proyecto de investigación se analizan las siguientes curvas características:

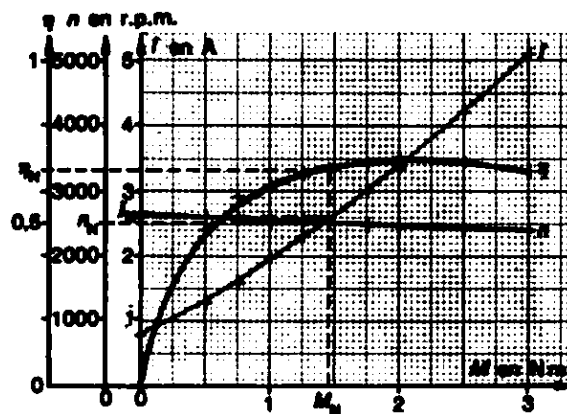
- Corriente de armadura en función del torque  $I_a - T$
- Velocidad en función del torque  $n - T$
- Potencia en función del torque  $P - T$
- Eficiencia en función del torque  $\eta - T$

a. **Curvas características de funcionamiento de un motor en derivación (Shunt).**

Considerando que la corriente en el circuito de campo en derivación, es constante; al aumentar la carga mecánica aplicada al eje del motor este se desacelera disminuyendo la velocidad del motor y por ende reduciendo la fuerza contraelectromotriz  $E = K_E \Phi n$ ; como consecuencia de esto se incrementa la corriente de armadura como se puede apreciar en la Ecuación 11.

$$I_a = \frac{V - E}{R_a} \quad \text{EC.11}$$

Al incrementarse la corriente de armadura se incrementará también el par electromagnético  $T = K_T \Phi I_a$ , hasta alcanzar o igualar al par resistente ofrecido por la carga; por esta razón en el caso del motor shunt y del motor con excitación independiente, se puede expresar la curva  $I_a - T$  como una relación que posee una tendencia lineal, como se muestra en la Figura 7.



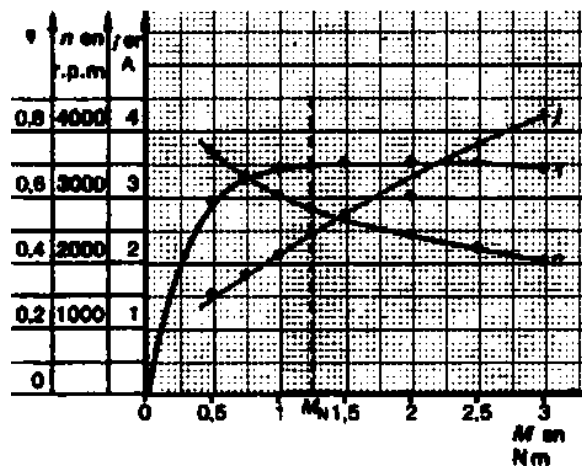
**Figura 7 Curvas características de un motor shunt**

Fuente: (Müller, 1987)

La caída de velocidad con el aumento del par en la curva característica anterior es pequeña, lo que indica que los motores shunt y de excitación independiente presentan una característica de carga dura o rígida y por ello se utilizan en aquellas aplicaciones que requieran una velocidad casi constante como por ejemplo ventiladores, bombas centrífugas, cintas transportadoras, máquinas herramientas, etc. (Mora, 2003)

## b. Curvas características de funcionamiento de un motor con excitación serie

En este tipo de motores, las corrientes de armadura y de campo son iguales, por esta razón si no hay una saturación en el circuito magnético, el flujo producido por el campo en serie es directamente proporcional a la corriente de armadura  $I_a$ . Al ser el flujo de la máquina dependiente de la corriente del inducido  $\Phi = K_I I_a$ , la ecuación básica del par para el funcionamiento de un motor serie resulta  $T = K'' I_a^2$ . Mientras el núcleo del campo esté sin saturar, es decir, en la parte lineal de su curva de magnetización, la relación entre el par y la corriente de carga del motor serie es exponencial, como se muestra en la Figura 8. (Kosow, 1993).



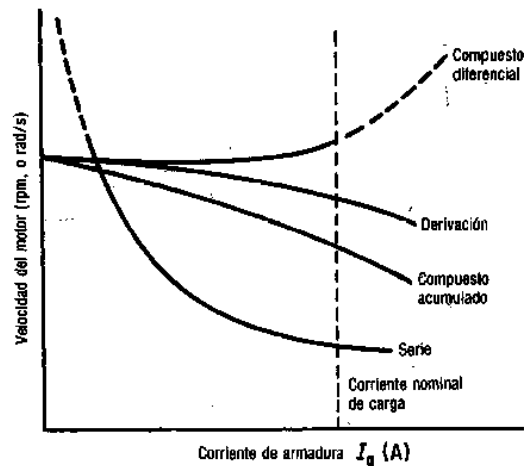
**Figura 8** Curvas de características de un motor serie  
Fuente: (Müller, 1987)

La ecuación básica de la velocidad también se modifica para este tipo de motores ya que el flujo producido por el campo en serie es proporcional sólo a la corriente de armadura, se puede decir que la velocidad es:

$$n = \frac{V - I_a(R_a + R_s)}{K_E \Phi} = K' \frac{V - I_a(R_a + R_s)}{I_a} \quad \text{EC.12}$$

Analizando la Ecuación 12 se puede determinar que al aplicar una carga mecánica pequeña al eje del rotor de un motor serie, la corriente de armadura es pequeña, produciendo una velocidad anormalmente alta, es decir en vacío, con poca corriente en la armadura y flujo en el campo, la

velocidad es demasiado alta; por esta razón los motores serie siempre se trabajan acoplados a una carga mecánica. Sin embargo, cuando aumenta la carga, el numerador de la fracción de la Ecuación 12 decrece con mayor rapidez de la que aumenta el denominador por esta razón la velocidad disminuye rápidamente como se muestra en la Figura 9. (Kosow, 1993)

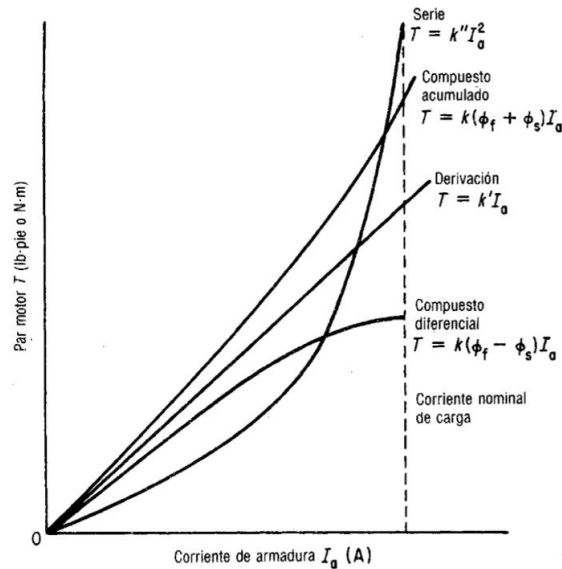


**Figura 9 Curvas características de  $n=f(I_a)$  de los motores DC**  
Fuente: (Kosow, 1993)

### c. Curvas características de funcionamiento de un motor compound

En este tipo de motores el devanado de excitación serie puede conectarse de forma que refuerce el campo derivación (aditivo) o que se oponga al mismo (diferencial) pero independientemente de la composición, la corriente en el circuito en derivación y el flujo del campo  $\Phi_f$ , durante el arranque o el funcionamiento, son constantes.

La ecuación básica del torque para la operación de un motor compuesto aditivo es,  $T = K(\Phi_f + \Phi_s)I_a$  en la cual el flujo del campo en serie  $\Phi_s$  es función de la corriente de armadura  $I_a$ . Comenzando con un flujo igual al del campo en derivación sin carga y uno que aumente con la corriente de armadura, el motor compuesto acumulado produce una curva de par que siempre es más alta que la del motor derivación para la misma corriente de armadura, como se ve en la Figura 10. (Kosow, 1993)



**Figura 10 Curvas características  $T=f(I_a)$  de los motores DC**  
**Fuente: (Kosow, 1993)**

Para el motor compuesto diferencial, la Ecuación básica del torque es  $T = K(\Phi_f - \Phi_s)I_a$  siendo  $\Phi_s$  función de la corriente de armadura  $I_a$  y  $\Phi_f$  constante. Comenzando con un flujo igual al del campo en derivación sin carga, cualquier valor de la corriente de armadura reduce el flujo total y por lo tanto el par. Por esta razón el motor compuesto diferencial produce una curva de par que siempre es menor que la del motor derivación. (Kosow, 1993)

La ecuación básica de la velocidad para el motor compuesto acumulado se puede formular de la siguiente manera:

$$n = K \frac{V - I_a(R_a + R_s)}{\Phi_f + \Phi_s} \quad \text{EC.13}$$

Analizando la Ecuación 13 se puede determinar que a medida que se incrementa la carga el flujo producido por el campo en serie también aumenta; por esta razón la velocidad del motor compuesto acumulado disminuirá más que la del motor derivación, al aplicar la carga, como se ve en la Figura 9.

La Ecuación 14 es la expresión matemática básica de la velocidad para el motor compuesto diferencial, se puede formular de la siguiente manera:

$$n = K \frac{V - I_a(R_a + R_s)}{\Phi_f - \Phi_s} \quad \text{EC.14}$$

En este tipo de motor cuando aumenta la carga, la velocidad aumenta. Esta condición establece una inestabilidad dinámica, por esta razón, los motores compuestos diferenciales casi nunca se usan.

### **2.1.8. Control de velocidad del motor con excitación independiente y en derivación (Shunt).**

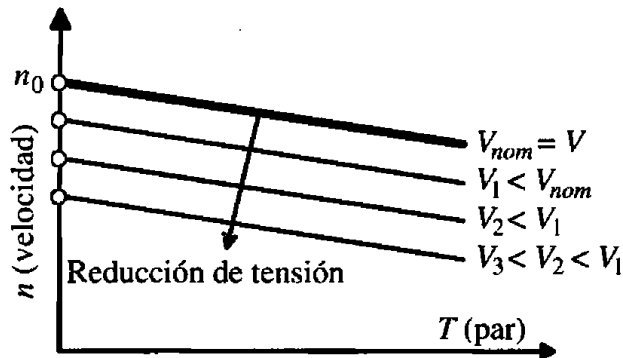
La regulación de velocidad de los motores derivación e independiente se consigue de las formas siguientes:

- Ajustando la tensión del inducido
- Variando la resistencia del circuito del inducido (aunque este procedimiento es poco práctico por las pérdidas que se producen, y de ahí su bajo rendimiento)
- Cambiando la resistencia del circuito de excitación para regular el flujo de campo del motor.

#### **a. Regulación de velocidad por cambio en la tensión aplicada al inducido**

Este sistema de control se aplica solamente a motores con excitación independiente, ya que estos tienen separados los circuitos de excitación y de inducido. Analizando la Ecuación 2, se puede observar que al reducir la tensión de alimentación  $V$  se produce una disminución de la velocidad de la máquina y por el contrario si se aumenta la tensión aplicada, se produce una elevación de la velocidad. (Mora, 2003)

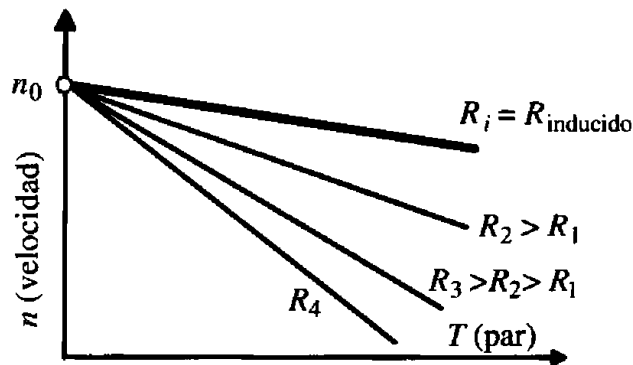
En la Figura 11 se muestran las curvas velocidad - par que se obtienen cuando se regula la velocidad de un motor DC con excitación independiente variando el voltaje de armadura. La característica principal de estas curvas es que mientras disminuye el voltaje aplicado a la armadura se reduce obviamente la velocidad, pero la pendiente de las curvas permanece constante ya que en este tipo de control no se altera el flujo del campo ni la resistencia en serie del inducido.



**Figura 11 Característica  $n=f(T)$  al variar el voltaje de armadura**  
Fuente: (Mora, 2003)

**b. Regulación de velocidad por cambio en la resistencia en serie con el inducido**

Este sistema de control es válido para los motores con excitación en derivación y con excitación independiente, la desventaja de este sistema es su factor antieconómico debido a las elevadas pérdidas por efecto Joule, es por ello que tiene muy pocas aplicaciones o se utiliza solamente en motores de pequeña potencia. Analizando la Ecuación 15 de la velocidad se puede determinar que al aumentar la resistencia que se añade al circuito del inducido la velocidad de la máquina disminuye. (Mora, 2003)



**Figura 12 Característica  $n=f(T)$  al variar la resistencia de armadura**  
Fuente: (Mora, 2003)

En la Figura 12 se muestra la evolución de las rectas correspondientes a este sistema de control, se puede observar que todas las rectas que se obtienen (que se denominan características artificiales o reostáticas) parten desde la velocidad en vacío debido a que la velocidad en vacío (torque igual a cero) no depende de la resistencia de armadura; depende solamente de la

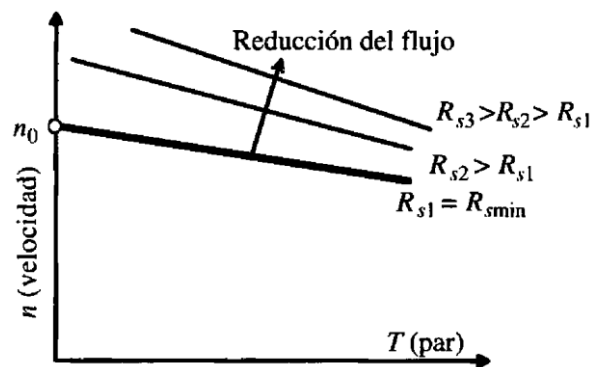


tensión aplicada  $V$  y del flujo inductor  $\Phi$ . La explicación analítica de lo anterior se justifica con la ayuda de la Ecuación 15.

$$n = \frac{V}{K_E \Phi} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi^2} T \quad \text{EC.15}$$

### c. Regulación de velocidad por cambio en la resistencia en serie con el inductor

Este sistema de control es válido para los motores con excitación en derivación y con excitación independiente; consiste en introducir una resistencia adicional en el circuito del inductor para disminuir la corriente de excitación y por ende el flujo inductor, como consecuencia de ello se incrementa la velocidad del motor. La explicación analítica de lo anterior se justifica con la ayuda de la Ecuación 15. De esta manera, si se desprecia la reacción de inducido del motor, se puede observar en la Figura 13 que al varir la resistencia del inductor se obtienen un haz de rectas que están por encima de la característica natural de la máquina. (Mora, 2003)

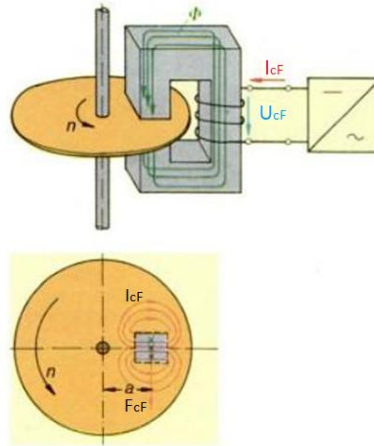


**Figura 13 Característica  $n=f(T)$  al variar la resistencia del inductor**  
Fuente: (Mora, 2003)

#### 2.1.9. Freno por corrientes de Foucault con dinamómetro

El principio de funcionamiento de este método de frenado consiste en un disco de material conductor (Al o bien Cu) que gira entre los polos de un electroimán; debido a esto se inducirá una tensión y ya que el circuito eléctrico está cerrado circularán remolinos de corriente  $I_{CF}$  que dan lugar a una fuerza  $F_{CF}$  en la dirección indicada en la Figura 14. Como el punto de

aplicación de la fuerza se encuentra situado a una distancia  $a$  del eje de giro aparecerá un par resistente  $M$ , que se opone al par motor provocando el freno de la maquina motriz. (Müller, 1987)



**Figura 14 Modelo de un freno por corrientes de Foucault**  
Fuente: (Müller, 1987)

El par resistente del freno de corrientes de Foucault puede modificarse variando la intensidad de la corriente de excitación del electroimán. El freno por corrientes de Foucault sólo actúa cuando el eje gira, puesto que en reposo no se inducen corrientes de Foucault. (Müller, 1987)

### 2.1.10. Sensores y Transductores

Los sensores son dispositivos que miden la magnitud de una señal determinada y producen una señal de salida que es función de la variable medida. Los transductores son dispositivos que convierten una señal de una forma física en una señal correspondiente, pero de otra forma física distinta; en otras palabras, se podría decir que un transductor es un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. (Pallás, 2003)

#### a. Sensor de corriente DC

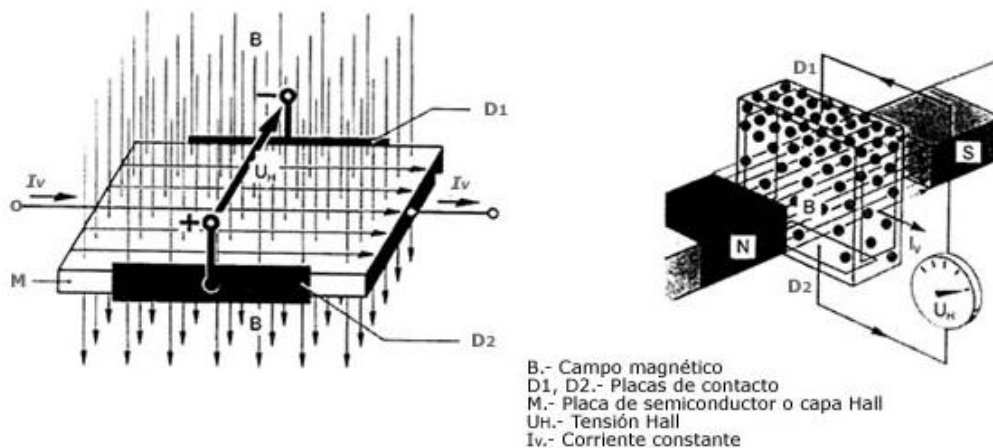
Para sensar la corriente DC se lo puede realizar de dos formas; mediante la utilización de un derivador de corriente o resistencia shunt y mediante la utilización de sensores de efecto hall. La resistencia shunt es una carga resistiva cuya resistencia es conocida con precisión; para determinar la intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de esta carga, se mide la

diferencia de tensión o caída de voltaje en la resistencia y posteriormente aplicando ley de Ohm se puede determinar la corriente correspondiente. La Figura 15 muestra una resistencia shunt de 50 A.



**Figura 15 Resistencia shunt de 50A**  
Fuente: (Power Resistor, 2015)

Los sensores de efecto Hall se basan como su nombre lo indica en el efecto Hall descubierto por Edwin C. Hall en 1879, este efecto consiste en la producción de un voltaje transversal en un conductor o un semiconductor por el cual circula una corriente eléctrica, y que está bajo la influencia de un campo magnético externo perpendicular a la dirección de flujo de corriente, este efecto se muestra en la Figura 16.



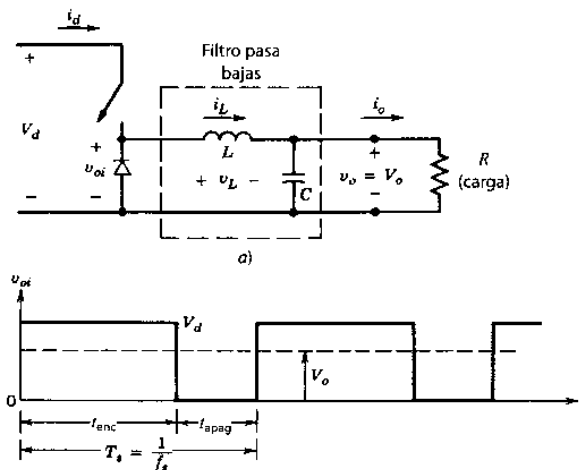
**Figura 16 Principio de funcionamiento de un sensor de efecto Hall**  
Fuente: (Aficionados a la Mecánica, 2014)

El voltaje Hall aparece debido a que el campo magnético transversal ejerce una fuerza desviadora  $F$  (llamada fuerza de Lorentz) sobre el material

conductor causando la deflexión de los portadores de carga que se mueven a través del material. Este voltaje es proporcional a la corriente eléctrica y al campo magnético aplicado; su polaridad depende del signo de los portadores de carga.

### b. Convertidor de voltaje DC/DC

Los convertidores DC/DC reductor de tensión o convertidor Buck, producen un voltaje medio de salida más bajo que el voltaje DC de entrada; los convertidores de DC-DC en general utilizan uno o más interruptores para transformar niveles de voltaje DC; el voltaje medio de salida se controla mediante el control de los tiempos de encendido ( $t_{enc}$ ) y apagado ( $t_{apag}$ ) de los interruptores (ver Figura 17).



**Figura 17 Convertidor reductor DC-DC**  
Fuente: (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009)

Un método para controlar los tiempos de encendido y apagado de los interruptores es usar una señal de control PWM, en este método la relación de trabajo  $D$  del interruptor se define como la proporción de la duración de encendido con el periodo de conmutación.

$$D = \frac{t_{enc}}{T_s}$$

### 2.1.11. Controladores

Uno de los controladores más conocidos en la actualidad es la placa Arduino, esta placa es una plataforma de prototipos electrónicos que consiste principalmente en un microcontrolador y un conjunto de pines de conexión de entradas y salidas los cuales permiten interactuar con el medio físico mediante un determinado programa basado en un lenguaje de programación en C/C++.

#### a. Ventajas de las placas Arduino

Las principales ventajas que ofrecen las placas Arduino frente a otras placas controladoras y microcontroladores son:

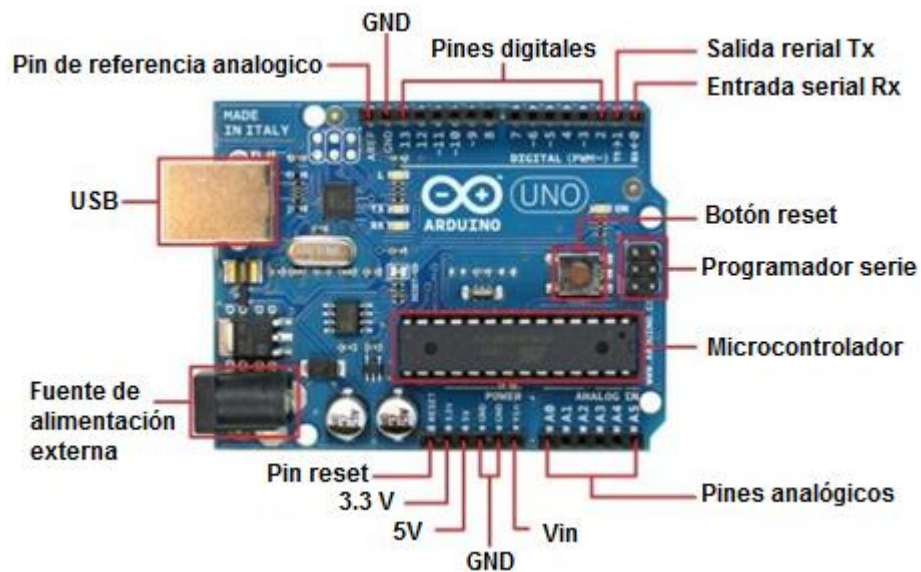
- **Simplificación:** Ya que la placa de Arduino es un sistema integrado por varios elementos como procesador, acondicionamientos, filtros, pines de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, puertos de comunicación, puerto de programación, entre otros; además consta de una plataforma de programación propia; todo esto simplifica el proceso de trabajar con microcontroladores.
- **Bajo costo:** Las placas Arduino son económicamente accesibles permitiendo así que muchos estudiantes del área eléctrica y electrónica desarrollen proyectos multidisciplinarios utilizando esta plataforma.
- **Multi-Plataforma:** Una de las ventajas que tiene el software de Arduino es que funciona en varios sistemas operativos como Windows, Macintosh OSX y Linux; mientras que otros entornos para microcontroladores están limitados únicamente a Windows.
- **Entorno de programación sencillo:** El entorno de programación de Arduino es relativamente fácil de usar ya que su interfaz es muy sencilla estructurándose de tal forma que el usuario se sienta en un ambiente familiar de programación.
- **Software ampliable y de código abierto:** Una ventaja potencial que tiene Arduino es su licencia libre y su capacidad de ampliación de software a la necesidad del usuario a través de librerías de C++ desarrolladas muchas veces por los fabricantes de Arduino o por

programadores expertos que comparten y aportan con su trabajo en la web.

- **Hardware ampliable y de código abierto:** Además del software el hardware también se lo puede ampliar a través de módulos y kits que se encuentran en la web; los planos de las placas están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que se puede hacer uso de estos para realizar una versión propia de la placa.

## b. Hardware de Arduino

El hardware de la mayoría de las placas de Arduino consiste en un microcontrolador Atmel AVR, pines de entradas y salidas digitales con opción configurable para salidas PWM, pines de entradas analógicas, pines de alimentación, puertos serie de hardware, oscilador de 16 MHz, conector USB, conector de alimentación, cabecera ICSP, botón de reinicio entre otros. En la Figura 18 se muestra las partes principales de este controlador.



**Figura 18 Partes principales de un Arduino UNO**

## c. Software de Arduino

El software consiste en una multiplataforma escrita en JAVA derivada de los proyectos Processing y Wiring. El Arduino IDE viene con una biblioteca llamada Wiring esta tiene la capacidad de programar en C/C++; esto permite crear con facilidad muchas operaciones de entrada y salida, teniendo

solamente que definir dos funciones en la aplicación para hacer un programa funcional:

- **Setup():** se inserta al inicio del código de programación, puede ser usada para inicializar la configuración.
- **Loop():** llamada para repetir un bloque de comandos o esperar hasta que sea desconectada.

### 2.1.12. Interfaz hombre máquina

La mayoría de HMI se encuentran en paneles operadores o computadores, la principal función de un HMI es servir de interfaz entre el hombre y la máquina, razón por la cual se suelen denominar con las siglas HMI (Human Machine Interface) un ejemplo de este tipo de pantallas HMI se muestra en la Figura 19. Mediante estos dispositivos se pueden visualizar datos y resultados de cualquier controlador (PLC, Arduino, etc.) para que los usuarios puedan observar el comportamiento de un proceso determinado. Además de observar y recibir información del controlador o autómatas, también es posible enviar información hacia estos para que tomen ciertas decisiones sobre el proceso que están controlando. El intercambio de información que se da mediante un HMI consiste básicamente en que el operador pueda ingresar datos de ajuste, visualizar mensajes del autómatas o controlador, monitorear mediciones o cálculos internos, etc. (Daneri, 2008)



**Figura 19 Pantalla HMI DELTA DOP B**  
Fuente: (Deltaww, 2016)

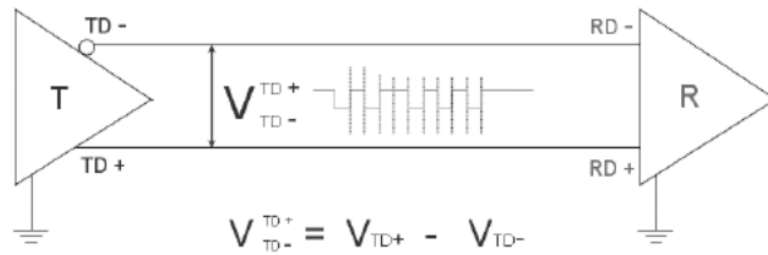
#### a. **Funciones de un HMI**

- **Monitoreo:** La interfaz HMI muestra los datos obtenidos de la planta o proceso mediante el controlador, estos datos se pueden mostrar en varios formatos de tal forma que le permitan una lectura más comprensible al usuario.
- **Supervisión:** Con la ayuda del monitoreo le permite al usuario ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente desde el panel o computadora.
- **Alarmas:** Reconoce eventos excepcionales dentro del proceso y las reporta en tiempos límites de control preestablecidos.
- **Control:** Aplican algoritmos que controlan elementos visuales y alfanuméricos. Este tipo de control es diferente al que se realiza en la supervisión ya que no se puede realizar cuando una aplicación está en funcionamiento.
- **Históricos:** Es una función primordial ya que muchos de los procesos en la industria y laboratorios es la recolección de datos para su posterior análisis y así identificar falencias del proceso o crear tendencias del sistema en estudio.

#### 2.1.13. Estándar RS-485

El estándar RS 485 es la configuración de hardware (capa 1, la capa física de OSI) más extendida para los buses de campo; permite la transmisión diferencial balanceada en redes multipunto, es ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias (35 Mbit/s hasta 10 metros y 100 kbit/s en 1200 metros) y a través de canales ruidosos, ya que el par trenzado reduce los ruidos que se inducen en la línea de transmisión (ver Figura 20). (Penin, 2008)





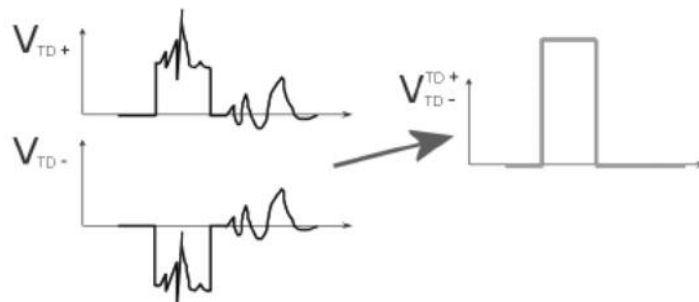
**Figura 20 Conexión diferencial**

**Fuente:** (Penin, 2008)

Algunas de las características más relevantes de este estándar de comunicación se resumen a continuación:

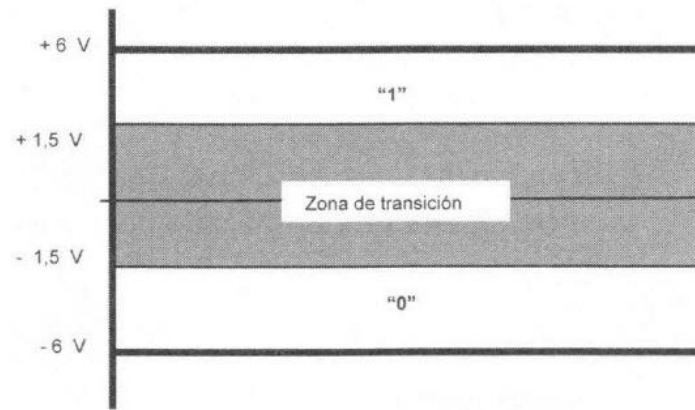
- Interfaz diferencial.
- Conexión multipunto.
- Alimentación única de +5V.
- Hasta 32 estaciones (ya existen interfaces que permiten conectar 256 estaciones).
- Velocidad máxima de 10 Mbit/s (a 12 metros).
- Longitud máxima de alcance de 1200 metros (a 100 kbit/s).
- Rango de bus de -7V a +12V

El estándar RS485 se basa en la transmisión de señales como diferencia de potencial, sin referencia de tierra. En el caso de haber interferencias, estas afectarán por igual a las dos señales y por esta razón en el destino, la señal final se obtiene de restar las dos señales recibidas (ver Figura 21), con lo cual la interferencia se anula. En la Figura 22 se muestran los niveles lógicos referidos a los eléctricos. (Penin, 2008)



**Figura 21 Interferencia de señal diferencial**

**Fuente:** (Penin, 2008)



**Figura 22 Señales eléctricas por la interfaz RS-485**  
**Fuente: (Guerrero, Yuste, & Martínez, 2009)**

#### 2.1.14. Protocolo de comunicación MODBUS

MODBUS es un protocolo desarrollado por Modicon en 1979, utilizado para establecer comunicaciones Maestro-Esclavo y Cliente-Servidor entre dispositivos inteligentes y dispositivos de campo haciendo posible la transmisión de señales digitales y analógicas entre estos. (Penin, 2008)

MODBUS es un protocolo que no incluye dentro de sus especificaciones la exigencia de una norma de capa física concreta; por esta razón es un protocolo que puede ser utilizado con numerosas normas de capa física actuales; en la práctica es habitual el uso de MODBUS con conexiones RS-485 y Ethernet. (Antón, 2014)

Modbus emplea el principio Maestro-Esclavo incluso en la modalidad punto a punto. Si un controlador origina el mensaje, lo hace como Maestro, y espera una respuesta de tipo Esclavo. Si a un controlador le llega una petición de otro, éste reconstruye la respuesta como si fuera un Esclavo. Las direcciones válidas van desde 0 a 247. Los esclavos podrán tener direcciones desde 1 a 247 (la dirección 0 es para mensajes broadcast). Cuando Modbus se implementa sobre otras redes de más alto nivel, el broadcast no se permite. Los siguientes dos modos de trabajo pertenecen únicamente a las redes de tipo Modbus. Definen el contenido de los campos del mensaje serie y la forma de empaquetar los datos. El modo escogido (incluyendo velocidad, paridad, etc.) deberá ser el mismo para todos los componentes de la red Modbus. (Penin, 2008)

**a. Modo de transmisión ASCII**

- Cada byte de 8 bits de un mensaje se envía como dos caracteres ASCII. La ventaja de esta modalidad es que se permiten tiempos muertos de hasta un segundo entre caracteres sin provocar un error.
- Utiliza codificación Hexadecimal (0 ... 9, A ... F)
- En cada byte:
  - 1 start bit
  - 7 bit de datos
  - 1 bit de paridad par o impar (No hay bit si no hay paridad)
  - 1 stop bit con paridad (2 stop bit sin paridad)
  - Campo de verificación de error (Check Field)
  - Verificación de Redundancia Longitudinal (LRC)

**b. Modo de transmisión RTU**

- Cada byte de 8 bits del mensaje contiene dos caracteres hexadecimales de 4 bits. La ventaja de esta modalidad es la densidad de caracteres, más elevada que ASCII, que aumenta la tasa de transmisión manteniendo la velocidad.
- Codificación binaria de 8 bit, hexadecimal (0 ... 9, A ... F).
- Dos caracteres hexadecimales por cada byte de mensaje.
- En cada byte:
  - 1 start bit
  - 8 bit de datos (el menos significativo se envía primero)
  - 1 bit de paridad par o impar (No hay bit si no hay paridad)
  - 1 stop bit con paridad (2 stop bit sin paridad)
  - Campo de verificación de error (Check Field)
  - Verificación de Redundancia Cíclica (CRC)

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Antecedentes investigativos

Los fabricantes de equipos didácticos para laboratorios actualmente poseen en sus catálogos bancos de pruebas para motores DC, por ejemplo la empresa Balance Systems ha desarrollado un banco para el control de motores DC en líneas de producción o pruebas en laboratorios, de motores ya ensamblados, las pruebas que se pueden hacer en este banco son: voltaje, corriente, dirección, RPM y par desarrollado, las pruebas pueden ser visualizadas en una pantalla touch screen montada en el equipo. (Balance Systems, 2007)

Existen empresas dedicadas a realizar ensayos de motores AC o DC, lo que permiten hacer estos bancos de prueba es: pruebas de par y revoluciones constantes, efectuar rampas de arranque o ciclos de trabajo, visualización en tiempo real, memorización y gestión de resultados; además las pruebas que pueden hacer estas empresas son: pruebas en vacío, pruebas con carga, recalentamiento, par de arranque, rampa en “real time”, simulación dinámica y pruebas especiales. (Grupo Tecnológico Industrial, 2015)

En la tesis “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA” (2013). Previo la obtención del título de ingeniero eléctrico el autor Yuri Humberto Merizalde Zamora desarrolla el diseño del banco tanto para generadores como para motores de corriente continua con el respectivo manual de operaciones para 21 pruebas de funcionamiento. (Merizalde, 2013)

En el informe de Proyecto de Graduación “IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA CARACTERIZACIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS MEDIANTE UN FRENO ELECTRODINÁMICO” (2013). Previo la obtención del título de ingeniero en electrónica con el grado académico de licenciatura el autor Erickson Cubillo Hernández detalla la implementación de un banco de pruebas para máquinas eléctricas rotativas, mediante el cual

será factible realizar una amplia gama de pruebas de acuerdo a las necesidades y directrices de la empresa RENAME S.A. (Reconstructora Nacional de Motores Eléctricos). (Cubillo Hernández, 2013)

### **3.2. Fundamentación legal**

El artículo 173 de la Ley Orgánica de Educación Superior (LOES), establece que el Consejo de Evaluación, Acreditación y Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior (CEAACES) es el organismo técnico público encargado de ejecutar los procesos de evaluación externa, acreditación y aseguramiento de la calidad de la educación superior, así como de normar el proceso de autoevaluación. En el mismo artículo también se establece que:

Las universidades, escuelas politécnicas, institutos superiores técnicos, tecnológicos, pedagógicos, de artes y conservatorios superiores del país, tanto públicos como particulares, sus carreras y programas, deberán someterse en forma obligatoria a la evaluación interna y externa, a la acreditación, a la clasificación académica y al aseguramiento de la calidad de la educación. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2010).

#### **3.2.1. Modelo genérico para la evaluación del entorno de aprendizaje de las carreras.**

Este modelo establece 5 criterios para la evaluación del entorno de aprendizaje de la carrera.

- Pertinencia
- Plan curricular
- Academia
- Ambiente institucional
- Estudiantes

##### **a. Ambiente institucional**

Este criterio evalúa el sistema de gestión académica de la carrera y los recursos de apoyo relacionados con bibliotecas y laboratorios, que cumplan

con los objetivos para los cuales fueron creados y de esa manera aporten al mejoramiento de la calidad de la educación. (CEAACES, 2015)

Este criterio contiene 3 subcriterios que son:

- Gestión Académica
- Fondo Bibliográfico
- Laboratorios/ Centros de simulación/ Talleres

El subcriterio “Laboratorios/ Centros de simulación/ Talleres evalúa los laboratorios/ centros de simulación y/o talleres, que deben ser funcionales, debidamente equipados y con espacios/equipos suficientes en relación con el número de estudiantes para garantizar el adecuado desarrollo de las actividades académicas planificadas” (CEAACES, 2015).

Este subcriterio tiene tres indicadores:

- **Funcionalidad:** “Este indicador evalúa las condiciones físicas y de seguridad que disponen los laboratorios/centros de simulación/ talleres de la carrera, que faciliten el desarrollo de las actividades prácticas planificadas” (CEAACES, 2015).
- **Equipamiento:** “Este indicador evalúa la existencia, condiciones y características del equipamiento básico de cada uno de los laboratorios / centros de simulación / talleres de la carrera, que garanticen la consecución de los objetivos de las prácticas y actividades planificadas” (CEAACES, 2015).
- **Disponibilidad:** “Este indicador evalúa la cantidad de equipos instalados, mobiliario e insumos disponibles en los laboratorios/centros de simulación/ talleres, en relación con el número de estudiantes que hacen uso de los mismos” (CEAACES, 2015).

### 3.3. Variables de investigación

**Variable Independiente:** Diseño e implementación de un módulo didáctico de pruebas de funcionamiento de motores de corriente continua.

**Variable Dependiente:** Curvas de funcionamiento de motores de corriente continua bajo diferentes niveles de carga.

### 3.4. Operacionalización de variables

**Tabla 1**  
**Operacionalización de variable independiente**

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>Diseño e implementación de un módulo didáctico de pruebas de funcionamiento de motores de corriente continua</b>	El módulo didáctico es un equipo de pruebas que adquiere y procesa los datos de las mediciones eléctricas y mecánicas, para luego presentarlo de forma gráfica en la pantalla HMI, facilitando el análisis de las curvas y comportamiento de los motores DC.	Programación de la placa controladora Arduino	Software de programación
			Fundamentos de programación
		Diseño de HMI	Software de programación
		Diseño de circuito de control del electrodinamómetro	Corriente máxima del electrodinamómetro
			Voltaje nominal del electrodinamómetro
			Señal de pulsos PWM
		Diseño de acondicionamiento de sensores	Transductor de voltaje DC
			Transductor de corriente DC
			Medidor de par
			Medidor de RPM

**Tabla 2**  
**Operacionalización de variable dependiente**

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>Curvas de funcionamiento del motor de corriente continua bajo diferentes niveles de carga</b>	Las curvas características de funcionamiento de un motor en general permiten determinar o predecir el comportamiento que tendrá este al variar la carga mecánica aplicada al eje.	Corriente de armadura vs Torque	Corriente de armadura
			Torque
		Velocidad vs Torque	Velocidad
			Torque
		Potencia útil vs Torque	Velocidad
			Torque
		Rendimiento vs Torque	Voltaje
			Corriente de armadura
			Corriente de campo
			Velocidad
			Torque

### **3.5. Modalidad de la investigación**

#### **3.5.1. Investigación bibliográfica**

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se hace uso de varias fuentes bibliográficas que permiten identificar y acceder a la información acerca de los tipos de curvas de funcionamiento de motores de corriente continua contribuyendo de esa manera a la investigación planteada.

#### **3.5.2. Investigación de campo**

La investigación se la desarrolla en el laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga ya que este lugar es donde se encuentra el objeto de estudio. Se obtiene información directa del estado físico en que se encuentran los motores, y mediante la revisión y análisis de las hojas de datos técnicos proporcionadas por el fabricante de los motores.

#### **3.5.3. Investigación experimental**

En la investigación planteada se hace uso de un conjunto de actividades metódicas y técnicas para obtener información y datos necesarios sobre el módulo didáctico de pruebas de motores DC. Se obtiene información por medio de la observación de los hechos, y se modifican ciertas variables de estudio con el fin de describir y analizar lo que ocurre en determinadas condiciones de prueba.

### **3.6. Tipos de investigación**

#### **3.6.1. Investigación aplicada**

Con el presente proyecto de investigación se pretende mejorar el proceso de aprendizaje de los estudiantes, mediante la actualización del laboratorio de Accionamientos Eléctricos al implementar un módulo didáctico para obtener las curvas características de funcionamiento bajo carga de los motores de corriente continua de forma gráfica en una pantalla HMI industrial.



### **3.6.2. Investigación correlacional**

Se estudia intrínsecamente el comportamiento y características de los motores de corriente continua al estar sometidos a diferentes niveles de carga y se compara las curvas obtenidas con el módulo de pruebas con las curvas obtenidas en pruebas manuales, también se analiza la influencia que tiene la actualización e implementación de equipos didácticos en el laboratorio en el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

### **3.7. Técnica de recolección de datos**

#### **3.7.1. La observación en laboratorio**

Para la obtención de datos necesarios para implementar el módulo de pruebas se necesita aplicar la técnica de observación y obtener estos experimentalmente mediante el funcionamiento bajo carga de cada uno de los motores de corriente continua, observar minuciosa y detalladamente los datos presentados por los instrumentos de medida presentes en el laboratorio.

### **3.8. Técnica de análisis de datos**

Para analizar los datos obtenidos de manera experimental, se utiliza la técnica gráfica, la cual ayuda a determinar la relación que existe entre los resultados obtenidos con la aplicación del módulo didáctico y los resultados obtenidos mediante las pruebas manuales de carga aplicadas a los motores de corriente continua.

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

#### 4.1. Generalidades

##### 4.1.1. Introducción

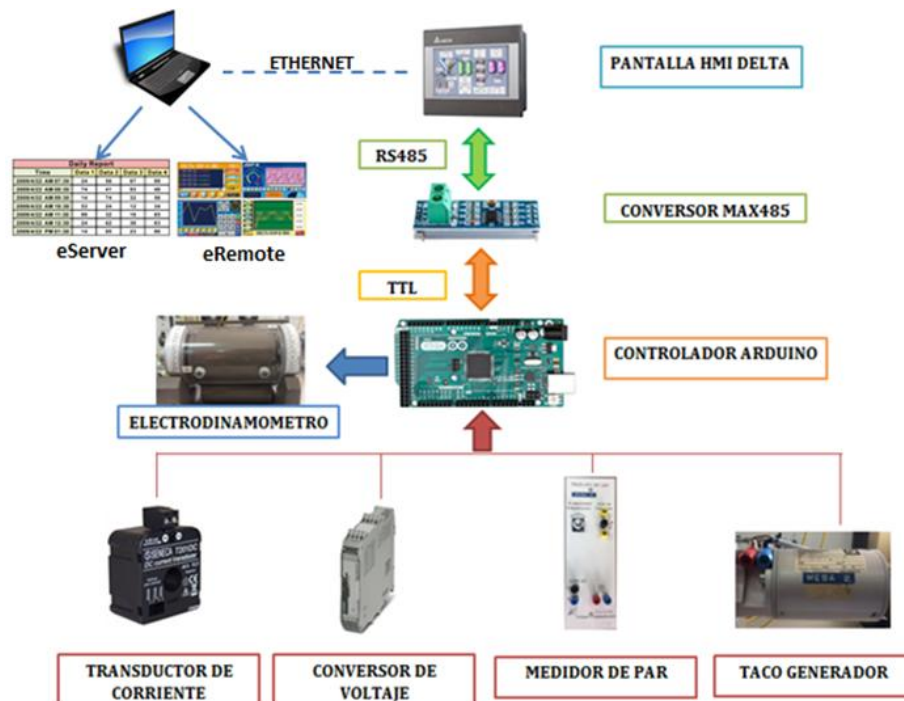
El sistema del módulo didáctico para la obtención de curvas características de motores de corriente continua consta de las siguientes etapas:

- **Obtención de medidas físicas:** Sensor las magnitudes físicas como voltaje DC, corriente DC, velocidad y torque; con sus respectivos acondicionamientos de señal para convertirlo en una señal normalizada de 0-5V segura para la placa Arduino.
- **Procesamiento de datos:** Programación en el controlador Arduino para el procesamiento de los datos analógicos y presentación de estos en las respectivas unidades de ingeniería.
- **Control del electrodinamómetro:** Control del electrodinamómetro o mando de carga disponible en el laboratorio, se desarrolla con la aplicación de un circuito electrónico que permite controlar un Mosfet de potencia mediante una señal PWM y de esa manera variar el voltaje aplicado al electrodinamómetro para poder controlar la carga aplicada al eje del motor.
- **Comunicación MODBUS:** Establece la comunicación entre el controlador Arduino con la pantalla HMI industrial por medio de un protocolo de comunicación MODBUS.
- **Visualización de curvas y datos en la pantalla HMI:** Configuración y programación de la pantalla HMI; para la presentación de datos y curvas.

##### 4.1.2. Arquitectura del proyecto

En la Figura 23 se muestra la arquitectura del proyecto en la que se indica el proceso de adquisición, control, procesamiento, comunicación y presentación de curvas una vez realizada la obtención de datos de las

variables físicas presentes en la prueba de carga de los motores de corriente continua.



**Figura 23 Arquitectura del proyecto**

#### 4.1.3. Características de los motores de corriente continua

##### a. Motor de corriente continua Barth 004.030

Es un motor compound que posee una bobina en shunt y una bobina en serie, el mismo posee las siguientes características técnicas:

**Designación de terminales:** A(A1) B(A2) Inducido

C(E1) D(E2) Bobina Shunt

E(D1) F(D2) Bobina Serie

**Potencia de salida:** 0.175 KW

**Voltaje nominal:** 220 V

**Corriente nominal:** 1.4 A

**Velocidad nominal:** 1450 rpm

**b. Motor de corriente continua Barth 004.001**

Es un motor en el que la bobina de excitación se conecta en serie con la bobina de inducido, el mismo posee las siguientes características técnicas:

<b>Designación de terminales:</b>	A(A1)      B(A2) Inducido
	E1(1D1)    F1(1D2) Bobina en serie
	E2(2D1)    F2(2D2) Bobina en serie
<b>Potencia de salida:</b>	0.17 KW
<b>Voltaje nominal:</b>	220 V
<b>Corriente nominal:</b>	1.4 A

**c. Motor de corriente continua Barth 004.060**

Es un motor shunt que posee polos auxiliares, el mismo posee las siguientes características técnicas:

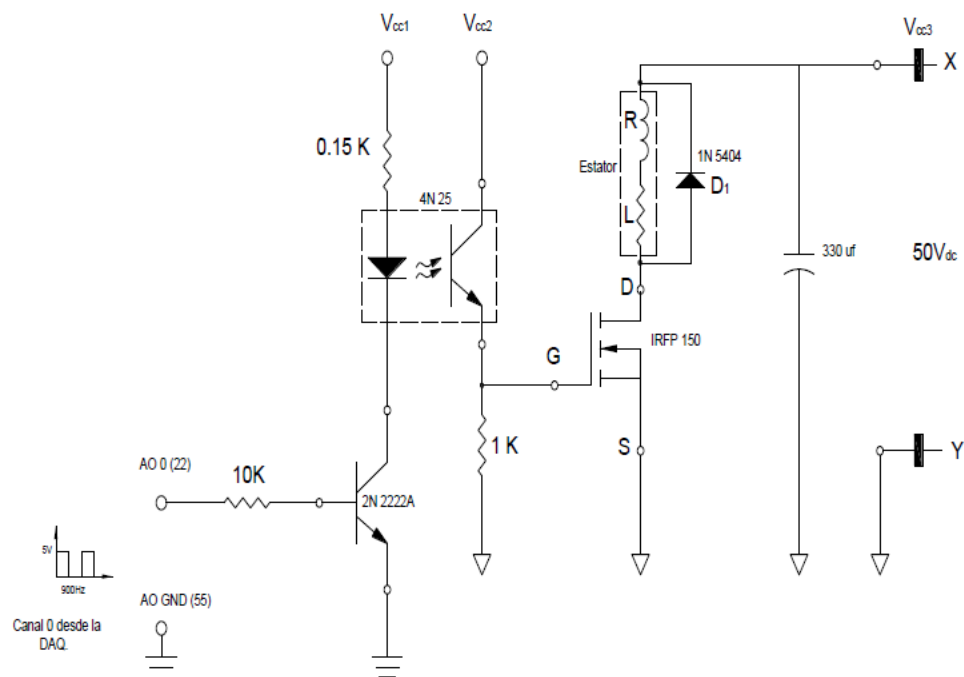
<b>Designación de terminales:</b>	A(A1)      B(A2) Inducido
	C(E1)      D(E2) Bobina shunt
	G2(2B1)    H2(2B2) Polo auxiliar
	G1(1B1)    H1(1B2) Polo auxiliar
<b>Potencia de salida:</b>	0.27 KW
<b>Voltaje nominal:</b>	220 V
<b>Corriente nominal:</b>	1.9 A
<b>Velocidad nominal:</b>	1380 rpm

**4.2. Diseño del circuito de control del electrodinamómetro**

El diseño del circuito de control del electrodinamómetro existente en el laboratorio de Accionamientos de Máquinas Eléctricas se lo realiza mediante un circuito electrónico que permita variar la corriente de excitación aplicada

al electrodinamómetro cuando se modifique la relación de trabajo en una de las salidas PWM del controlador Arduino.

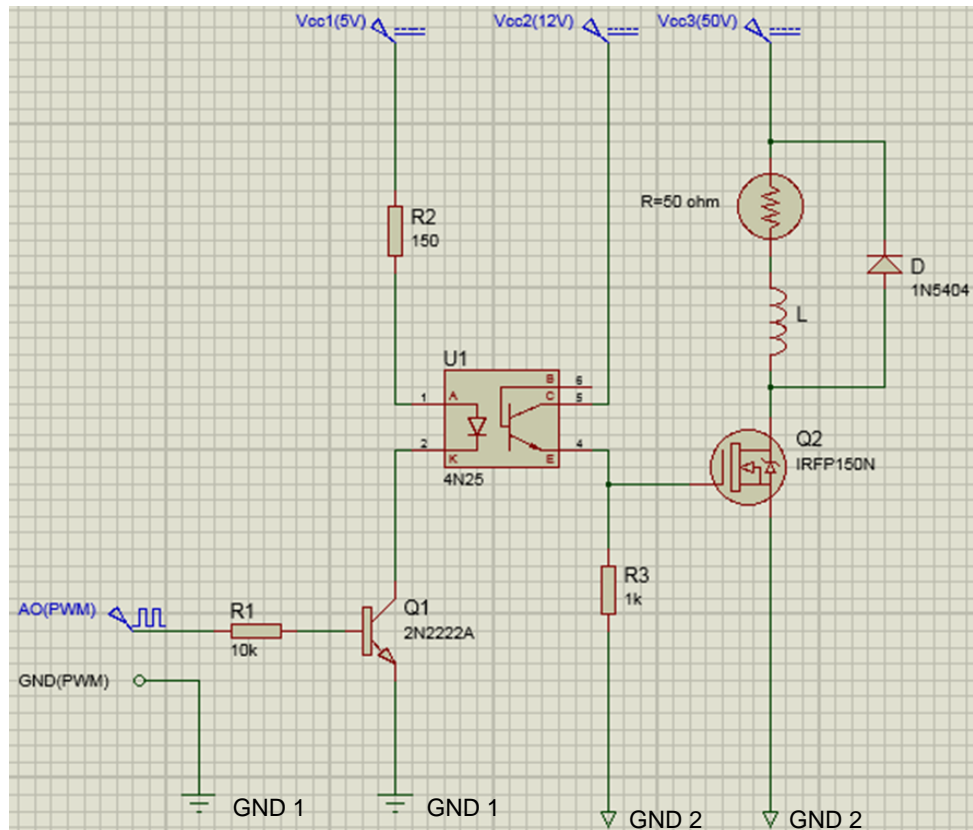
Basándose en un proyecto de tesis realizado en la Escuela Politécnica del Ejército sede Latacunga para el laboratorio de Máquinas Eléctricas, se tiene en cuenta el uso del mismo módulo para la medición del par, que es un electrodinamómetro 004.038 para obtener una salida de 0 a 5 V en función de la carga aplicada al eje de los motores, la misma que varía de 0 a 3.2 Nm, por lo que su circuito de control es de gran ayuda para el presente trabajo de investigación, en la Figura 24 se muestra el circuito de control para el electrodinamómetro.



**Figura 24 Circuito de control del electrodinamómetro**  
Fuente: (Jiménez & Taípe, 2005)

El circuito presenta las características necesarias e importantes para poder controlar el voltaje aplicado a la excitación del electrodinamómetro el mismo que varía en un rango de 0 a 50 VDC, aplicando una corriente para el frenado del motor; posee un aislamiento físico entre el circuito de potencia y el circuito de control, esto funciona como método de protección de la placa controladora, el funcionamiento de este circuito de control se da a frecuencia constante, variando la relación de trabajo (duty).

Una vez revisado y contrastado con las características necesarias para la investigación presente, no se hizo modificaciones al circuito de control; el controlador Arduino posee salidas PWM cuya relación de trabajo se puede controlar desde 0 al 100%; la máxima frecuencia de trabajo de esta señal es 980 Hz mientras que en el circuito utilizado en el proyecto de tesis anteriormente citado se usa una frecuencia de 900 Hz por lo que no presenta problemas al momento de modelar este circuito.



**Figura 25 Circuito implementado para el control del electrodinómetro**

En la Figura 25 se puede ver el diseño del circuito de control del electrodinómetro en un paquete llamado Isis en el software Proteus por lo que nos permite visualizar el funcionamiento de cada uno de los elementos del circuito mediante la simulación que este software ofrece. Los componentes del circuito para el control del electrodinómetro se presentan en la Tabla 3:

**Tabla 3**  
**Características de los componentes del circuito de control**

ORDEN	COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
1	VCC1	Fuente de voltaje de 5Vdc	Fuente de voltaje que posee la misma referencia con respecto a la señal PWM de entrada al circuito de control.
2	VCC2	Fuente de voltaje de 12Vdc	Fuente de voltaje que posee la misma referencia con respecto a la parte de potencia del circuito de control.
3	VCC3	Fuente de voltaje de 50Vdc	Fuente de voltaje que se encarga de la alimentación del electrodinamómetro en función del duty aplicado.
4	R1	Resistencia de 10K $\Omega$	Resistencia ubicada en la base del transistor para establecer la corriente de base.
5	R2	Resistencia de 150 $\Omega$	Resistencia ubicada en serie para reducir la corriente de activación del diodo en el optoacoplador
6	R3	Resistencia de 1K $\Omega$	Resistencia en paralelo a la salida del optoacoplador para establecer el voltaje de compuerta del Mosfet.
7	Q1	Transistor 2N2222A	Amplifica la señal de corriente que se aplica en su base cuya fuente de voltaje o control es una señal PWM
8	Q2	Mosfet IRFP150N	Controla el nivel de voltaje aplicado al electrodinamómetro.
9	RL	Representación del electrodinamómetro.	Representación esquemática del electrodinamómetro el cual posee una resistencia de 50 $\Omega$ .
10	D	Diodo de bypass 1N5404.	Protege al circuito de posibles descargas de energía almacenada en el electrodinamómetro.
11	GND1	Referencia de señal PWM de entrada al circuito de control.	Referencia de la señal PWM de entrada al circuito de control.
12	GND2	Referencia de las fuentes aplicadas en la parte de potencia del circuito.	La fuente aplicada al circuito de control en la parte de potencia del circuito debe poseer la misma referencia.

### 4.3. Diseño de acondicionamientos de señales para sensores

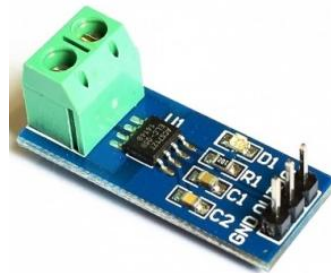
El módulo didáctico consta de dos transductores de corriente DC, un convertidor de voltaje DC, un sensor de torque y un sensor de velocidad; todas las señales de salida de estos elementos serán conectadas a entradas analógicas del controlador para lo cual es indispensable que estas sean previamente acondicionadas para que no superen los 5 VDC.

#### 4.3.1. Selección del transductor o sensor de corriente DC

En la selección del sensor de corriente se toma en cuenta la corriente de la placa de características de cada tipo de motor, los motores compound y serie tienen una corriente de 1.4 A; mientras que el motor shunt tiene una corriente de 1.9 A; al momento de realizar las pruebas bajo carga de cada uno de los motores se determinó que la corriente máxima de armadura del motor compound (004.030) es de 2.6 A, la corriente máxima del motor serie (004.001) es de 2.5 A y la corriente máxima de armadura del motor shunt (004.060) es de 3 A, por lo que es necesario seleccionar un sensor que cumpla con estos rangos de medición.

##### a. Sensor de corriente ACS712ELCTR-05B-T

En la Figura 26 se muestra este sensor de corriente por efecto hall, que provee una solución económica y precisa para medir corriente en AC o DC, ya sea en ambientes industriales o comerciales. Este sensor funciona transformando un campo magnético originado por el paso de la corriente a través de un conductor de cobre interno en el sensor, y convirtiendo este campo en un voltaje variable. (Patagoniatec, 2012)



**Figura 26 Sensor de corriente ACS712 Allegro**  
Fuente: (Patagoniatec, 2012)



### b. Transductor de corriente T201DC SENECA

Tiene una señal de salida en lazo cerrado de corriente de 4 a 20 mA, posee una alta precisión en los 8 rangos de medición monopolar y bipolar que se pueden seleccionar mediante interruptores DIP, adicionalmente posee un filtro mitigador para aumentar la estabilidad de la lectura. Una de las mayores ventajas es que puede funcionar sin ningún problema con corrientes pulsadas o con componentes de corriente alterna superpuestas a la componente de corriente continua. El aspecto es muy similar un TC estándar, pero con la notable característica de medir la componente continua de la corriente (ver Figura 27). (SENECA, 2015)



**Figura 27 Transductor de corriente T201DC**  
Fuente: (SENECA, 2015)

### c. Sensor de corriente H970LCA Hawkeye

Este sensor se muestra en la Figura 28, al igual que la opción anterior se fundamenta en el principio de efecto Hall, tiene tres rangos de medición que se pueden seleccionar mediante interruptores y dos tipos de salida analógica proporcional a la corriente de entrada, una salida de corriente de 4-20mA y una de voltaje 0-5V. El transductor necesita una fuente de alimentación externa de 12-30VAC/DC; a diferencia del modelo anterior este transductor es de núcleo abierto facilitando la instalación del mismo brindando una gran flexibilidad de montaje de tal manera que el soporte se puede fijar sobre riel DIN.



**Figura 28 Sensor de corriente H970LCA Hawkeye**  
Fuente: (ALPHAOMEGA Electronics, 2016)

**d. Transductor de corriente EDCC - CX(5Adc) - E1 - XA**

Tiene un rango de medición de 0-5A y una salida analógica de corriente de 4-20mA, necesita una fuente de alimentación externa de 110VAC. Los circuitos de entrada y salida están aislados eléctricamente; a diferencia de las opciones anteriores este transductor permite realizar un ajuste del ZERO/SPAN y al igual que las opciones anteriores se puede montar sobre riel DIN (ver Figura 29).



**Figura 29 Sensor de corriente EDCC - CX(5Adc) - E1 – XA**  
Fuente: (ELTIME CONTROLS, 2016)

En la Tabla 4 se presenta un resumen de las especificaciones y características técnicas de cada uno de los transductores de corriente citados anteriormente.

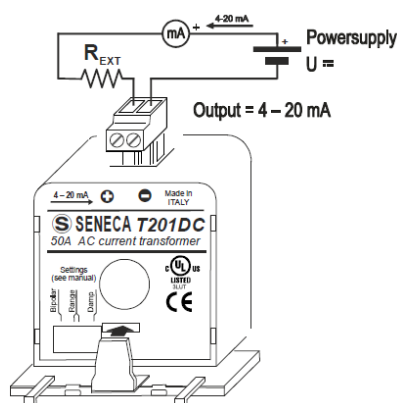
**Tabla 4**  
**Especificaciones técnicas de transductores de corriente DC**

Equipo	ACS712ELCTR-05B-T	T201DC de Seneca	H970LCA Hawkeye	EDCC - CX - E1 - XA
Rango de medición	0-5 A	0-5, 0-10, 0-20, 0-40 A	0-20, 0-40, 0-80 A	0-5 A

CONTINÚA 

<b>Señal de salida</b>	185mV/A	4-20 mA	4-20 mA 0-5 V	4-20 mA
<b>Exactitud (Error máximo)</b>	±10%	0.05%	±3%	0,25%
<b>Ajuste ZERO/SPAN</b>	NO	NO	NO	SI
<b>Fuente de alimentación externa</b>	5 VDC	6-28 VDC	12-30 VDC	110 VAC
<b>Montaje sobre riel DIN</b>	NO	SI	SI	SI

Debido a las características técnicas, nivel de tecnología y costo, se escogió el transductor de corriente T201DC de la marca SENECA, en la Figura 30 se muestra el esquema de conexión



**Figura 30 Conexiones eléctricas SENECA T201DC**  
Fuente: (SENECA, 2015)

Para conocer con mayor detalle las características técnicas de este transductor ver el Anexo B. Para seleccionar el rango de medición se debe conmutar los interruptores DIP como se muestra en la Figura 31, el transductor necesita de una fuente de alimentación de 6-28VDC en conexión directa, como salida posee un lazo de corriente de 4-20mA. (SENECA, 2015)

DIP-switches												
Capacidad						Filtro						
DIP-SWITCH	1	2	3		DIP-SWITCH	1	2	3		DIP-SWITCH	4	
				0..5 A		•			-5..5 A		•	Filtro introducido
			•	0..10 A		•		•	-10..10 A			filtro no introducido
		•		0..20 A		•	•		-5..20 A			
		•	•	0..40 A		•	•	•	-10..40 A			

**Figura 31 DIP-switches del transductor de corriente T201DC**  
**Fuente: (SENECA, 2015)**

#### 4.3.2. Acondicionamiento de señal para transductor de corriente

La salida del sensor de corriente se encuentra en el rango de 4 a 20 mA, como se mencionó anteriormente la máxima corriente de los motores es de 3A por lo que se usa el rango de 0-5 A en el sensor de corriente. El acondicionamiento se diseña para una corriente mínima de 0 A y una máxima de 3.5 A, para obtener una mayor resolución; con estos datos se procede a realizar el cálculo de la o las resistencias que se conectaran en el lazo de corriente de 4-20mA para obtener una señal de voltaje de 0-5 V.

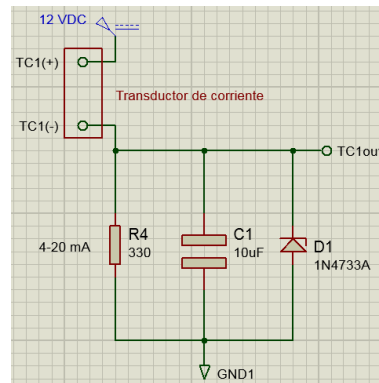
$$I_{loop} = \frac{(20 - 4)mA}{5A} * 3.5A + 4mA$$

$$I_{loop} = 15.2 mA$$

$$R = \frac{5V}{15.2 mA} = 328.95 \Omega$$

$$R = 330 \Omega$$

Para eliminar el ruido se colocó un capacitor a la salida del acondicionamiento y un diodo zener como seguridad que limita el voltaje a 5.1 V. El circuito de acondicionamiento que se muestra en la Figura 32 se implementa para los dos sensores de corriente.



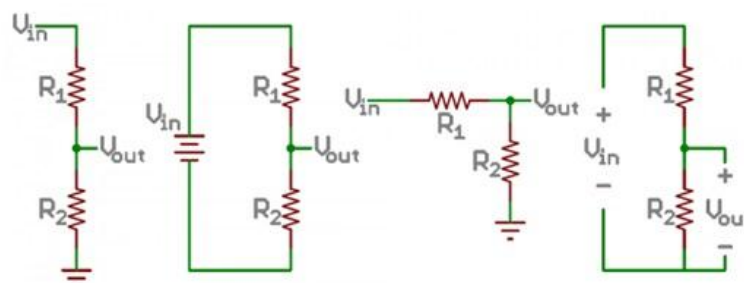
**Figura 32 Acondicionamiento de señal para sensores de corriente**

#### 4.3.3. Selección del transductor de voltaje DC

La selección del transductor de voltaje DC se lo hace mediante los datos de placa de cada motor; la alimentación de los tres motores descritos anteriormente es de 220 Vdc constante desde una fuente de alimentación.

##### a. Divisor de voltaje

Un divisor de voltaje es un circuito simple que reparte la tensión de una fuente entre una o más impedancias conectadas en serie. Con solo dos resistencias y un voltaje de entrada, se puede obtener un voltaje de salida equivalente a una fracción del de entrada. Un divisor de voltaje requiere que se conecte una fuente de voltaje a través de dos resistencias en serie. Es posible que el divisor de voltaje sea dibujado de distintas maneras, pero siempre debe ser esencialmente el mismo circuito (ver Figura 33). (5Hertz, 214)



**Figura 33 Ejemplos esquemáticos de divisores de voltaje**  
Fuente: (5Hertz, 214)

### b. Transductor de voltaje VTD 4 - 005 - 24U - DIN

En la Figura 34 se observa este transductor que tiene un rango de medición de 0-300VDC con una salida normalizada de 0-5VDC que es proporcional al voltaje de entrada, los circuitos de entrada y salida están aislados eléctricamente, necesita de una fuente de alimentación externa de 24VAC/DC. La serie de transductores VTD tiene rangos de medición 0-15, 0-25, 0-50, 0-150, 0-300, 0-600 VDC y salidas normalizadas de voltaje 0-5VDC, 0-10VDC o de corriente 4-20mA; todos los modelos se los puede montar en riel DIN.



**Figura 34 Transductor de voltaje DC VTD3-420-24U-DIN**  
Fuente: (nktechnologies, 2016)

### c. Convertidor de voltaje Phoenix Contact

El convertidor de tensión tiene diversos rangos de medición de voltaje desde 0 VDC ...  $\pm 24$  VDC hasta 0 VDC ...  $\pm 550$  V CC, tiene incorporada dos señales de salida analógica proporcionales al voltaje de entrada, una señal de corriente (-20mA ... 20mA) y otra de voltaje (-10V ... 10V) las cuales se pueden ajustar a la necesidad del usuario con respecto al voltaje de entrada mediante la configuración ZERO/SPAN o con la configuración Teach-In. El dispositivo necesita de una alimentación externa de 24VDC, la configuración y selección de la escala a medir se la realiza mediante interruptores DIP, además tiene un aislamiento reforzado del circuito de medición con respecto al circuito de alimentación y salida, en la Figura 35 se indica este convertidor.



**Figura 35 Convertidor de voltaje Phoenix Contact**  
**Fuente:** (Phoenix Contact, 2016)

**d. Transductor de voltaje EDCV-VX(300VDC)-E1-XA**

Tiene un rango de medición de 0-300V y una salida analógica de corriente de 4-20mA, la ventaja con respecto a las dos opciones anteriores es que necesita una fuente de alimentación externa de 110VAC. Los circuitos de entrada y salida están aislados eléctricamente, es posible ajustar el ZERO/SPAN y al igual que las opciones anteriores se puede montar sobre riel DIN (ver Figura 36).



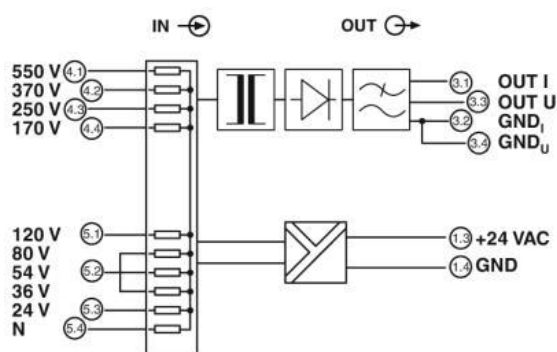
**Figura 36 Sensor de voltaje EDCV-VX(300VDC)-E1-XA**  
**Fuente:** (ELTIME CONTROLS, 2016)

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las especificaciones y características técnicas de cada uno de los transductores o convertidores de voltaje DC citados anteriormente.

**Tabla 5**  
**Especificaciones técnicas de transductores de voltaje DC**

Equipo	Divisor de voltaje	Transductor de voltaje VTD	Convertidor de voltaje Phoenix Contact	Transductor de voltaje EDCV
Rangos de medición	Depende del diseño	0-300 VDC	Desde 0...±24VDC hasta 0...±550VDC	0-300 VDC
Señal de salida	0-5 VDC	0-5 VDC	-10 V...10 V -20 mA...20 mA	4-20 mA
Exactitud (Error máximo)	>10%	<1%	1%	±0.25%
Ajuste ZERO/SPAN	NO	NO	SI	SI
Fuente de alimentación externa	SI	24 VDC	24VDC	110 VAC
Montaje sobre riel DIN	NO	SI	SI	SI

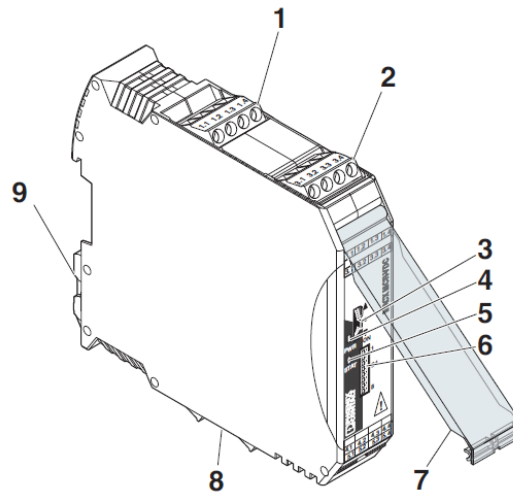
Debido a las características del equipo se escogió el conversor MACX-MCR-VDC-2906242 de la marca Phoenix Contact que es utilizado para convertir voltajes DC en rangos que van desde 0...±24 VDC hasta 0...±550 VDC en señales normalizadas de corriente o voltaje dependiendo de la configuración realizada. En la Figura 37 se muestra un esquema simbólico de las conexiones del convertidor seleccionado.



**Figura 37 Conexiones internas del convertidor de voltaje**  
**Fuente:** (Phoenix Contact, 2016)



El convertidor de voltaje Phoenix Contact serie MACX-MCR-VDC-2906242 tiene la gran ventaja de poder configurar el valor zero y span de manera manual, ajustando así el valor inicial y final de la señal de salida sea esta de corriente o voltaje para un rango de medición determinado, el convertidor de voltaje posee los siguientes elementos dentro de su construcción (ver Figura 38).



**Figura 38 Partes del convertidor de voltaje**

**Fuente:** (Phoenix Contact, 2016)

1. Voltaje de alimentación
2. Salida: señales normalizadas
3. Rueda multifunción S2
4. LED verde “PWR”, alimentación de voltaje
5. LED de estado rojo/verde “STAT”
6. Interruptor DIP S1
7. Cobertor
8. Entrada: Tensión de medición
9. Pie de encaje para montaje sobre carril. (Phoenix Contact, 2016)

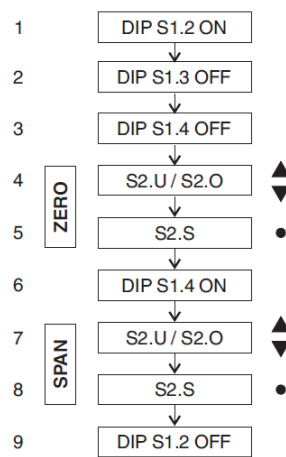
Debido a que la señal de voltaje de la fuente de alimentación existente en el laboratorio no proporciona una señal perfectamente rectificadas y filtradas se debe calcular el valor pico para determinar el rango de medición y poder configurar ese rango en el convertidor.

$$V_{dc} = V * \sqrt{2}$$

$$V_{dc} = 220V * \sqrt{2}$$

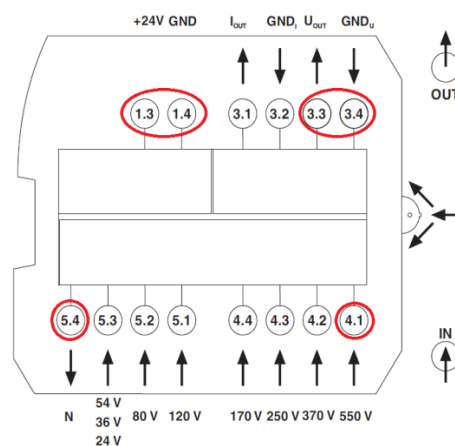
$$V_{dc} = 311.12 V$$

Por lo que se utiliza el rango de medición de 550V y se realiza la calibración del convertidor de voltaje mediante la configuración zero/span, esto permite establecer una salida de 0-5VDC para un rango de entrada de voltaje de 0-550VDC. En la Figura 39 se muestran los pasos a seguir para la respectiva configuración del convertidor.



**Figura 39 Procedimiento para la configuración zero/span**  
Fuente: (Phoenix Contact, 2016)

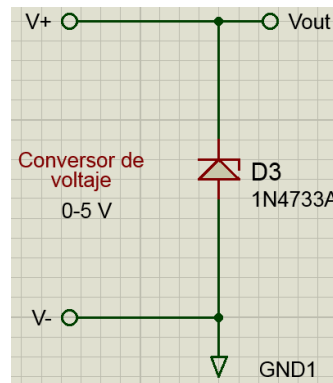
En la Figura 40 se indican los terminales utilizados del convertidor para su respectiva aplicación en el presente proyecto de investigación. Para mayor información sobre este equipo consultar el Anexo B.



**Figura 40 Borneos utilizados del convertidor**

#### 4.3.4. Acondicionamiento de señal para el sensor de voltaje

Debido a que el convertidor brinda una salida análoga de voltaje escalada, normalizada y filtrada, se coloca como protección externa un diodo zener de 5.1 V a la entrada analógica del controlador para evitar cualquier daño en el mismo (ver Figura 41).



**Figura 41 Acondicionamiento de señal para el sensor de voltaje**

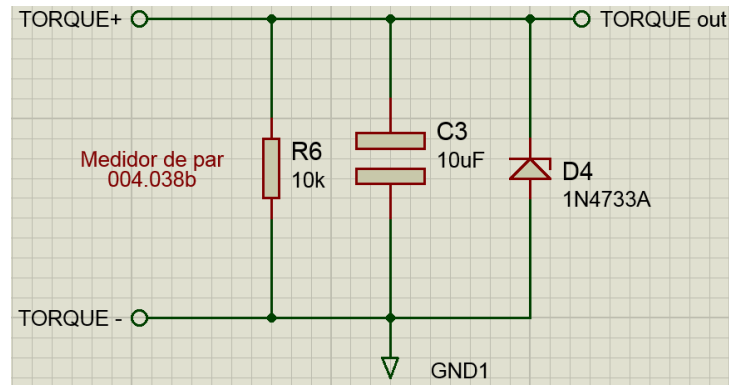
#### 4.3.5. Acondicionamiento de señal para el sensor de torque

Para la medición de torque se usa el módulo 004.038b el cual necesita un voltaje de alimentación de 220 Vac; para realizar el acondicionamiento se hacen pruebas de carga para determinar el voltaje de salida a determinados niveles de torque, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6**  
**Voltajes de salida del módulo 004.038b**

<b>TORQUE (Nm)</b>	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25
<b>VOLTAJE (V)</b>	0	0,19	0,36	0,54	0,77	0,95	1,15	1,34	1,63	1,88

Basándose en los resultados obtenidos y debido a que el torque máximo aplicado a los motores DC no supera los 2.5Nm, el acondicionamiento tiene un capacitor, una resistencia en paralelo a la señal de salida del sensor y un diodo zener para evitar daños a la entrada del controlador (ver Figura 42).



**Figura 42 Acondicionamiento de señal para el sensor de torque**

#### 4.3.6. Acondicionamiento de señal para el sensor de velocidad

Para sensar la velocidad se emplea un taco generador (004.005a), que esta acoplado directamente al electrodinamómetro, el sensor tiene un voltaje de salida de 6 Vdc a una velocidad de 1000 rpm, la velocidad máxima es 4000 rpm con lo que obtenemos un voltaje máximo de salida de 24 Vdc.

$$4000 \text{ rpm} \rightarrow 24 \text{ V}$$

$$I_n = 75 \text{ mA}$$

$$\frac{V_1}{R_1 + R_2} * R_2 = V_2 \text{ (fórmula de divisor de tensión)}$$

$$\frac{24}{R_1 + R_2} * R_2 = 5$$

$$24R_2 = 5(R_1 + R_2)$$

*(Se selecciona una resistencia de 15KΩ en R<sub>1</sub>)*

$$R_1 = 15\text{K}\Omega$$

$$24R_2 = 5(15 + R_2)$$

$$R_2 = 3.9\text{K}\Omega$$

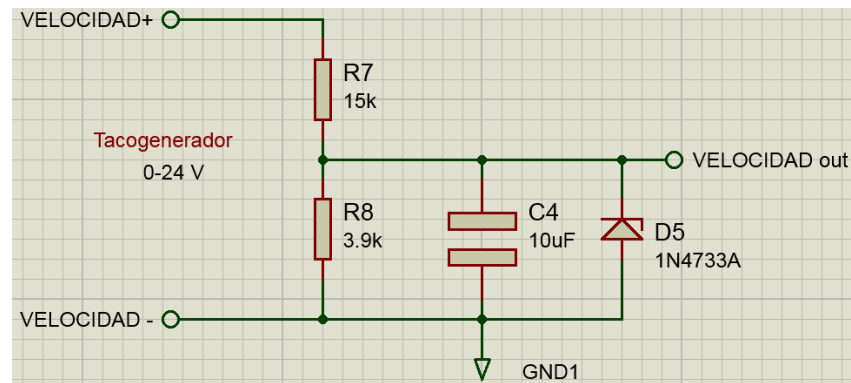
*(Obtenemos la corriente total que circula por el divisor)*

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24 \text{ V}}{18.9 \text{ K}\Omega} = 1.27 \text{ mA}$$

*(Comparamos la corrientes nominal y la del acondicionamiento)*

$$I = 1.27 \text{ mA (Calculado)} < I_n = 75 \text{ mA (Nominal)}$$

Por esta razón se implementa un divisor de voltaje para acondicionar la señal de salida; la corriente calculada en el acondicionamiento es menor que la corriente generada por el taco generador por lo que se justifica el diseño, además de colocar un capacitor para filtrar la señal y un diodo zener para limitar el voltaje de entrada al controlador (ver Figura 43).



**Figura 43 Acondicionamiento de señal para el sensor de velocidad**

#### 4.4. Diseño del circuito impreso para el control del electrodinamómetro y acondicionamientos de señales

Como se indicó anteriormente es necesario agregar tres fuentes de voltaje para el funcionamiento del circuito de control del electrodinamómetro, el mismo que necesita una fuente de 50 Vdc, para su diseño es necesario un transformador de 127 Vac a 50 Vac con una capacidad de corriente en el bobinado secundario de 4 A, un puente rectificador de 600 V y 8 A, un capacitor de 330 uF y 100 V, también añadimos al diseño una fuente de 12 Vdc por lo que es necesario un transformador de 127 Vac a 12 Vac con tap central, un puente rectificador de 25 V y 1 A, un regulador de voltaje de 12 Vdc y un capacitor de 330 uF, para el diseño de la fuente de alimentación de la parte de control del circuito es necesario un transformador de 127 Vac a 12 Vac, un regulador de voltaje de 12 Vdc, un capacitor de 330 uF y 50 V, como este transformador posee una capacidad de 1 A se lo utiliza para la alimentación de sensores; a la vez se agrega un regulador de voltaje de 5 Vdc, un capacitor de 330 uF y 25 V.



#### 4.5. Selección del controlador

Para la selección de la placa controladora se toma en cuenta los siguientes criterios:

- Número de entradas/salidas digitales
- Número de entradas/salidas analógicas
- Salidas PWM
- Número de puertos para comunicación serie
- Memoria de almacenamiento
- Software y lenguaje de programación
- Accesibilidad en el mercado

##### a. Arduino UNO

En la Figura 46 se muestra esta placa que consta de un microcontrolador ATmega328, cuenta con 14 pines digitales de entrada y salida de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM, posee 6 entradas analógicas, la alimentación se la puede realizar mediante el puerto USB tipo B o mediante una fuente de alimentación externa de 7-12V. El voltaje de operación de la placa es de 5V; el software de programación se puede descargar gratuitamente de la página oficial de Arduino, el lenguaje de programación es muy similar a C++.

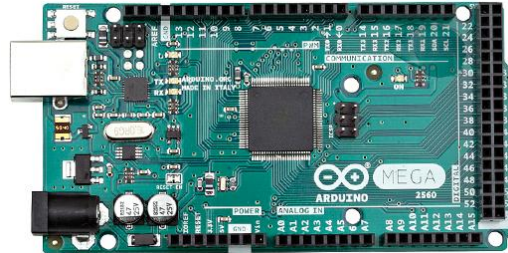


**Figura 46 Arduino UNO**  
**Fuente:** (Arduino, 2016)

##### b. Arduino MEGA 2560

El Arduino Mega está basado en un microcontrolador ATmega2560, la placa consta de 54 pines de entradas/salidas digitales de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM, posee 16 entradas analógicas y 4

puertos seriales UARTs; la alimentación se la puede realizar mediante el puerto USB tipo B o mediante una fuente de alimentación externa de 7-12V. El voltaje de operación de la placa es de 5V; el software de programación se puede descargar gratuitamente de la página oficial de Arduino, el lenguaje de programación es muy similar a C++ (ver Figura 47).



**Figura 47 Arduino MEGA 2560**  
**Fuente:** (Arduino, 2016)

### c. Controlador BeagleBone Black

En la Figura 48 se muestra esta placa computadora desarrollada por la organización Beagleboard.org, la cual fomenta el hardware y software open source, la plataforma se ejecuta bajo un sistema operativo Linux, cuenta con entradas y salidas de tipo digital y analógico, posee también un puerto Ethernet y un puerto USB 2.0. Se debe destacar que la placa BeagleBone Black traslada el sistema operativo de la tarjeta SD hacia la memoria flash incorporado, liberando la ranura para tarjetas microSD para otros fines.



**Figura 48 Controlador BeagleBone**  
**Fuente:** (Hacedores, 2014)



En la Tabla 7 se presenta un resumen de las especificaciones y características técnicas de cada una de las placas controladoras citadas anteriormente.

**Tabla 7**  
**Especificaciones técnicas de placas controladoras**

Controlador	Arduino UNO	Arduino MEGA 2560	BeagleBone Black
Procesador	ATmega328	ATMega2560	ARM Cortex-A8
Clock Speed	16 MHz	16 MHz	1 GHz
Voltaje de operación	5 V	5 V	3.3 V
I/O Analógicas	6/0	16/0	7/0
I/O Digitales	14 (5V)	54 (5V)	65 (3.3V)
Pines PWM	6	15	8
Puerto Ethernet	NO	NO	SI
Pines para comunicación serial	Serial0: 0 (RX) y 1 (TX); Datos TTL	Serial0: 0 (RX) y 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) y 14 (TX) Datos TTL	UART0 J1_4 (RX) J1_5 (TX)

El controlador seleccionado es el Arduino MEGA 2560 debido a que la placa debe tener mínimo 2 puertos de comunicación serial ya que un puerto estará usado implícitamente en la conexión USB de la placa al computador para la respectiva programación de la misma y el otro puerto será usado para establecer la comunicación con la pantalla HMI; otro aspecto importante es el voltaje de operación, en este caso debe ser de 5V ya que los acondicionamientos de señales y circuito de control están referenciados a este nivel de voltaje; por esta razón se escogió un Arduino MEGA 2560. Para mayor información sobre esta placa controladora ver el Anexo B.

#### 4.6. Selección de pantalla HMI

Considerando la cantidad de marcas y modelos de pantallas HMI o paneles operadores existentes actualmente en el mercado se establece los siguientes criterios para seleccionar la pantalla adecuada para el proyecto:

- Tamaño y resolución del display (7", 8" o 10")
- Puertos de comunicación (RS232, RS485)
- Funcionalidad (Puerto USB para registro de datos, Alarmas, etc.)
- Software de configuración (Licencia gratuita, manuales)
- Accesibilidad en el mercado nacional
- Precio

#### a. Paneles operadores Siemens

En la Figura 49 se muestran los SIMATIC HMI Basic Panels de segunda generación, son la serie de entrada ideal para aplicaciones HMI sencillas. La serie de dispositivos ofrece paneles con pantallas de 4 ", 7", 9 " y 12", y combinación de teclas o toque. La interfaz de usuario innovadora abre una amplia gama de operaciones con usos mejorados a través de nuevos controles y gráficos. (Siemens, 2016)



**Figura 49 Paneles operadores Simatic**  
**Fuente:** (Siemens, 2016)

#### b. Paneles operadores Delta

En la Figura 50 se muestran los paneles operadores Delta que ofrecen varios puertos de comunicación para una comunicación rápida y un cómodo control de una amplia gama de máquinas, sistemas e instalaciones. La pantalla táctil en color permite la introducción intuitiva de parámetros y una variedad de formas de mostrar datos variables, incluyendo gráficos de tendencias y elementos de alarma. La pantalla LCD de alta resolución visualiza el funcionamiento, la supervisión y el control eficiente en tiempo real, además el software de programación y configuración es muy intuitivo y

gratuito permitiéndole al usuario diseñar fácilmente la interfaz gráfica del proyecto respectivo. (Deltaww, 2016)



**Figura 50 Delta Touch Panels HMI**  
Fuente: (Deltaww, 2016)

### c. Paneles operadores Red Lion

Los paneles operadores HMI de Red Lion ofrecen conectividad expandida con Ethernet incorporada y un conector de tarjeta CompactFlash estándar y hasta 5 puertos serie de alta velocidad. Las pantallas HMI también incluyen conversión de protocolos, registro de datos y servicio web, facilitando el acceso a los datos. Las pantallas HMI de Red Lion están disponibles con pantallas táctiles en color de 4.3" o 7" que ofrecen puertos Ethernet y serie de alta velocidad (ver Figura 51).



**Figura 51 Paneles HMI Red Lion**  
Fuente: (Lion, 2016)

### d. Paneles operadores TouchWin Xinje

La serie TH de paneles operadores TouchWin de la marca Xinje se basa en la serie de paneles TP, se pueden encontrar paneles de 4.7", 7", 8", 10.1", 10.4"; los paneles requieren una alimentación externa de 24VDC, poseen 2 puertos de comunicación serial, 1 puerto USB para la conexión de dispositivos de almacenamiento, 1 puerto USB para la carga y descarga del programa, además posee un puerto RJ45 para conexión Ethernet. En la Figura 52 se muestra un Touch Panel TH765 y en la Tabla 8 se presenta un

resumen de las especificaciones y características técnicas de las pantallas HMI citadas anteriormente.



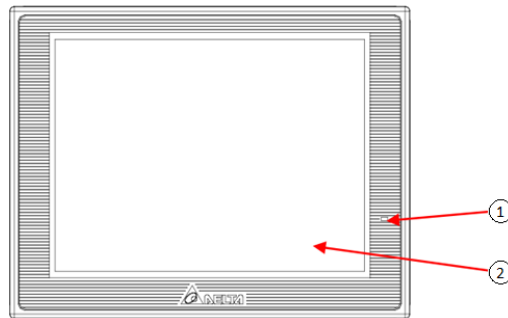
**Figura 52 Touch Panel TH765**  
Fuente: (Xinje, 2016)

**Tabla 8**  
**Especificaciones técnicas de pantallas HMI**

Pantalla HMI	KTP700 Basic	DOP-B07 E515	RED LION	TouchWin Xinje
Industrial	DP		G308C	TH765
<b>Tipo de Display</b>	7" TFT widescreen display	7" TFT LCD (65536 colors)	7.7" DSTN Passive Matrix 256 Color	7" LCD 65536 colors
<b>Resolución (pixels)</b>	800 x 480	800 x 600	640x480	800 x 480
<b>Software</b>	WinCC Basic (TIA Portal) V13 or higher	DOPSoft 2.00.04	Crimson® 3.0	TouchWin TH
<b>Alimentación</b>	24 VDC	24 VDC	24 VDC	24 VDC
<b>Interfaces</b>	COM1: RS485 USB: Tipo A	COM1: RS232 COM2: RS232/RS485 USB: Tipo A y B Ethernet 10/100 Mbps	COM1: RS485 COM2: RS232 USB: Tipo B Ethernet 10/100 Mbps	COM1: RS232/RS485 COM2: RS232/RS422/RS485 USB: Tipo A y B
<b>Dimensiones (mm)</b>	214 x 158	184 x 144	247.7 x 193	204 x 150.5

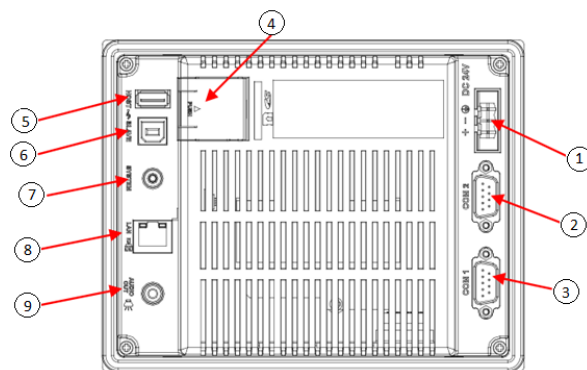
Se escogió la pantalla DOP-B07 E515 debido a sus características técnicas, su software de configuración interactivo y precio accesible. Las

Figuras 53 y 54 muestran las partes principales de la pantalla seleccionada; para mayor información ver el Anexo B



**Figura 53 Vista frontal de pantalla delta modelo DOP- B07E515**

1. Led indicador de estado
2. Touch Screen, display 7" TFT LCD (65536 colores), resolución de 800x600 pixeles



**Figura 54 Vista trasera de pantalla delta modelo DOP- B07E515**

1. Terminales de alimentación 24 VDC (-10% ~ +15%)
2. COM2 (RS-232, RS-485, RS-422)
3. COM1 (RS-232)
4. Cubierta de la batería/Slot para memory card
5. USB Host
6. USB Slave
7. System Key
8. Puerto Ethernet 10/100 Mbps auto- sensing
9. Salida de audio

#### 4.7. Implementación de la interfaz y protocolo de comunicación

Para establecer la comunicación entre el Arduino MEGA 2560 y la pantalla HMI DOP- B07E515 se utiliza la interfaz RS-485 debido a su alta calidad en la transmisión y recepción de datos ya que este estándar utiliza un sistema diferencial que permite eliminar los posibles ruidos que se pueden presentar en el canal de comunicación, además de otras ventajas como velocidades de hasta 10 Mbps y distancias de hasta 1200m.

Debido a que los terminales de comunicación serial TX/RX de Arduino usan niveles lógicos TTL y la pantalla bajo el estándar RS 485 usa valores de voltaje  $\pm 6V$  no se puede conectar directamente estos pines al puerto serial de la pantalla HMI, por esta razón es necesario la implementación de un dispositivo que convierta los niveles TTL de Arduino a las señales que se utilizan en el bus RS 485 y viceversa; este dispositivo es el circuito integrado MAX485, el cual se lo puede obtener fácilmente en el mercado nacional en su versión comercial para Arduino (ver Figura 55). En la Tabla 9 se indica la descripción de los pines del MAX485.



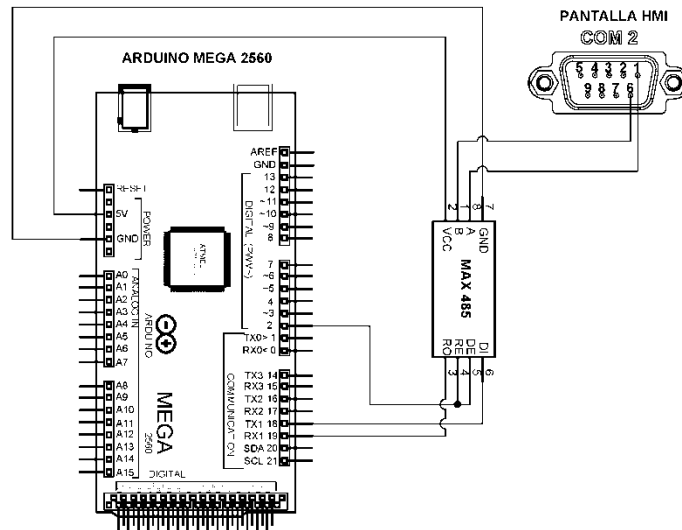
**Figura 55 Conversor MAX485**  
Fuente: (Vistronica, 2016)

**Tabla 9**

**Descripción de pines del módulo conversor MAX485**

PIN	NOMBRE	DESCRIPCION
1	RO	Salida de recepción
2	RE	Se usa para habilitar recepción. Activo a nivel bajo
3	DE	Se usa para habilitar transmisión. Activo a nivel alto
4	DI	Entrada de transmisión
5	GND	Conexión a tierra
6	A	Salida transmisión no invertida/entrada recepción no invertida
7	B	Salida transmisión invertida/entrada recepción invertida
8	Vcc	Alimentación 4.75V<Vcc<5.25V

En la Figura 56 se muestra el diagrama de conexión del módulo MAX485 con el Arduino MEGA 2560 y el puerto COM2 de la pantalla HMI. Los pines DE y RE del módulo RS485 se conectan en este caso al pin 2 para habilitar o deshabilitar la transmisión desde el programa.



**Figura 56 Interfaz de comunicación**

#### 4.8. Desarrollo del software en el controlador Arduino

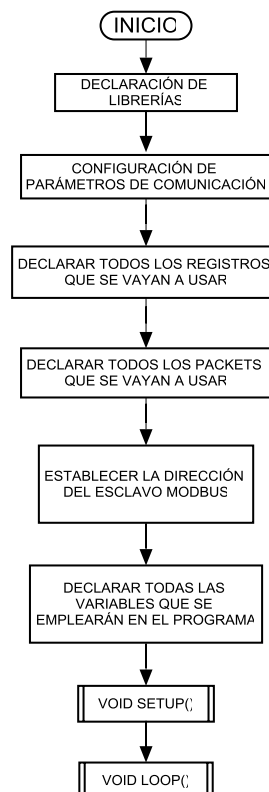
El programa está estructurado en tres partes principales la primera es la configuración previa de algunos parámetros necesarios para la comunicación entre la placa Arduino y la pantalla HMI, la segunda parte es la configuración de packets o comandos de funciones modbus que se declaran en la función void setup() y la tercera está relacionada con el código necesario para la adquisición y procesamiento de señales analógicas, cabe recalcar que esta última parte del código se encuentra dentro de la función void loop().

##### 4.8.1. Configuración inicial

En esta sección se declaran las librerías “ModbusXT.h” y “MatrixMath.h”. La primera sirve para configurar los parámetros de comunicación y todo lo relacionado a la configuración del protocolo modbus para establecer la comunicación de la placa Arduino con la pantalla HMI; la segunda librería sirve para realizar operaciones entre matrices como por ejemplo suma,

multiplicación, transpuesta, inversa, etc; esta librería puede ser de bastante utilidad ya que dependiendo de las circunstancias puede ser necesario realizar una regresión polinómica para suavizar la curva que se encuentre distorsionada.

En esta sección también se configuran los parámetros de comunicación como por ejemplo el tiempo máximo permitido para obtener una respuesta de un esclavo (TIMEOUT), tiempo de espera entre la ejecución de comandos continuos (POLLING), velocidad de transmisión de datos (BAUD), tiempo para la retransmisión de una solicitud después de una falla (RETRIES), pin para habilitar la comunicación y dirección del esclavo en este caso la pantalla HMI será el esclavo con un ID igual a uno. En la Figura 57 se muestra el diagrama de flujo que representa la configuración inicial que se realiza en la placa Arduino.



**Figura 57 Flujograma de configuración inicial**

Por último, en esta sección se establece el nombre y el orden de los registros, el número de packets o comandos y la declaración de las variables que se usaran en el programa; los registros son las variables que se desean



leer o escribir desde la placa Arduino a la pantalla HMI y viceversa, mientras que los packets son comandos en los que se configura que registros se van leer o escribir con una dirección modbus determinada hacia un esclavo específico.

#### 4.8.2. Función void setup()

La función void setup() se ejecuta una sola vez tras la descarga del programa a la placa y al energizar la misma; en esta función se configuran los packets estableciendo el número del packet, el ID del esclavo con el cual se desea comunicar, la función modbus correspondiente (Read Coil Status, Read Holding Registers, Read Input Registers, Preset Single Register, Preset Multiple Registers), la dirección modbus del registro, el número de registros y el registro de inicio. También se inicializa la comunicación estableciendo el puerto serial de la placa Arduino que se conecta a la pantalla HMI. Un ejemplo del código de programación se muestra a continuación.

```
void setup()
{
  //Config packets and register
  master.configure(packets, NO_OF_PACKET, regs);

  //Config individual packet: (packet, ID, Function, Address, Number of register, start register)
  master.construct(&packets[PACKET1], hmiID, PRESET_MULTIPLE_REGISTERS, 0, 9, 0);
  master.construct(&packets[PACKET2], hmiID, READ_HOLDING_REGISTERS, 9, 2, 9);
  master.construct(&packets[PACKET3], hmiID, READ_HOLDING_REGISTERS, 12, 2, 11);
  master.construct(&packets[PACKET4], hmiID, READ_HOLDING_REGISTERS, 100, 28, 14);
  master.construct(&packets[PACKET6], hmiID, READ_HOLDING_REGISTERS, 400, 28, 42);
  master.construct(&packets[PACKET7], hmiID, PRESET_MULTIPLE_REGISTERS, 150, 28, 70);
  |
  //Start Modbus
  master.begin(&Serial1, BAUD, BYTE_FORMAT, TIMEOUT, POLLING, RETRIES, TxEnablePin);

  Serial.begin(57600); //debug on serial0

  println("Arduino Modbus Master");
  pinMode(13, OUTPUT);
}
```

#### 4.8.3. Función void loop()

La función void loop() se ejecuta cíclicamente haciendo posible que el programa responda periódicamente a cualquier evento suscitado; dentro de esta función se encuentra implementado el código que nos permite obtener las lecturas de los sensores, la conversión de estas lecturas a unidades de ingeniería, la configuración del pin para la salida PWM, las operaciones aritméticas para el cálculo de la potencia útil, potencia total y rendimiento,

así como también el algoritmo de regresión polinómica para obtener los coeficientes respectivos de la función linealizada. En la Figura 58 se muestra un diagrama de flujo que representa la lógica implementada en el código de programación de la función void loop(), el código de todo el programa se muestra en el Anexo E.

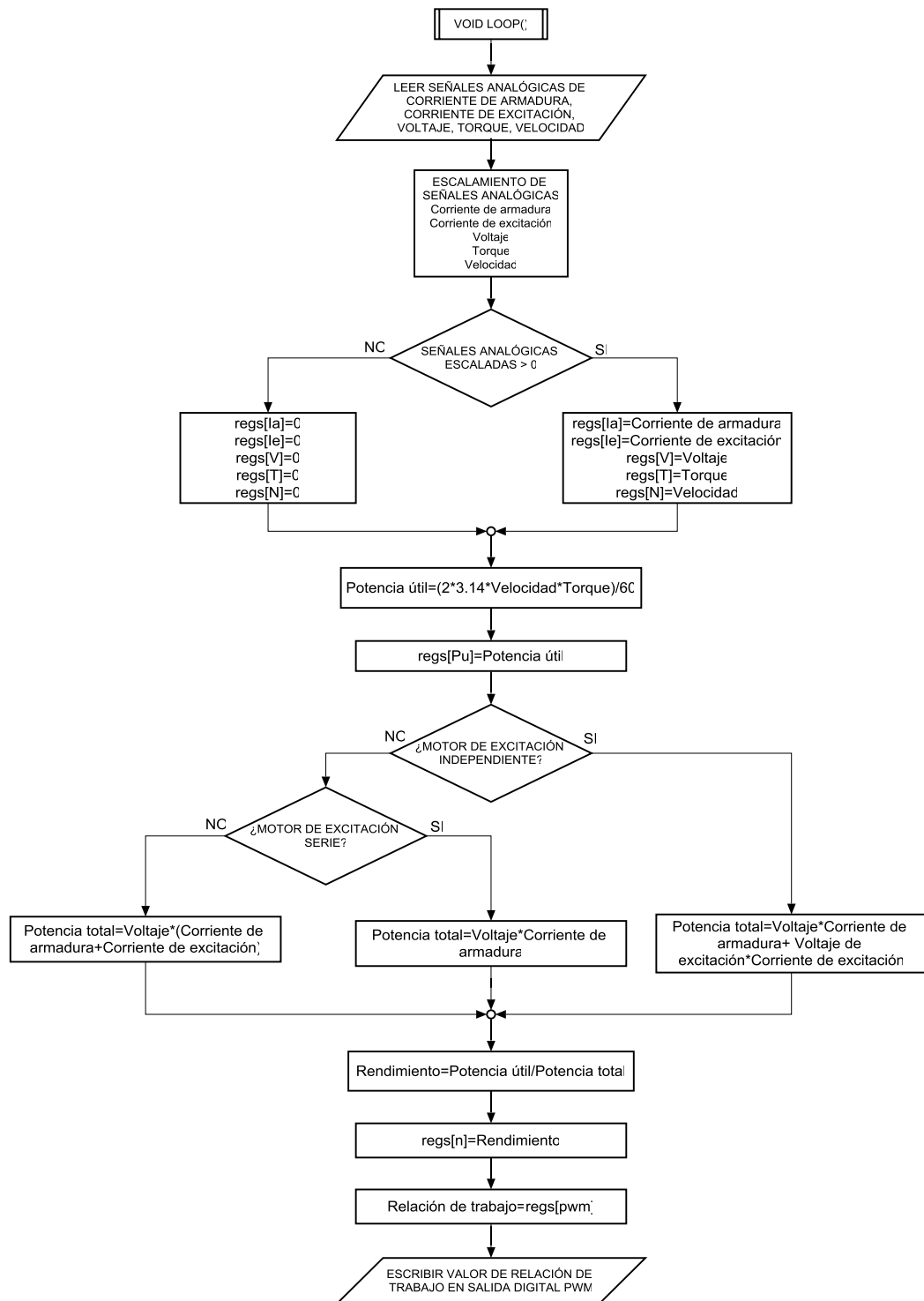


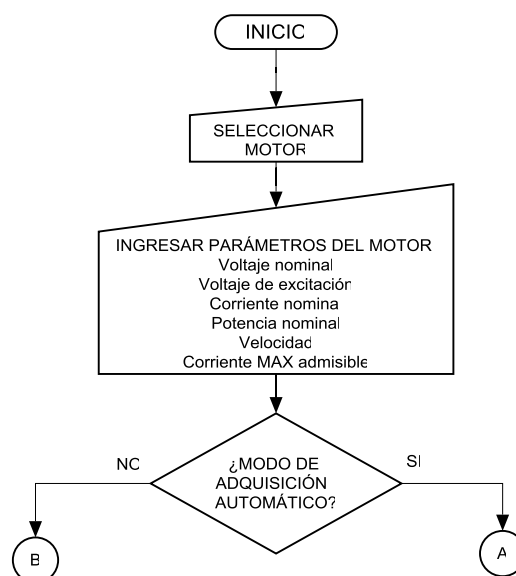
Figura 58 Diagrama de flujo de la función void loop()

#### 4.9. Desarrollo de la interfaz gráfica

Para el desarrollo de la interfaz gráfica es necesario el software DOPSoft para la serie de pantallas DOP-B, la licencia es gratuita y se lo puede descargar desde la página oficial de delta [www.deltaww.com](http://www.deltaww.com). La interfaz gráfica consta de 9 ventanas descritas a continuación.

- Ventana principal de inicio
- Ventana de selección del tipo de motor
- Ventana de parámetros del motor seleccionado
- Ventana de adquisición de datos
- Dos ventanas en las que se muestra las gráficas de las curvas características
- Dos ventanas en las que se presentan los datos obtenidos
- Ventana de histórico de alarmas

En las Figuras 59, 60 y 61 se muestra el diagrama de flujo que representa el funcionamiento del módulo didáctico, las primeras acciones que debe realizar el usuario una vez que se hayan realizado las conexiones correspondientes son escoger el tipo de motor e ingresar las características principales del mismo para posteriormente escoger el modo de funcionamiento, manual o automático.



**Figura 59 Primeras acciones al iniciar las pruebas de funcionamiento**

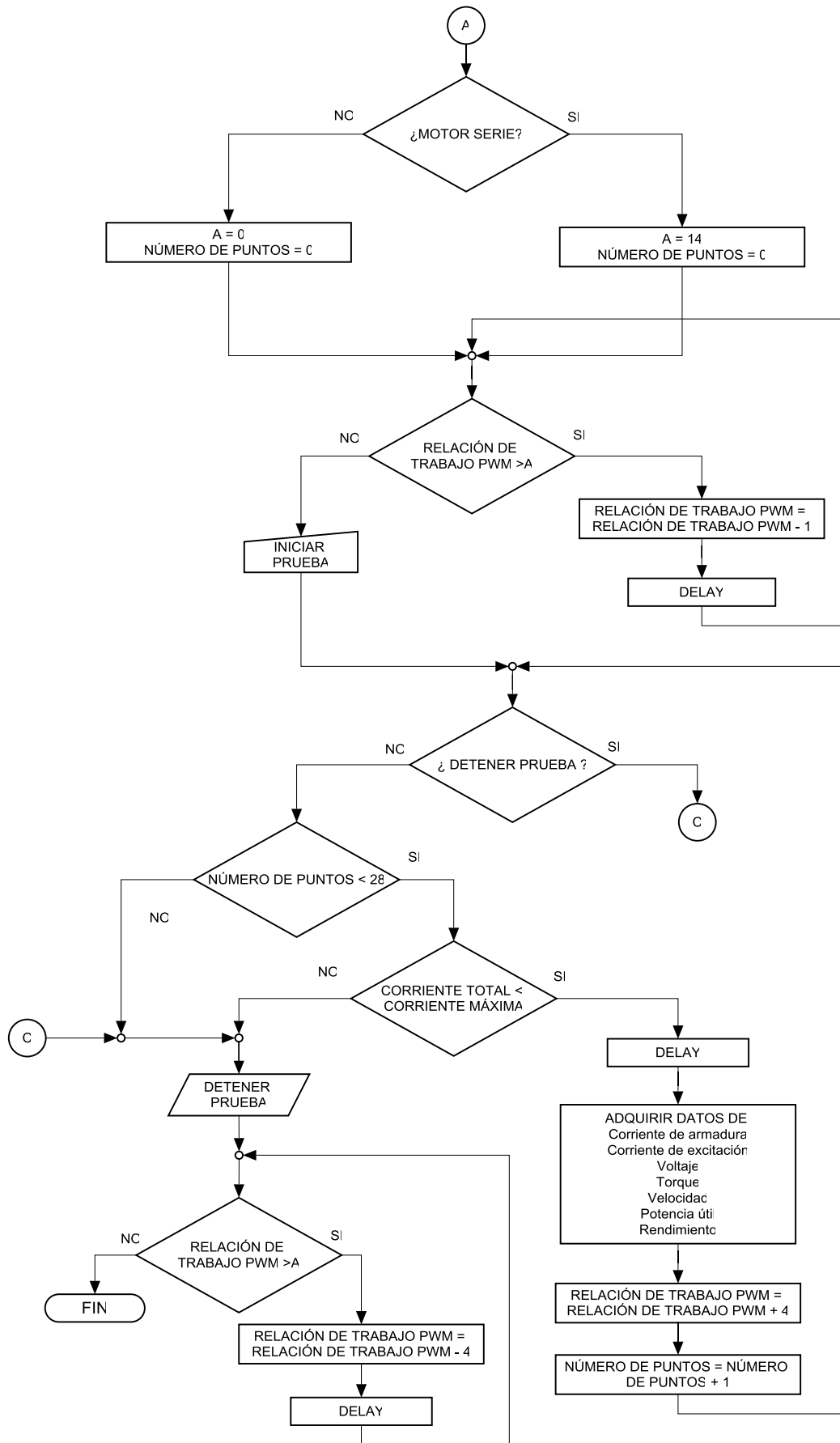
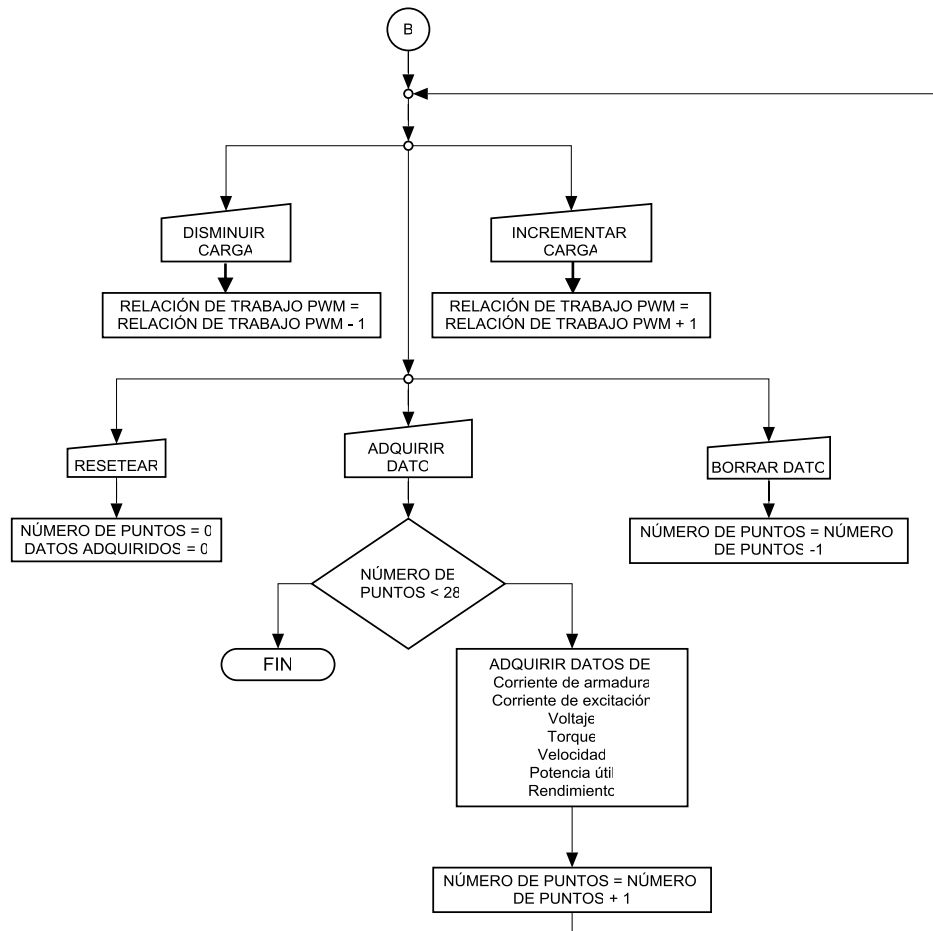


Figura 60 Modo de funcionamiento automático



**Figura 61 Modo de funcionamiento manual**

#### 4.9.1. Ventana de inicio para las pruebas de funcionamiento

En la Figura 62 se muestra la ventana de inicio una vez que se ha puesto en funcionamiento el módulo; nos muestra la información acerca del proyecto de investigación, además de la opción para seleccionar el motor.



**Figura 62 Pantalla principal**

#### 4.9.2. Ventana de selección del tipo de motor

En la Figura 63 se indica la ventana en la cual el usuario debe elegir el motor con el cual desea realizar la práctica para obtener las curvas características bajo carga. En caso que se desee cambiar de motor, la selección del mismo se lo deberá realizar con el motor sin suministro de energía caso contrario los botones de selección se bloquearán y se mostrará un mensaje como se muestra en la Figura 64.

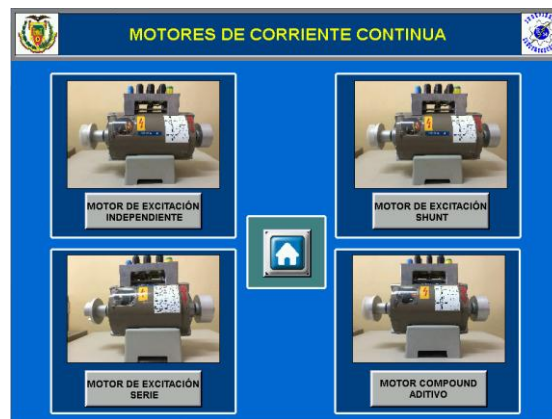


Figura 63 Ventana de selección de motores de corriente continua



Figura 64 Mensaje de advertencia al seleccionar un motor energizado

#### 4.9.3. Ventana de parámetros del motor

En la Figura 65 se muestra esta ventana en la que el usuario debe ingresar los datos de placa del motor seleccionado y ciertos parámetros como el voltaje de excitación (habilitado solamente cuando se seleccione el motor 004.060 en configuración de excitación independiente) y la corriente máxima admisible por el motor, por defecto este parámetro se establece en

2 A; este parámetros es muy importante ya que una de las condiciones para detener la adquisición de datos y por ende el incremento de carga es precisamente si la corriente total del motor supera la corriente máxima, debido a esto este parámetro está protegido con un nivel 6 de seguridad, si se desea cambiar el valor de este parámetro se solicitará la contraseña respectiva al nivel 6 o superior, si se desea cambiar la clave deberá ingresar al administrador de usuario ingresando la clave respectiva al nivel 7.

**PARÁMETROS DEL MOTOR SHUNT**  
004.060

**VOLTAJE DE EXCITACIÓN (V) :**

**VOLTAJE DE ARMADURA (V) :** 220.00

**CORRIENTE NOMINAL(A) :** 1.90

**POTENCIA (W) :** 270

**VELOCIDAD (RPM) :** 1380.0

**CORRIENTE MAX (A) :** 2.50

**Dipl.Ing. (FH) Hubert Barth**  
D-7060 Schorndorf  
West-Germany  
Type KGNW 56-2  
Nr. 004\_060 IP 00  
V 220 DC A 1,9  
KW 0,27 cos ϕ  
1380 /min. Hz Kl. B  
VDE 0530/72

**Dipl.Ing. (FH) Hubert Barth**  
D-7060 Schorndorf  
West-Germany  
Type KGNC 56-2  
Nr. 004\_030 IP 00  
V 220= A 1,4  
KW 0,175 cos ϕ  
1450 /min. Hz Kl. B  
VDE 0530/72

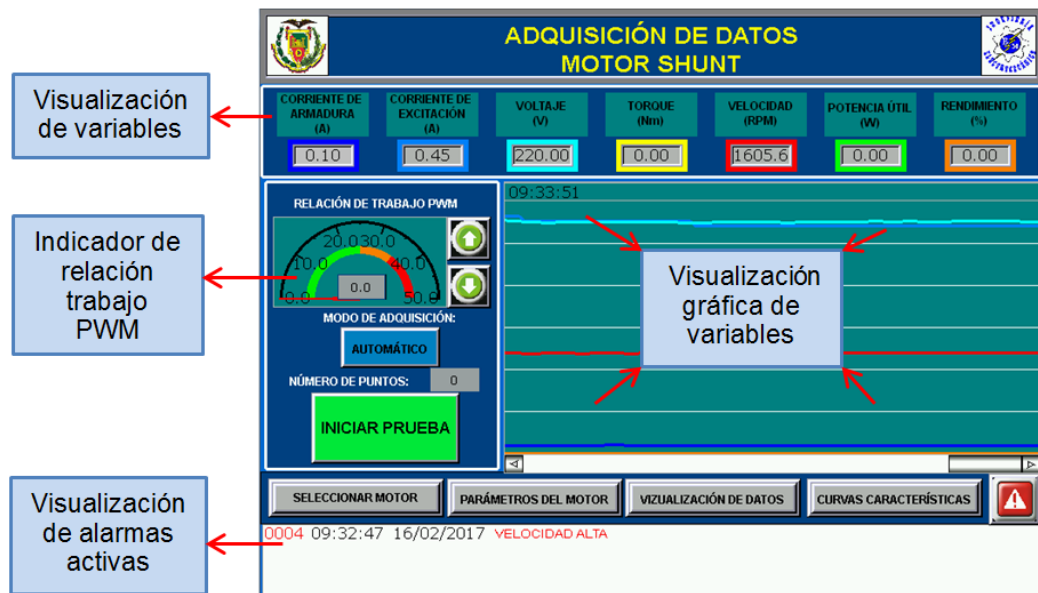
**Dipl.Ing. (FH) Hubert Barth**  
D-7060 Schorndorf  
West-Germany  
Type KGR-56-2  
Nr. 004\_001 IP 00  
V 220 DC A 1,4  
KW 0,17 /min. Hz Kl. B  
VDE 0530/72

SELECCIONAR MOTOR    ADMINISTRADOR DE USUARIO    ADQUISICIÓN DE DATOS

**Figura 65 Ventana de parámetros del motor seleccionado**

#### 4.9.4. Ventana de adquisición de datos

En esta ventana se puede visualizar los valores actuales de corriente de armadura, corriente de excitación, voltaje de alimentación, velocidad, torque, potencia útil y rendimiento. La adquisición de datos se lo puede realizar de dos formas automática o manual. En modo automático el sistema incrementa la carga mecánica aumentando progresivamente la relación de trabajo PWM y después de un tiempo de estabilización adquiere los datos de las variables antes mencionadas, este proceso se repite hasta que la corriente total supere la corriente máxima o hasta adquirir 28 puntos o datos de cada una de las variables. Para iniciar la prueba se debe pulsar el botón **“INICIAR PRUEBA”**, si el voltaje de alimentación es menor a 215 V o mayor a 225 V el botón no se habilita (ver Figura 66).



**Figura 66 Ventana de adquisición de datos en modo automático**

En modo manual el usuario puede incrementar la carga mecánica al valor deseado ya sea en incrementos o decrementos del 4% de la relación de trabajo PWM o al porcentaje deseado a través de un campo de entrada numérica; el modo manual consta de tres botones (ver Figura 67):

- **RESET:** Borra todos los puntos adquiridos hasta el momento previo de presionar este botón para empezar una nueva adquisición desde el primer punto.
- **BORRAR:** Borra el punto o grupo de datos adquiridos anteriormente, es decir si se encuentra actualmente en el punto 20 al presionar este botón regresará al punto 19 para obtener los nuevos datos.
- **ADQUIRIR:** Adquiere los datos de las variables antes mencionadas.

El número máximo de puntos o pares ordenados de datos adquiridos tanto en modo automático como en modo manual es de 28.



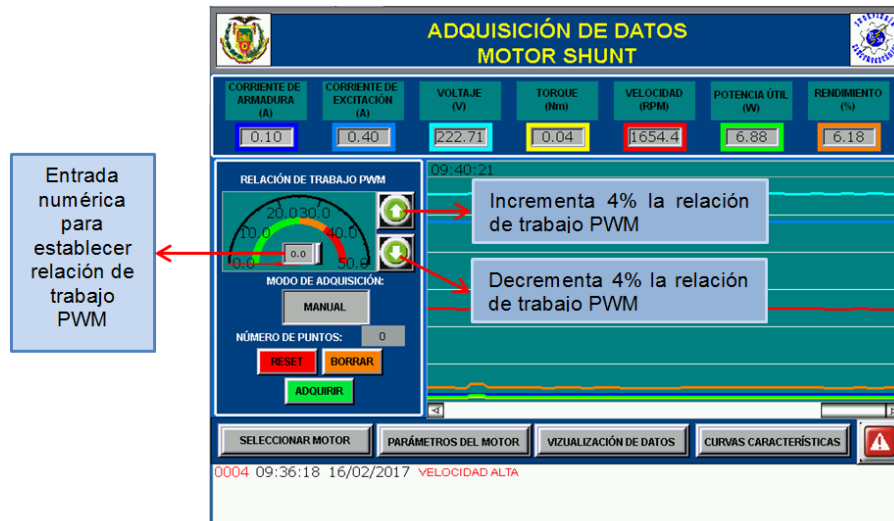


Figura 67 Ventana de adquisición de datos en modo manual

#### 4.9.5. Ventana de gráficas de curvas características

En esta ventana el usuario puede visualizar las curvas características del motor seleccionado, se puede optar por graficar cada una individualmente o las cuatro curvas al mismo tiempo; para graficar la curva seleccionada se debe borrar la curva que se encuentre graficada presionando el botón BORRAR GRÁFICA y posteriormente para graficar la nueva curva presionar el botón GRAFICAR. Presionando la flecha en el panel inferior de la ventana se visualiza la segunda ventana de curvas características del motor seleccionado (ver Figura 68).

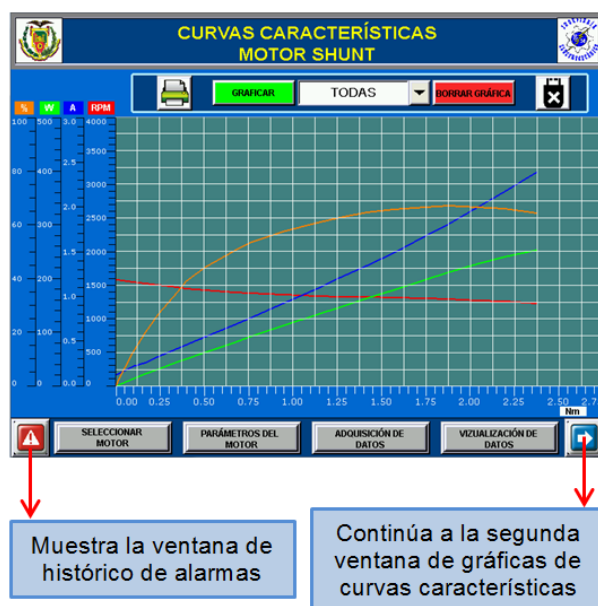


Figura 68 Ventana principal de curvas características

#### 4.9.6. Ventana de datos obtenidos

En esta ventana el usuario puede observar los datos obtenidos durante la prueba de carga ya sea de forma automática o manual, como se indica anteriormente el número máximo de puntos es 28; presionando la flecha en el panel inferior de la ventana se visualiza la segunda ventana de datos obtenidos (ver Figura 69).

DATOS OBTENIDOS MOTOR SHUNT						
TORQUE (Nm)	VELOCIDAD (RPM)	CORRIENTE DE ARMADURA (A)	CORRIENTE DE EXCITACIÓN (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)	RENDIMIENTO (%)
0.00	1605.6	0.10	0.44	220.22	0.00	0.00
0.01	1605.6	0.12	0.44	218.18	1.66	1.36
0.01	1581.3	0.14	0.43	216.83	1.64	1.33
0.10	1552.8	0.17	0.42	214.11	16.14	12.78
0.17	1532.5	0.22	0.42	211.39	27.09	20.02
0.24	1495.9	0.27	0.41	207.77	37.33	26.42
0.35	1459.3	0.33	0.40	203.47	53.11	35.76
0.40	1430.8	0.40	0.39	200.98	59.52	37.92
0.51	1418.6	0.48	0.39	201.21	75.24	42.98
0.67	1406.5	0.57	0.39	200.98	98.00	50.79
0.76	1390.2	0.67	0.39	200.76	109.88	51.63
0.95	1378.0	0.77	0.39	201.21	136.14	58.33
1.14	1361.7	0.88	0.39	200.98	161.44	63.25
1.27	1345.5	1.00	0.39	200.30	177.71	63.83

Realiza una captura de pantalla y la almacena en el dispositivo USB

Expulsa de forma segura el dispositivo USB

Figura 69 Ventana principal de datos obtenidos

#### 4.9.7. Ventana de histórico de alarmas

Esta ventana se visualiza en la Figura 70; en esta ventana se muestra el historial de todas las alarmas ocurridas en el sistema. Las alarmas que se pueden presentar son las siguientes:

- Corriente total mayor a la corriente máxima establecida
- Voltaje aplicado demasiado alto ( $V_{ap} > 225 V$ )
- Voltaje aplicado muy bajo ( $V_{ap} < 215 V$ )
- Velocidad alta



HISTÓRICO DE ALARMAS				
O	0001	09:24:33	16/02/2017	VOLTAJE BAJO
O	0004	09:32:47	16/02/2017	VELOCIDAD ALTA
X	0001	09:32:56	16/02/2017	VOLTAJE BAJO
O	0001	09:34:36	16/02/2017	VOLTAJE BAJO
X	0004	09:35:13	16/02/2017	VELOCIDAD ALTA
O	0003	09:35:59	16/02/2017	PELIGRO   CORRIENTE ALTA
X	0003	09:36:02	16/02/2017	PELIGRO   CORRIENTE ALTA
O	0004	09:36:18	16/02/2017	VELOCIDAD ALTA
X	0001	09:36:27	16/02/2017	VOLTAJE BAJO

SELECCIONAR MOTOR    PARÁMETROS DEL MOTOR    ADQUISICIÓN DE DATOS    CURVAS CARACTERÍSTICAS    VIZUALIZACIÓN DE DATOS

Figura 70 Ventana de histórico de alarmas

## CAPÍTULO V

### 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Prueba de la interfaz de comunicación

La prueba de comunicación fue la primera que se realizó al inicio de la presente investigación ya que es uno de los pilares en los que se fundamenta este proyecto. El objetivo de esta prueba fue visualizar en la pantalla HMI valores de 0-1023 que corresponden a niveles de voltaje de 0-5V y encender un led al pulsar un botón en la pantalla HMI, para ello se implementa el circuito de la Figura 71. Los resultados fueron satisfactorios como se observa en la Figura 72.

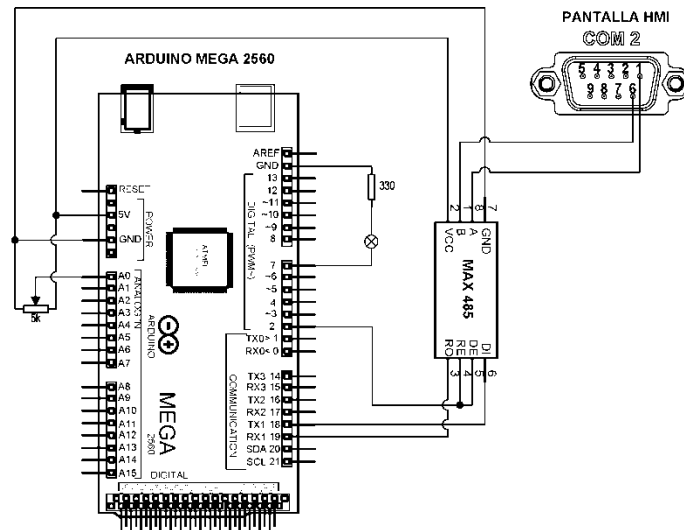


Figura 71 Circuito para prueba de comunicación

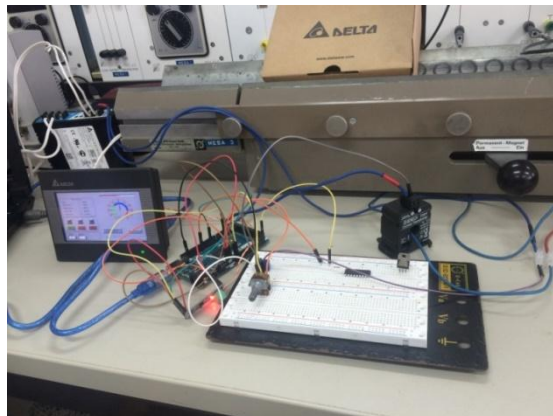
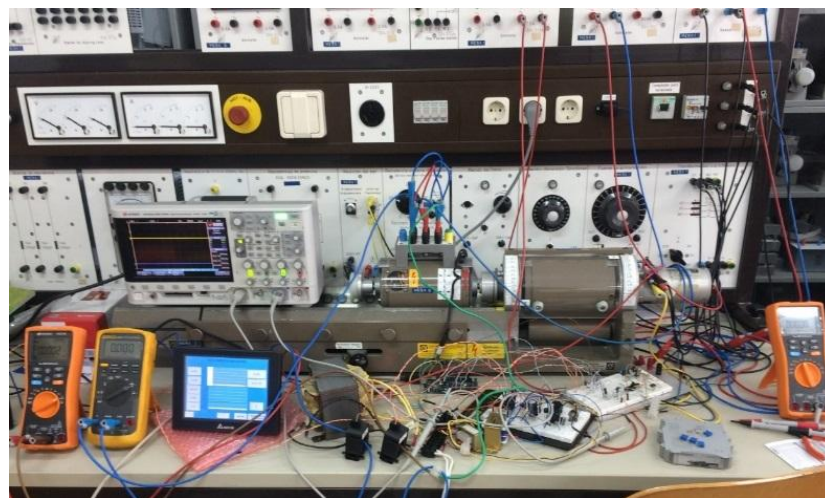


Figura 72 Prueba de comunicación entre HMI y Arduino

## 5.2. Prueba del circuito de control del electrodinamómetro y acondicionamientos

En esta prueba se implementó el circuito electrónico del Anexo C2 en un protoboard; primero se prueba el circuito de control, para lo cual se realizan las conexiones del Anexo D2 con la diferencia de que los terminales de alimentación del electrodinamómetro se conectan a los pines de salida del circuito implementado y mediante unos botones en el HMI se aumenta y disminuye la relación de trabajo PWM variando el voltaje aplicado al electrodinamómetro lo cual se ve reflejado en el frenado correspondiente del motor. Posteriormente se probaron los acondicionamientos para cada uno de los sensores, contrastando los valores reales con los valores obtenidos mediante el escalamiento correspondiente en la placa Arduino. La Figura 73 muestra las conexiones realizadas para la implementación de las pruebas descritas.

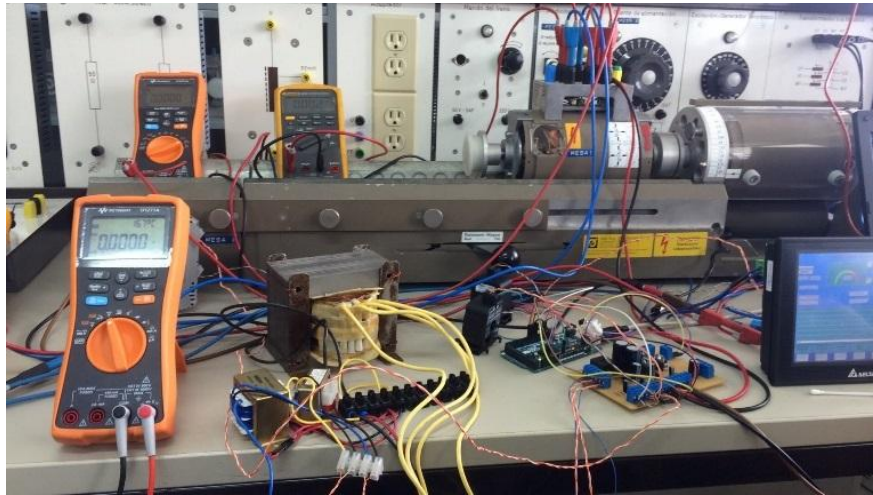


**Figura 73 Pruebas del circuito de control y acondicionamientos**

## 5.3. Pruebas del circuito impreso para control y acondicionamientos

Para realizar esta prueba se implementó las conexiones del Anexo C1 y se verificó que al variar la señal PWM se aplique carga al eje del motor, además se comprueba que los acondicionamientos de señal funcionen correctamente comparando las medidas reales con las obtenidas mediante el escalamiento respectivo, algunas diferencias que existen entre estos valores se calibran cambiando el escalamiento mediante la programación

respectiva. Adicionalmente se realiza una prueba de carga con el motor shunt en la que se observa todo el funcionamiento del sistema con el objetivo de verificar y corregir configuraciones de la pantalla HMI y placa Arduino, en las Figura 74 se pueden apreciar las conexiones realizadas para la prueba descrita.



**Figura 74 Prueba del circuito impreso de control y acondicionamiento**

#### **5.4. Pruebas para obtención de curvas de funcionamiento en forma manual.**

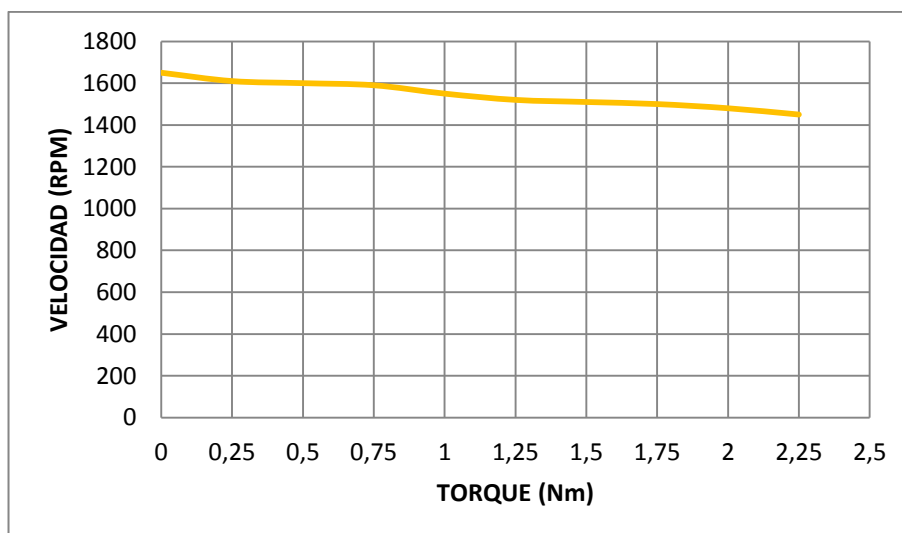
Para evidenciar las ventajas que se obtienen al implementar el módulo didáctico en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga es importante realizar primeramente pruebas de funcionamiento en forma manual es decir de la manera tradicional como se lo ha venido haciendo hasta el momento; esta forma consiste en armar los circuitos que se muestran en los Anexos D1, D2, D3 y D4; luego se debe incrementar carga con el mando de freno hasta obtener el valor de torque deseado; posteriormente tomar datos de corriente de armadura, corriente de excitación, voltaje de alimentación, torque y velocidad; luego se procede a tabular los datos obtenidos en una hoja de Excel y posteriormente con la ayuda de esta herramienta informática se calcula los valores de potencia útil, potencia total y rendimiento para finalmente obtener las curvas características.

### 5.4.1. Motor de excitación independiente

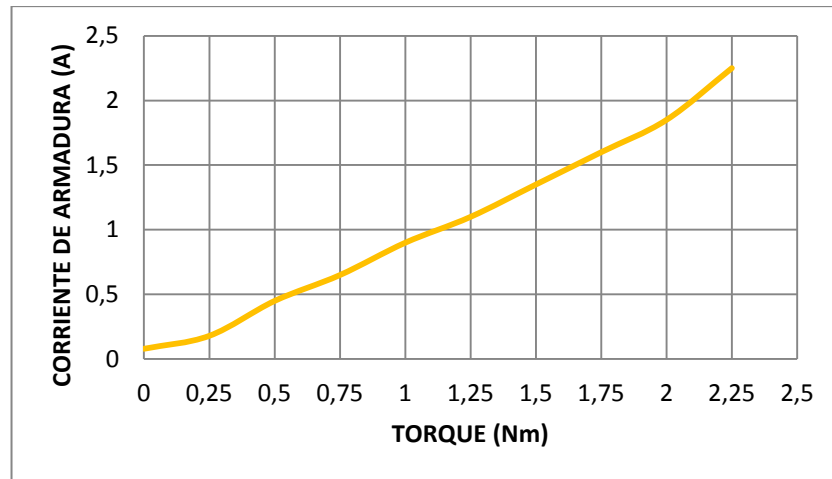
Para obtener las curvas de funcionamiento del motor de excitación independiente (004.060) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D1. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 10 mientras que en las Figuras 75, 76, 77 y 78 se observan las curvas características del motor (004.060) con excitación independiente obtenidas manualmente.

**Tabla 10**  
**Prueba de carga manual para el motor con excitación independiente 004.060**

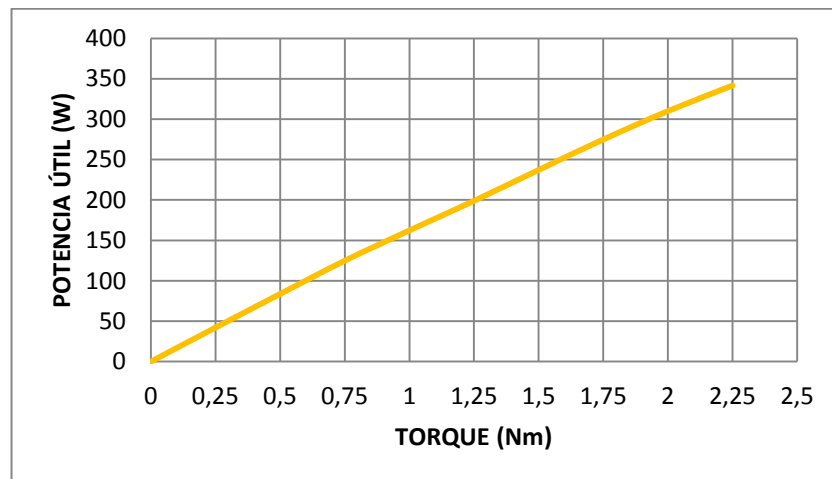
M (Nm)	n (RPM)	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>e</sub> (A)	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>e</sub> (V)	P <sub>t</sub> (W)	P <sub>u</sub> (W)	η (%)
0	1650	0,08	0,42	220	220	110	0	0
0,25	1610	0,18	0,415	220	220	130,9	42,15	32,2
0,5	1600	0,45	0,41	220	220	189,2	83,78	44,28
0,75	1590	0,65	0,4	220	220	231	124,88	54,06
1	1550	0,9	0,4	220	220	286	162,32	56,76
1,25	1520	1,1	0,4	220	220	330	198,97	60,29
1,5	1510	1,35	0,39	220	220	382,8	237,19	61,96
1,75	1500	1,6	0,385	220	220	436,7	274,89	62,95
2	1480	1,85	0,38	220	220	490,6	309,97	63,18
2,25	1450	2,25	0,38	220	220	578,6	341,65	59,05



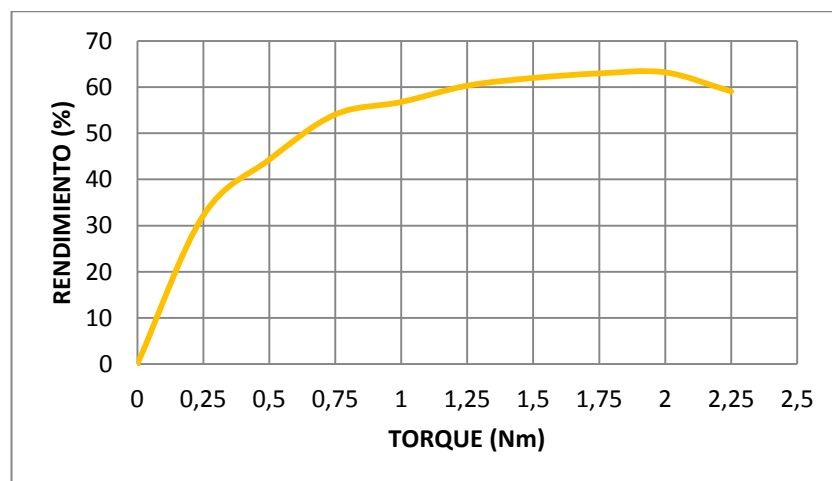
**Figura 75 Curva  $n=f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida manualmente**



**Figura 76 Curva  $I_a=f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida manualmente**



**Figura 77 Curva  $P_u=f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida manualmente**



**Figura 78 Curva  $\eta=f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida manualmente**

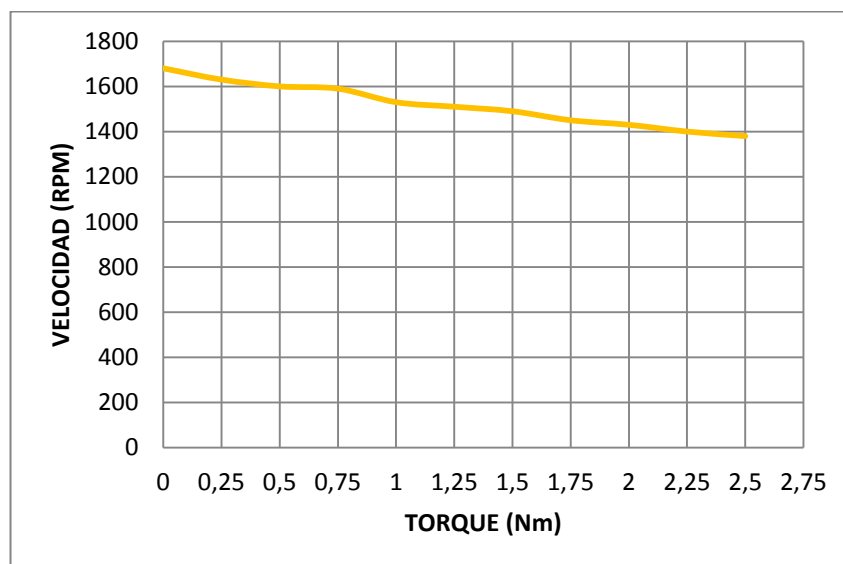


### 5.4.2. Motor shunt

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor shunt (004.060) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D2. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 11, mientras que en las Figuras 79, 80, 81 y 82 se observan las curvas características del motor shunt (004.060).

**Tabla 11**  
**Prueba de carga manual para el motor shunt 004.060**

M (Nm)	n (RPM)	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>e</sub> (A)	I <sub>g</sub> (A)	V (V)	P <sub>t</sub> (W)	P <sub>u</sub> (W)	η (%)
0	1680	0,1	0,4	0,5	220	110	0	0
0,25	1630	0,18	0,4	0,58	220	127,6	42,67	33,44
0,5	1600	0,42	0,395	0,815	220	179,3	83,78	46,73
0,75	1590	0,65	0,395	1,045	220	229,9	124,88	54,32
1	1530	0,9	0,39	1,29	220	283,8	160,22	56,46
1,25	1510	1,08	0,39	1,47	220	323,4	197,66	61,12
1,5	1490	1,3	0,385	1,685	220	370,7	234,05	63,14
1,75	1450	1,5	0,38	1,88	220	413,6	265,73	64,25
2	1430	1,85	0,38	2,23	220	490,6	299,5	61,05
2,25	1400	2,1	0,38	2,48	220	545,6	329,87	60,46
2,5	1380	2,5	0,38	2,88	220	633,6	361,28	57,02



**Figura 79 Curva  $n=f(M)$  del motor shunt obtenida manualmente**

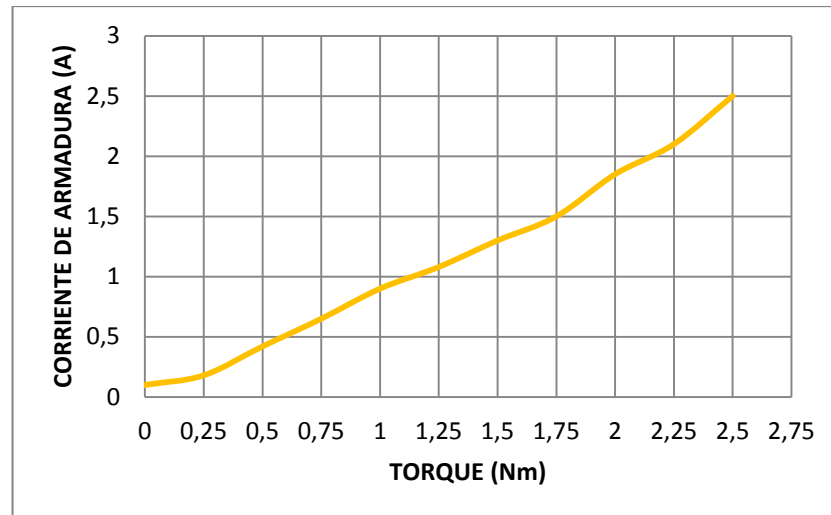


Figura 80 Curva  $I_a=f(M)$  del motor shunt obtenida manualmente

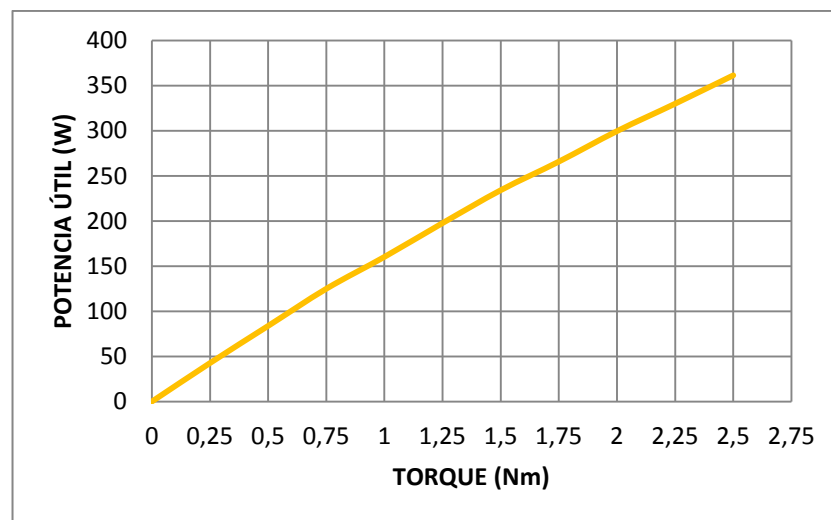


Figura 81 Curva  $P_u=f(M)$  del motor shunt obtenida manualmente

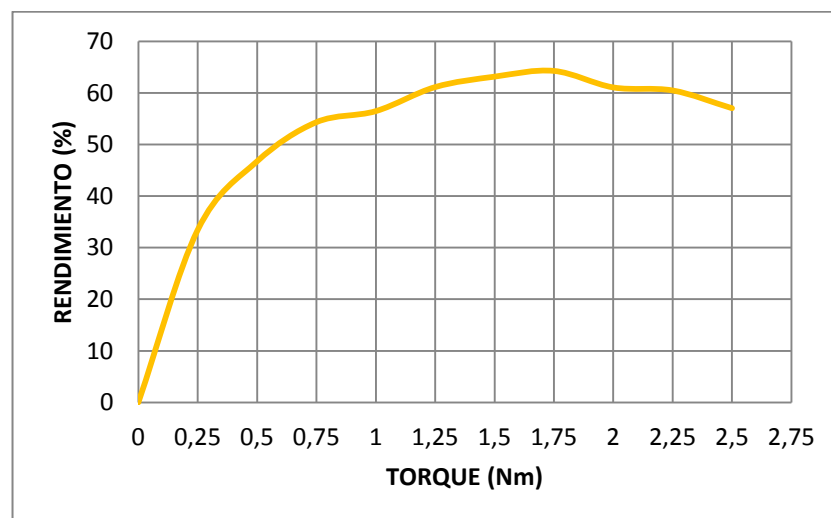


Figura 82 Curva  $\eta=f(M)$  del motor shunt obtenida manualmente

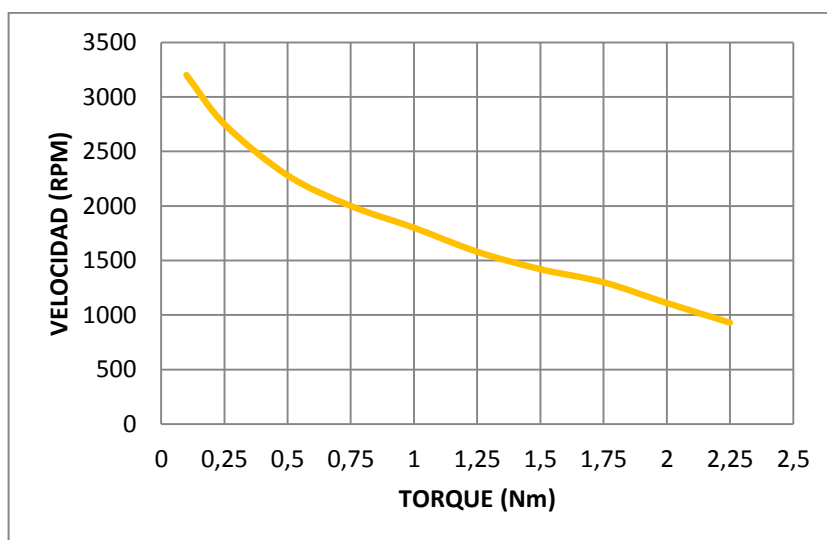
### 5.4.3. Motor de excitación serie

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor serie (004.001) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D3. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 12, mientras que en las Figuras 83, 84, 85 y 86 se observan las curvas características del motor serie (004.001).

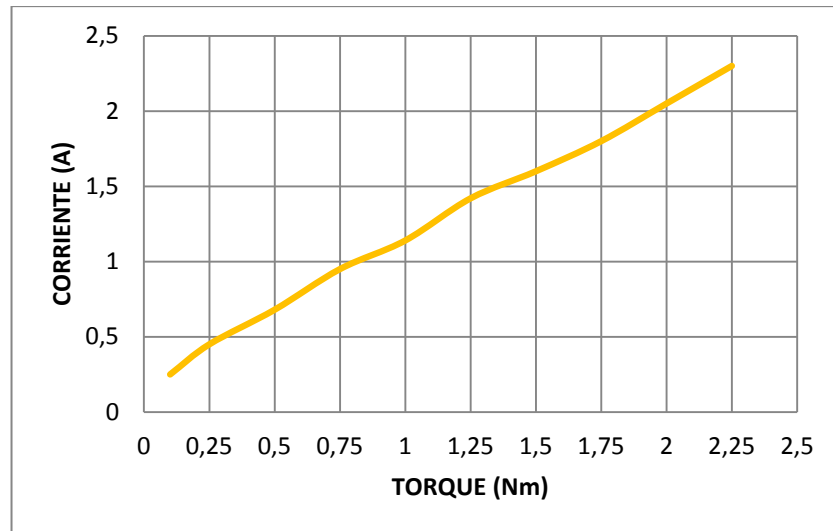
**Tabla 12**

**Prueba de carga manual para el motor serie 004.001**

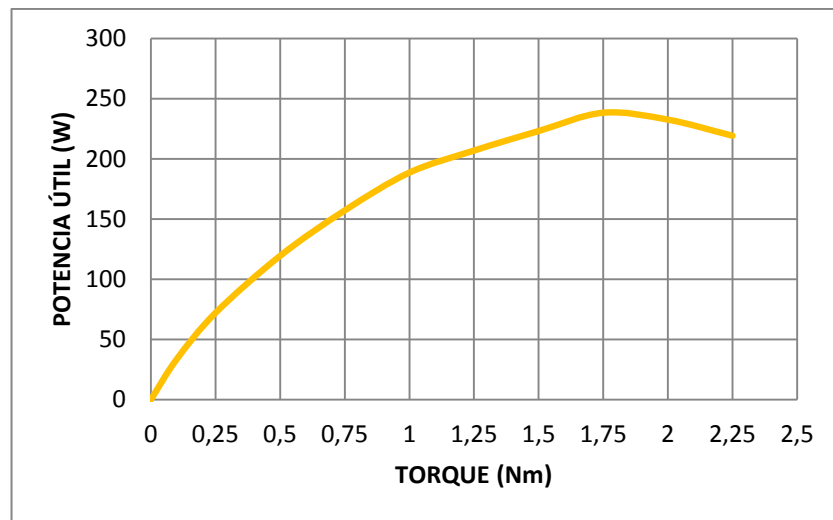
M (Nm)	n (RPM)	Ia (A)	V (V)	Pt (W)	Pu (W)	$\eta$ %
0,1	3200	0,25	220	55	33,51	60,93
0,25	2750	0,45	220	99	71,99	72,72
0,5	2280	0,68	220	149,6	119,38	79,8
0,75	2000	0,95	220	209	157,08	75,16
1	1800	1,14	220	250,8	188,5	75,16
1,25	1580	1,42	220	312,4	206,82	66,2
1,5	1420	1,6	220	352	223,05	63,37
1,75	1300	1,8	220	396	238,24	60,16
2	1110	2,05	220	451	232,48	51,55
2,25	930	2,3	220	506	219,13	43,31



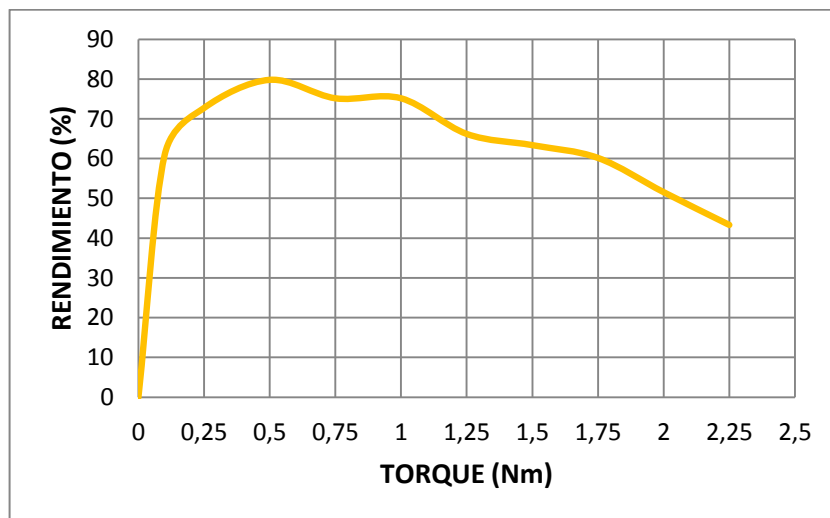
**Figura 83 Curva  $n=f(M)$  del motor serie obtenida manualmente**



**Figura 84 Curva  $I=f(M)$  del motor serie obtenida manualmente**



**Figura 85 Curva  $P_u=f(M)$  del motor serie obtenida manualmente**



**Figura 86 Curva  $\eta=f(M)$  del motor serie obtenida manualmente**

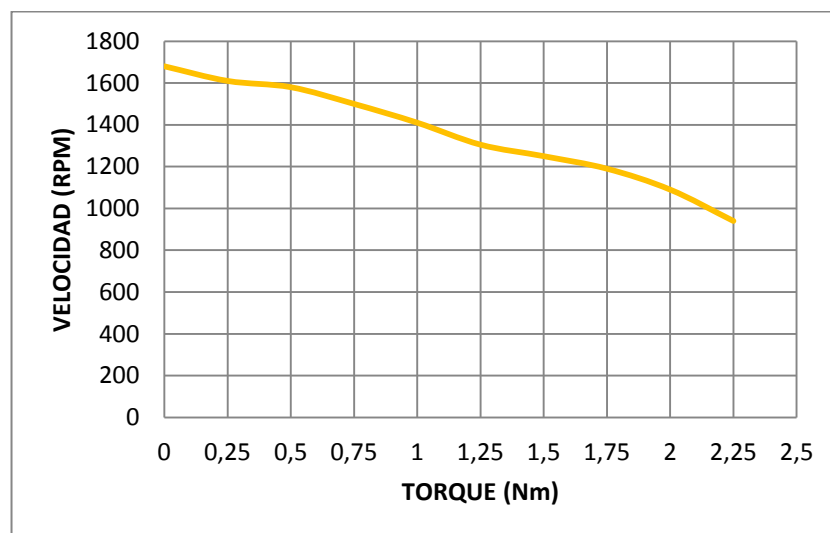
#### 5.4.4. Motor compound aditivo

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor compound aditivo (004.030) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D4. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 13, mientras que en las Figuras 87, 88, 89 y 90 se observan las curvas características del motor compound aditivo (004.030).

**Tabla 13**

**Prueba de carga manual para el motor compound 004.030**

M (Nm)	n (RPM)	Ia (A)	Ie (A)	Ig (A)	V (V)	Pt (W)	Pu (W)	$\eta$ %
0	1680	0,1	0,25	0,35	220	77	0	0
0,25	1610	0,23	0,24	0,47	220	103,4	42,15	40,76
0,5	1580	0,53	0,24	0,77	220	169,4	82,73	48,84
0,75	1500	0,77	0,235	1,005	220	221,1	117,81	53,28
1	1410	1	0,235	1,235	220	271,7	147,65	54,34
1,25	1305	1,3	0,23	1,53	220	336,6	170,82	50,75
1,5	1250	1,52	0,23	1,75	220	385	196,35	51
1,75	1190	1,73	0,23	1,96	220	431,2	218,08	50,58
2	1090	1,97	0,22	2,19	220	481,8	228,29	47,38
2,25	940	2,23	0,22	2,45	220	539	221,48	41,09



**Figura 87 Curva  $n=f(M)$  del motor compound obtenida manualmente**

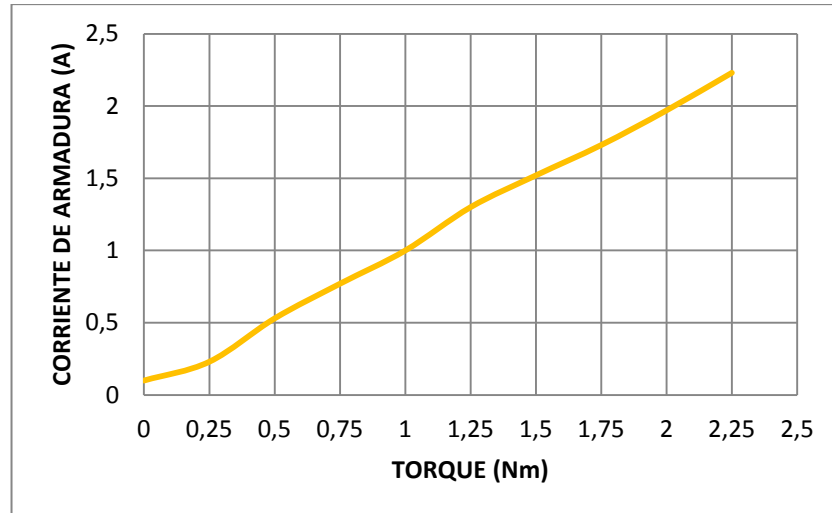


Figura 88 Curva  $I_a=f(M)$  del motor compound obtenida manualmente

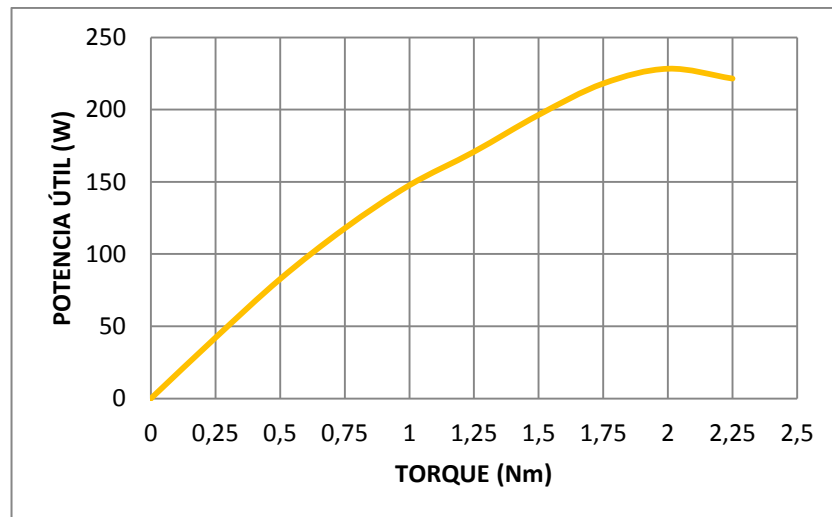


Figura 89 Curva  $P_u=f(M)$  del motor compound obtenida manualmente

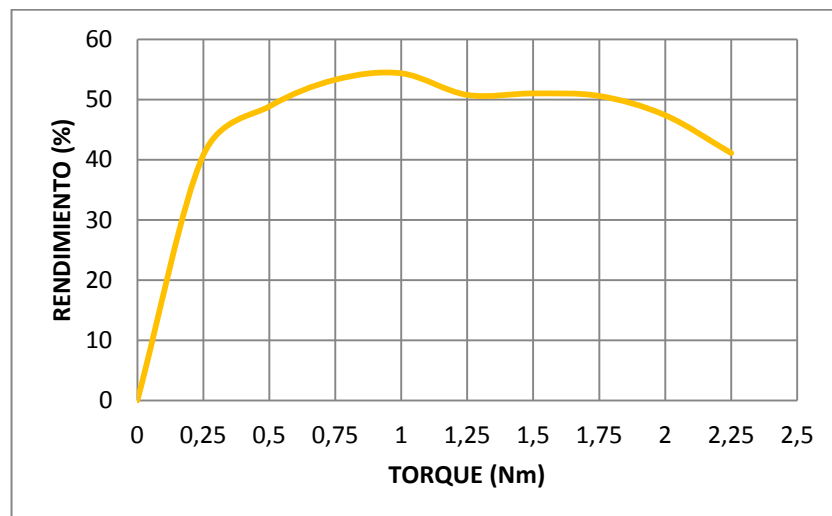


Figura 90 Curva  $\eta=f(M)$  del motor compound obtenida manualmente

## 5.5. Pruebas para obtención de curvas de funcionamiento con la aplicación del módulo

Para obtener las curvas de funcionamiento bajo carga de los motores DC utilizando el módulo didáctico se debe realizar las conexiones que se muestran en los Anexos D5, D6, D7 y D8; una vez realizada la conexión del motor correspondiente se procede a energizar el módulo, seleccionar el motor correspondiente, ingresar los parámetros de funcionamiento del motor, seleccionar el modo de funcionamiento, manual o automático y finalmente una vez terminada la prueba se pueden obtener las curvas características del motor con tan solo pulsar un botón. Al culminar las pruebas se puede comparar los resultados obtenidos con el módulo didáctico y los obtenidos manualmente y de esa manera constatar y ratificar las facilidades y ventajas que brinda el módulo con respecto al método tradicional de las pruebas manuales.

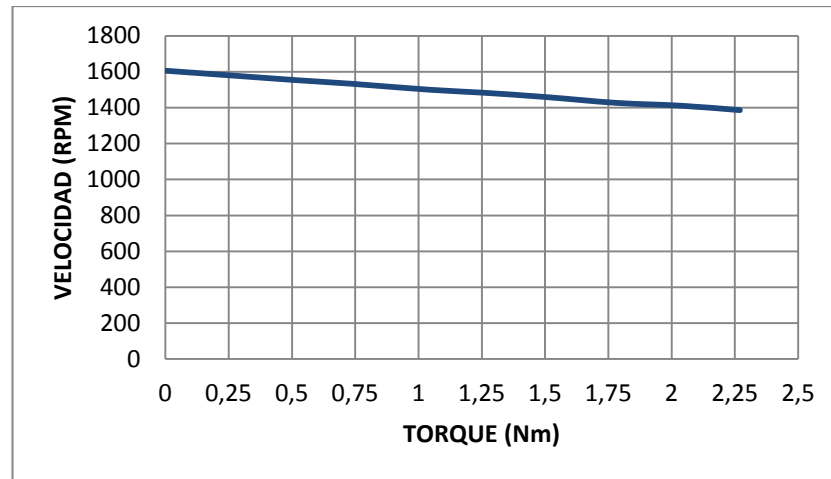
### 5.5.1. Motor de excitación independiente

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor de excitación independiente (004.060) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D5. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 14; en las Figuras 91, 92, 93 y 94 se observan las curvas características del motor con excitación independiente (004.060).

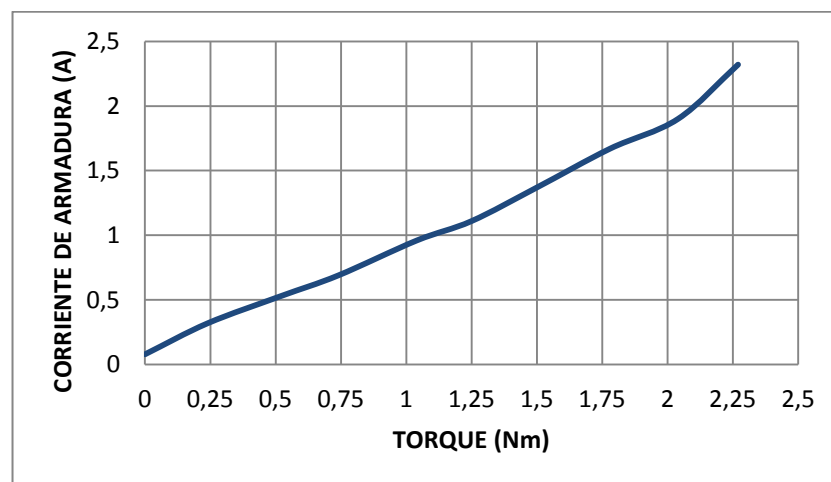
**Tabla 14**

**Prueba de carga con el módulo para el motor de excitación independiente 004.060**

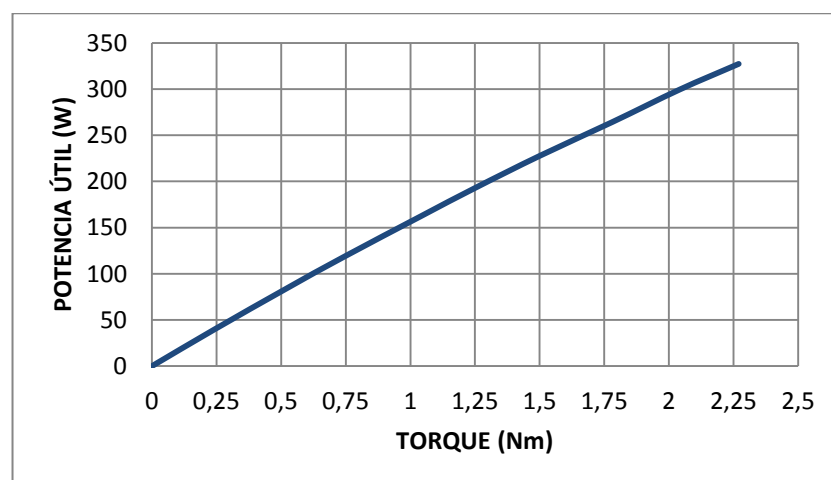
M (Nm)	N (RPM)	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>e</sub> (A)	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>e</sub> (V)	P <sub>u</sub> (W)	η (%)
0	1605,6	0,08	0,44	220,45	220	0	0
0,24	1581,3	0,32	0,41	220,22	220	39,46	24,56
0,52	1552,8	0,53	0,4	220	220	83,97	40,99
0,74	1532,5	0,69	0,4	220,22	220	117,94	49,11
1,04	1500	0,96	0,38	219,77	220	162,24	55,07
1,25	1483,7	1,11	0,38	220,67	220	192,88	58,7
1,5	1459,3	1,37	0,38	220,67	220	227,65	58,99
1,78	1426,8	1,67	0,38	220	220	264,12	58,56
2,04	1410,5	1,9	0,37	219,54	220	299,25	60,02
2,27	1386,1	2,32	0,37	221,35	220	327,23	55



**Figura 91 Curva  $n = f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida con el módulo**

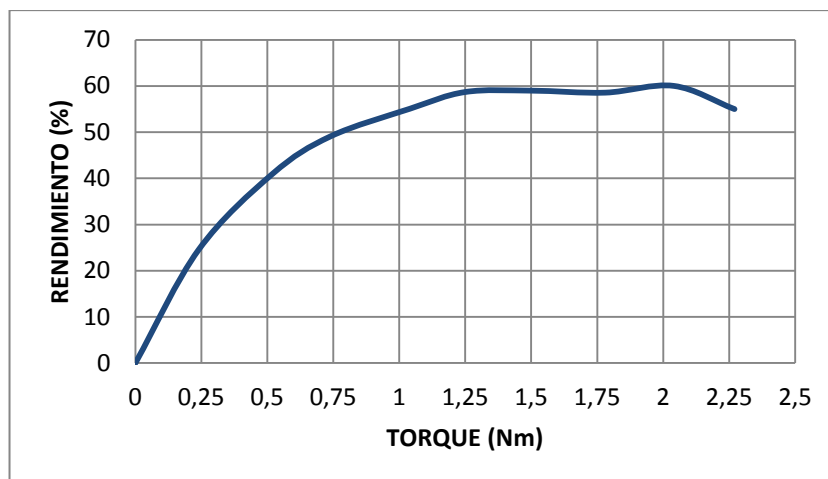


**Figura 92 Curva  $I_a = f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida con el módulo**



**Figura 93 Curva  $P_u = f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida con el módulo**





**Figura 94 Curva  $\eta = f(M)$  del motor de excitación independiente obtenida con el módulo**

### 5.5.2. Motor de excitación shunt

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor shunt (004.060) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D6. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 15; en las Figuras 95, 96, 97 y 98 se observan las curvas características del motor shunt (004.060).

**Tabla 15**

**Prueba de carga con el módulo para el motor shunt 004.060**

M (Nm)	N (RPM)	$I_a$ (A)	$I_e$ (A)	V (V)	$P_u$ (W)	$\eta$ (%)
0	1597,5	0,08	0,41	222,03	0	0
0,14	1552,8	0,27	0,41	219,77	22,72	14,16
0,43	1536,5	0,54	0,41	220,45	68,71	32,13
0,7	1512,1	0,74	0,4	220,45	110,08	43,04
0,99	1491,8	0,97	0,4	220,67	153,59	50,43
1,25	1467,4	1,21	0,4	220,67	190,76	53,36
1,42	1447,1	1,39	0,39	220,22	213,7	54,21
1,77	1426,8	1,73	0,39	220,9	262,64	55,82
1,99	1406,5	1,97	0,38	220,22	291,08	55,77
2,29	1369,9	2,32	0,38	220	326,25	54,72
2,52	1349,5	2,61	0,38	220,45	353,67	53,47

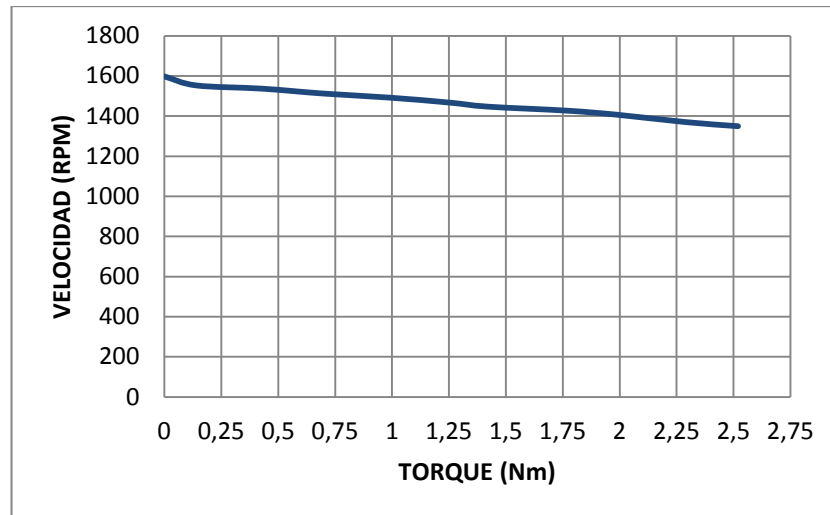


Figura 95 Curva  $n = f(M)$  del motor shunt obtenida con el módulo

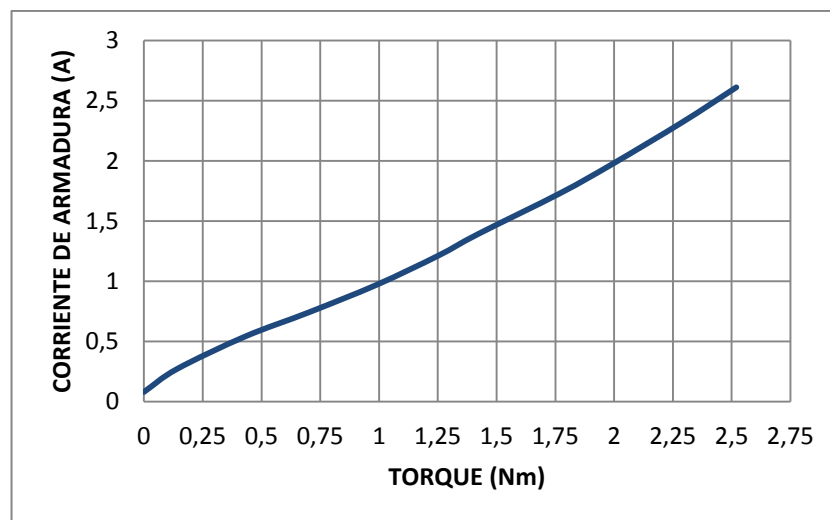


Figura 96 Curva  $i_a = f(M)$  del motor shunt obtenida con el módulo

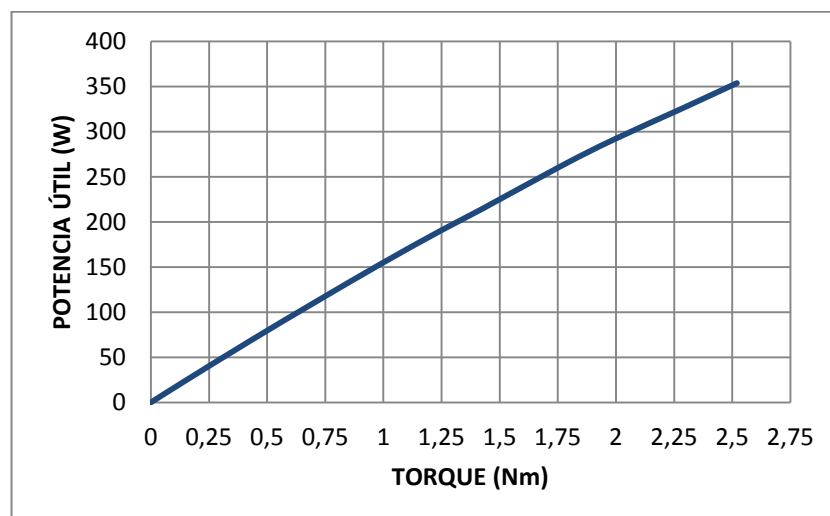
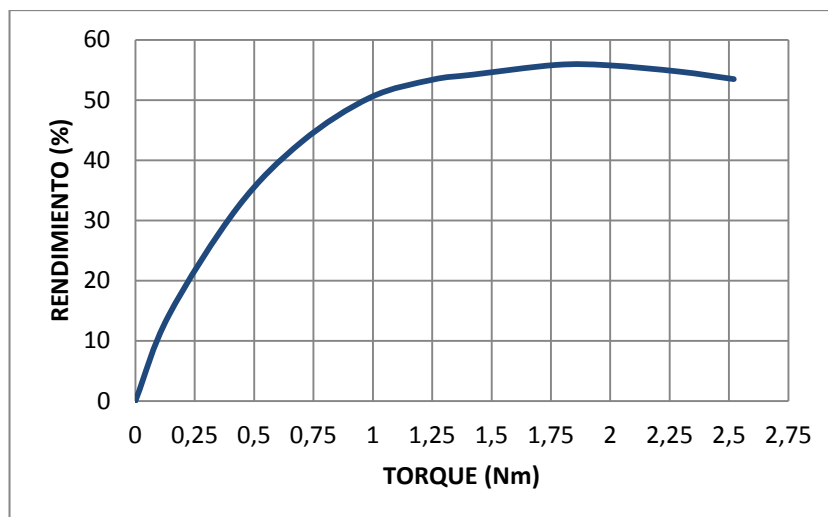


Figura 97 Curva  $P_u = f(M)$  del motor shunt obtenida con el módulo



**Figura 98 Curva  $\eta = f(M)$  del motor shunt obtenida con el módulo**

### 5.5.3. Motor de excitación serie

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor serie (004.001) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D7. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 16; en las Figuras 99, 100, 101 y 102 se observan las curvas características del motor serie (004.001).

**Tabla 16**

#### **Prueba de carga con el módulo para el motor serie 004.001**

<b>M</b> <b>(Nm)</b>	<b>N</b> <b>(RPM)</b>	<b>I</b> <b>(A)</b>	<b>V</b> <b>(V)</b>	<b>Pu</b> <b>(W)</b>	<b><math>\eta</math></b> <b>%</b>
0,18	2902,4	0,37	220,67	54,33	66,55
0,42	2239,8	0,65	220,9	97,83	68,13
0,7	1886,1	0,95	220	137,3	65,69
0,99	1674,7	1,19	220,9	172,42	65,59
1,25	1479,6	1,45	220,9	192,34	60,05
1,5	1264,2	1,75	220	197,21	51,22
1,76	1097,5	2,02	220,45	200,88	45,11
2,03	987,8	2,15	220,22	208,54	44,04
2,27	731,7	2,53	220,45	172,73	30,97

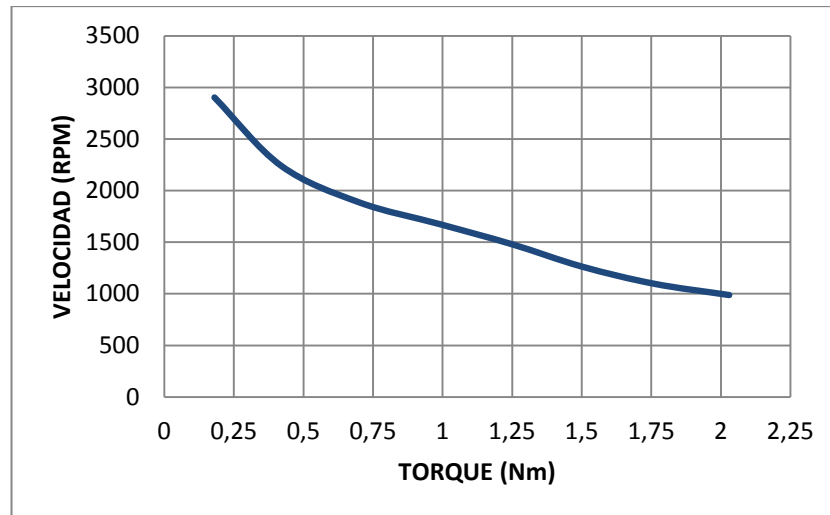


Figura 99 Curva  $n = f(M)$  del motor serie obtenida con el módulo

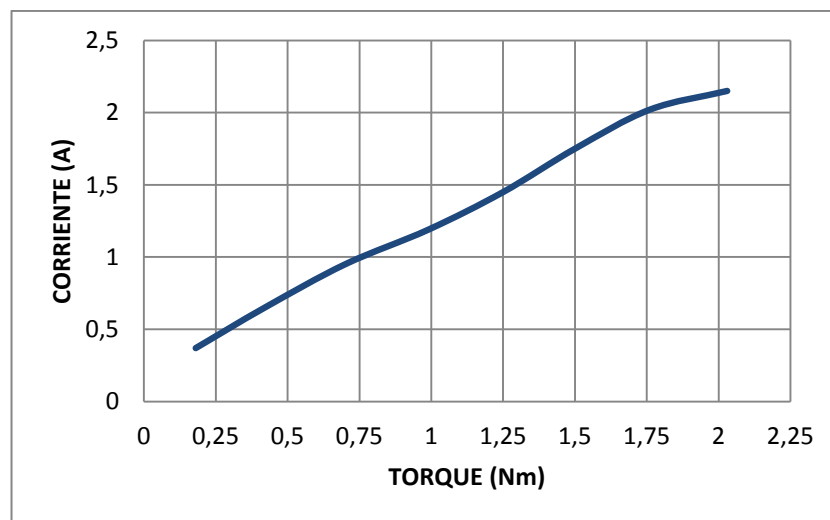


Figura 100 Curva  $I = f(M)$  del motor serie obtenida con el módulo

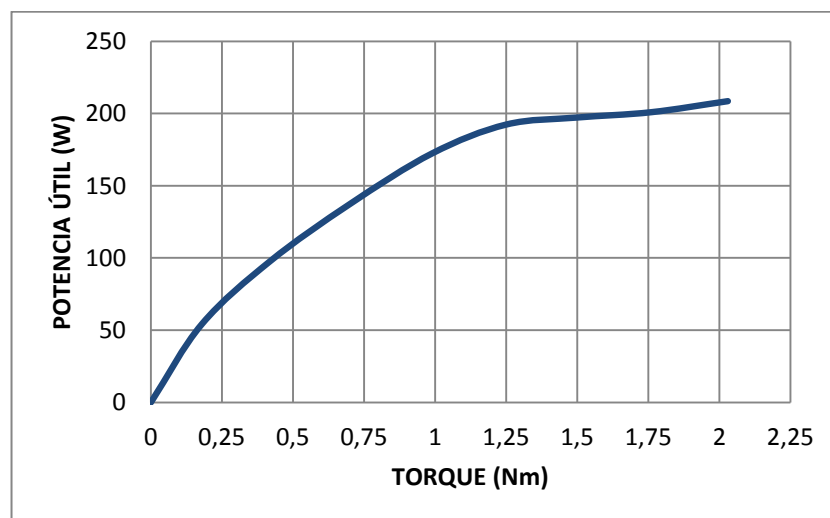
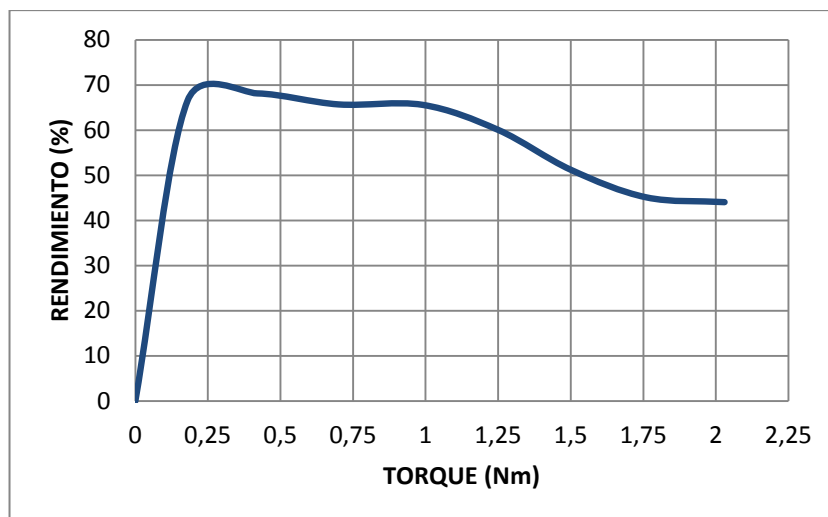


Figura 101 Curva  $P_u = f(M)$  del motor serie obtenida con el módulo



**Figura 102 Curva  $\eta = f(M)$  del motor serie obtenida con el módulo**

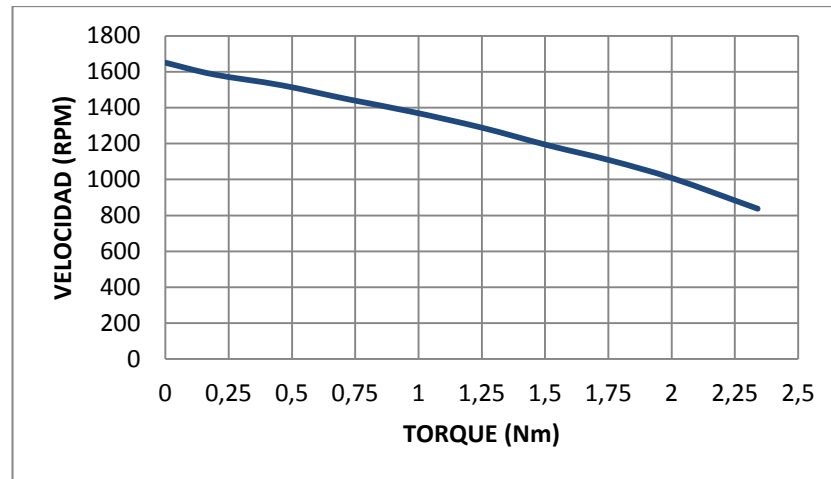
#### 5.5.4. Motor compound aditivo

Para la obtención de las curvas de funcionamiento del motor compound aditivo (004.030) se debe realizar las conexiones que se indican en el Anexo D8. Los resultados obtenidos al realizar la prueba de carga se presentan en la Tabla 17; en las Figuras 103, 104, 105 y 106 se observan las curvas características del motor compound aditivo (004.030).

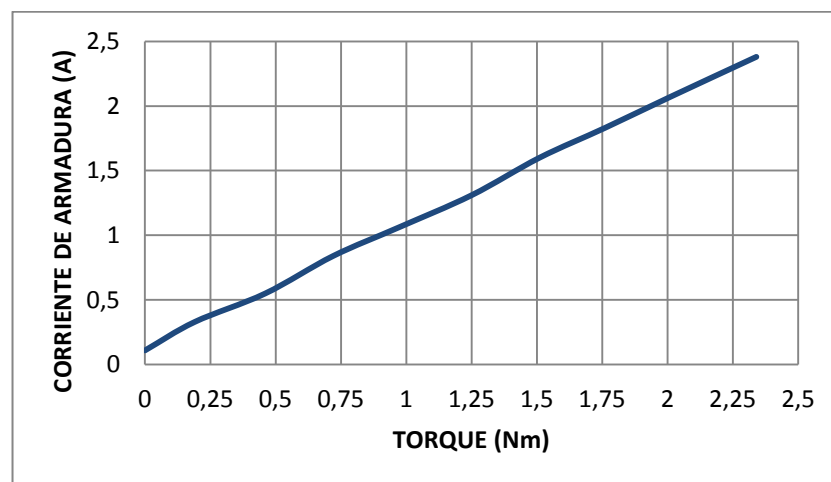
**Tabla 17**

**Prueba de carga con el módulo para el motor compound aditivo 004.030**

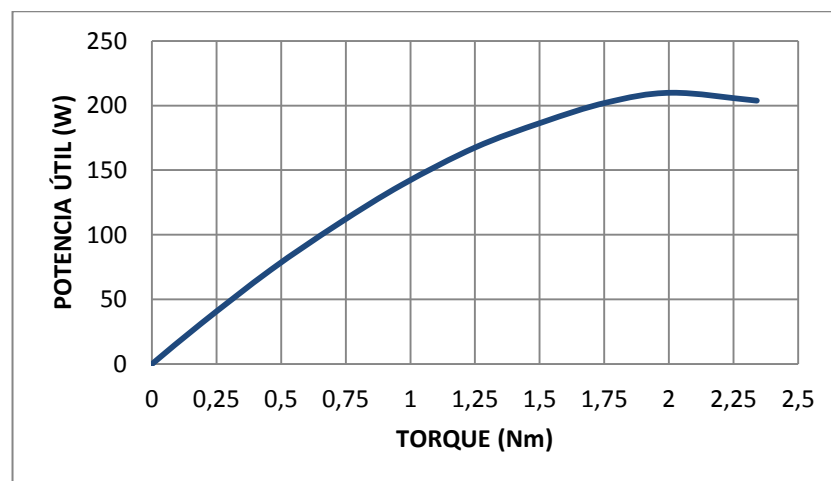
M (Nm)	N (RPM)	Ia (A)	Ie (A)	V (V)	Pu (W)	$\eta$ (%)
0	1650,4	0,11	0,24	219,77	0	0
0,19	1585,3	0,33	0,23	219,54	31,32	25,48
0,46	1524,3	0,55	0,23	220,45	72,92	42,96
0,72	1447,1	0,84	0,23	221,81	108,35	46,08
0,97	1378	1,06	0,23	221,13	139,01	49,11
1,25	1288,6	1,31	0,22	220	167,51	49,76
1,51	1191	1,6	0,22	220,22	187,03	46,66
1,76	1105,6	1,83	0,22	220,67	202,36	44,73
2,01	1004	2,07	0,22	220	209,87	41,65
2,34	837,3	2,38	0,22	220,22	203,76	35,58



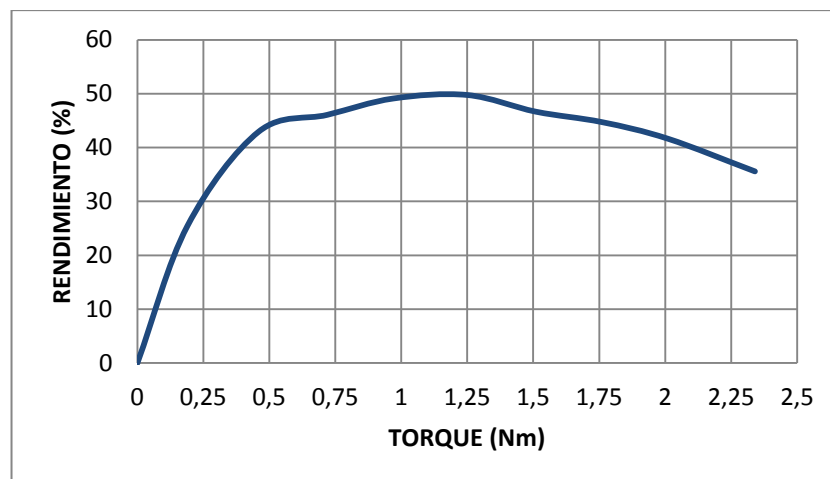
**Figura 103 Curva  $n = f(M)$  del motor compound obtenida con el módulo**



**Figura 104 Curva  $I_a = f(M)$  del motor compound obtenida con el módulo**



**Figura 105 Curva  $P_u = f(M)$  del motor compound obtenida con el módulo**



**Figura 106 Curva  $\eta = f(M)$  del motor compound obtenida con el módulo**

## 5.6. Análisis de resultados

Para analizar los resultados obtenidos en las pruebas de carga al obtener las curvas características de los motores DC es necesario contrastar las curvas obtenidas manualmente con las obtenidas usando el módulo didáctico y a la vez comparar estas con las curvas características dadas por el fabricante del motor.

### 5.6.1. Análisis de curvas del motor de excitación independiente 004.060.

En las Figuras 107, 108, 109 y 110 se muestran las curvas características del motor 004.060 con excitación independiente obtenidas manualmente y con el módulo didáctico; debido a que el fabricante no proporciona información sobre este motor se analizarán solamente las dos curvas obtenidas con los métodos descritos anteriormente.

Se puede observar que la mayoría de las curvas obtenidas con el módulo coinciden con las obtenidas manualmente lo que demuestra que el módulo es confiable y que se puede llegar a obtener los mismo o inclusive mejores resultados que las pruebas manuales en menos tiempo.

- Curva obtenida con el módulo
- - - Curva obtenida manualmente
- Curva dada por el fabricante

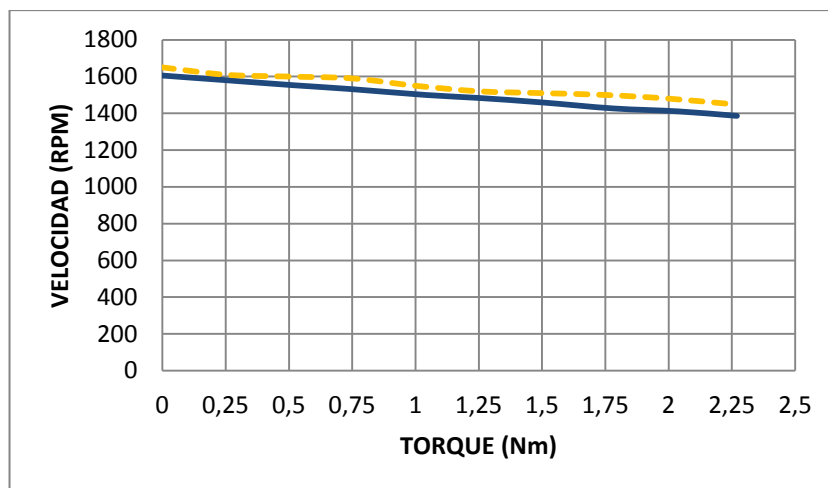


Figura 107 Curvas  $n = f(M)$  para el motor de excitación independiente

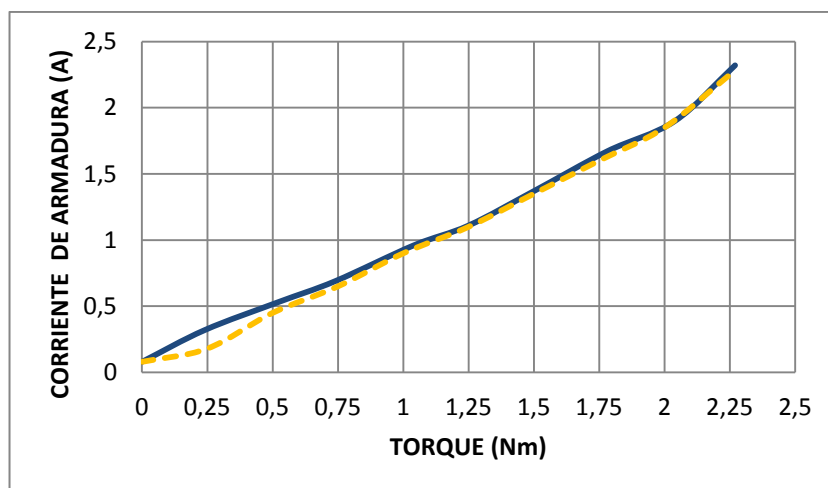


Figura 108 Curvas  $I_a = f(M)$  para el motor de excitación independiente

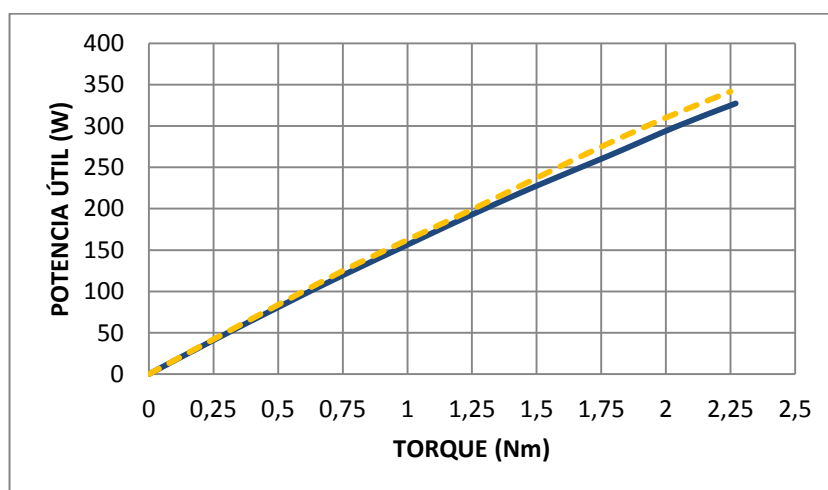
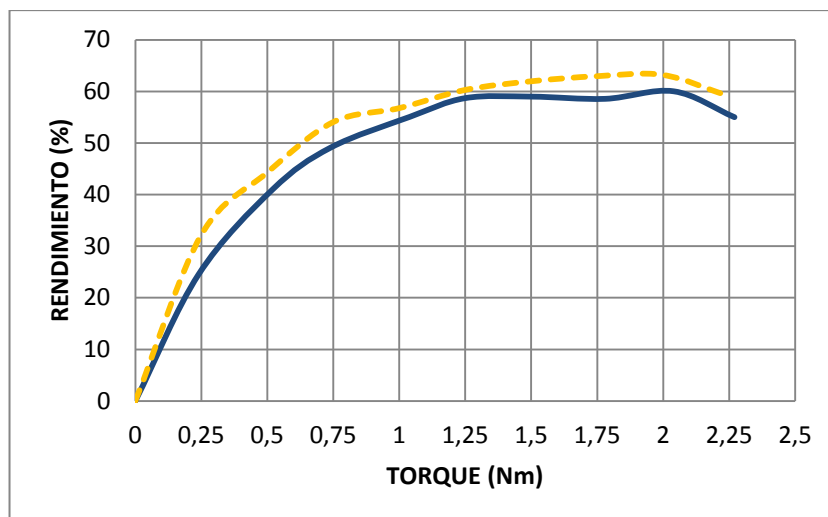


Figura 109 Curvas  $P_u = f(M)$  para el motor de excitación independiente

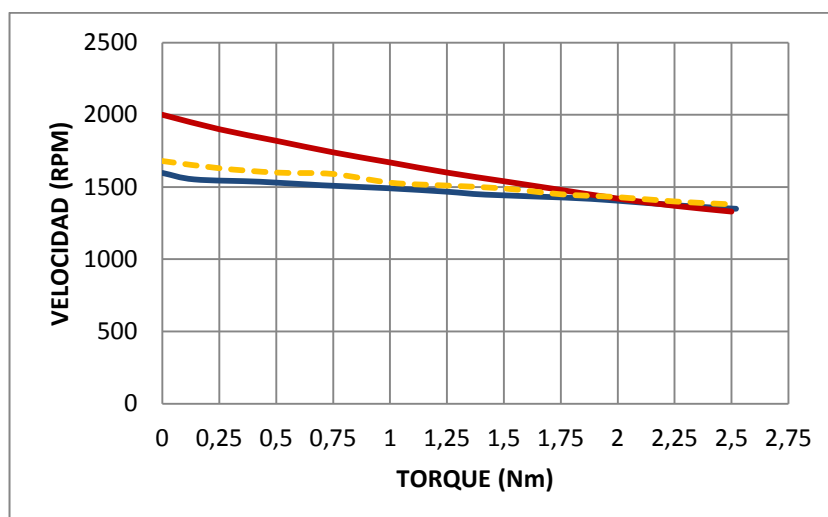




**Figura 110 Curvas  $\eta = f(M)$  para el motor de excitación independiente**

### 5.6.2. Análisis de curvas del motor shunt 004.060.

En las Figuras 111, 112, 113 y 114 se muestran las curvas características del motor shunt con polos auxiliares 004.060 obtenidas manualmente y con el módulo didáctico; además se muestra también las curvas dadas por el fabricante (ver Anexo A) para tener una referencia y poder determinar el error existente entre las curvas obtenidas manualmente y las obtenidas con el módulo.



**Figura 111 Curvas  $n = f(M)$  para el motor shunt**

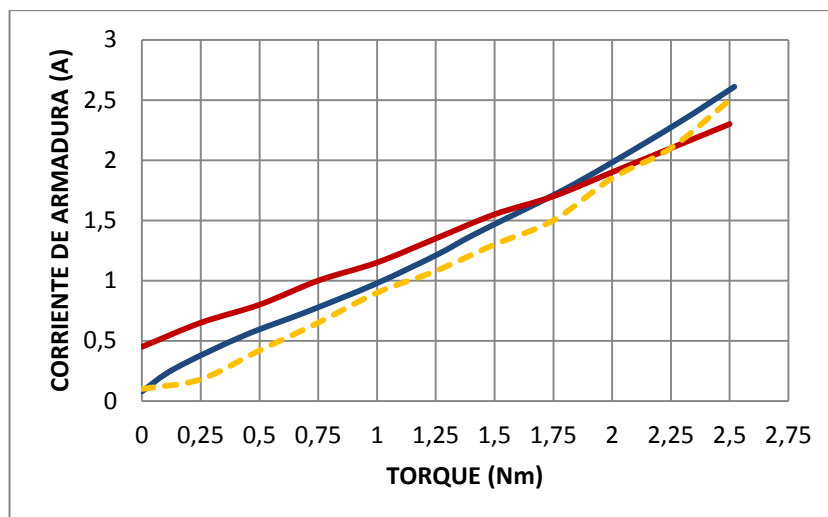


Figura 112 Curvas  $I_a = f(M)$  para el motor shunt

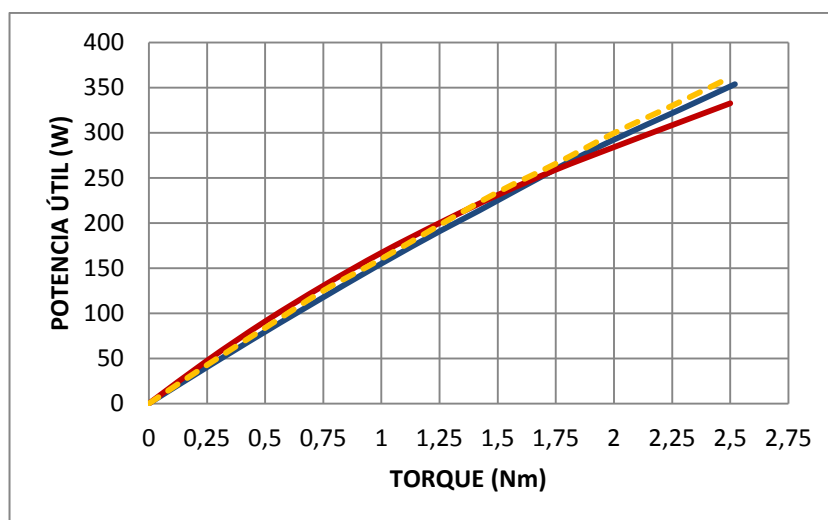


Figura 113 Curvas  $P_u = f(M)$  para el motor shunt

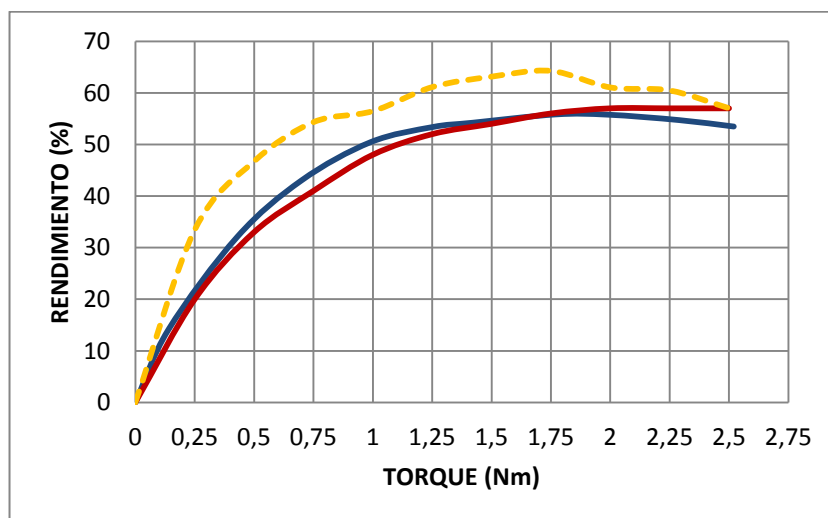


Figura 114 Curvas  $\eta = f(M)$  para el motor shunt

En la Tabla 18 se muestran los errores de velocidad, potencia útil y rendimiento, del motor shunt, calculados al comparar las curvas del fabricante con las curvas obtenidas manualmente y curvas obtenidas con el módulo, este error se calculó bajo una condición de corriente nominal o corriente de armadura de 1.55 A.

**Tabla 18**  
**Error entre curvas del motor shunt bajo corriente nominal**

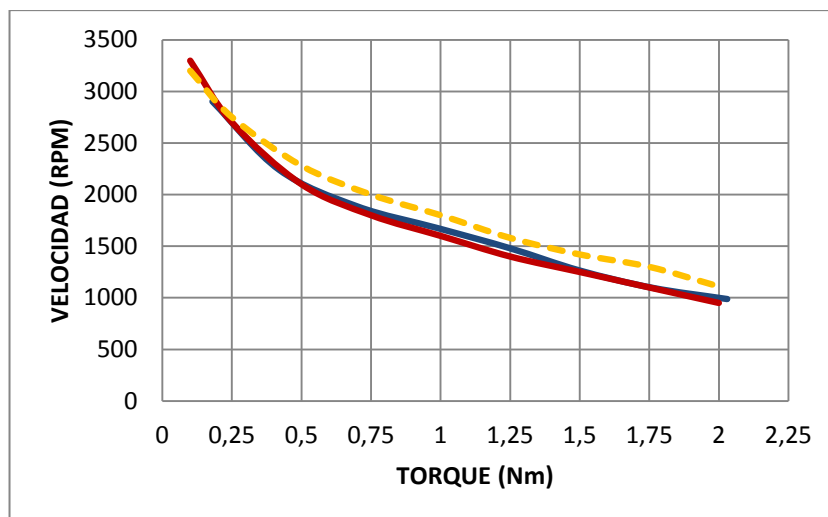
	Fabricante	Manual	Módulo	Error fabricante manual	Error fabricante módulo	Error manual módulo
<b>n (RPM)</b>	1540	1447	1437,54	6,04	6,65	0,65
<b>Pu (W)</b>	231	270,55	236,73	17,12	2,48	12,5
<b><math>\eta</math> (%)</b>	54	63,79	54,97	18,13	1,8	13,83
			<b>Promedio</b>	13,76	3,64	8,99

En la Tabla 18 se puede observar que el error promedio en condiciones de corriente nominal, entre las curvas del fabricante y las obtenidas con el módulo es de 3,64% mientras que el error promedio entre las curvas del fabricante y las obtenidas manualmente es de 13,76%, demostrando de esta manera que el módulo es confiable y que se puede llegar a obtener los mismo o inclusive mejores resultados que en las pruebas manuales con mucha más eficiencia y eficacia.

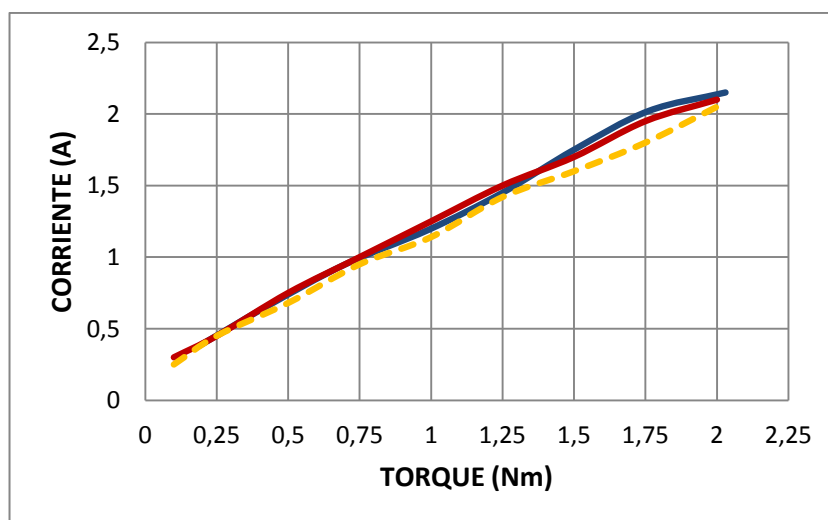
### 5.6.3. Análisis de curvas del motor serie 004.001.

En las Figuras 115, 116, 117 y 118 se muestran las curvas características del motor serie 004.001 obtenidas manualmente y con el módulo didáctico; además se muestra también las curvas dadas por el fabricante (ver Anexo A) para tener una referencia y poder determinar el error existente entre las curvas obtenidas manualmente y las obtenidas con el módulo.

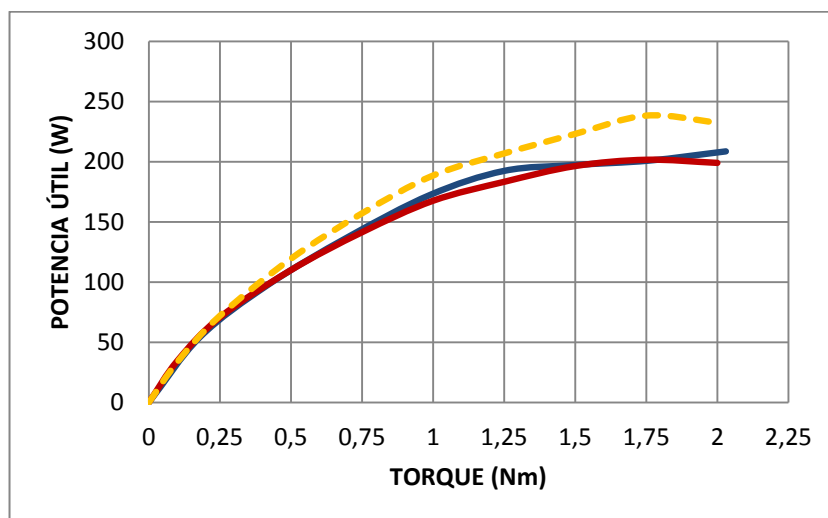
En la Tabla 19 se muestran los errores de velocidad, potencia útil y rendimiento, del motor serie, calculados al comparar las curvas del fabricante con las curvas obtenidas manualmente y curvas obtenidas con el módulo, este error se calculó bajo una condición de corriente nominal o corriente de armadura de 1.5 A.



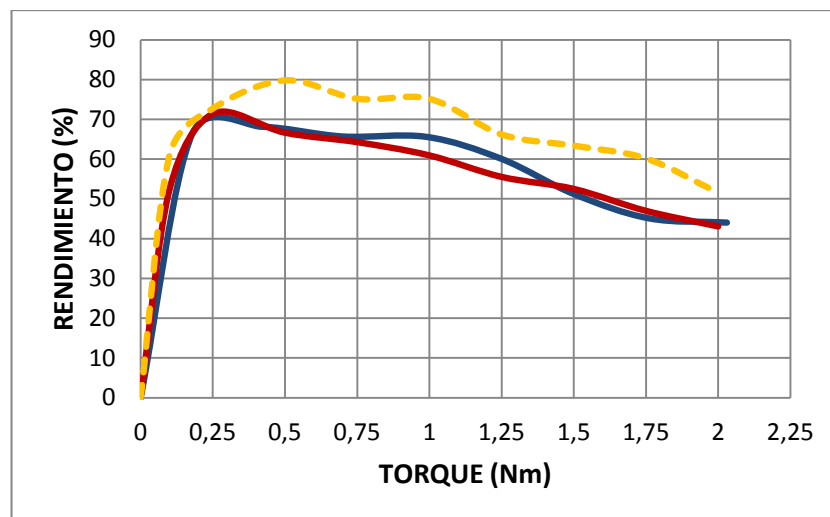
**Figura 115 Curvas  $n = f(M)$  para el motor serie**



**Figura 116 Curvas  $I = f(M)$  para el motor serie**



**Figura 117 Curvas  $P_u = f(M)$  para el motor serie**



**Figura 118 Curvas  $\eta = f(M)$  para el motor serie**

En la Tabla 19 se puede observar que el error promedio en condiciones de corriente nominal, entre las curvas del fabricante y las obtenidas con el módulo es de 4,67% mientras que el error promedio entre las curvas del fabricante y las obtenidas manualmente es de 13,78%, demostrando de esta manera que el módulo es confiable y que se puede llegar a obtener los mismo o inclusive mejores resultados que en las pruebas manuales con mucha más eficiencia y eficacia.

**Tabla 19**

**Error entre curvas del motor serie bajo corriente nominal**

	Fabricante	Manual	Módulo	Error fabricante manual	Error fabricante módulo	Error manual módulo
<b>n (RPM)</b>	1400	1508	1443,7	7,71	3,12	4,26
<b>Pu (W)</b>	183,26	214	193,15	16,77	5,4	9,74
<b><math>\eta</math> (%)</b>	55,53	64,9	58,58	16,87	5,49	9,74
			<b>Promedio</b>	13,78	4,67	7,91

#### 5.6.4. Análisis de curvas del motor compound aditivo 004.030.

En las Figuras 119, 120, 121 y 122 se muestran las curvas características del motor compound 004.030 obtenidas manualmente y con el módulo didáctico; además se muestra también las curvas dadas por el fabricante (ver Anexo A) para tener una referencia y poder determinar el error existente entre las curvas obtenidas manualmente y las obtenidas con el módulo.

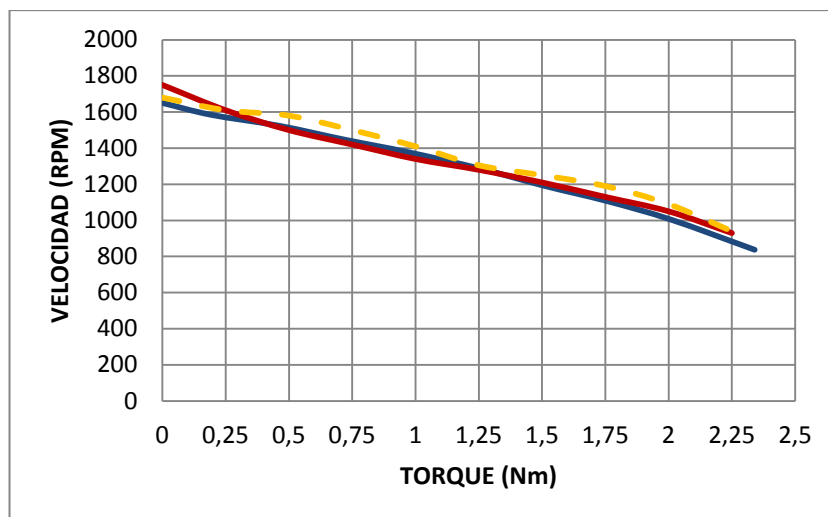


Figura 119 Curvas  $n = f(M)$  para el motor compound

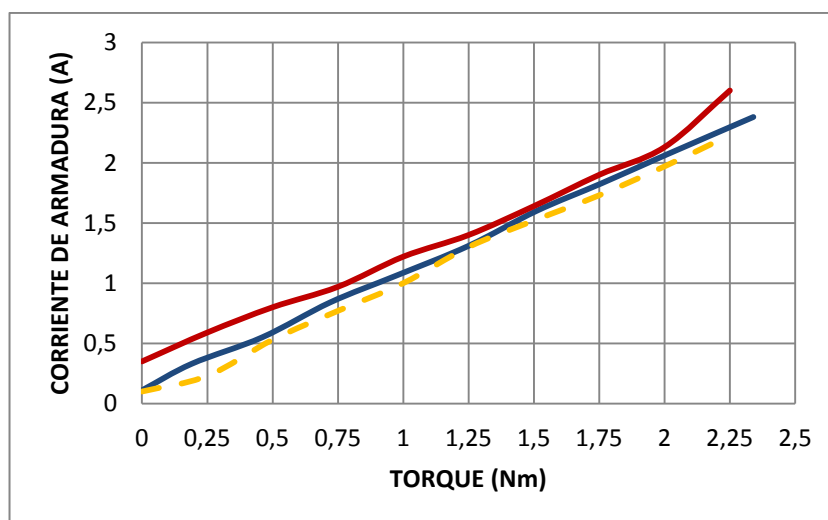


Figura 120 Curvas  $I_a = f(M)$  para el motor compound

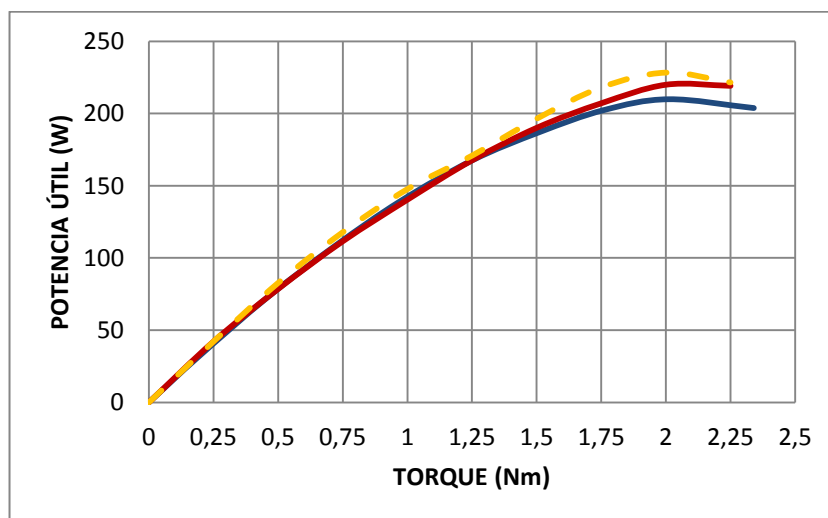
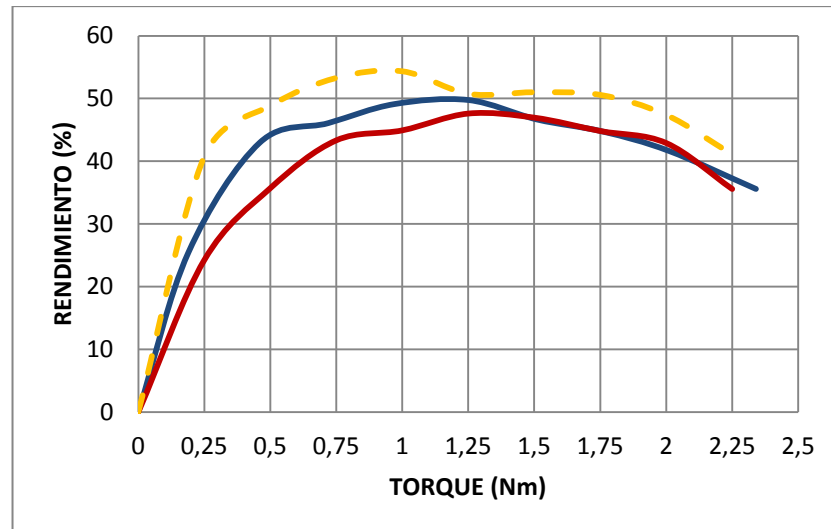


Figura 121 Curvas  $P_u = f(M)$  para el motor compound



**Figura 122 Curvas  $\eta = f(M)$  para el motor compound**

En la Tabla 20 se muestran los errores de velocidad, potencia útil y rendimiento, del motor compound, calculados al comparar las curvas del fabricante con las curvas obtenidas manualmente y curvas obtenidas con el módulo, este error se calculó bajo una condición de corriente nominal o corriente de armadura de 1.22 A.

**Tabla 20**

**Error entre curvas del motor compound bajo corriente nominal**

	Fabricante	Manual	Modulo	Error fabricante manual	Error fabricante módulo	Error manual módulo
<b>n (RPM)</b>	1340	1333	1320,78	0,52	1,43	0,92
<b>Pu (W)</b>	140,32	164,6	157,25	17,3	12,07	4,47
<b><math>\eta</math> (%)</b>	44,92	51,7	49,53	15,09	10,26	4,2
			<b>Promedio</b>	10,97	7,92	3,2

En la Tabla 20 se puede observar que el error promedio en condiciones de corriente nominal, entre las curvas del fabricante y las obtenidas con el módulo es de 7,92% mientras que el error promedio entre las curvas del fabricante y las obtenidas manualmente es de 10,97%, demostrando de esta manera que el módulo es confiable y que se puede llegar a obtener los mismo o inclusive mejores resultados que en las pruebas manuales con mucha más eficiencia y eficacia.

## CONCLUSIONES

- Es importante conocer las curvas características de un motor eléctrico, pues estas permiten determinar o predecir el comportamiento que tiene la máquina al variar la carga mecánica aplicada al eje.
- Se diseñó e implementó un módulo didáctico que permite obtener las curvas características de funcionamiento en operación bajo carga de los motores de corriente continua, las cuales se pueden visualizar en un interfaz HMI industrial; permitiendo actualizar el laboratorio para que docentes y estudiantes puedan realizar prácticas o investigaciones que aporten al desarrollo del país.
- El módulo didáctico le permite al estudiante obtener las curvas características de los motores de corriente continua en menos tiempo de lo que le llevaría hacerlo en forma manual, para optimizar tiempos de estudio, contribuir en su proceso de aprendizaje y reducir el calentamiento excesivo del electrodinómetro y del motor.
- Mediante el software implementado en la placa Arduino y la pantalla HMI, así como también gracias a los transductores de corriente DC, convertidor de voltaje DC y circuito de control del electrodinómetro el usuario puede obtener mayor cantidad de datos con más precisión y exactitud que al realizar las pruebas manualmente.
- Se desarrolló un programa en el lenguaje de programación de Arduino, el cual permite la lectura, escritura, procesamiento, control y comunicación con una pantalla HMI industrial en la cual se creó también una aplicación amigable con el usuario que le permite el control, adquisición, visualización de datos y curvas de funcionamiento de motores DC.
- El módulo le concede al usuario un control del electrodinómetro o mando de freno mucho más preciso y seguro, con la implementación de un circuito electrónico o conversor DC/DC cuya señal de control PWM es generada por el controlador Arduino.
- El módulo cuenta con dos puertos de servicio: un puerto ethernet para conexión remota lo cual le permite al usuario visualizar y controlar las



pruebas desde un PC, así como también un puerto USB para conectar dispositivos de almacenamiento y guardar capturas de pantalla de la aplicación.

- El error en condiciones de corriente nominal, entre las curvas del fabricante y las obtenidas con el módulo es menor al error entre las curvas del fabricante y las obtenidas manualmente, demostrando de esta manera que el módulo es confiable y que se puede llegar a obtener los mismos o inclusive mejores resultados que en las pruebas manuales con mucha más eficiencia y eficacia.

## RECOMENDACIONES

- La alimentación del controlador Arduino se la puede hacer a través del puerto USB (5V) o mediante el Jack de alimentación (7-12V) desde una fuente que proporcione una señal de voltaje filtrada para evitar ruidos que interfieren en el correcto funcionamiento del equipo.
- Para evitar ruidos producidos por inducción electromagnética se recomienda cablear por separado la parte de control de la parte de potencia.
- Para reducir el error que se produce en los instrumentos analógicos al momento de medir señales de voltaje o corriente DC se recomienda implementar en las mesas de trabajo del Laboratorio de Accionamientos Eléctricos una fuente de alimentación regulable, que proporcione una señal de voltaje DC rectificadas y filtradas con el menor rizado posible.
- Para actualizar los equipos del Laboratorio de Accionamientos Eléctricos se recomienda implementar o diseñar un transductor de torque cuya señal de salida sea normalizada y lineal con respecto a la magnitud del par.
- Para la realización de cada una de las prácticas a través del módulo implementado se recomienda leer las guías de prácticas que se anexan en este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 5Hertz. (10 de Octubre de 214). *5 Hertz Electrónica*. Recuperado el 23 de Abril de 2016, de 5 Hertz Electrónica: <http://5hertz.com/tutoriales/?p=91>
- Aficionados a la Mecánica*. (2014). Recuperado el 21 de 04 de 2016, de Aficionados a la Mecánica: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sensores1.htm>
- Alcalde San Miguel, P. (2011). *Electrotécnia*. Madrid: Paraninfo S.A.
- ALPHAOMEGA Electronics*. (2016). Recuperado el 18 de Marzo de 2016, de ALPHAOMEGA Electronics: <http://www.alphaomega-electronics.com/es/transductores-corriente-ac/1056-h970-transductor-idx-hawkeye-salida-ma-y-o-v.html>
- Antón, J. (2014). *Comunicaciones industriales*. Asturias: Departamento de electricidad-electrónica.
- Arduino*. (2016). Recuperado el 15 de Octubre de 2016, de Arduino: <http://www.arduino.org/products/boards/arduino-mega-2560>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2010). *LEY ORGÁNICA DE EDUCACIÓN SUPERIOR*. Quito.
- Balance Systems. (2007). *balance systems.com*. Recuperado el 3 de 10 de 2016, de balance systems: <http://pdf.directindustry.es/pdf/balance-systems-srl/btm5-banco-motores-prueba-dc-pwm-motores-electricos/7362-594246.html>
- CEAACES. (2015). *MODELO GENÉRICO DE EVALUACIÓN DEL ENTORNO DE APRENDIZAJE DE CARRERAS PRESENCIALES Y SEMIPRESENCIALES DE LAS UNIVERSIDADES Y ESCUELAS POLITÉCNICAS DEL ECUADOR*. Quito.
- Cortes Cherta, M. (1994). *Curso Moderno de Máquina Eléctricas Rotativas Tomo II*. Barcelona: Reverté S.A.

- Cubillo Hernández, E. (2013). *Implementación de un banco de pruebas para caracterización de máquinas eléctricas mediante un freno electrodinámico*. Cartago.
- Daneri, P. (2008). *PLC. Automatización y control industrial*. Buenos Aires: Hispano Americana.
- Deltaww*. (2016). Recuperado el 2016, de *Deltaww*:  
[http://www.deltaww.com/Products/CategoryListT1.aspx?CID=060302  
&PID=ALL&hl=en-US](http://www.deltaww.com/Products/CategoryListT1.aspx?CID=060302&PID=ALL&hl=en-US)
- ELTIME CONTROLS*. (2016). Recuperado el 20 de Mayo de 2016, de *ELTIME CONTROLS*:  
<http://www.etime.co.uk/product.php/49/DC%20Current%20%20Voltage%20Transducers.html>
- Grupo Tecnológico Industrial. (2015). *www.gtisistemas.com*. Recuperado el 3 de 10 de 2016, de GTI Grupo Tecnológico Industrial:  
<http://www.gtisistemas.com/bp-motores-eléctricos.html>
- Guerrero, V., Yuste, R., & Martínez, L. (2009). *Comunicaciones industriales*. Barcelona: Marcombo.
- Hacedores. (5 de Junio de 2014). *Hacedores Maker Community*. Recuperado el 4 de Mayo de 2016, de Hacedores Maker Community:  
<http://hacedores.com/que-tarjeta-de-desarrollo-elegir-parte-1/>
- Jiménez, M., & Taípe, F. (2005). *Sistema de adquisición de datos para determinar las características de operación con carga de los motores trifásicos de inducción para el laboratorio de máquinas eléctricas*. Latacunga.
- Kosow, I. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. México, D.F.: PRENTICE-HALL.
- Lion, R. (2016). *Red Lion connect, monitor, control*. Recuperado el 15 de Octubre de 2016, de Red Lion Web Site:

<http://www.redlion.net/products/industrial-automation/hmis-and-panel-meters/hmi-operator-panels/g3-hmis>

Merizalde, Y. (2013). *Diseño e implementación de un banco de pruebas para máquinas de corriente continua*. Guayaquil.

Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. (2009). *Electrónica de potencia*. México, D.F.: McGRAW-HILL.

Mora, J. F. (2003). *Máquinas Eléctricas*. Madrid: Edigrafos S.A.

Müller, W. (1987). *Electrotécnia de potencia. Curso superior*. Barcelona: Reverté S.A.

nktechnologies. (2016). *nktechnologies*. Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de nktechnologies: <http://www.nktechnologies.com/voltage-transducers/vtd-voltage-transducers/#>

Pallás, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: MARCOMBO.

Patagoniatec. (2012). *saber.patagoniatec*. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de [sbaer.patagoniatec.com](http://saber.patagoniatec.com): <http://saber.patagoniatec.com/sensor-de-corriente-ac712-5-20-30a-ptec-arduino-pic/>

Penin, A. R. (2008). *Comunicaciones industriales*. Barcelona: MARCOMBO.

Phoenix Contact. (2016). *Phoenix Contact*. Recuperado el 11 de Mayo de 2016, de Phoenix Contact: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ar?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2906242>

Power Resistor, M. (2015). *Direct Industry*. Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/mf-power-resistor-ltd/product-39029-1719790.html>

- SENECA. (2015). *Seneca Automation Interfaces*. Recuperado el 7 de Mayo de 2016, de Seneca Automation Interfaces: <http://www.seneca.it/media/2536/mi001714-e.pdf>
- Siemens. (2016). *Siemens Corporation*. Recuperado el 28 de Octubre de 2016, de Siemens Web Site: <http://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/operator-devices/basic-hmi/basic-panels/Pages/Default.aspx>
- Vistronica. (2016). *Vistronica*. Recuperado el 13 de Mayo de 2016, de Vistronica: <https://www.vistronica.com/modulos/modulo-conversor-ttl-a-rs-485-max485-detail.html>
- Wildi, T. (2007). *Máquina Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Monterrey: Pearson Education.
- Xinje. (2016). *Xinje*. Recuperado el 20 de Marzo de 2016, de Xinje: <http://www.xinje.com/En/ProductView.asp?ID=184&SortID=135>

# ANEXOS




**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

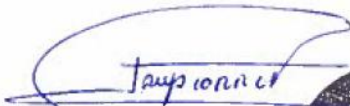
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el siguiente trabajo de titulación fue desarrollado por los señores: **DIEGO ALEJANDRO BARRENO RAMÍREZ** y **CARLOS EDMUNDO RODRÍGUEZ CHACÓN**, bajo nuestra supervisión.

  
Ing. Mario Jiménez  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Aprobado por:**

  
Ing. Katya Torres  
**DIRECTORA DE CARRERA**

  
Dr. Rodrigo Vaca  
**SECRETARIO ACADÉMICO**

