

**MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.  
ARRANQUE Y CONTROL DE VELOCIDAD POR TENSIÓN DE ARMADURA**

**CRISTIAN CAMILO BARRAGÁN MURCIA  
JUAN CARLOS MARTINEZ AGUILAR**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRONICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018**

**MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.  
ARRANQUE Y CONTROL DE VELOCIDAD POR TENSIÓN DE ARMADURA**

**CRISTIAN CAMILO BARRAGÁN MURCIA  
JUAN CARLOS MARTINEZ AGUILAR**

**Trabajo De Grado Para Optar Por el Título De  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Director**

**JULIO AUGUSTO GELVEZ FIGUEREDO  
Mgs. En Ingeniería Eléctrica**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRONICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018**

## DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen santísima por todo lo recibido en esta vida.

A mi madre Nubia Esperanza Murcia Pulido por su apoyo incondicional en toda mi vida y por ser la mejor madre del mundo.

A mi padre Carlos Humberto Barragán Solano por sus buenos consejos y todo el esfuerzo realizado para darme el estudio.

A mi abuelita Brigida Pulido de Murcia por su cariño, por ser mi primera profesora y enseñarme tantas cosas que han sido importantes para mi vida.

A mi abuelito Luis Alejandro Barragán, por ser el apoyo y el ejemplo todos estos años.

A mis padrinos Libardo Antonio Barragán y Antonio Forero Castillo por su comprensión y apoyo.

A todos mis tíos por su gran apoyo y enseñarme que el trabajo duro trae sus frutos.

A mi hermana Luisa Fernanda Barragán por escucharme cuando necesitaba que alguien me escuchara.

A mis primos y primas por los momentos de alegría.

A mis amigos por los momentos felices.

A el profesor Julio Gélvez Figueredo por ser nuestro guía en el proyecto, gracias por su buena disposición.

A Guillermo por su colaboración en el laboratorio.

A todos muchas gracias.

Cristian Camilo Barragán Murcia

## **DEDICATORIA**

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es y lo justa que puede llegar a ser; gracias a mi familia por permitirme cumplir con excelencia el desarrollo de esta tesis ya que sin el apoyo de ellos y la confianza brindada no hubiese sido posible este logro.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y respaldo, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos. Les agradezco y hago presente mi gran afecto hacia ustedes mi hermosa familia.

Juan Carlos Martínez Aguilar

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. CONCEPTOS GENERALES	23
2.1 ESTRUCTURA Y ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR	23
2.2 OPERACIÓN DEL MOTOR EN IV CUADRANTES	29
3. PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE	31
3.1 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE ARMADURA	31
3.1.1 Medición directa empleando instrumentos de medida digital (óhmetro digital).	32
3.1.2 Medición indirecta mediante la relación tensión vs corriente en la armadura (ley de Ohm).	33
3.2 MEDICIÓN DE LA INDUCTANCIA DE ARMADURA	36
3.2.1 Medición directa empleando el medidor de inductancia digital.	37
3.2.2 Medición directa empleando el medidor de parámetros	37
3.2.3 Medición indirecta empleando el método de resonancia	38
3.3 CONSTANTE DE MAGNETIZACIÓN	40
3.4 MEDICIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA	41
4. ANÁLISIS DE LA CORRIENTE EN EL ARRANQUE MEDIANTE SIMULACIÓN Y PRUEBAS DE LABORATORIO.	44
4.1 SIMULACIÓN DEL ARRANQUE DIRECTO	44
4.2 OBSERVACIONES DE LAS SIMULACIONES Y LOS RESULTADOS DEL LABORATORIO	46
4.3 SIMULACION DEL ARRANQUE ENERGIZANDO LA ARMADURA CON UNA TENSIÓN TROCEADA	46

4.4 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA REALIZAR EL ARRANQUE CONTROLANDO LA TENSIÓN DE ARMADURA	48
4.4.1 Selección del transistor mosfet	48
4.4.2 Selección del diodo de marcha o paso libre	51
4.4.3 Sonda de efecto hall para medición de corriente	52
4.4.4 Cálculo de velocidad empleando un fotodetector	55
5. PROGRAMACIÓN, CONEXIONADO Y CONTROL DEL MOTOR DC	
EXCITACIÓN INDEPENDIENTE EMPLEANDO EL SOFTWARE TWIDOSUITE	57
5.1 PROGRAMACIÓN IMPLEMENTANDO LA FUNCIÓN PWM	58
5.1.1 Arranque suave de la máquina	62
5.1.1.1 Configuración de las salidas para el arranque y la parada	62
5.1.1.2 Programación del arranque limitando la corriente máxima en la armadura	65
5.1.1.3 Obtención de la velocidad por medio de pulsos empleando fotodetector	68
5.1.1.4 Control y estabilización del motor	70
5.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA FUNCIÓN PID	73
5.2.1 Función de transferencia y sintonización del PID	73
5.2.1.1 Modelado de la planta	73
5.2.1.2 Obtención de los parámetros para el controlador PID	75
5.2.2 Programación del arranque utilizando la función PID	77
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
6.1 RESULTADOS DEL ARRANQUE PARA EL MOTOR SIN CARGA	84
6.2 RESULTADOS DEL ARRANQUE PARA EL MOTOR CON CARGA	86
6.2.1 Arranque del motor acoplado al generador sin carga	86
6.2.2 Arranque del motor acoplado al generador variando la carga	88
6.2.2.1 Arranque con 3 bombillas de 200W	88
6.2.2.2 Arranque con 6 bombillas de 200 watts	90
6.3 RESULTADOS IMPLEMENTANDO LA FUNCIÓN PID	92
6.4 OBSERVACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	95

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	101

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema básico de la forma física del motor DC	24
Figura 2. Circuito equivalente de la máquina de corriente continua de excitación independiente	25
Figura 3. Diagrama de bloques del motor de corriente continua de excitación independiente	29
Figura 4. Operación del motor en cuatro cuadrantes	30
Figura 5. Datos nominales de la máquina DC marca De Lorenzo	31
Figura 6. Esquema de medición de tensión y corriente en la armadura.	34
Figura 7. Tensión Vs corriente de armadura	36
Figura 8. Montaje utilizado para hallar la frecuencia de resonancia	38
Figura 9. Tensión en la armadura al desconectar la alimentación	42
Figura 10. Simulación en SIMULINK para el arranque directo en vacío.	44
Figura 12. Simulación en PSIM para el arranque directo en vacío	45
Figura 12. Circuito empleado del troceador en PSIM	46
Figura 13. Funcionamiento del transistor MOSFET	49
Figura 14. Aspecto físico y símbolo transistor MOSFET STW45NM50	49
Figura 15. Circuito de protección para el I transistor MOSFET	50
Figura 16. Corriente vs tensión de armadura	51
Figura 17. Diodo rectificador negativo de tuerca 50HF60VN	52
Figura 18. Circuito implementado para la caracterización de la sonda de efecto HALL ACS-712	53
Figura 19. a) Gráfica de tensión de salida vs corriente medida para la sonda ACS-712-20A b) Gráfica extraída del datasheed	54
Figura 20. Conexión del fotodetector XUB-H103535 Schneider Electric tipo N.	55
Figura 21. Esquema de la conexión del motor por medio de contactores.	57
Figura 22. Diagrama GRAFCET del proceso	58
Figura 23. Bloque de la función PWM TWUIDO SUITE	60

Figura 24. Bloque de la función contador rápido TWIDO SUITE	61
Figura 25. Configuración del arranque directo	62
Figura 26. Configuración del arranque en sentido inverso	63
Figura 27. Habilitación de la parada por medio del bit de entrada	63
Figura 28. Ejecución de la parada y determinación del tiempo para el frenado	64
Figura 29. Reinicio de condiciones iniciales	65
Figura 30. Activación del bloque PWM	65
Figura 31. Porcentaje inicial del ciclo de trabajo	66
Figura 32. Incremento del ancho de pulso	66
Figura 33. Condición para aumentar el porcentaje del PWM	67
Figura 34. Límite de la corriente durante el arranque	68
Figura 35. Programa implementado en la medición de la velocidad.	69
Figura 36. Finalización del arranque suave	70
Figura 37. Control de velocidad	71
Figura 38. Incremento de velocidad del motor	72
Figura 39. Decremento de la velocidad del motor	73
Figura 40. Respuesta al escalón de la planta	76
Figura 41. Regla de sintonía Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método)	77
Figura 42. Configuración del sentido directo en modo PID	78
Figura 43. Programación de la parada.	79
Figura 44. Condiciones iniciales	80
Figura 45. Reinicio de las condiciones iniciales	80
Figura 46. Medición de velocidad	81
Figura 47. Activación de la función PID	82
Figura 48. Corriente medida con la sonda de efecto hall del motor en vacío, energizado por tensión troceada	84
Figura 49. Tensión de armadura con operación en vacío	85
Figura 50. Tensión de salida de la fuente DC a la entrada del troceador.	86
Figura 51. Corriente del motor acoplando el generador sin carga	87

Figura 52. Tensión de armadura con generador en vacío como carga	88
Figura 53. Corriente del motor teniendo como carga al generador con 3 bombillas de 200W.	89
Figura 54. Tensión de armadura con el motor acoplado al generador y tres bombillas como carga.	90
Figura 55. Corriente del motor acoplado el generador con 6 bombillas de 200W como carga	91
Figura 56. Tensión de armadura con el motor acoplado al generador y 6 bombillas como carga.	92
Figura 57. Corriente de la armadura del motor implementando la función PID	93
Figura 58. Tensión vs corriente en la armadura al implementar el PID	94
Figura 59. Corriente y Velocidad a 35.1 [v]	103
Figura 60. Corriente y Velocidad a 65.7 [v]	103
Figura 61. Corriente y Velocidad a 75.2 [v]	104
Figura 62. Corriente y Velocidad a 85.5 [v]	104
Figura 63. Corriente y Velocidad a 35.1 [v]	105
Figura 64. Corriente y Velocidad a 65.7 [v]	105
Figura 65. Corriente y Velocidad a 75.2 [v]	106
Figura 66. Corriente y Velocidad a 85.5 [v]	106
Figura 67. Corriente y Velocidad a 35.1 [v]	107
Figura 68. Corriente y Velocidad a 65.7 [v]	107
Figura 69. Corriente y Velocidad a 75.2 [v]	108
Figura 70. Corriente y Velocidad a 85.5 [v]	108
Figura 71. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 20%	109
Figura 72. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 30%	110
Figura 73. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 50%	110
Figura 74. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 70%	111
Figura 75. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 20%	111
Figura 76. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 30%	112
Figura 77. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 50%	112

Figura 78. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 70%	113
Figura 79. Configuración de las entradas analógicas	114
Figura 80.Habilitación del PID	115
Figura 81. Cambio a modo exploración de TWIDO.	115
Figura 82. Selección del entre PID o PID+AT	116
Figura 83. Configuración de la entrada del PID.	117
Figura 84. Ingreso de parámetros del PID.	117
Figura 85. Configuración de la salida PWM del PID.	118
Figura 86. Esquema de funcionamiento del PID	118
Figura 87. Ciclo de trabajo del PWM	119
Figura 88. Cuadro de configuración del PWM	119

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Óhmetro AMPROBE LCR 55a	32
Tabla 2. Óhmetro FLUKE 117	32
Tabla 3. Valores de tensión y corriente en la armadura de la máquina	34
Tabla 4. Medidor AMPROBE LCR55	37
Tabla 5. Resultados del medidor de parámetros	38
Tabla 6. Valores RCL del circuito utilizado para hallar la frecuencia de resonancia.	39
Tabla 7. Valores para el cálculo de Km (constante del motor).	40
Tabla 8. Velocidad y corriente pico en el arranque directo a diferentes valores de tensión en la armadura	45
Tabla 9. Resultados de simulación de Velocidad y corriente pico del arranque, energizando la armadura por medio de una tensión troceada	47
Tabla 10. Tensión y corriente en el circuito de protección del transistor.	50
Tabla 11. Datos de la caracterización de la sonda de efecto HALL	53
Tabla 12. Simbología usada en el programa.	59
Tabla 13. Comparación de los valores en la implementación del arrancador	95

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. SIMULACIÓN Y EJECUCIÓN DEL ARRANQUE DIRECTO	102
ANEXO B. CONFIGURACION DE LAS FUNIONES PID Y PWM DEL PLC TWIDO TWDLCAE40DRF	114

Nota: "Ver anexos en la carpeta adjunta"

## RESUMEN

**TÍTULO:** MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE. ARRANQUE Y CONTROL DE VELOCIDAD POR TENSIÓN DE ARMADURA.\*

**AUTORES:** CRISTIAN CAMILO BARRAGÁN MURCIA  
JUAN CARLOS MARTÍNEZ AGUILAR \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Software Twido Suite, controlador lógico programable (PLC), sonda de efecto hall, transistor mosfet, diodo de marcha, controlador PID, arranque directo, arranque empleando tensión reducida (tensión troceada), frenado dinámico.

### DESCRIPCIÓN

La corriente en el arranque de los motores DC alcanza un valor transitorio cuya magnitud depende de los parámetros del motor (RLC), de la carga, el par de aceleración y la tensión de alimentación presentando picos de corriente, por lo tanto, se diseñan diferentes formas de mitigarlos para que no se accione la protección de sobre corriente y no cause sobrecalentamientos en los devanados o daños en la parte móvil del motor. En las prácticas de laboratorio de máquinas 1 del programa de ingeniería eléctrica de la UIS, sólo se implementa el método de arranque por resistencias en serie con la armadura, pero no permite ver el comportamiento del transitorio y el valor máximo de corriente que alcanza cuando la máquina vence la inercia.

Con el presente trabajo de grado se pretende diseñar un arrancador que permita controlar la corriente de arranque de un motor DC de excitación independiente, utilizando funciones avanzadas del controlador lógico programable (PLC) TWDLCAE40DRF, las cuales controlan el transistor que conforma el troceado, permitiendo la operación de la máquina en sentido directo y en sentido inverso, en donde la corriente es sensada mediante una sonda de efecto hall, y en la parada del motor implementar un frenado dinámico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenieras Fisicomecanicas. Escuela de Ingeniera Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director Julio Augusto Gelvez Figueredo

## ABSTRACT

**TITLE:** CONTINUOUS CURRENT OF INDEPENDENT EXCITATION ENGINE. STARTING AND SPEED CONTROL BY ARMOR TENSION.\*

**AUTHORS:** CRISTIAN CAMILO BARRAGÁN MURCIA  
JUAN CARLOS MARTÍNEZ AGUILAR\*\*

**KEYWORDS:** Twido Suite software, programmable logic controller (PLC), hall effect probe, mosfet transistor, run diode, PID controller, direct start, start using reduced voltage (chopped voltage), dynamic braking.

### DESCRIPTION

The starting current of the DC motors reaches a transient value whose magnitude depends on the motor parameters (RLC), the load, the acceleration torque and the supply voltage; Due to these high current peaks, different ways to mitigate them are designed so that it does not cause overheating in the windings or damage to the mobile part of the motor. In the machines laboratory practices 1, only the starting method is implemented by resistors in series with the armature, but it does not allow to see the behavior of the transient and the maximum value of current reaches when the machine overcomes the inertia.

With the present degree work it intends to design a starter that allows to control the starting current of a DC independent excitation engine, using advanced functions of the programmable logic controller (PLC) TWDLCAE40DRF, which operate the transistor that makes up the chopper, allowing the operation of the machine in the direct direction and in the opposite direction, where the current is sensed by a hall effect probe, which has an oscilloscope connected to the output in order to observe the behavior of it during start and stop of the engine to implement a dynamic braking.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineers. School of Electrical Engineering Electronics and Telecommunications. Director Julio Augusto Gelvez Figueredo

## INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander en el transcurso de los años se ha destacado por ser una institución de educación superior de las mejores del país por la calidad, ética y emprendimiento de sus egresados en todos los programas que ofrece. La escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) como parte de enseñanza brinda a los estudiantes la oportunidad de realizar prácticas en el laboratorio con máquinas de corriente continua y corriente alterna para así fortalecer los conceptos teóricos impartidos.

Con los avances que se tienen en el campo de los dispositivos electrónicos y de la electrónica de potencia, se vuelve más sencillo diseñar e implementar un prototipo de arranque suave para un motor DC del laboratorio de máquinas, con el propósito de fortalecer mediante la práctica los conceptos teóricos que se imparten en las aulas de clase. Actualmente en el laboratorio se implementa el arranque del motor DC con resistencias en serie con la armadura, este método simplemente me limita la corriente, pero no permite hacer un control continuo sobre esta.

Con la realización de este trabajo de grado se pretende contrastar el modelo matemático obtenido en los cursos de máquinas, con los valores reales obtenidos mediante la medición en el arranque controlado por tensión. Los softwares PSIM y SIMULINK fueron usados para tener una visión más amplia de cómo es el comportamiento de la corriente en el arranque, y hacer la correcta selección de los elementos a utilizar en el circuito de control.

Cabe resaltar que las ecuaciones utilizadas en la ejecución del proyecto para obtener los valores de los parámetros del motor están disponibles y fueron tomadas de libros de máquinas eléctricas y de trabajos de grado con relación al tema del motor DC de excitación independiente; por esta razón, no se realizarán las

demostraciones matemáticas de las mismas, dado que son ecuaciones conocidas y utilizadas en los cursos de máquinas eléctricas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un arrancador electrónico, cuyo propósito es variar la tensión en terminales de armadura de un motor de corriente continua de excitación independiente; controlando, por medio de un PLC (Programmable Logic Controller), la corriente de arranque y la velocidad de la máquina.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Controlar la corriente de un motor DC de excitación independiente utilizando un troceador, que permita el funcionamiento en dos de los cuatro cuadrantes (sentido directo, sentido inverso), y además se pueda implementar el frenado dinámico de la máquina.

Utilizar una sonda de efecto Hall con el propósito de medir y controlar desde el PLC la corriente durante el arranque del motor DC de excitación independiente.

Emplear el software TwidoSuite para programar el PLC Referencia TWDLCAE40DRF y diseñar un programa que permita controlar el troceador que acciona el motor DC de excitación independiente.

## 2. CONCEPTOS GENERALES

### 2.1 ESTRUCTURA Y ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

El motor de corriente continua<sup>1</sup> es una máquina eléctrica, que físicamente se compone de una parte móvil o rotor, el cual es construido en forma cilíndrica, con capas magnéticas de acero de silicio convenientemente ranurado, donde se alojan los devanados, estos son energizados con corriente continua a través del colector de delgas que a su vez están en contacto con las escobillas. El rotor va a estar sometido a torques mecánicos, generando un movimiento a una velocidad determinada por la tensión de armadura, la tensión de excitación y la carga.

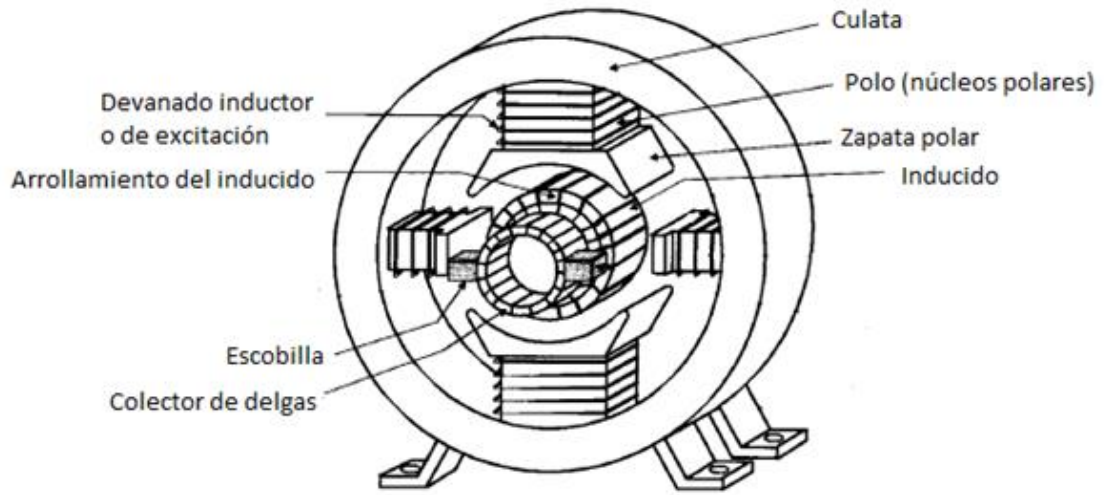
La parte fija o estator, está formado por la culata que da soporte mecánico a la estructura total del motor, es la parte visible donde se alojan los bornes de conexión y a su vez el devanado inductor o de excitación, ver **Figura 1**. El propósito de la maquina DC es convertir la energía eléctrica en energía mecánica, esto se realiza generando un movimiento rotatorio en su eje, gracias a la acción del campo magnético producido al energizar el devanado inductor o de excitación del estator.

En la figura 1 se muestra un esquema básico de la forma física que presenta este tipo de máquina:

---

<sup>1</sup> JESUS FRAILE MORA. Máquinas eléctricas. Quinta edición. Mc Graw Hill

Figura 1. Esquema básico de la forma física del motor DC



Fuente: JESUS FRAILE MORA. Máquinas eléctricas. Quinta edición. Mc Graw Hill

El principio de funcionamiento de la maquina está dado por la ley de fuerza de Lorentz<sup>2</sup>, donde un conductor que transporta una corriente dentro de un campo magnético experimenta una fuerza que intenta moverlo, dicha ley está dada por la siguiente expresión:

$$F = \vec{I} * L \times \vec{B} \quad (1)$$

La magnitud de dicha fuerza está dada por:

$$F = I * L * B * \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

F: Fuerza [N]

L: Longitud del conductor [m]

---

<sup>2</sup> SERWAY RAYMOND AND JEWETT JHON, Physics for Scientist and Engineers. Sixth Edition. Vol 1, Editorial Cencage Learning, 2008.

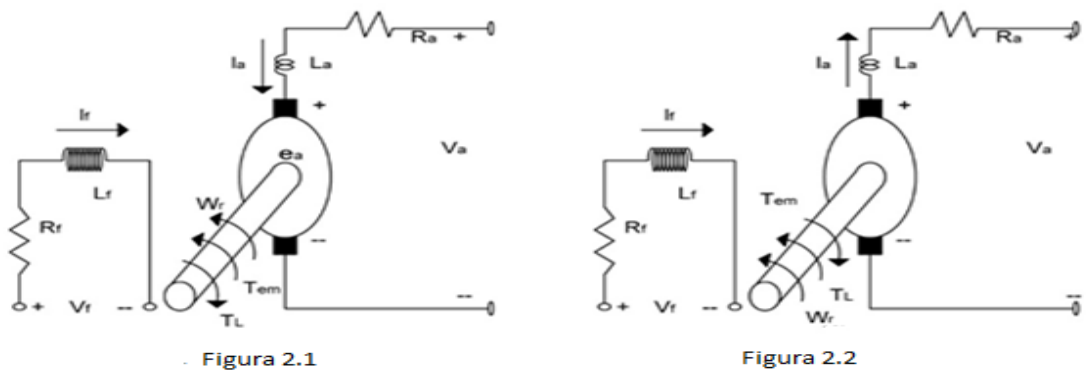
B: Densidad de campo magnético [ $\text{Ø}/\text{A}$ ]

I: Corriente [A]

$\theta$ : Ángulo formado entre los vectores de la corriente y la densidad de campo.

En la figura 2 se muestra el circuito eléctrico de la máquina de corriente continua de excitación independiente, en la figura 2.1 operando como motor y en la figura 2.2 operando como generador.

Figura 2. Circuito equivalente de la máquina de corriente continua de excitación independiente



De la figura 2.1, aplicando la sumatoria de tensiones de Kirchhoff [1] para el devanado de campo y analizando la operación como motor, la ecuación que se obtiene se presenta a continuación:

$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (3)$$

$V_f$ = Tensión aplicada al campo del motor [V]

$R_f$ =Resistencia del devanado de campo [ $\Omega$ ]

$I_f$  = Corriente de excitación [A]

$L_f$  = Inductancia propia del devanado de campo [H]

Si se realiza el análisis para el circuito de armadura la tensión está dada por la siguiente expresión:

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

Siendo  $e_a = K_m * \Omega_m$  para un flujo magnético constante.

Donde:

$e_a$  = Tensión inducida en la armadura a flujo constante [V].

$K_m$  = Constante característica del motor de excitación independiente  $\left[ \frac{\text{voltios} \cdot \text{segundo}}{\text{Radianes}} \right]$ .

$\Omega_m$  = Velocidad angular mecánica del rotor [1/s].

$\Delta V$  = Caída de tensión en las escobillas [V].

$V_a$  = Tensión externa aplicada a los bornes de la armadura [V].

$R_a$  = Resistencia del devanado de armadura [ $\Omega$ ].

$I_a$  = Corriente de armadura [A].

$L_a$  = Inductancia propia del devanado de armadura [H].

De la segunda ley de Newton [2] y realizando un análogo con la aceleración angular aplicando esta ley al estudio de torques en el rotor tenemos:

$\sum F = m * a$  N, el torque se expresa como  $T = F * r$  Nm, y la aceleración angular como  $A = r * \frac{d\Omega_m}{dt} \frac{1}{s}$ ; llegamos a la siguiente expresión:

$$\sum T = \sum F * r = m * \left( r * \frac{d\Omega_m}{dt} \right) * r = m * r^2 * \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (5)$$

Sabiendo que  $J_m = m * r^2$  al reemplazar y organizando los términos tenemos:

$$\sum T = J_m * \frac{d\Omega_m}{dt} \text{ Torque debido a la aceleración [N*m].}$$

Tomando como referencia de velocidad cero en el rotor obtenemos la siguiente ecuación:

$$T_{em} - T_p - T_L = J_m A \quad (6)$$

Donde:

$T_{em}$  =Torque electromagnético producido por el flujo magnético presente en máquina y que cruza el entrehierro [Nm].

$T_p$  = Torque de pérdidas debido al rozamiento de las balineras con el eje del rotor y eventualmente pérdidas por ventilación [Nm].

$T_L$  = Torque mecánico aplicado externamente a la máquina referido al rotor y que corresponde al propio del motor más el equivalente de la carga [Nm].

$J_m$  = Momento de inercia del rotor debido a la masa del hierro que lo compone y del cobre de sus bobinas, más el momento de inercia de la carga referido al motor.

$$A = \frac{d\Omega_m}{dt} \text{ Aceleración angular del rotor de la máquina } \left[ \frac{1}{s^2} \right].$$

El torque electromagnético [1] para una máquina de corriente continua de excitación independiente y con flujo constante viene dado por:

$$T_{em} = K_m I_a \quad (7)$$

Haciendo el reemplazo del torque electromagnético de la máquina de corriente continua de excitación independiente en la ecuación (6) se obtiene que:

$$K_m I_a - T_p - T_L = J_m \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (8)$$

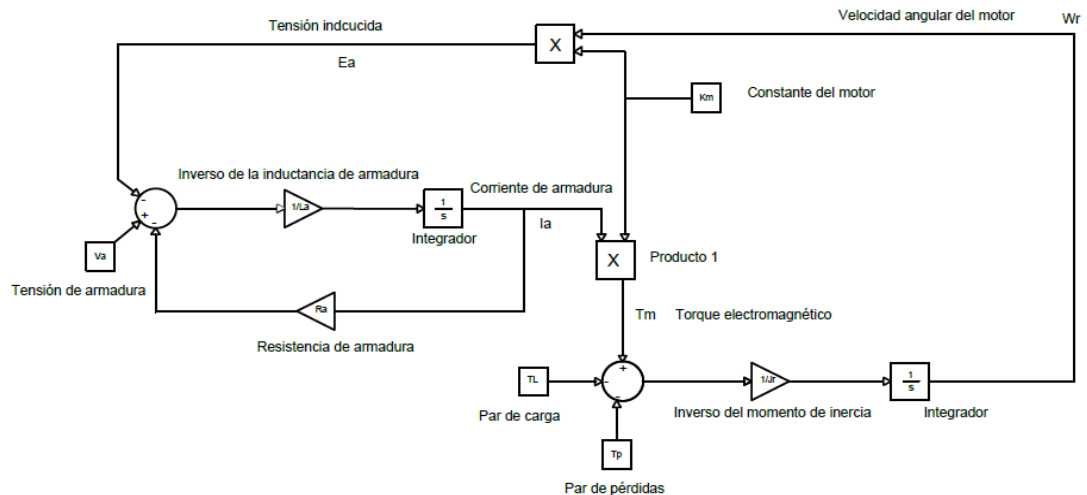
Las ecuaciones anteriores caracterizan matemáticamente el comportamiento en estado estable y transitorio de un motor de corriente continua de excitación independiente.

De la ecuación (8) se llega a la expresión:

$$\int \frac{-T_L - T_p + K_m I_a}{J_m} dt = \Omega_m \quad (9)$$

De las ecuaciones (3), (8) y (9) y aplicando la transformada de Laplace se obtiene el diagrama de bloques con el cual se representa la máquina de corriente continua de excitación independiente, que se muestra en la figura 3.

Figura 3. Diagrama de bloques del motor de corriente continua de excitación independiente



Fuente: DANIEL MEJÍA URIBE Y HUGO ALEJANDRO MARTÍNEZ RAMOS, Motores eléctricos: Frenado dinámico y a contracorriente.2001. Tesis de grado. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.

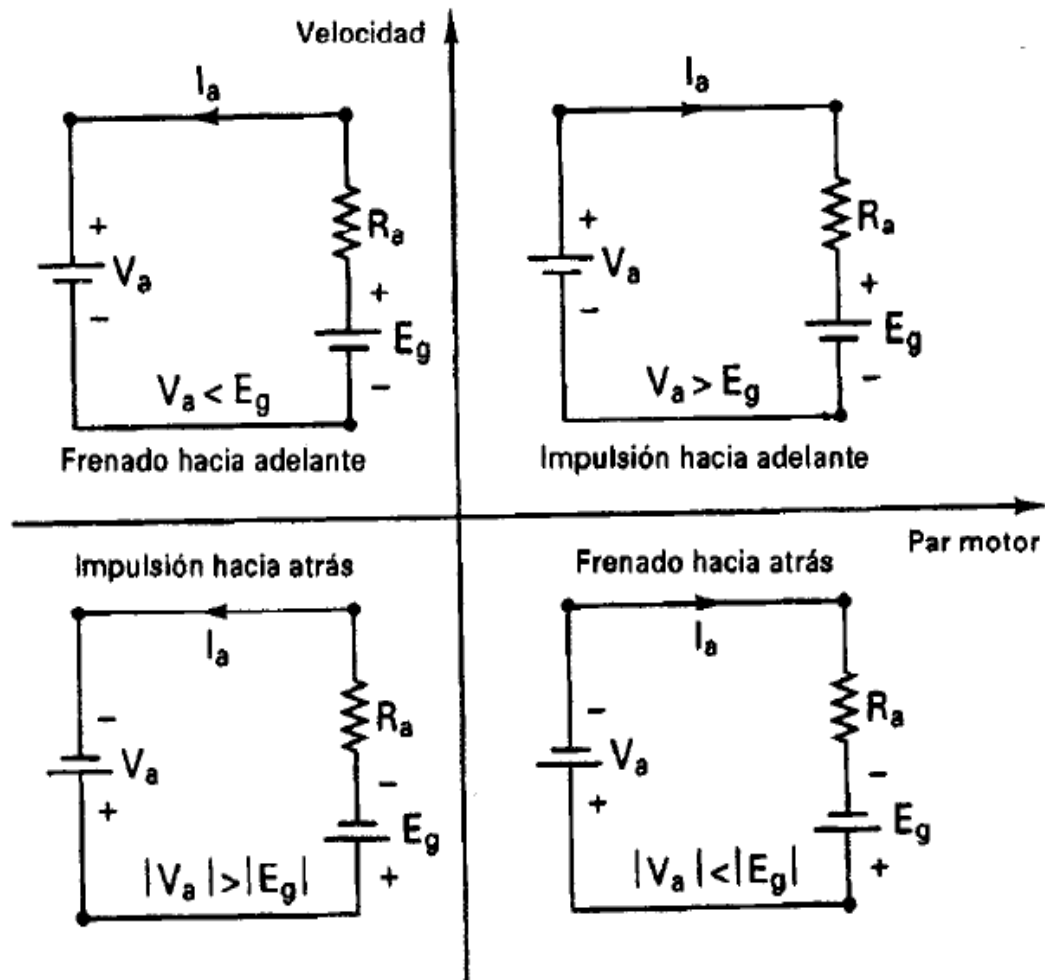
## 2.2 OPERACIÓN DEL MOTOR EN IV CUADRANTES

Se denominan cuatro cuadrantes [3] a la representación por medio de un plano cartesiano a las diferentes operaciones de la maquina DC, las cuales se definen dependiendo la velocidad y el par del motor, cada cuadrante del plano representa la siguiente función:

- **Cuadrante I** operación como motor con impulsión hacia adelante o en sentido directo (velocidad positiva y par positivo).
- **Cuadrante II** operación de frenado directo hacia adelante.
- **Cuadrante III** operación como motor con impulsión en reversa o hacia atrás.
- **Cuadrante IV** operación de frenado directo reversa.

En la figura 4 se muestra el sentido de la corriente de armadura y la condición de tensión que se debe presentar para su operación en cada cuadrante:

Figura 4. Operación del motor en cuatro cuadrantes



Fuente: MUHAMMAD H. RASHID, Circuitos, dispositivos y aplicaciones, Segunda edición, Pertice Hall Hispanoamericana.

### 3. PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Los parámetros que fueron calculados corresponden a la máquina de corriente continua marca De Lorenzo diseñada para aplicaciones educativas y que se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander, por tanto, estos parámetros son diferentes al ser comparados con una máquina de uso industrial. En la figura 5 se presentan los datos de placa del motor DC.

Figura 5. Datos nominales de la máquina DC marca De Lorenzo



#### 3.1 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE ARMADURA

Para medir la resistencia de armadura, se emplean diferentes métodos con el fin poder comparar y contrastar que la magnitud leída sea aproximadamente el mismo valor sin importar la técnica implementada. Se realizaron los siguientes procesos para medir la resistencia de armadura:

- Medición directa empleando instrumentos de medida digital (óhmetro digital).

- Medición indirecta mediante la relación tensión vs corriente en la armadura (ley de Ohm).

**3.1.1 Medición directa empleando instrumentos de medida digital (óhmetro digital).** En esta prueba se utilizaron dos medidores digitales, Amprobe lcr 55<sup>a</sup> y Fluke 117, en donde se fue girando el rotor aproximadamente 45°. Los datos de la medición quedaron se registraron en las tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1. Óhmetro AMPROBE LCR 55a

<b>ANGULO</b> [°]	<b>MEDIDA</b> <b>1</b>	<b>MEDIDA</b> <b>2</b>	<b>MEDIDA</b> <b>3</b>	<b>PROMEDIO</b>
<b>45</b>	3.65	2.91	2.98	3.18
<b>90</b>	4.15	2.72	2.76	3.21
<b>135</b>	2.66	2.54	3.2	2.8
<b>180</b>	4.52	3.15	3.45	3.707
<b>225</b>	2.79	4.9	4.64	4.11
<b>270</b>	3.23	5.15	3.17	3.85
<b>315</b>	2.42	2.37	2.62	2.47
<b>360</b>	3.05	3.09	3.19	3.11
<b>Resistencia promedio</b>				3.305

Tabla 2. Óhmetro FLUKE 117

<b>ANGULO</b> [°]	<b>MEDIDA</b> <b>1</b>	<b>MEDIDA</b> <b>2</b>	<b>MEDIDA</b> <b>3</b>	<b>PROMEDIO</b>
<b>45</b>	3.6	3.7	3.6	3.633
<b>90</b>	3.5	3.5	3.6	3.533
<b>135</b>	3.4	3.4	3.4	3.400
<b>180</b>	3.4	3.4	3.3	3.367
<b>225</b>	3.3	3.3	3.3	3.300

ANGULO [°]	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	PROMEDIO
270	3.5	3.5	3.5	3.500
315	3.8	3.7	3.8	3.767
360	3.5	3.5	3.6	3.533
<b>Resistencia promedio</b>				3.504

Al comparar el promedio de la medida realizada con el Óhmetro **AMPROBE LCR 55<sup>a</sup>** con la del Óhmetro **FLUKE 117**, se puede observar que hay una similitud en las magnitudes leídas con una diferencia de 0.199 [Ω] donde el error es de aproximadamente 3.5%.

**3.1.2 Medición indirecta mediante la relación tensión vs corriente en la armadura (ley de Ohm).** Para esta prueba se utilizó una fuente DC BK PRECISION 1672, dos amperímetros digitales PEAK TECH 4350 y AMPROBE AMP 320 y un multímetro FLUKE 117.

Empleando el montaje de la figura 6, se midió la tensión y la corriente en la armadura, para después calcular el valor de la resistencia mediante la relación  $R = \frac{V}{I}$ , donde el valor de la tensión es el tomado en bornes de armadura y el valor de la corriente es el promedio entre el valor de los dos medidores y el valor de corriente que registra la fuente con un display de 3 dígitos, dichos datos se encuentran registrados en la tabla 3.

Figura 6. Esquema de medición de tensión y corriente en la armadura.

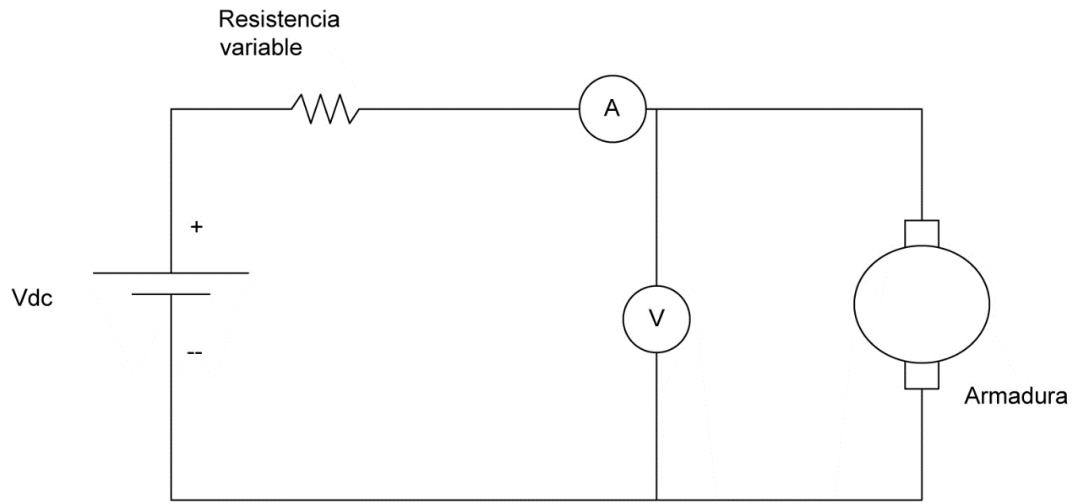


Tabla 3. Valores de tensión y corriente en la armadura de la máquina

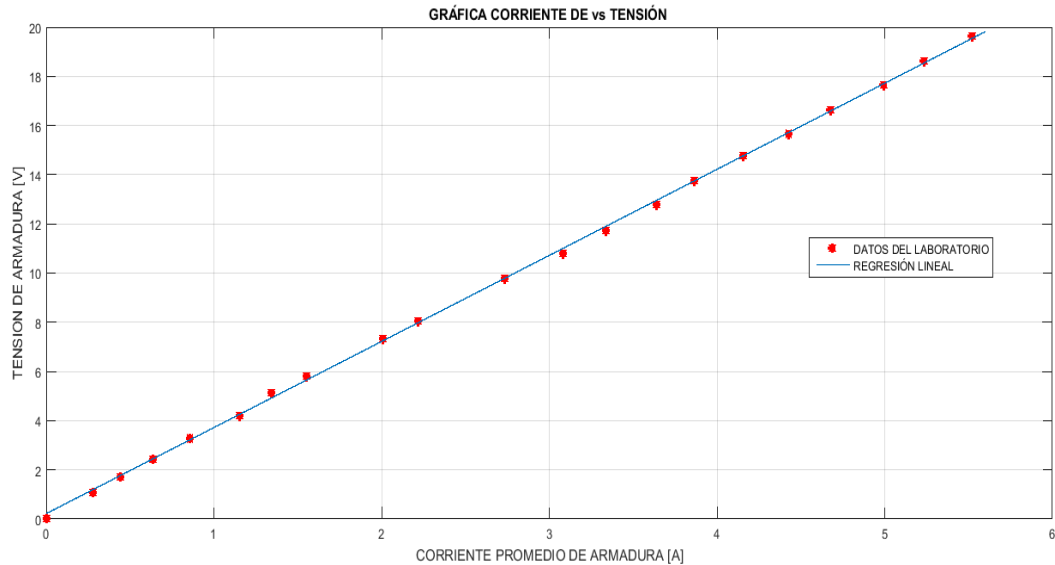
Tensión de armadura [V]	Medidor 1 [A]	Medidor 2 [A]	Display fuente [A]	Resistencia [ $\Omega$ ]
0	0	0	0	0
1.086	0.293	0.24	0.3	3.911
1.72	0.463	0.4	0.47	3.871
2.449	0.657	0.59	0.67	3.833
3.277	0.873	0.81	0.89	3.821
4.196	1.111	1.05	1.3	3.637
5.118	1.354	1.29	1.38	3.816
5.815	1.561	1.51	1.59	3.743
7.32	2.006	1.97	2.04	3.65
8.04	2.225	2.18	2.25	3.624
9.8	2.735	2.7	2.77	3.583

Tensión de armadura [V]	Medidor 1 [A]	Medidor 2 [A]	Display fuente [A]	Resistencia [ $\Omega$ ]
10.81	3.089	3.05	3.11	3.506
11.74	3.336	3.34	3.33	3.517
12.79	3.634	3.62	3.66	3.516
13.76	3.862	3.86	3.87	3.561
14.76	4.157	4.15	4.16	3.552
15.67	4.423	4.44	4.42	3.539
16.65	4.68	4.68	4.68	3.558
17.67	5	5.02	4.96	3.539
18.63	5.2	5.28	5.22	3.56
19.65	5.5	5.56	5.51	3.558
<b>RESISTENCIA PROMEDIO</b>				3.645

En la figura 7, se presentan los datos obtenidos anteriormente, a los cuales se les aplicó la técnica de regresión lineal, en donde la relación está dada de la forma  $V = R * I + b$  siendo  $I$  la variable independiente,  $R$  La pendiente de aproximación, que a su vez es el valor de la resistencia con un valor de  $3,5\Omega$ , y el termino independiente  $b$  como la variación de tensión con un valor de  $0.219V$ .

La expresión para la tensión al realizar la regresión lineal de los datos de la prueba es  $V = 3,5 * I + 0.219$ .

Figura 7. Tensión Vs corriente de armadura



Como se puede observar la resistencia de armadura varía dependiendo del método de medición implementado, por esta razón se realiza el promedio de los valores obtenidos y así tener un valor representativo de la magnitud de la resistencia de armadura.

$$R_a = \frac{R_{medidor1} + R_{medidor2} + R_{leyohm} + R_{regresión}}{4}$$

$$R_a = \frac{3.305 + 3.504 + 3.645 + 3,5}{4} = 3.489 \text{ } [\Omega]$$

### 3.2 MEDICIÓN DE LA INDUCTANCIA DE ARMADURA

Para medir la inductancia de armadura, también se ejecutaron varios métodos con el fin de poder comparar y contrastar que la magnitud leída sea aproximadamente el mismo valor sin importar la técnica utilizada. Se realizaron los siguientes procesos en la medida de la inductancia de armadura:

- Medición directa empleando el medidor de inductancia digital.
- Medición directa empleando el medidor de parámetros.
- Medición indirecta empleando el método de resonancia.

**3.2.1 Medición directa empleando el medidor de inductancia digital.** Para esta prueba se utilizó un medidor digital de referencia AMPROBE LCR 55, los resultados se encuentran en la Tabla 4. El rotor se fue girando aproximadamente 45° (grados), con el fin de observar la variación que se presenta en la inductancia dependiendo la posición del rotor.

Tabla 4. Medidor AMPROBE LCR55

ÁNGULO [°]	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	PROMEDIO
45	67.3	67	67	67.100
90	66.2	66.2	66.2	66.200
135	66.7	66	66.5	66.400
180	67	67	67.1	67.033
225	67.1	67.1	67.3	67.167
270	66.3	66.1	66.4	66.267
315	65.8	66.1	66.1	66.000
360	66.7	66.9	66.8	66.800
<b>Inductancia promedio [mH]</b>				66.621

**3.2.2 Medición directa empleando el medidor de parámetros.** Para esta prueba se utilizó un medidor de parámetros de referencia PM6305 RCL METER PHILLIPS a una frecuencia de 1000Hz, los resultados se encuentran en la Tabla 5. El rotor

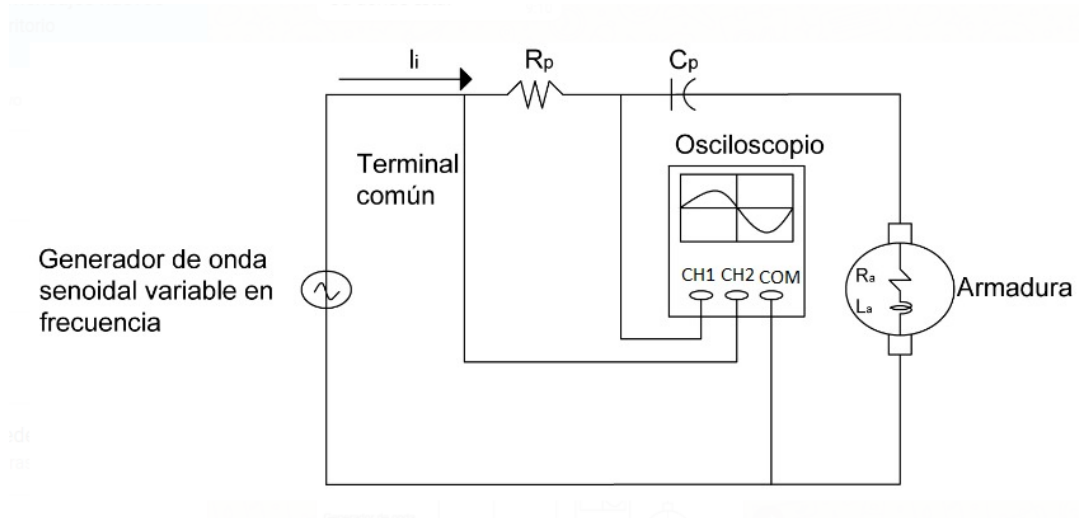
se fue girando aproximadamente cada 90° (grados), con el fin de observar la variación que se presenta en la inductancia dependiendo la posición del rotor.

Tabla 5. Resultados del medidor de parámetros

Ángulo	Inductancia [mH]
315	67.3
45	66.46
135	66.43
<b>Inductancia promedio [mH]</b>	66.73

**3.2.3 Medición indirecta empleando el método de resonancia.** En esta prueba se utilizó un circuito RC en serie con la armadura como se muestra en la Figura 8, en el cual se varía la frecuencia de la fuente generadora de señales, para ver con el osciloscopio el momento en el cual, la tensión de la fuente y la tensión en la resistencia se encuentran en fase.

Figura 8. Montaje utilizado para hallar la frecuencia de resonancia



Teniendo en cuenta el concepto de resonancia en un circuito RLC serie [4], donde la componente inductiva y la capacitiva se cancelan, se tiene que:

$$Z = R + j\left(\omega L + \frac{1}{\omega C}\right) \quad (10)$$

Entonces:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (11)$$

Reescribiendo la ecuación, podemos hallar el valor de la inductancia.

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_a * C_p}} \rightarrow 2 * \pi * f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_a * C_p}} \rightarrow L_a = \frac{1}{(2 * \pi * f_0)^2 * C_p} \quad (12)$$

Los datos obtenidos al variar el valor de la resistencia y el capacitor se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores RCL del circuito utilizado para hallar la frecuencia de resonancia.

<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Resistencia [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Capacitancia [<math>\mu</math>f]</b>	<b>Inductancia calculada [mH]</b>
<b>836</b>	2	0.47	77.113
<b>584</b>	2	0.94	79.0108
<b>1215</b>	2	0.235	73.0163
<b>1205</b>	1	0.235	74.233
<b>Inductancia Promedio [mH]</b>			<b>75.843275</b>

Como se puede observar la inductancia de armadura también varía dependiendo del método de medición implementado, por esta razón se realiza de nuevo un promedio de los valores obtenidos para hacer una relación de todos métodos y así obtener un valor más exacto de la inductancia de armadura.

$$L_a = \frac{L_{medidor1} + L_{medidor2} + L_{resonancia}}{3}$$

$$L_a = \frac{66.6208333 + 66.73 + 75.843275}{3} = 69.7339 \text{ [mH]}$$

### 3.3 CONSTANTE DE MAGNETIZACIÓN

Cuando el motor opera en vacío y en estado estable se tiene la siguiente expresión:

$$e_a = V_a - R_a I_a \quad (13)$$

Como la máquina es de excitación independiente y con un flujo constante se dice que  $e_a = K_m * \Omega_m$ , al reemplazar en la ecuación anterior se tiene que:

$$K_m = \frac{V_a - R_a I_a}{\Omega_m} \quad (14)$$

El método consiste [5] en variar la tensión de armadura con el fin de obtener los diferentes valores de corriente y velocidad del motor, después se reemplazan los datos en la ecuación (14) para el cálculo de la constante de magnetización.

En la tabla 7 se encuentran los resultados de la prueba para el cálculo de la constante de magnetización.

Tabla 7. Valores para el cálculo de  $K_m$  (constante del motor).

Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Resistencia [Ω]	$K_m$ [V*s/rad]
190	0.36	190.23	3.489	0.9922
180.2	0.34	180.45	3.489	0.992
169.2	0.33	168.82	3.489	0.9954
160.2	0.32	159.77	3.489	0.9957
150.5	0.31	150.13	3.489	0.9953

Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Resistencia [Ω]	Km [V*s/rad]
139.5	0.3	138.93	3.489	0.9966
<b>Promedio</b>				0.9945

La magnitud de Km se calculó para el valor nominal de flujo y corresponde al motor DC de excitación independiente con el que cuenta el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander.

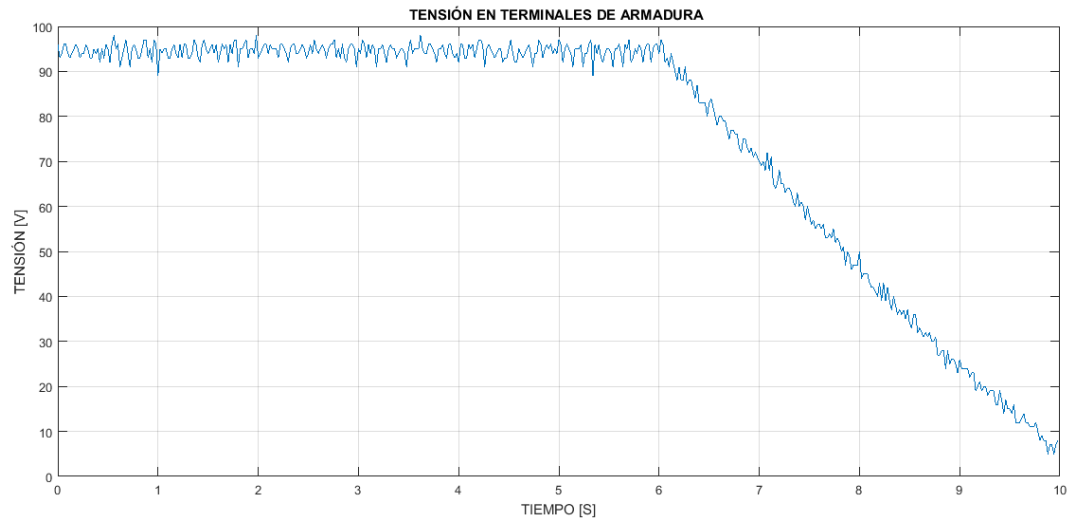
### 3.4 MEDICIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA

Para el cálculo del momento de inercia<sup>3</sup>, se realizó la prueba con el motor trabajando en vacío. La prueba se realiza llevando el motor a la velocidad nominal y por medio de un osciloscopio, analizar el comportamiento de la tensión en los terminales de armadura, al desconectar la alimentación en la misma como se muestra en la figura 9.

---

<sup>3</sup> DANIEL MEJÍA URIBE Y HUGO ALEJANDRO MARTÍNEZ RAMOS, Motores eléctricos: Frenado dinámico y a contracorriente.2001. Tesis de grado. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.

Figura 9. Tensión en la armadura al desconectar la alimentación



De la ecuación (4) cuando el motor gira en vacío cumple con la siguiente igualdad:

$$T_{em} = T_p \quad (15)$$

$T_{em}$ : Torque electromagnético que pasa a través del entrehierro.

$T_p$ : Torque de pérdidas por rozamiento y ventilación.

Lo cual es equivalente a

$$k_m * i_a = \beta * \Omega_0 \quad (16)$$

Donde se considera que el torque debido a la fricción de los bujes es proporcional a la velocidad<sup>4</sup>.

$$\beta = \text{constante de fricción del motor a velocidad de vacío} \left[ \frac{\text{Kg-m}^2}{\text{s}} \right].$$

<sup>4</sup> JESUS FRAILE MORA. Máquinas eléctricas. Quinta edición. Mc Graw Hill

$\Omega_0 =$  velocidad del motor en vacio  $\left[\frac{1}{s}\right]$

$i_a =$  corriente de armadura del motor en vacio [A]

Al desconectar la armadura de la red el motor cumple la siguiente ecuación de movimiento:

$$J_m * \frac{\partial \Omega_m}{\partial t} + \beta * \Omega_m = 0 \quad (17)$$

Ecuación diferencial de primer orden con solución:

$\Omega_m = \Omega_0 * e^{\frac{-t}{\tau_m}}$  Donde la constante de tiempo mecánica es  $\tau_m = \frac{J_m}{\beta}$  [s].

Al ejecutar el procedimiento varias veces, obtenemos el valor de  $\tau_m$  calculando el tiempo que tarda la tensión en caer a cero al desconectar la armadura y sacar un promedio de este.

Al despejar el momento de inercia de la ecuación (17) tenemos

$$J_m = \beta * \tau_m \quad (18)$$

$$J_m = \frac{k_m * i_a * \tau_m}{\Omega_m} \quad (19)$$

Reemplazando los valores anteriores se obtiene el valor del momento de inercia.

$$J_m = \frac{0.9945 * 0.302 * 3.84}{1800 * \frac{\pi}{30}} = 0.00612 \text{ Kg} - \text{m}^2$$

## 4. ANÁLISIS DE LA CORRIENTE EN EL ARRANQUE MEDIANTE SIMULACIÓN Y PRUEBAS DE LABORATORIO.

Al tener los parámetros del circuito eléctrico equivalente del motor se realizan las simulaciones mediante los programas PSIM y SIMULINK, con el fin de analizar la corriente durante el arranque, energizando la armadura con diferentes valores de tensión menores a la nominal y así poder comparar con las pruebas realizadas en el laboratorio.

### 4.1 SIMULACIÓN DEL ARRANQUE DIRECTO

En la Figura 10 y en la Figura 11 se encuentra la conexión del arranque directo de la máquina dependiendo el programa utilizado, donde se mantiene constante la tensión en el devanado de campo y se varía la tensión de armadura, en el **ANEXO A** se encuentra la descripción y la ejecución de las simulaciones y los resultados de la práctica de laboratorio.

Figura 10. Simulación en SIMULINK para el arranque directo en vacío.

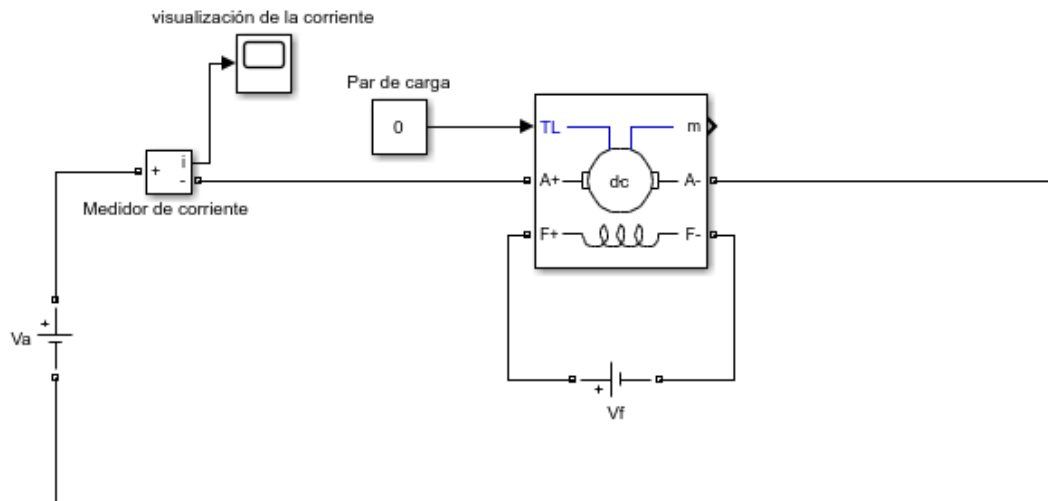
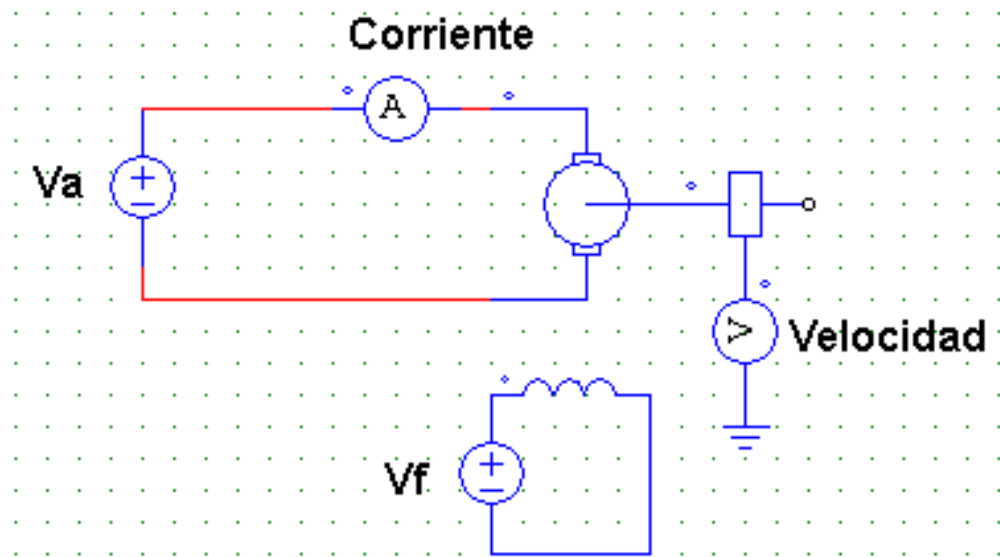


Figura 12. Simulación en PSIM para el arranque directo en vacío



Los resultados de las simulaciones para los diferentes valores de tensión, tanto para lo simulado como para lo de obtenido en el laboratorio encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8. Velocidad y corriente pico en el arranque directo a diferentes valores de tensión en la armadura

Tensión [V]	Prueba en el laboratorio		Simulación PSIM		Simulación SIMULINK	
	Corriente pico [A]	Velocidad final [rpm]	Corriente pico [A]	Velocidad final [rpm]	Corriente pico [A]	Velocidad final [rpm]
<b>35.1</b>	4.04	322	9	400	10.08	403.53
<b>65.7</b>	9.5	617	16.85	750	18.78	754.26
<b>75.2</b>	12.4	710	19.24	858	21.59	861.1
<b>85.5</b>	13.5	808	21.9	974	24.4	981.21

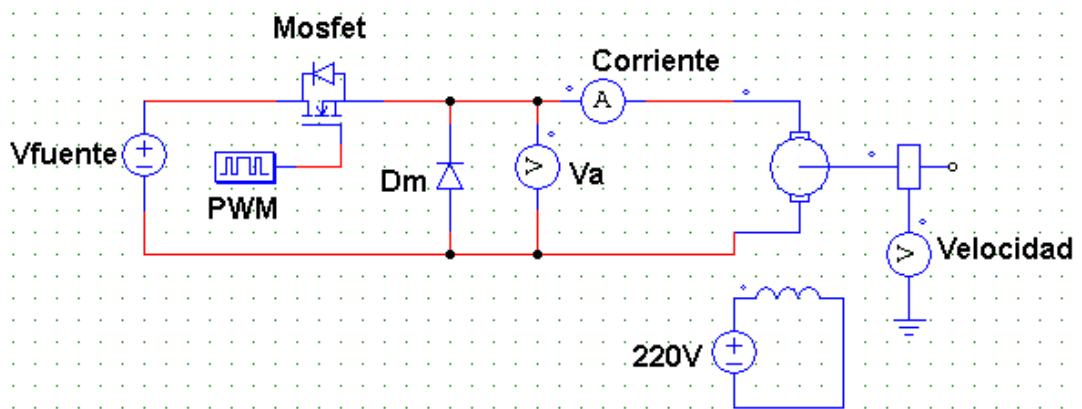
## 4.2 OBSERVACIONES DE LAS SIMULACIONES Y LOS RESULTADOS DEL LABORATORIO

Al hacer una comparación entre las gráficas obtenidas en los programas de simulación y las gráficas de la práctica ver **Anexo A**, se puede observar que la forma de onda que arroja el programa SIMULINK no coincide con el real, ya que el valor inicial es el pico de corriente y no cero como ocurre en la prueba o en el programa PSIM, por lo tanto no se puede observar el tiempo total que se demora en estabilizar la corriente; debido a esto se elige el programa PSIM para seguir llevando a cabo las simulaciones futuras.

## 4.3 SIMULACION DEL ARRANQUE ENERGIZANDO LA ARMADURA CON UNA TENSIÓN TROCEADA

En la Figura 12 se encuentra el montaje realizado en **PSIM** para el troceador seleccionado con el que se llevará a cabo el control de la tensión de armadura durante el arranque del motor. Cabe resaltar que el control del arranque se realizará empleando el **PLC TWIDO TWDLCAE40DRF [7]** que consta solo de dos salidas a transistor debido a lo cual se realizó este conexionado.

Figura 12. Circuito empleado del troceador en PSIM



Se realizó una serie de simulaciones, manteniendo un nivel de tensión constante en la fuente ( $V_{fuente}$ ) y variando el ancho de pulso del PWM [3], esto con el fin de observar el comportamiento de la corriente y la velocidad al modificar el ciclo de trabajo en el transistor. La frecuencia de conmutación que se implementó en el transistor para realizar las simulaciones y con la que se va a desarrollar el control del motor durante el arranque fue de 704Hz, debido a que es una de las frecuencias estándar del bloque funcional PWM que nos ofrece el **PLC TWIDO TWDLCAE40DRF**.

En el **Anexo A** se presentan los resultados y las gráficas de las simulaciones del arranque empleando una tensión troceada, al variarse el ancho de pulso del PWM que controla la operación del transistor MOSFET. En la Tabla 9 se encuentran los valores pico de corriente y velocidad.

Tabla 9. Resultados de simulación de Velocidad y corriente pico del arranque, energizando la armadura por medio de una tensión troceada

<b>TENSIÓN VF</b> <b>[V]</b>	<b>ANCHO DE PULSO</b> <b>[%]</b>	<b>CORRIENTE</b> <b>PICO [A]</b>	<b>VELOCIDAD</b> <b>FINAL</b> <b>[RPM]</b>
<b>85.5</b>	20	4.49	302
	30	6.44	446
	50	11.1	722
	70	15.4	983
<b>200</b>	20	10.5	705
	30	15.6	1042
	50	25.8	1689
	70	36.3	2298

Las simulaciones con tensión troceada se realizaron para el valor de 85.5V ya que fue el máximo valor de tensión al cual se hizo el arranque directo en el laboratorio, y a 200V debido a que esta tensión es la nominal de la máquina.

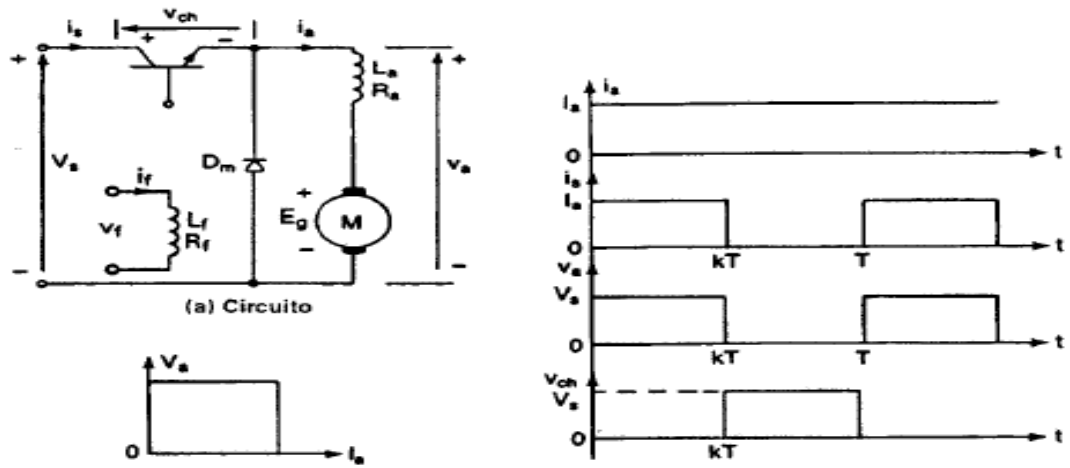
Observando los valores en la tabla 9 de corriente y velocidad al realizar el arranque con una tensión troceada en comparación con la tabla 8 del arranque directo, hay una disminución en la magnitud del pico de corriente y la velocidad de la máquina, garantizando que si se energiza la armadura a tensión nominal y seleccionando un ancho de pulso adecuado se puede arrancar la máquina sin producir daños en sus devanados o en su parte física

#### **4.4 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA REALIZAR EL ARRANQUE CONTROLANDO LA TENSIÓN DE ARMADURA**

Al obtener los resultados de las simulaciones del arranque por medio de una tensión troceada, se decidió realizar el montaje de la figura 12 en el laboratorio y observar el comportamiento de la corriente y la velocidad.

**4.4.1 Selección del transistor mosfet.** Un Mosfet de potencia [3] es un dispositivo controlado por voltaje, que requiere solo una pequeña corriente a la entrada, con una velocidad de conmutación del orden de los nanosegundos, en la figura 13 se muestra el comportamiento de la corriente de la corriente respecto del tiempo.

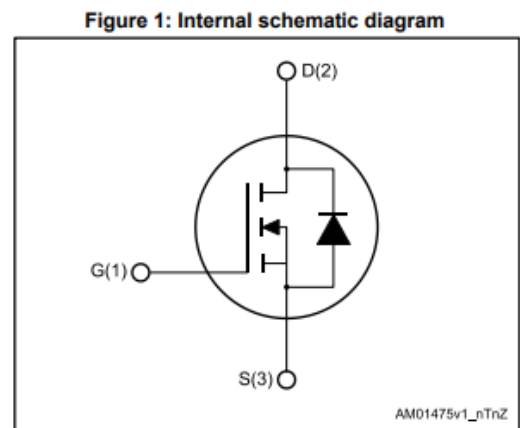
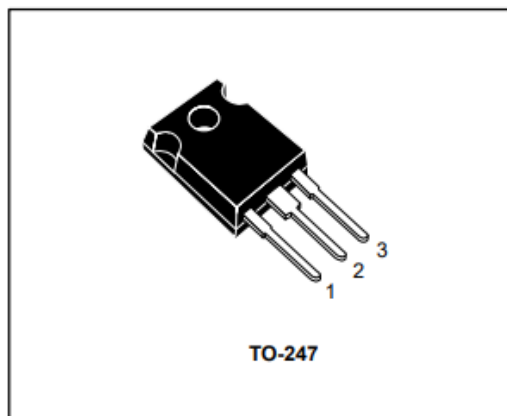
Figura 13. Funcionamiento del transistor MOSFET



Fuente: MUHAMMAD H.RASHID, Circuitos, dispositivos y aplicaciones, Segunda edición, Pertice Hall Hispanoamericana.

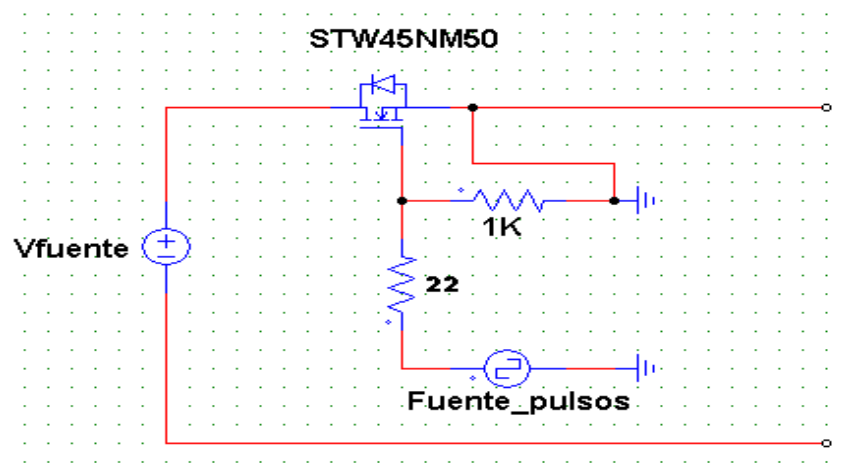
Para la selección del transistor se tuvo en cuenta el pico de corriente obtenido en las simulaciones, ya que la capacidad amperimétrica de este debe ser superior, por lo cual se decidió trabajar con el mosfet STW45NM50 canal n, con una corriente de 45A a 25°C y 28.4A a 100°C. En la figura 14 se encuentra el modelo con los correspondientes del transistor.

Figura 14. Aspecto físico y símbolo transistor MOSFET STW45NM50



Para que el transistor opere de forma correcta, se debe hacer la conexión en los terminales de una resistencia en serie y otra en paralelo, con el fin de proteger la puerta de las corrientes requeridas por capacitancias parasitas que se presentan en los terminales del mosfet; estas capacitancias se presentan entre drenador (D) y surtidor (s), y entre puerta (G) y surtidor (S). Lo que se logra con estas resistencias es limitar la corriente de carga al capacitor protegiendo la puerta y potencializar la puerta respecto al surtidor. En la figura 15 se encuentra el esquema de la conexión.

Figura 15. Circuito de protección para el transistor MOSFET



La tensión de puerta máxima que se puede aplicar es de 30 voltios según el datasheet del transistor; al medir la corriente que circula se puede observar que se mantiene una relación de 100, en donde esa sería la resistencia equivalente del circuito, como se muestra en la siguiente tabla 10.

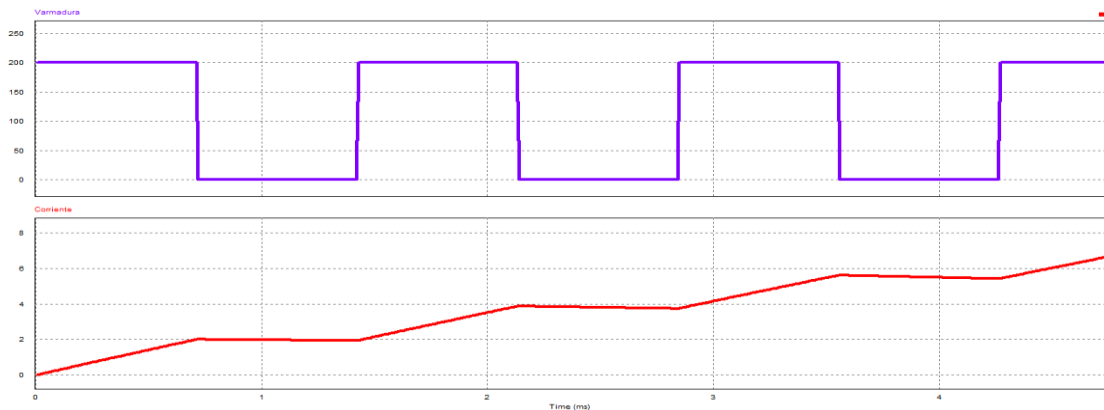
Tabla 10. Tensión y corriente en el circuito de protección del transistor.

Tensión de puerta [V]	Corriente [A]
10	0.1
15	0.15
25	0.25
30	0.3

**4.4.2 Selección del diodo de marcha o paso libre.** Un diodo de potencia [3] es un dispositivo de unión pn de dos terminales denominadas ánodo y cátodo, cuando el potencial del ánodo es positivo con respecto al cátodo se dice que el diodo está polarizado directamente, cuando el voltaje del cátodo es positivo respecto del ánodo se dice que el diodo está en polarización inversa y no conduce.

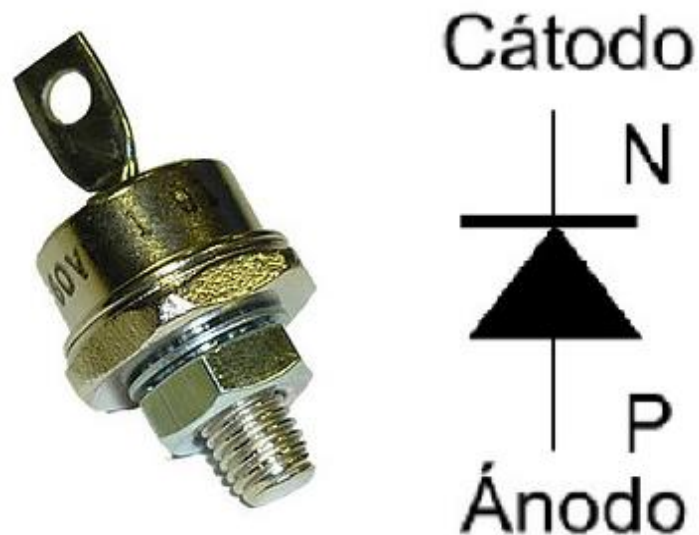
Por seguridad y confiabilidad fue seleccionado el diodo rectificador tipo tuerca referencia 50HF60Vn, está diseñado para soportar una tensión máxima de 600V y una corriente de 50A, el objetivo del diodo es permitir que circulen corrientes que están almacenadas en la armadura del motor cuando el mosfet vascula al estado de no conducción, en la figura 16 se puede apreciar la forma de la corriente en la armadura durante el ciclo de trabajo del transistor a lo largo de un periodo.

Figura 16. Corriente vs tensión de armadura



En la figura 17 se puede apreciar el diodo tipo tuerca 50HF60Vn.

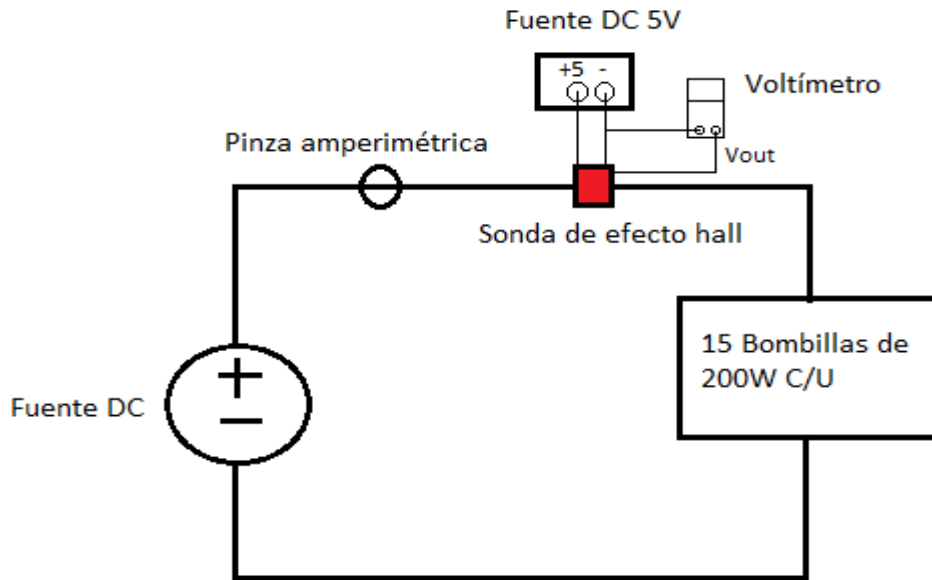
Figura 17. Diodo rectificador negativo de tuerca 50HF60VN



**4.4.3 Sonda de efecto hall para medición de corriente.** Con el fin de tener un valor de la magnitud de corriente durante el arranque, se decidió implementar el sensor de corriente de efecto Hall [8] **ACS-712-20A de Allegro microsystems**, la cual entrega un valor de tensión DC en sus terminales de salida dependiendo la magnitud y el sentido de la corriente que pasa por los terminales de entrada.

Se realizó una prueba para corroborar la información correspondiente a la sensibilidad de la sonda suministrada en el datasheet mediante la conexión de bombillas de 200W, en la figura 18 se presenta el montaje que se implementó en el laboratorio de máquinas eléctricas, donde la sonda se encuentra en serie con la armadura, alimentada a una tensión de 5 voltios por una fuente DC, y a la salida la medición de voltaje para hallar la relación tensión-corriente y compararla con la establecida por el fabricante.

Figura 18. Circuito implementado para la caracterización de la sonda de efecto HALL ACS-712



La prueba consistió en incrementar moderadamente el nivel de tensión de la fuente DC, para que a su vez también lo hiciera la corriente a través del circuito, en la tabla 10 se encuentran los resultados del ensayo, donde la tensión y la corriente son las medidas en los terminales de salida de la sonda y en la pinza amperimétrica respectivamente.

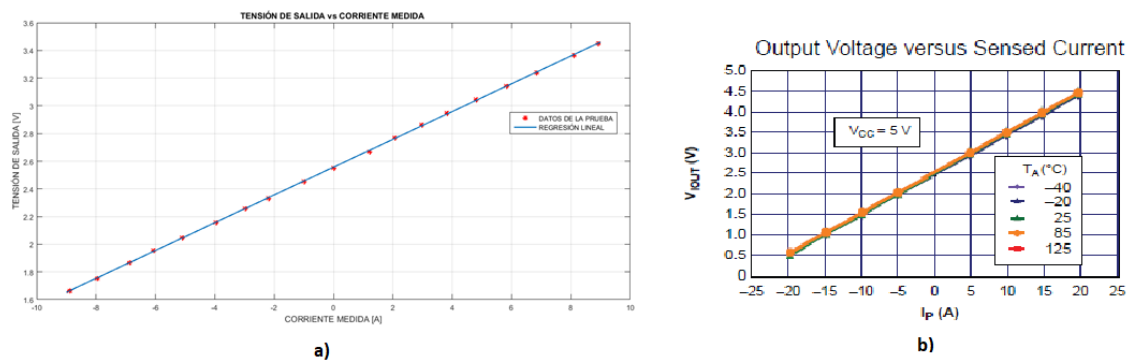
Tabla 11. Datos de la caracterización de la sonda de efecto HALL

<b>Corriente sentido positivo</b>		<b>Corriente sentido negativo</b>	
<b>Tensión de salida [V]</b>	Corriente medida [A]	Tensión de salida [V]	Corriente medida [A]
<b>2.553</b>	0	2.553	0
<b>2.668</b>	1.22	2.454	0.99
<b>2.771</b>	2.07	2.33	2.19
<b>2.864</b>	2.98	2.261	2.97
<b>2.95</b>	3.82	2.157	3.96

Corriente sentido positivo		Corriente sentido negativo	
3.04	4.81	2.047	5.09
3.145	5.83	1.953	6.06
3.24	6.86	1.867	6.88
3.366	8.11	1.754	7.97
3.45	8.94	1.663	8.9

Se realizó la gráfica de los datos obtenidos en la tabla y por medio de la regresión lineal se encontró la relación entre la tensión de salida y la corriente medida; en la figura 19 se observa la gráfica de los datos de la prueba, los cuales se comparan con la información proporcionada por el datasheet.

Figura 19. a) Gráfica de tensión de salida vs corriente medida para la sonda ACS-712-20A b) Gráfica extraída del datasheet



De la regresión lineal se obtuvo la expresión  $V_{out} = 0.1004 * I_{med} + 2.557$ , donde se obtiene una sensibilidad de 100.4mV/A y un punto inicial de 2.557 [V], según el datasheet la sensibilidad es de 100 [mV/A] con un punto inicial de 2.5 [V].

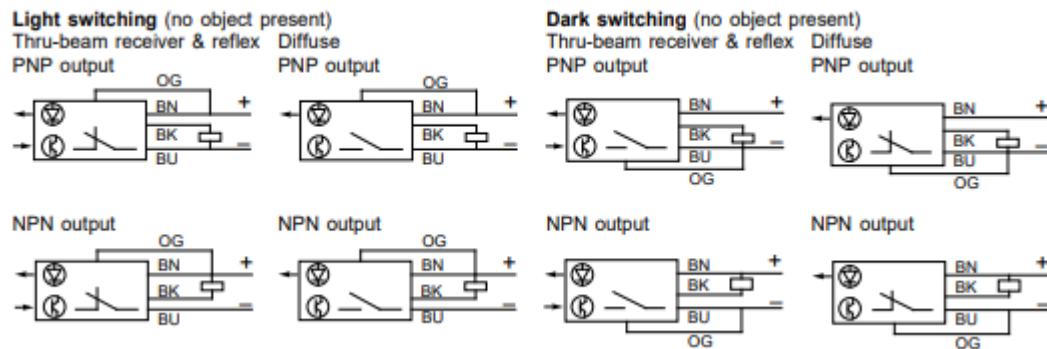
El error porcentual en la sensibilidad de la sonda se puede calcular como:

$$err\% = \left| \frac{Valor\ real - Valor\ medido}{Valor\ real} \right| * 100 = \left| \frac{100 - 100.4}{100} \right| * 100 = 0.4\%$$

Se obtiene un error del 0.4% en la sensibilidad de la sonda ACS-712-20A.

**4.4.4 Cálculo de velocidad empleando un fotodetector.** Con el fin de medir la velocidad del motor se implementó un fotodetector de la marca Schneider serie **XUB-H103535**, el cual opera enviando un haz de luz que, al ser interrumpido por medio de cinta reflectiva genera un pulso eléctrico con una magnitud del mismo valor de la tensión de alimentación, dependiendo la polaridad de transistor PNP o NPN tiene una conexión asignada [9], en la figura 20 se puede apreciar la conexión según la polaridad del fotodetector.

Figura 20. Conexión del fotodetector XUB-H103535 Schneider Electric tipo N.



Fuente: <http://www.naewoielec.co.kr/pdf/Photosensor13.pdf>

Donde:

BN: marrón (Brown).

BK: negro (Black).

BU: azul (Blue).

OG: naranja (Orange)

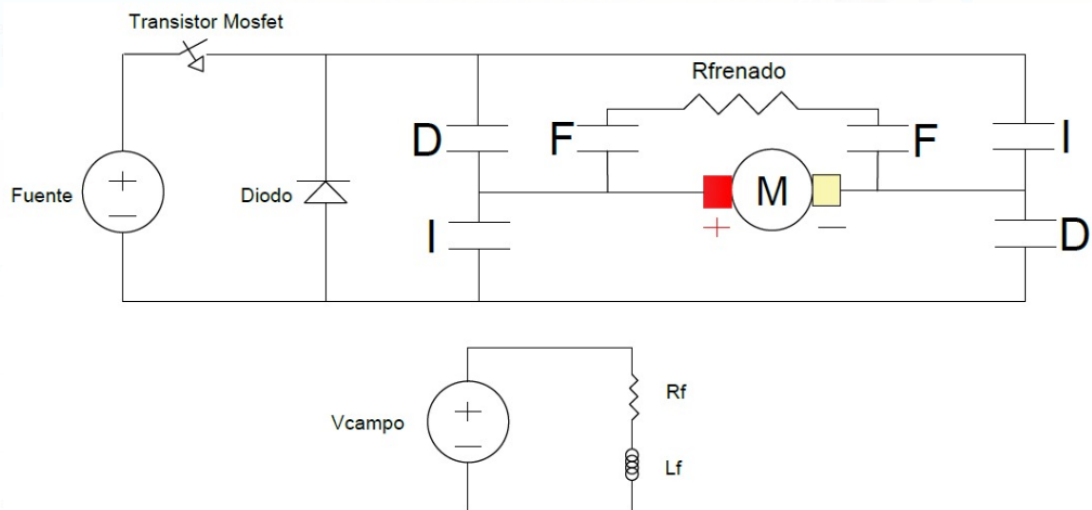
La opción light switching o dark switching simplemente definen si el fotodetector funciona enviando o no un haz de luz de color rojo.

Dependiendo del número de cintas reflectivas que se adhieran al rotor se tiene un valor más exacto en la medida de la velocidad ya que su función se asemejaría a la de un encoder; para nuestro caso el número de cintas usadas fueron 4, ubicadas cada  $90^\circ$ .

## 5. PROGRAMACIÓN, CONEXIONADO Y CONTROL DEL MOTOR DC EXCITACIÓN INDEPENDIENTE EMPLEANDO EL SOFTWARE TWIDOSUITE

El arrancador del motor de continua se hizo pensando en la operación en el ámbito industrial, proporcionando las opciones de girar en cualquiera de los dos sentidos, adicionalmente tiene un sistema de frenado dinámico. En el diseño de este conexionado se usaron tres contactores, el contactor número uno me permite la operación del motor en sentido directo (D), el segundo contactor hace que se invierta la polaridad de la armadura logrando que el motor gire en sentido inverso (I), y el tercer contactor habilita la parada dejando la armadura conectada en serie con una resistencia en la cual se disipará la energía almacenada en la inductancia. En la figura 21 se muestra el diagrama para la operación del motor:

Figura 21. Esquema de la conexión del motor por medio de contactores.



La programación en el software Twidosuite se divide en dos partes; en la primera parte se realizó el arranque del motor usando la función PWM, modificando el ancho de pulso de la salida a transistor que activa el Mosfet de potencia con el objetivo de reducir el pico de corriente a un valor deseado, en la segunda parte se empleó el bloque funcional PID, realimentado por velocidad con el fin de controlar la corriente

del arranque al empezar con un valor de referencia bajo e ir incrementándose hasta llegar a su valor nominal.

## 5.1 PROGRAMACIÓN IMPLEMENTANDO LA FUNCIÓN PWM

El software Twidosuite ofrece para la programación dos tipos de lenguaje [7], en la figura 22 se presenta el diagrama en el lenguaje de programación GRAFCET, con el fin de hacer una breve explicación del proceso. Cada cuadro enumerado ejecuta un proceso específico designado por la programación, las líneas horizontales que prosiguen los cuadros son las condiciones que se deben cumplir para realizar la orden siguiente asignada en el programa.

Figura 22. Diagrama GRAFCET del proceso

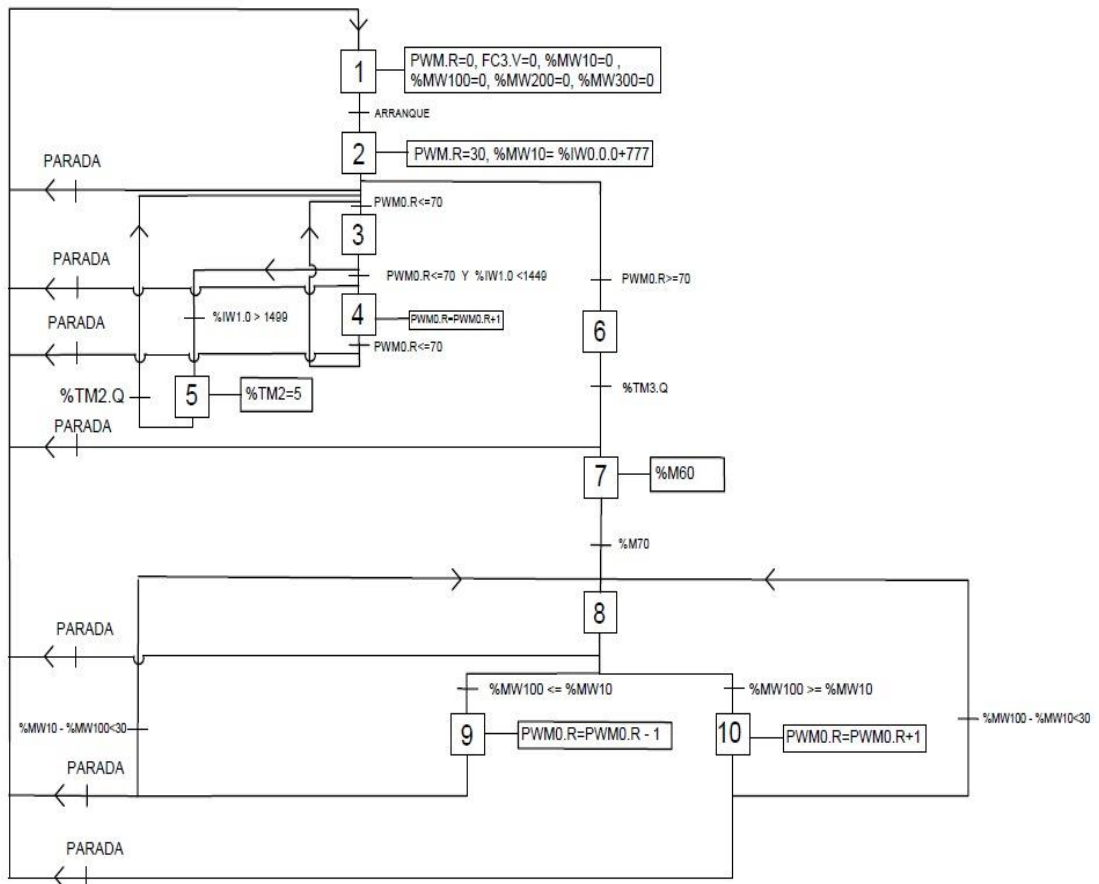


Tabla 12. Simbología usada en el programa.

<b>Designaciones</b>	
<b>%PWM0.R</b>	Porcentaje de la señal en estado 1 en un periodo
<b>%FC3</b>	Contador rápido
<b>%IW1.0</b>	Entrada bloque analógico (Corriente de armadura)
<b>%TMX</b>	Temporizador usado
<b>%IW0.0.0</b>	Entrada canal analógico incorporado
<b>%MWX</b>	Palabra de memoria
<b>%MW10</b>	Velocidad de la máquina
<b>%MW100</b>	Velocidad de referencia

Del paso uno al paso cuatro se programa el arranque del motor usando la función PWM, el cual se inicia con un ancho de pulso del 30% y se ejecuta un bucle hasta llegar a un valor del 70%; en el paso cinco se hace la restricción de corriente donde esta no puede ser superior a 10A ya que es el máximo valor permitido para el arranque.

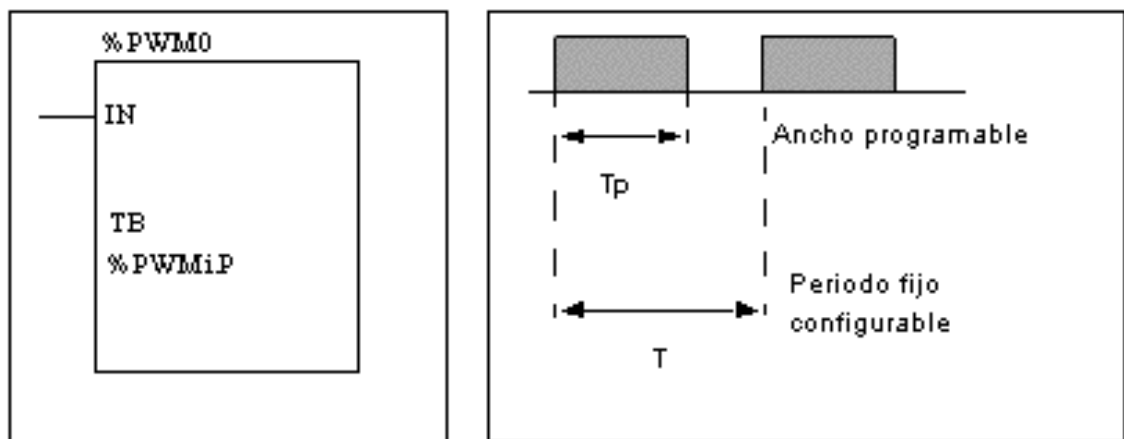
Cuando se culmina el arranque del motor, se procede a hacer el control de velocidad, mediante una entrada especial del PLC, en donde al cambiar la posición del potenciómetro externo ubicado en la parte frontal del PLC (canal analógico incorporado), se ajusta la referencia de velocidad a la que se desea llevar la máquina. El valor de referencia está comprendido entre 777 y 1800 rpm; para que la máquina logre establecer esta velocidad, se empieza a variar el ancho de pulso del PWM de forma ascendente o descendente hasta que se acerca a la velocidad de referencia, con un 4% de margen de error.

El otro lenguaje de programación es el LADDER o escalera, en donde la programación se realiza empleando contactos y bloques funcionales que facilitan el control de los procesos.

Los bloques funcionales más importantes que se usaron en la programación son:

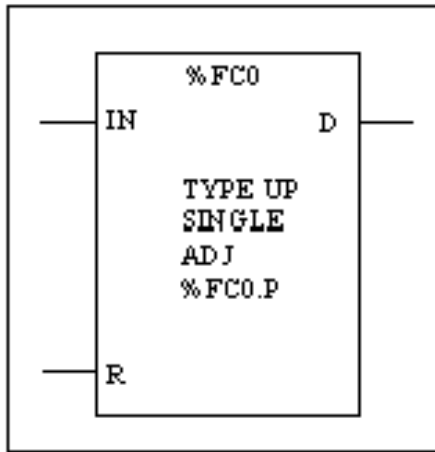
- PWM (%PWM0): La modulación por ancho de pulsos permite variar el ciclo de trabajo del transistor con el fin de no arrancar el motor a tensión plena, en lugar de esto iniciar con un porcentaje de la tensión e ir incrementándola hasta llegar a valores nominales si así se requiere.

Figura 23. Bloque de la función PWM TWUIDO SUITE



- Contador rápido (%FC3): Este bloque funcional se usa para contar los pulsos que genera el fotodetector al sensar el paso de la cinta reflectora que se encuentra en el rotor y mediante la conversión pertinente saber a cuantas rpm (revoluciones por minuto) está operando la máquina.

Figura 24. Bloque de la función contador rápido TWIDO SUITE



- Bloque de entrada/salida analógica: La entrada analógica convierte linealmente un valor de tensión comprendido entre 0 y 10 voltios a un número entre -32625 y 32625 (por defecto), o a unos valores comprendidos dentro de este rango.
- Incremento (INC) y decremento (DEC): Este par de funciones me permiten aumentar o disminuir un operando en una unidad, se utilizaron para variar el ancho de pulso.
- Canal analógico incorporado: El canal analógico incorporado cuenta con dos potenciómetros incorporados en la parte frontal del PLC, los cuales toman un valor de referencia entre 0 y 10 voltios y los convierte a valores constantes entre 0 y 1023.

El programa para el control del motor se realizó en tres secciones (LADDER):

- Arranque suave de la máquina.
- Medición de velocidad por medio de pulsos.

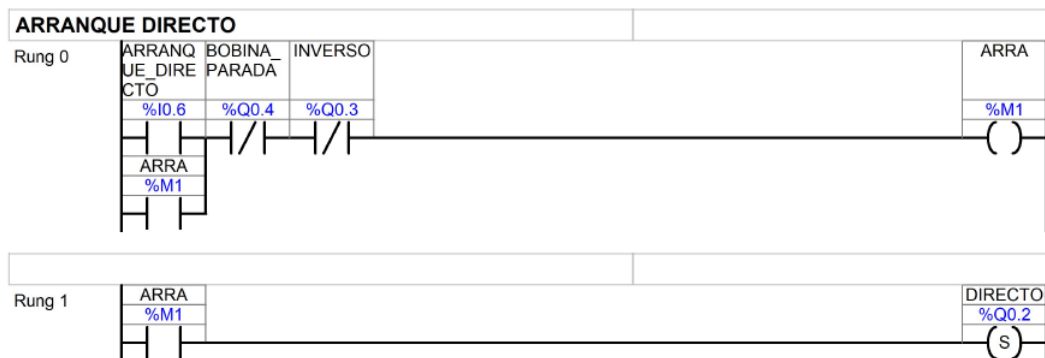
- Control y estabilización del motor.

De esta manera la actualización de los datos se lleva a cabo más rápido y se tiene una mayor eficacia en el momento de ser ejecutado.

**5.1.1 Arranque suave de la máquina.** La primera sección está compuesta por 16 RUNG o escalones, donde se configuró todo lo relacionado con el arranque en sentido directo, sentido inverso y el proceso de frenado, además, se definieron las condiciones para que al realizar el arranque, el pico de corriente sea bajo para protección del motor.

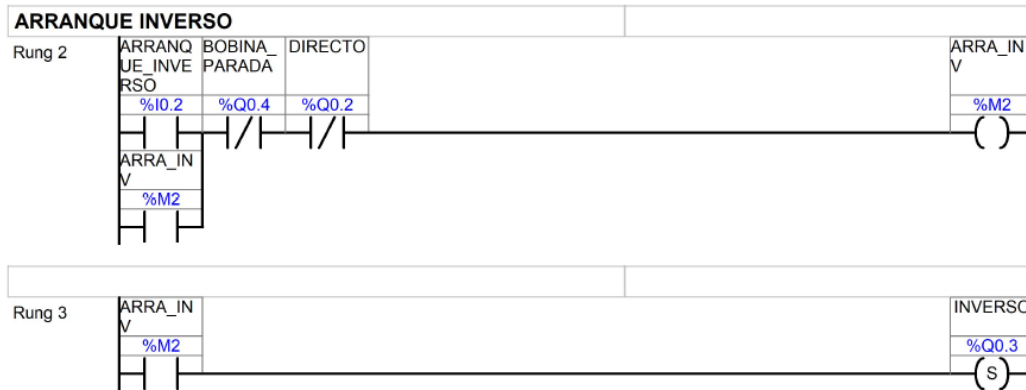
**5.1.1.1 Configuración de las salidas para el arranque y la parada.** Los dos primeros RUNG están destinados a llevar a cabo el arranque directo, como se puede observar en la figura 25

Figura 25. Configuración del arranque directo



La entrada %I0.6, envía un alto, el cual enclava el bit de memoria %M1 y “setea” la salida %Q0.2, a la cual está conectada la bobina del primer contactor (D) y el motor empieza a girar en sentido directo; en el sentido inverso se hace una programación similar como se muestra en la figura 26, la entrada %I0.2 envía un alto enclavando a %M2, “seteando” la salida %Q0.3 que controla la bobina del contactor (I) número 2, esta tiene la función de invertir la polaridad en la armadura.

Figura 26. Configuración del arranque en sentido inverso



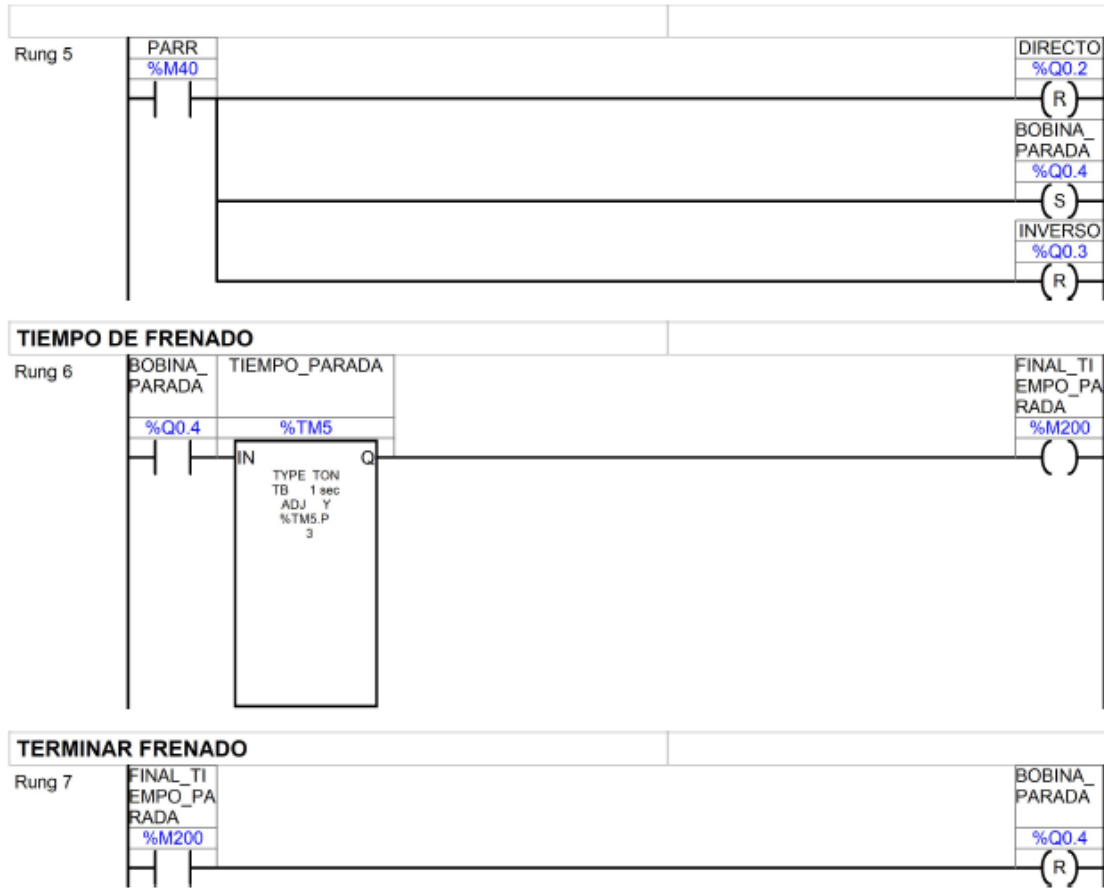
Para el caso del frenado dinámico, este se puede accionar siempre y cuando el motor ya esté en marcha, ya sea en sentido directo o en sentido inverso como se muestra en la figura 27

Figura 27. Habilitación de la parada por medio del bit de entrada



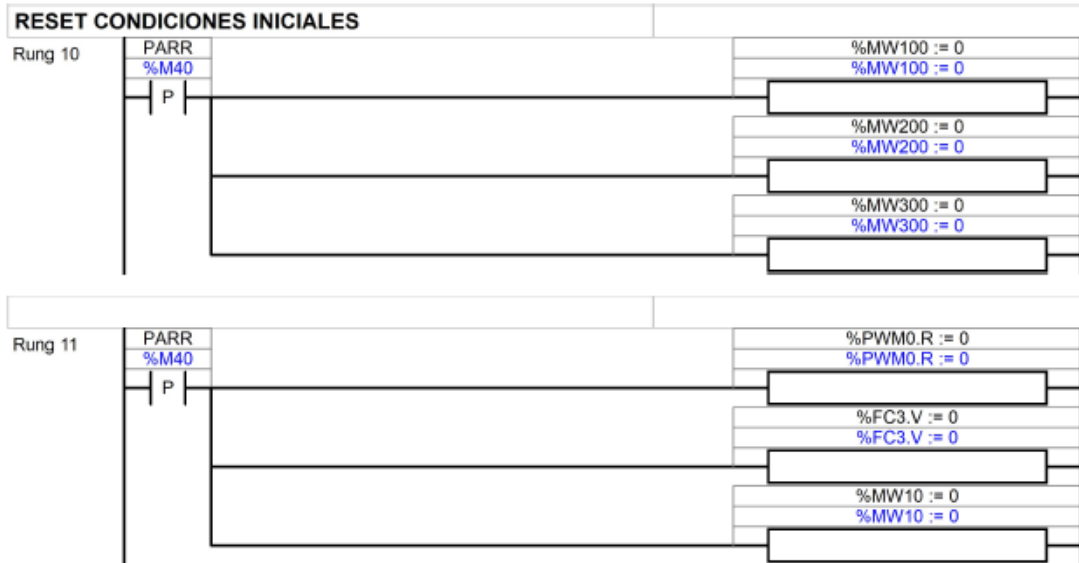
La entrada %I0.10 configurada para realizar la parada, activa el bit de memoria %M40 y este a su vez la salida %Q0.4 que está conectada a la bobina del tercer contactor (F) de acuerdo con la figura 28, luego desactiva las salidas de cualquiera de los dos arranques (directo o inverso) que esté en modo SET (directo o inverso),

Figura 28. Ejecución de la parada y determinación del tiempo para el frenado



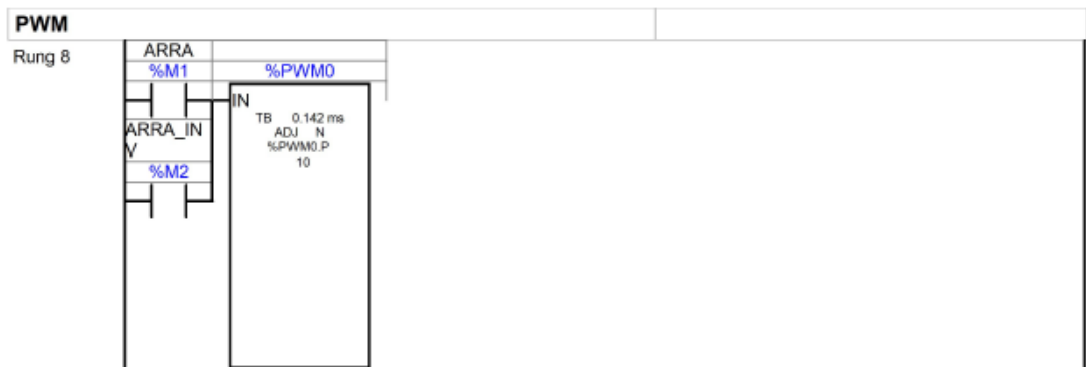
Después de que se acciona la parada, se inhabilita el arranque directo o inverso por un tiempo establecido para el frenado, que es lanzado por el temporizador 5 (%TM5) y tiene una duración de 3 segundos (tiempo de frenado en rueda libre), transcurrido este tiempo, podemos volver a enviar un alto mediante las entradas de arranque. En los RUNG 10 y 11 al detectar un flanco de subida el bit %M40 se reinician los valores iniciales y de esta manera se evitan inconvenientes al ejecutar un nuevo arranque de acuerdo como se presenta en la figura 29.

Figura 29. Reinicio de condiciones iniciales



**5.1.1.2 Programación del arranque limitando la corriente máxima en la armadura.** Con el bloque funcional PWM se hace la respectiva configuración, eligiendo la base de tiempo y el valor de preselección, con estos valores asignados se trabajará a una frecuencia de 704 HZ. Para que esta función este activa se debe tener un alto constante a la entrada, por esto los dos bits de memoria en paralelo como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Activación del bloque PWM



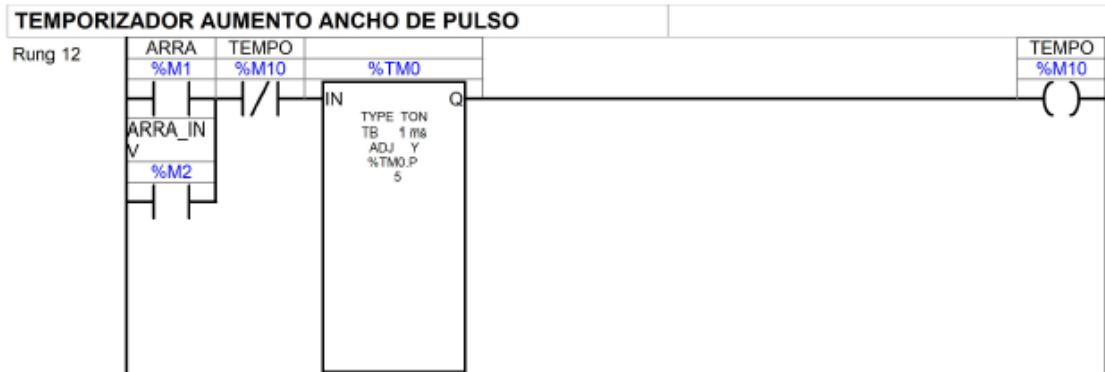
El ancho de pulso con el cual se va a iniciar el arranque del motor es del 30%, este se configura con un bloque de asignación como se evidencia en la figura 31; la designación %PWM0.R indica el porcentaje de la señal que encuentra en alto.

Figura 31. Porcentaje inicial del ciclo de trabajo



Después de tener el valor establecido del ancho de pulso en un 30% al iniciar el arranque del motor, en la figura 32 se muestra como el ciclo de trabajo del PWM va incrementando una unidad cada cinco milisegundos por medio del temporizador 0 (%TM0), hasta llega al 70% empleando la función INC.

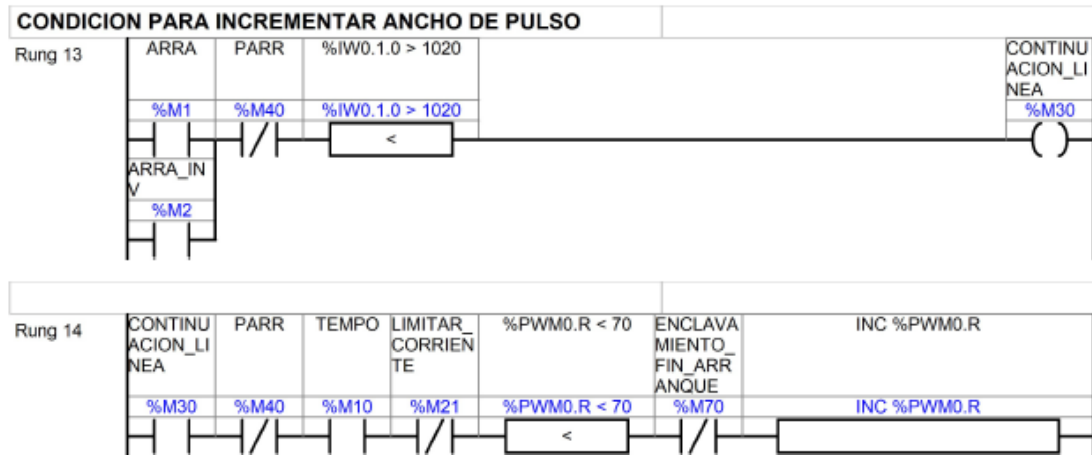
Figura 32. Incremento del ancho de pulso



La palabra %IW0.1.0 (entrada cero correspondiente al bloque analógico que se adicionó) es la encargada de adquirir el valor de la corriente que circula en la armadura de la máquina, en donde se configuró que un valor de 1020 está indicando

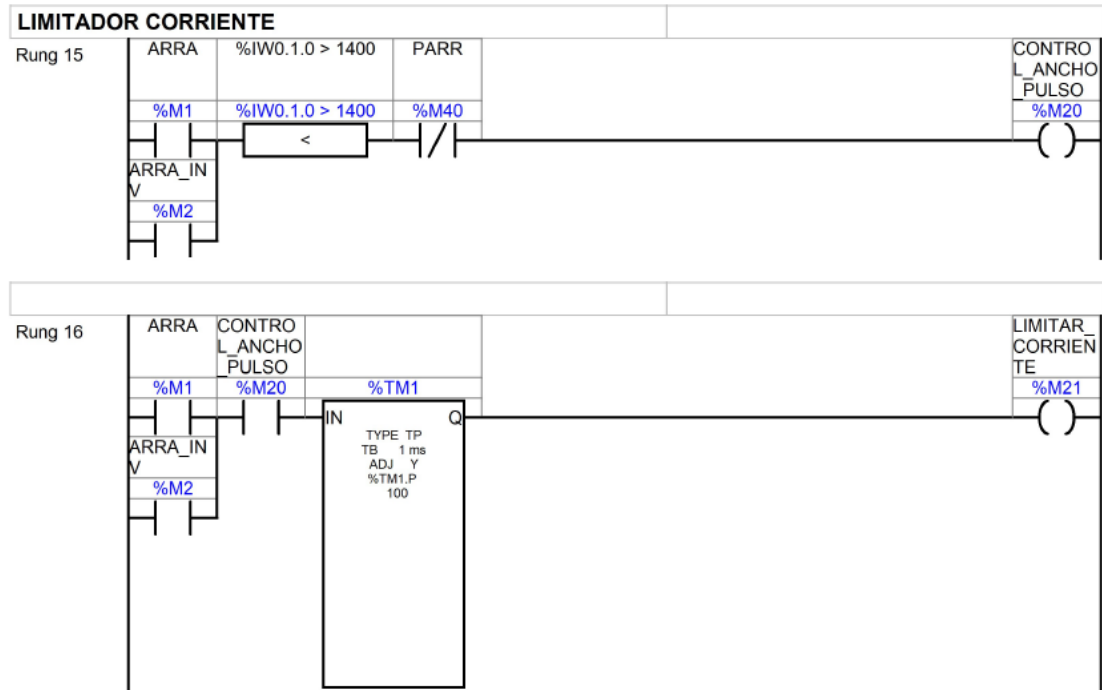
0A y el valor de 1857 equivale a 20A que es la máxima corriente soportada por la sonda, este proceso se puede evidenciar en la figura 33.

Figura 33. Condición para aumentar el porcentaje del PWM



Además, la palabra de entrada %IW0.1.0 se utiliza en el control del arranque, donde el valor máximo permitido va a ser 10 amperios en el arranque, lo que sería igual a un valor de 1400. En el instante que este valor de corriente sea superado, el ancho de pulso no seguirá incrementando por un tiempo establecido de 100 ms, transcurrido este tiempo seguirá el incremento hasta llegar al 70%, este proceso se encuentra en la figura 34.

Figura 34. Límite de la corriente durante el arranque



**5.1.1.3 Obtención de la velocidad por medio de pulsos empleando fotodetector.** En la sección 2 se encuentra el programa que determina la velocidad del motor; el contador rápido %FC3 es activado mediante los bits de memoria %M1 o %M2 ya que uno de estos siempre va estar en alto desde que se presiona arranque en cualquiera de los dos sentidos (directo o inverso).

La entrada %I0.5 es la encargada de ingresar los datos al contador rápido, cuando la cinta reflectiva pasa por el haz de luz que emite el fotodetector la cuenta aumenta en uno, esta cuenta se actualiza cada medio segundo, que es tiempo estipulado en el temporizador 2 (%TM2).

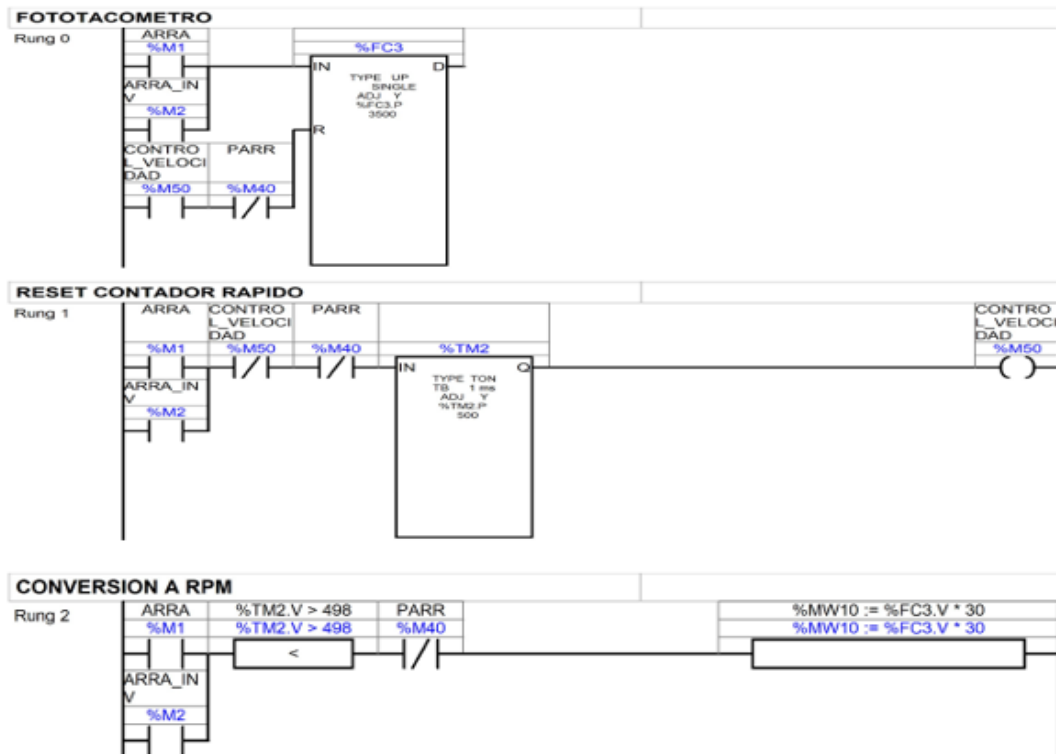
El valor registrado en el contador rápido corresponde a el dato de la velocidad a la que está girando el motor, este valor está dado en “vueltas por segundo”, como el tiempo de muestreo es medio segundo y el número de cintas reflectivas en el rotor es de 4, debemos multiplicar el número de pulsos por un factor de 30, y así se

obtiene la velocidad en RPM quedando guardada en la palabra de memoria %MW10.

$$\frac{\text{Vuelta}}{\text{Segundo}} * \frac{60 \text{ Segundos}}{1 \text{ Minuto}} * \frac{1}{4} * \frac{1}{0,5} = 30$$

En la figura 35 se puede observar el programa para la medición de la velocidad.

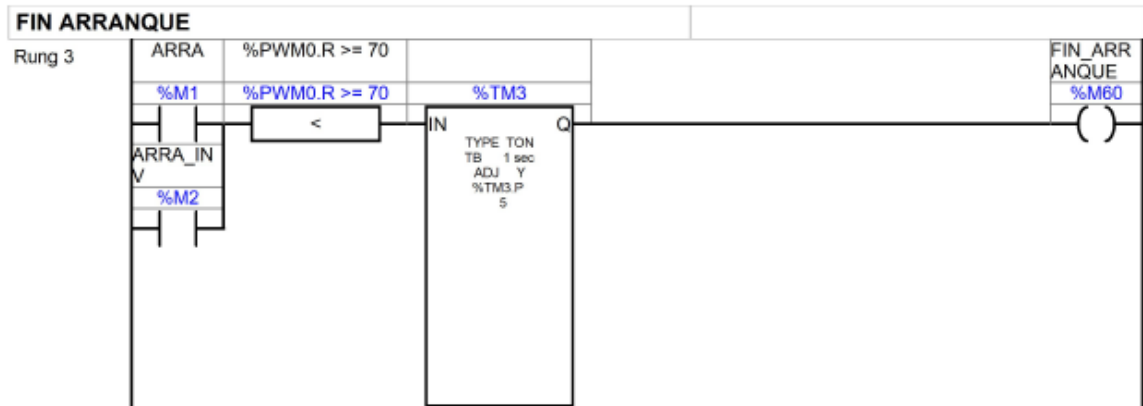
Figura 35. Programa implementado en la medición de la velocidad.



Una vez se termina el arranque el ancho de pulso se encuentra en un 70%, a continuación, se designa un tiempo de 5 segundos denominado tiempo de estabilización de acuerdo con la figura 36, transcurridos los 5 segundos el programa lleva el motor a una velocidad seleccionada. Cuando se activa el bit de memoria

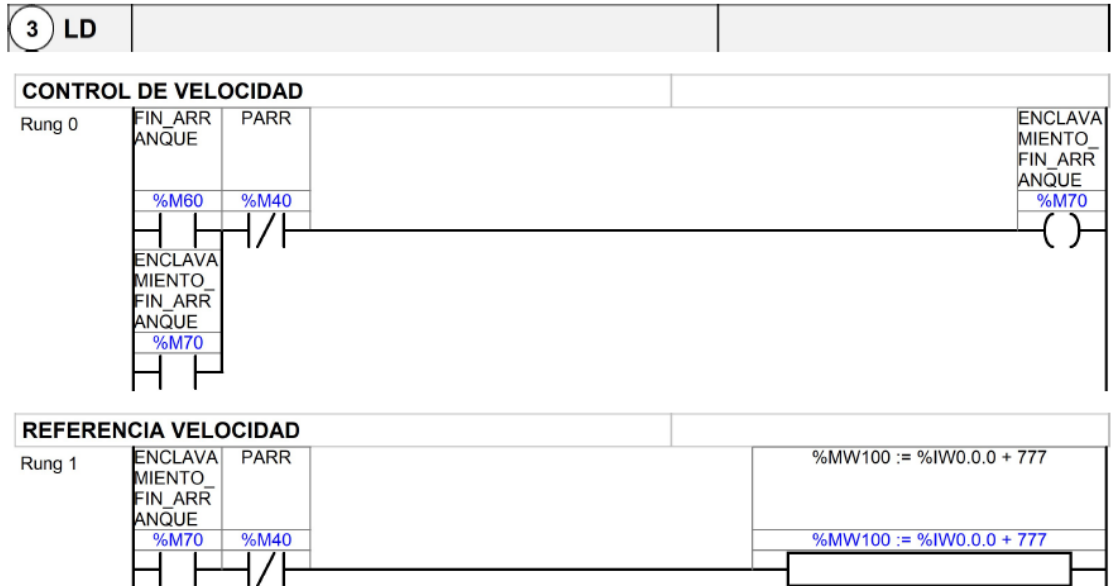
%M60, da paso a la última sección del programa en donde se hace el control de velocidad.

Figura 36. Finalización del arranque suave



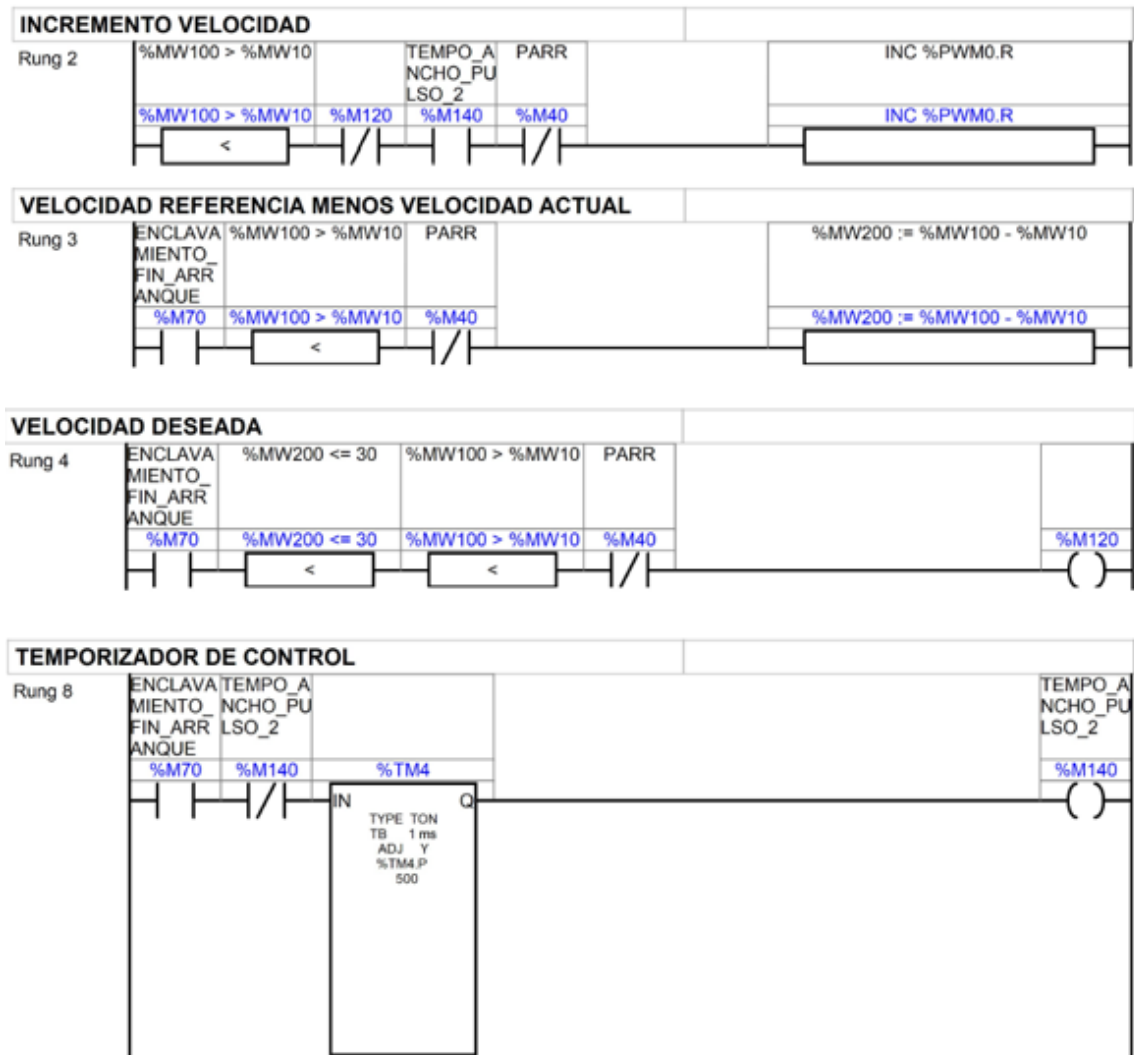
**5.1.1.4 Control y estabilización del motor.** Mediante el canal analógico incorporado se asigna la velocidad de referencia de la máquina, este canal en su posición inicial (potenciómetro 1) proporciona un valor igual a cero, pero a medida que se gira hacia la derecha empieza a aumentar de una forma lineal hasta llegar a 1023, es por esto que adiciona un valor de 777, esto genera una restricción, ya que el motor podrá estabilizarse a velocidades comprendidas entre 777 y 1800 rpm; el valor seleccionado de referencia quedará guardado en una palabra de memoria %MW100 como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Control de velocidad



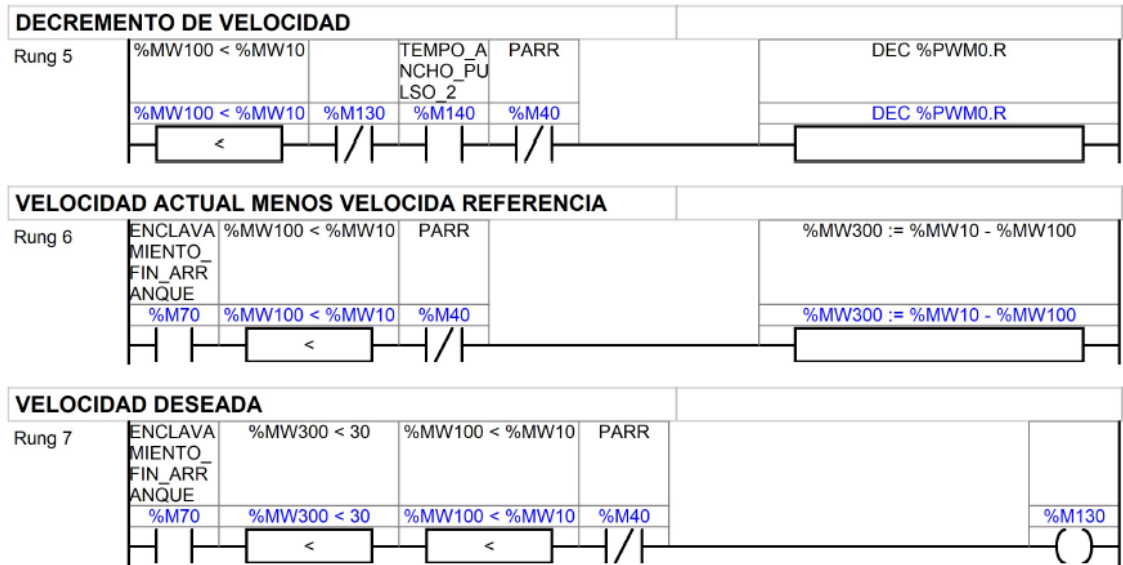
Cuando el valor de referencia es mayor al seleccionado al finalizar el arranque, el ancho de pulso debe incrementar, este incremento se hace cada medio segundo hasta que el motor gire a la velocidad deseada, una vez se obtenga el valor aproximado de velocidad se activa el bit de memoria %M120 el cual impide que siga aumentando el ancho de pulso, este procedimiento se resume en la figura 38.

Figura 38. Incremento de velocidad del motor



En la figura 39, se muestra el desarrollo cuando la velocidad de referencia es menor a la velocidad con la que finaliza el arranque, la programación es prácticamente igual, la única diferencia es que ahora el ancho de pulso se empieza a disminuir.

Figura 39. Decremento de la velocidad del motor



## 5.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA FUNCIÓN PID

Con el fin de implementar la función PID se calculó la función de transferencia por medio de los parámetros hallados para el motor DC de excitación independiente y se hizo la sintonización del controlador por medio del método de Ziegler-Nichols para obtener los valores necesarios de KP, KI y KD.

Después se procedió a realizar la programación del arranque mediante la función PID realimentando por velocidad.

### 5.2.1 Función de transferencia y sintonización del PID

**5.2.1.1 Modelado de la planta.** Para la obtención del modelo de la planta se debe tener en cuenta la relación que existe entre la parte mecánica y la parte eléctrica del motor. Analizando el motor en reposo (corriente inicial cero) y trabajando con el

modelo eléctrico del motor de la figura 2.1 se obtiene la siguiente expresión en el dominio de la frecuencia <sup>5</sup>

$$V_a(s) = I_a(s) * (R_a + L_a * s) + E(s) \quad (20)$$

Dónde:

$$E(s) = K * I_f * \Omega_m(s) \quad (21)$$

Teniendo en cuenta que la corriente de excitación  $I_f$  es constante y  $K$  es la constante característica de la máquina la ecuación se puede expresar así:

$$E(s) = K_m * \Omega(s) \quad (22)$$

Despejando la corriente de armadura en la ecuación (20) se obtiene:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_m * \Omega_m(s)}{R_a + L_a * s} \quad (23)$$

Aplicando la transformada de Laplace [10] en la ecuación (4) que relaciona las variables mecánicas y eléctricas para la condición inicial de velocidad cero y que el motor se encuentra en vacío (considerando solo la fricción) se tiene:

$$T_{em} - T_p = J_m * s * \Omega_m(s) \quad (24)$$

El torque electromagnético expresado en el dominio de la frecuencia está dado por:

$$T_{em} = K_m * I_a(s) \quad (25)$$

---

<sup>5</sup> RAÚL OMAR VILA CASADO, Circuitos eléctricos básicos para el estudiante. Universidad Industrial de Santander. 2008.

El torque de debido a las pérdidas se expresa como:

$$T_p = \beta * \Omega_m(s) \quad (26)$$

De la ecuación (16) el valor de la constante de fricción se puede calcular como:

$$\beta = \frac{K_m * I_{a0}}{\Omega_0} = \frac{0.9945 * 0.302}{1800 * \frac{\pi}{30}} = 0.00159 \left[ \frac{\text{Kg} - \text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Reemplazando las expresiones (23), (25) y (26) en la ecuación (24) se obtiene:

$$K_m * \frac{V_a(s) - K_m * \Omega_m(s)}{R_a + L_a * s} - \beta * \Omega_m(s) = J_m * s * \Omega_m(s) \quad (27)$$

Realizando operaciones algebraicas (simplificando y reordenando) se llega a la función de transferencia del motor la cual se expresa así:

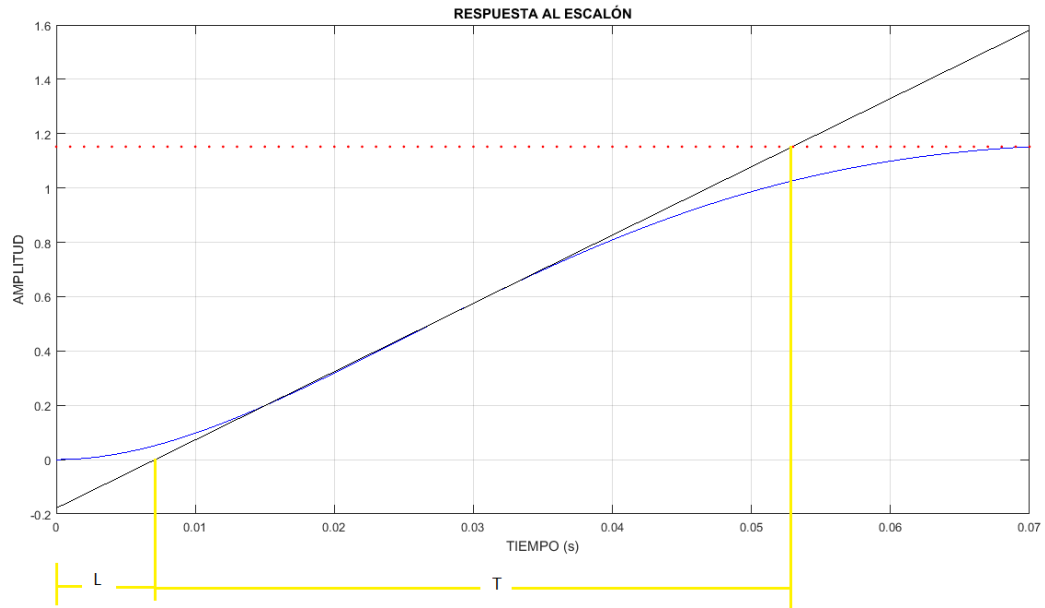
$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a * s) * (J_m * s + \beta) + K_m^2} \quad (28)$$

Por lo tanto, el modelo final para la planta del motor al reemplazar los parámetros obtenidos anteriormente seria:

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{0.9945}{(3.489 + 0.0697339 * s) * (0.00612 * s + 0.00159) + 0.9890}$$

**5.2.1.2 Obtención de los parámetros para el controlador PID.** La obtención de los parámetros del controlador PID se realizaron mediante el primer método de Ziegler-Nichols [10], los resultados se presentan a continuación:

Figura 40. Respuesta al escalón de la planta



La curva en color azul representa el comportamiento de la planta a la entrada escalón unitario y la línea en color negro es la pendiente en el punto de inflexión de la curva. Para calcular las constantes del primer método de Ziegler-Nichols, se debe tener en cuenta el tiempo que la pendiente aumenta de un valor negativo hasta llegar a cero ( $L$ ) y la duración de la pendiente en alcanzar el punto de estabilización por parte de la planta a la respuesta al escalón ( $T$ ).

Donde:

$$T = 0.0455 \text{ [s]}$$

$$L = 0.0075 \text{ [s]}$$

Figura 41. Regla de sintonía Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método)

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: OGATA KATSUHIKO, Ingeniería de control moderna, quinta edición, Prentice Hall, 2010

Al reemplazar los valores anteriores para el PID tenemos:

$$K_p = 1.2 * \frac{0.0455}{0.0075} = 7.28$$

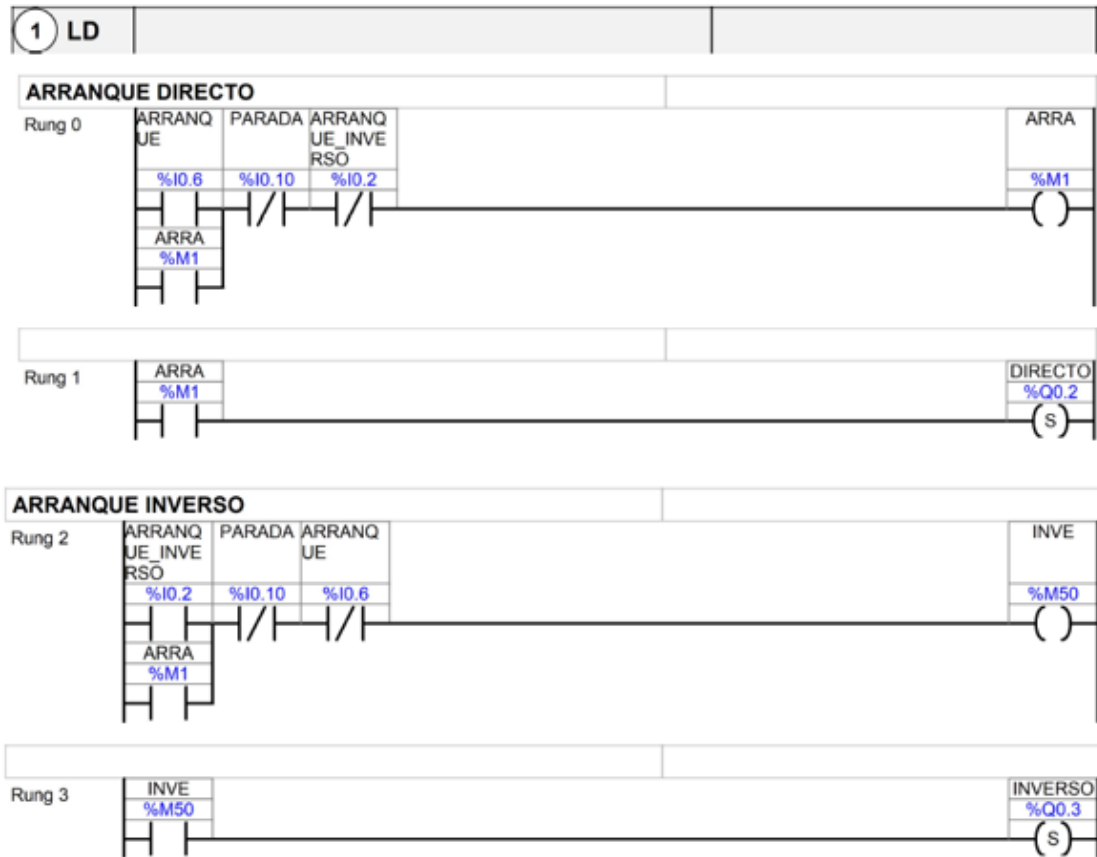
$$T_i = 2 * 0.0075 = 0.015$$

$$T_d = 0.5 * 0.0075 = 0.00375$$

**5.2.2 Programación del arranque utilizando la función PID.** El arranque del motor se hace mediante la entrada %I0.6, la cual enclava el bit de memoria %M1 y a su vez acciona la salida %Q0.2, este proceso se hace con el fin de cerrar los contactos del primer contactor (D) y que el motor gire en sentido directo. El sentido inverso se hace mediante la entrada %I0.2, en este caso el bit de memoria que enclava es el %M50 accionando la bobina del contactor (I) número 2, mediante la salida %Q0.3.

En la figura 42 se presenta el programa para realizar el arranque en ambos sentidos.

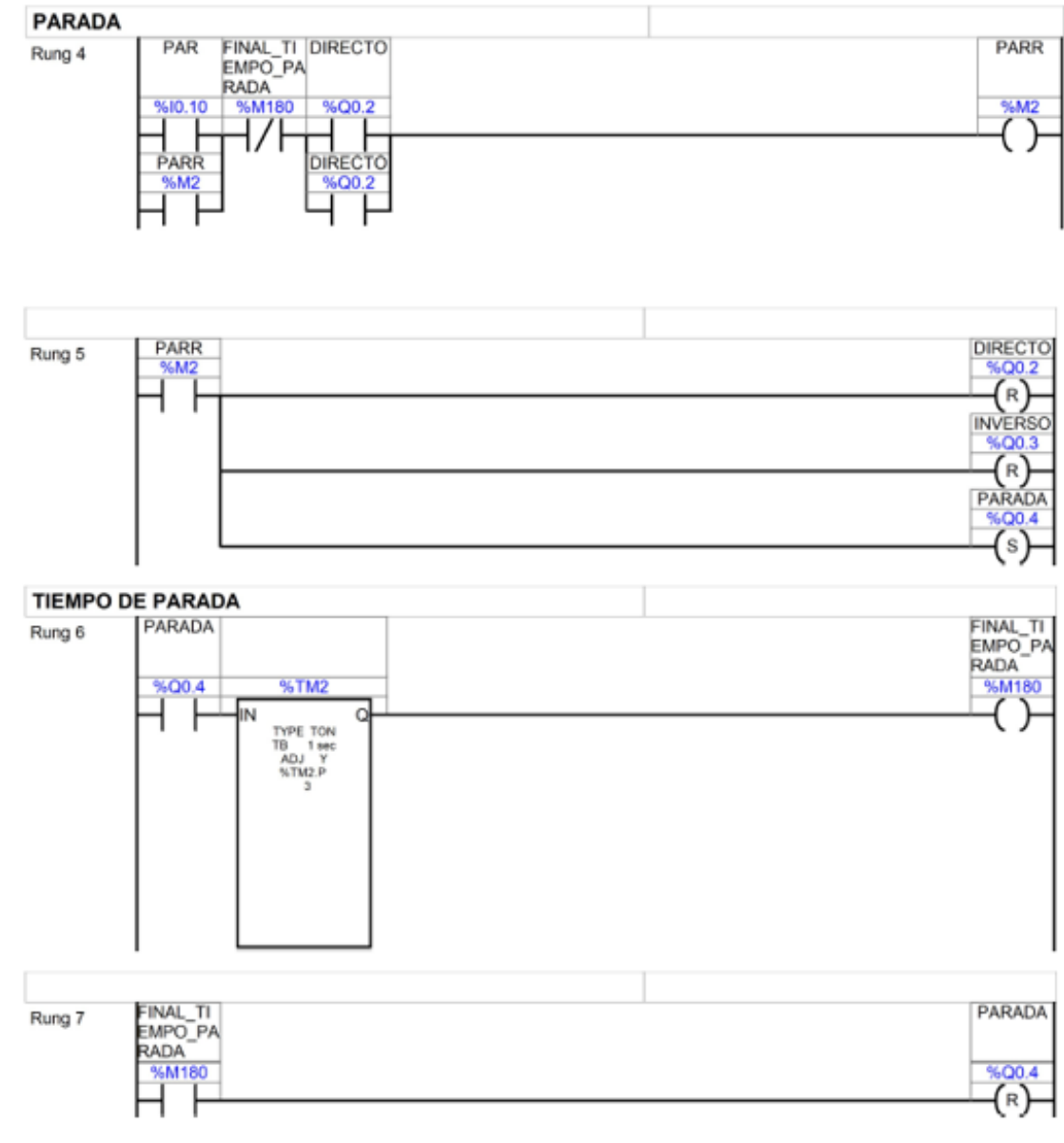
Figura 42. Configuración del sentido directo en modo PID



La opción parada solo puede ser accionada siempre y cuando el motor este en movimiento; se realiza activando la entrada %I0.10, enclavando el bit de memoria %M2 y energizando la bobina del tercer contactor (F) mediante la activación de la salida %Q0.4; el tiempo de parada es de 3 segundos, el cual es lanzado por el temporizador %TM2, transcurrido este tiempo la máquina se puede volver a poner en marcha.

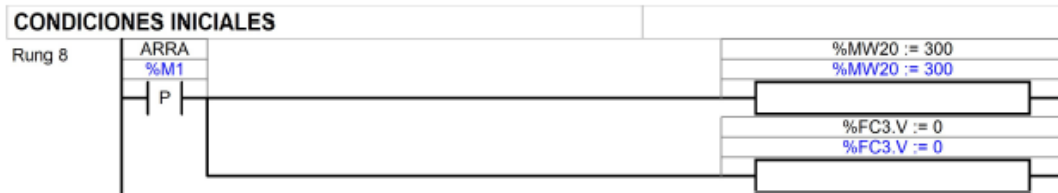
La programación de la parada en el motor se encuentra en la figura 43.

Figura 43. Programación de la parada.



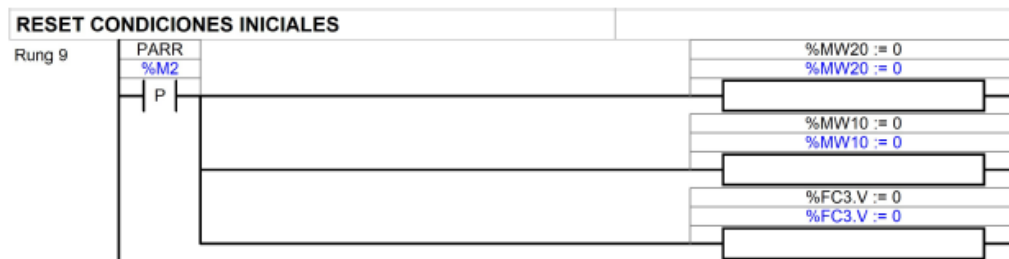
Al presionar arranque, en el RUNG 8 se establecen las condiciones iniciales como se observa en la figura 44, para este caso el valor de consigna va a ser de 300 rpm, este está guardado en la palabra de memoria `%M20`, el contador rápido (`%FC3.V`) se configura con un valor de cero para asegurar que el contador de pulsos no contenga información guardada.

Figura 44. Condiciones iniciales



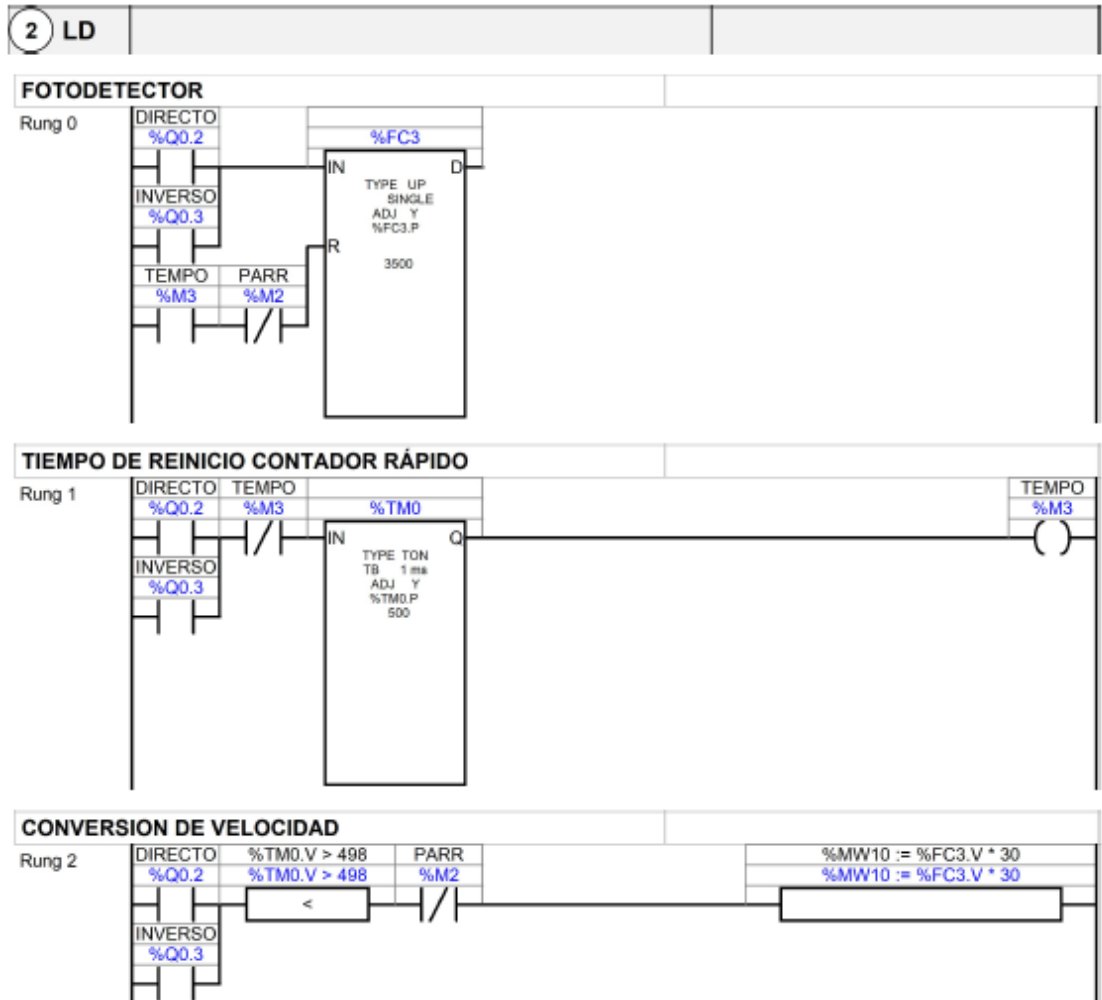
Por medio de la orden de parada, se reinicia a valores iniciales, esto para darle confiabilidad al programa y mitigar los inconvenientes al momento de volverse a ejecutar. Otro parámetro adicional que se reinicia es la palabra de memoria %MW10 que inicia la conversión de vueltas por segundo a rpm del motor, en la figura 45 se puede observar el proceso de reiniciar las condiciones iniciales.

Figura 45. Reinicio de las condiciones iniciales



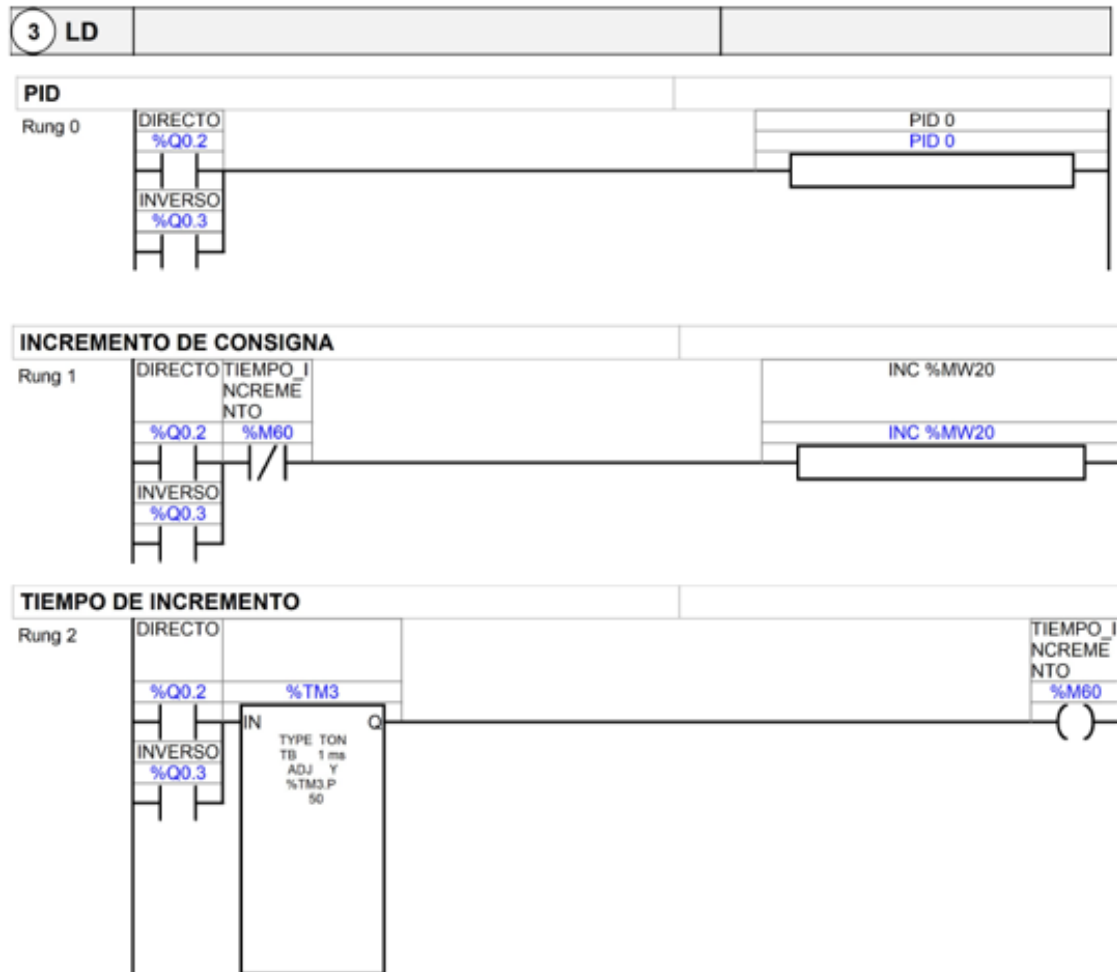
De igual forma que en la programación utilizando la función PWM, con el fin de determinar la velocidad a la que está girando el motor, se implementa el contador rápido que lleva la cuenta de los pulsos sensados por el fotodetector XUB-H103535. Este conteo se hace cada medio segundo, por lo cual hay que hacer una conversión de vueltas por segundo a rpm, este dato quedará guardado en la palabra de memoria %MW10 como se presenta en la figura 46.

Figura 46. Medición de velocidad



El bloque PID se activa mediante una entrada o un bit de memoria, las entradas en paralelo tienen la función de iniciar el control sin importar el sentido de giro con el que se desee arrancar el motor; el valor inicial de la consigna está registrado en 300 rpm y este se irá aumentando cada 50 milisegundos por medio del temporizador número 3 (%TM3), esta programación se describe en la figura 47.

Figura 47. Activación de la función PID



El bloque funcional PID usa la salida a transistor %Q0.0 para hacer el control por tensión en la armadura variando el ancho de pulso.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas se realizaron implementando el programa el fin de realizar el control de la corriente en la armadura durante el arranque, se hicieron pruebas al motor en las operaciones de vacío y carga, además, estas pruebas se realizaron a valores nominales en la armadura y en el campo mediante las fuentes de corriente continua con las que cuenta el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad industrial de Santander.

La fuente DC que proviene del rectificador alimentado por un auto transformador trifásico, fue utilizada para energizar el Mosfet de potencia con el cual se ejecutó el troceo de la tensión que energiza el circuito de armadura, la magnitud de la tensión se ajustó a un valor de 200V; la segunda fuente DC energizó el devanado de campo con un valor de 220V. Con el propósito de medir las tensiones se utilizó un multímetro Fluke referencia 117.

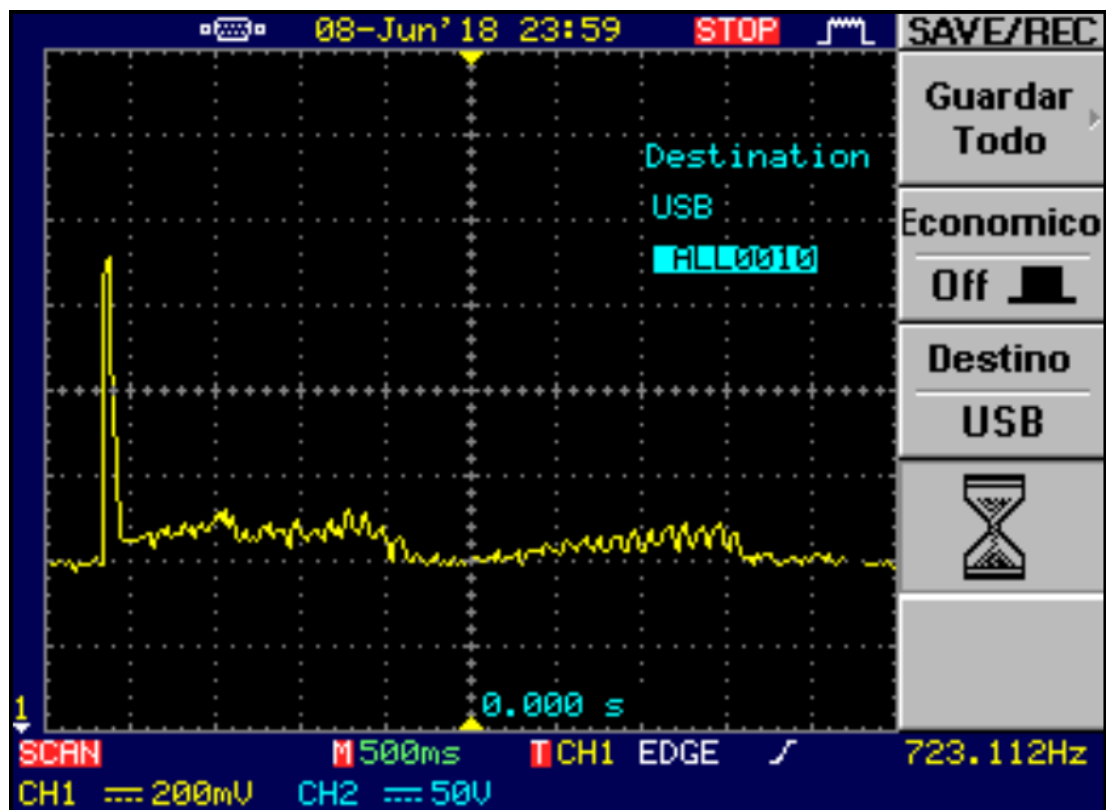
En la implementación de la función PID las pruebas se realizaron a tensión reducida en la armadura y manteniendo los 220V en el devanado de campo debido a la baja frecuencia de conmutación del PWM al ejecutar el control por medio del PID.

Para las gráficas de corriente se debe tener en cuenta que la tensión de salida en la sonda de efecto hall cuando no se ha energizado el circuito de armadura es de 2.557V (ver figura 19) y corresponde a un valor de 0A. Por esta razón se debe desplazar la referencia en el osciloscopio con el fin de captar la señal en el momento del arranque.

## 6.1 RESULTADOS DEL ARRANQUE PARA EL MOTOR SIN CARGA

En la figura 48 se encuentra la forma de onda para la corriente medida con la sonda de efecto hall y registrada con el osciloscopio durante en el arranque del motor en vacío.

Figura 48. Corriente medida con la sonda de efecto hall del motor en vacío, energizado por tensión troceada

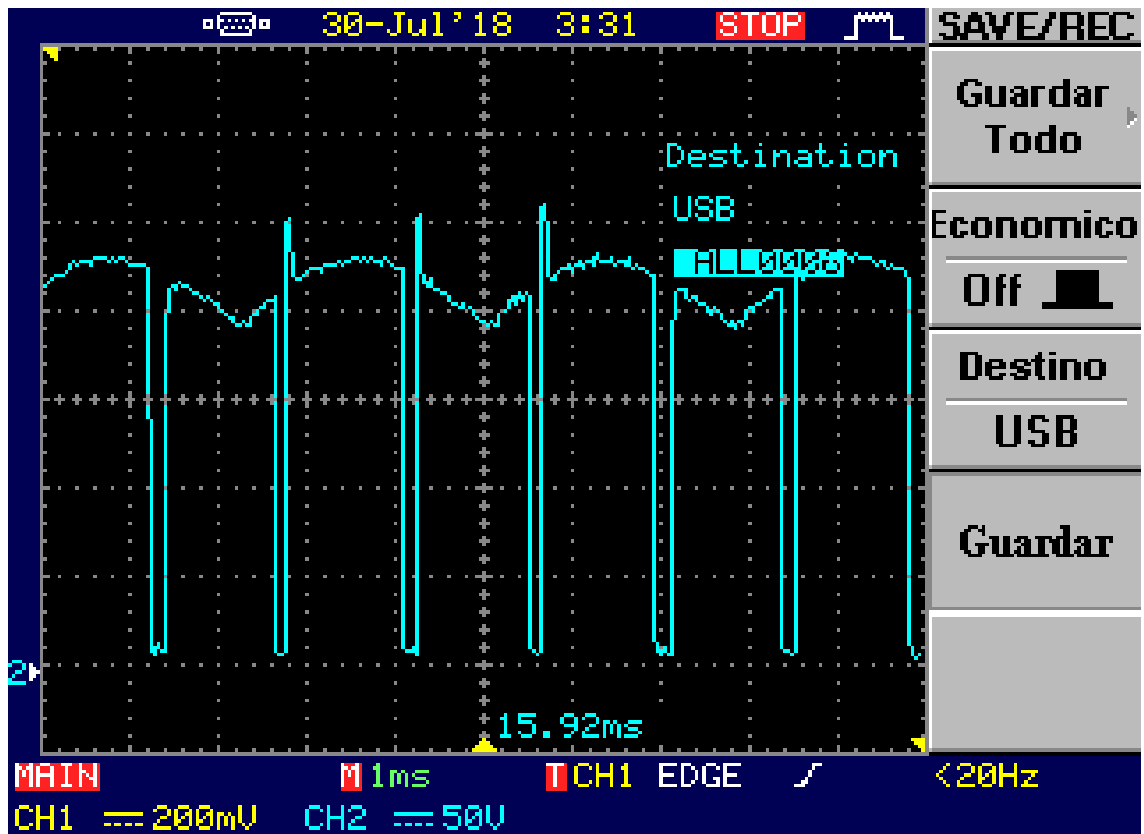


De acuerdo con la tensión de salida en la sonda de efecto hall tenemos un valor estimado de 3.27V al sumar el valor inicial más la magnitud que entrega el osciloscopio ( $2.557+0.713$ ) y por medio de la relación tensión-corriente hallada en la caracterización de la sonda (ver figura 19) equivaldría a 7.1A.

$$I = \frac{3.27 - 2.557}{0.1004} = 7.102 \text{ [A]}$$

Al medir la tensión final de armadura se obtuvo una magnitud de 183.4V con un ancho de pulso del 86%, en la figura 49 se presenta el comportamiento de la tensión.

Figura 49. Tensión de armadura con operación en vacío



Al analizar la gráfica se observa que la tensión de alimentación no es continua pura y se presentan pequeñas variaciones (picos), las cuales pueden presentarse por la conmutación del transistor o debido a la forma de onda de la fuente con la cual se está energizando el Mosfet de potencia como presenta en la figura 50.

Figura 50. Tensión de salida de la fuente DC a la entrada del troceador.



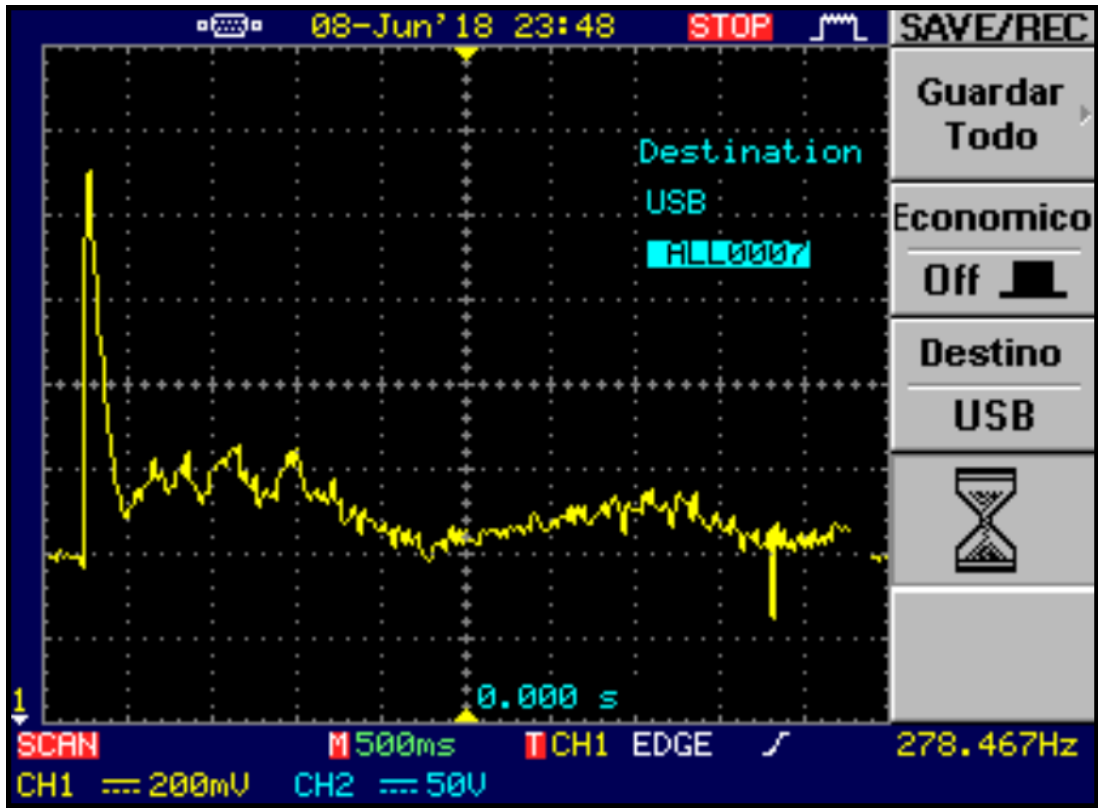
## 6.2 RESULTADOS DEL ARRANQUE PARA EL MOTOR CON CARGA

Las siguientes pruebas se ejecutaron acoplando un generador DC de excitación independiente de las mismas características del motor, con el fin de incrementar la carga y poder analizar la corriente durante el arranque:

- Arranque con el generador sin carga.
- Arranque variando la carga del generador.

**6.2.1 Arranque del motor acoplado al generador sin carga.** En este caso se acoplo el generador y se energizo el devanado de campo con una tensión de 200V (valor nominal del generador) con el fin que el motor viera una mayor carga. En la figura 51 se puede ver el pico de corriente en la armadura de motor.

Figura 51. Corriente del motor acoplado el generador sin carga

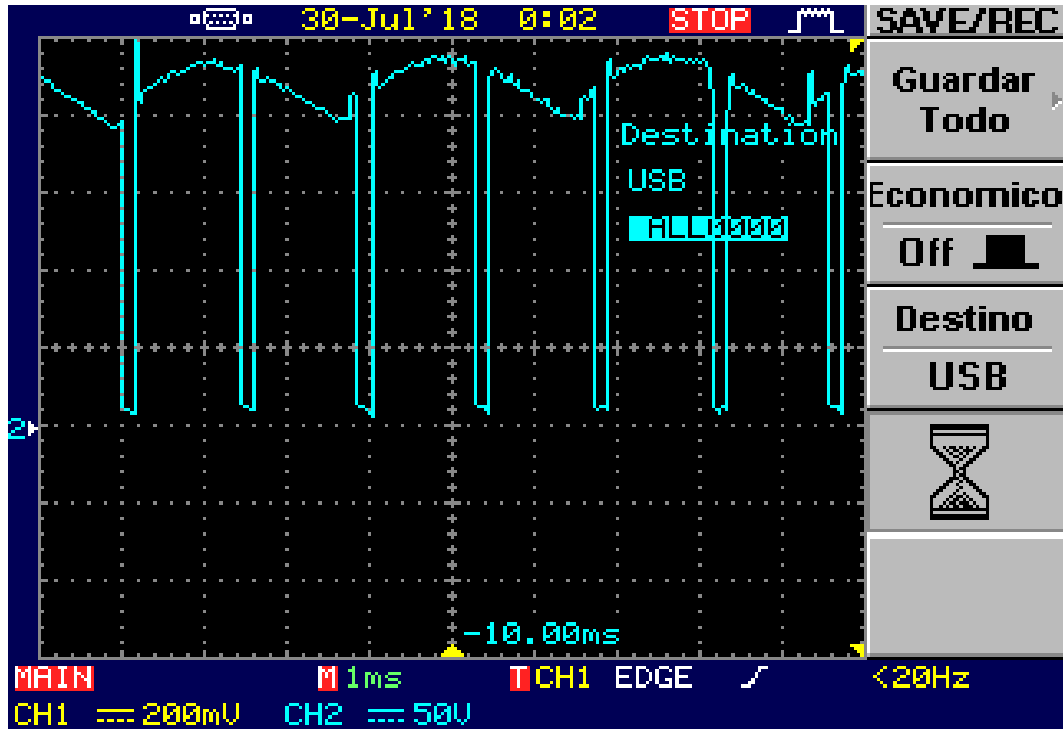


De acuerdo con la tensión de salida en la sonda de efecto hall tenemos un valor estimado de 3.47V, por tanto, en corriente es equivalente a 9.1A.

$$I = \frac{3.47 - 2.557}{0.1004} = 9.094 \text{ [A]}$$

Al medir la tensión final de armadura se obtuvo una magnitud de 187.7V con un ancho de pulso del 90%, en la Figura 52 se encuentra el comportamiento de la tensión.

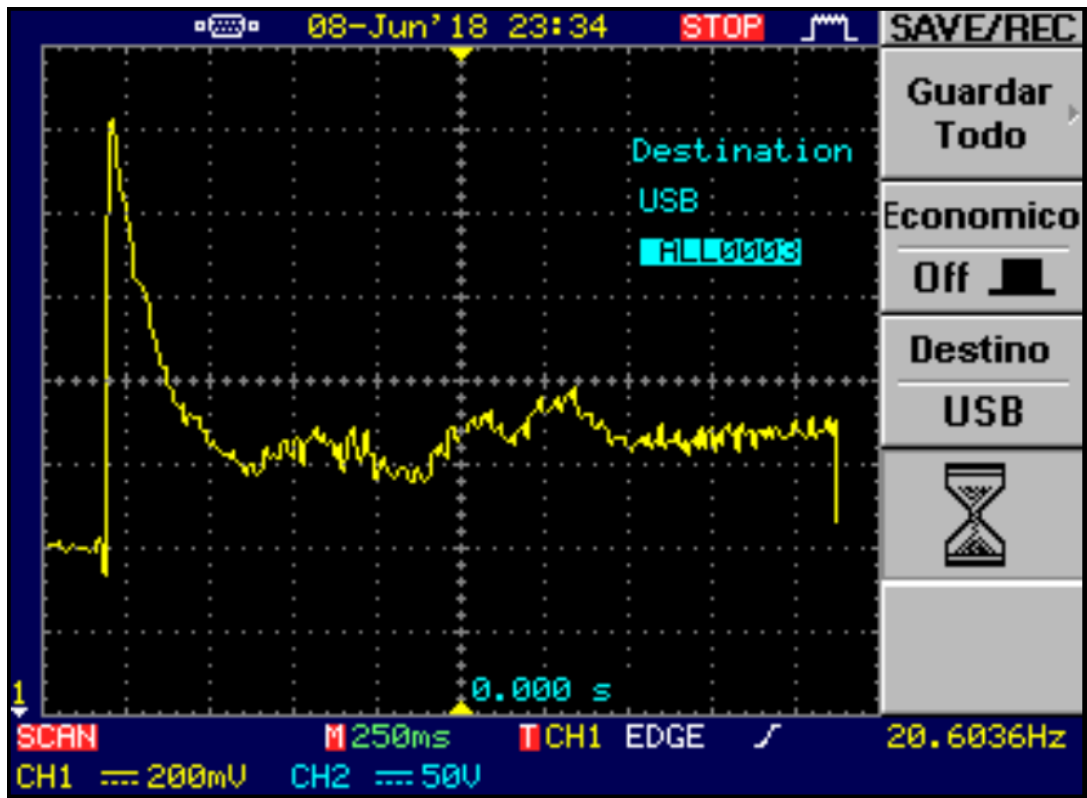
Figura 52. Tensión de armadura con generador en vacío como carga



**6.2.2 Arranque del motor acoplado al generador variando la carga.** El arranque del motor se hizo con el generador acoplado y adicionalmente este con un número específico de bombillas en paralelo de 200W como carga; la primera prueba se realizó con 3 bombillas y la segunda con 6.

**6.2.2.1 Arranque con 3 bombillas de 200W.** En la figura 53 se presenta el comportamiento de la corriente de armadura del motor durante el arranque acoplado el generador con una carga de 3 bombillas.

Figura 53. Corriente del motor teniendo como carga al generador con 3 bombillas de 200W.

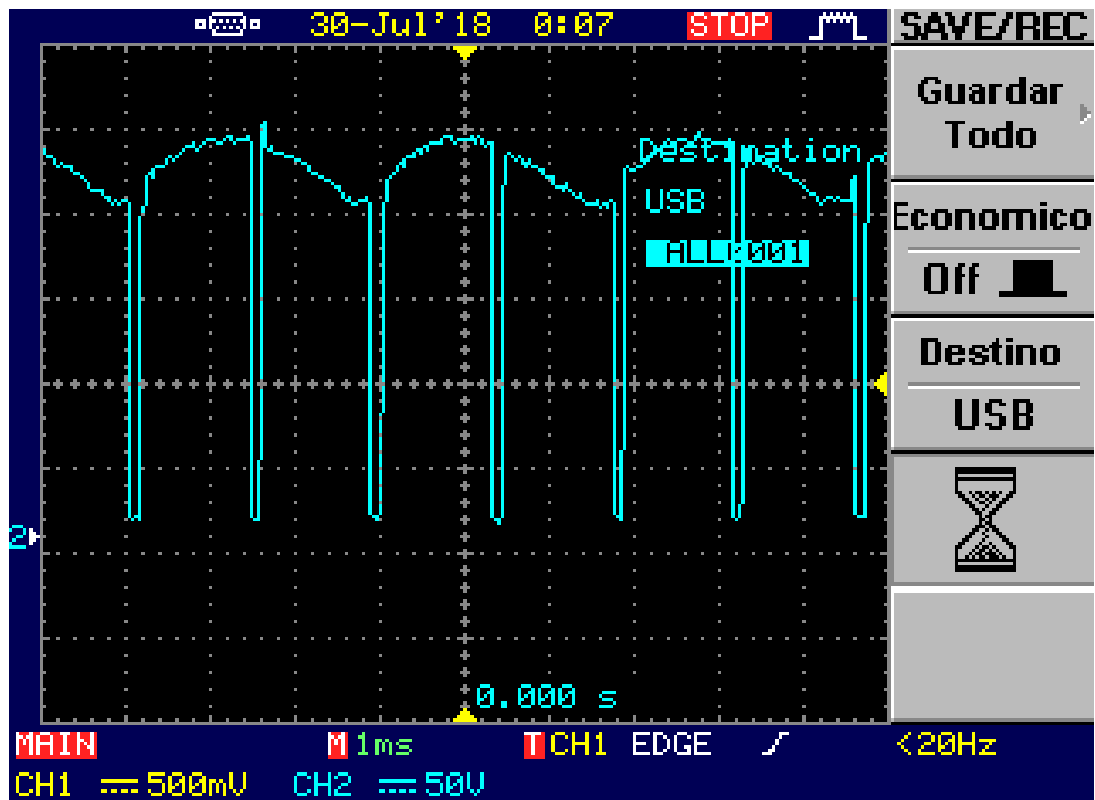


De acuerdo con la tensión de salida en la sonda de efecto hall tenemos un valor estimado de 3.59V correspondiente a 10.3A cómo se puede observar la corriente no disminuye a cero, esto se debe a que el control se configuro para que el motor mantenga la velocidad nominal (1800rpm).

$$I = \frac{3.59 - 2.557}{0.1004} = 10.289 \text{ [A]}$$

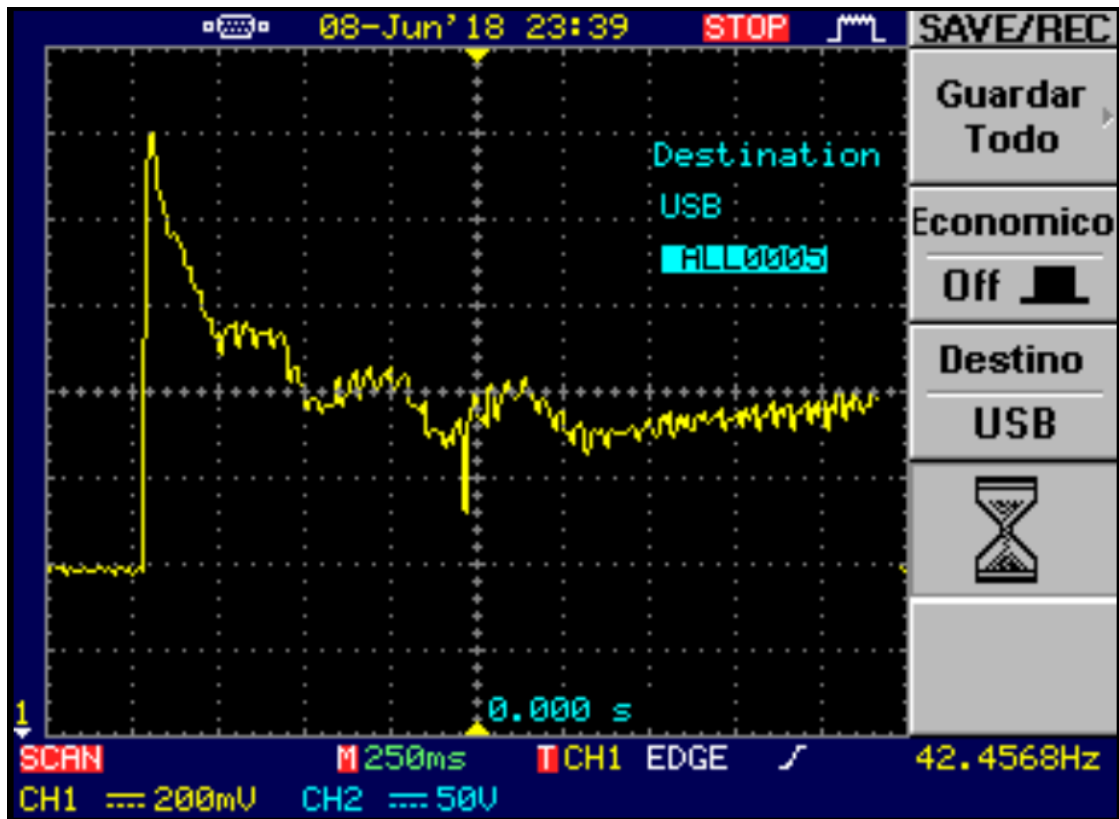
Al medir la tensión final de armadura se obtuvo una magnitud de 192.1V con un ancho de pulso del 96%, en la figura 54 se encuentra el comportamiento de la tensión.

Figura 54. Tensión de armadura con el motor acoplado al generador y tres bombillas como carga.



**6.2.2.2 Arranque con 6 bombillas de 200 watts.** En la figura 55 se presenta el comportamiento de la corriente de armadura del motor durante el arranque acoplado el generador con una carga de 6 bombillas.

Figura 55. Corriente del motor acoplando el generador con 6 bombillas de 200W como carga



De acuerdo con la tensión de salida en la sonda de efecto hall tenemos un valor estimado de 3.59V correspondiente a 10.3A. Como se puede observar la corriente tiende a estabilizar en un valor más elevado que en el caso anterior y a medida que se incremente la carga, la corriente del motor también lo hará al tratar de mantener la velocidad nominal (1800rpm).

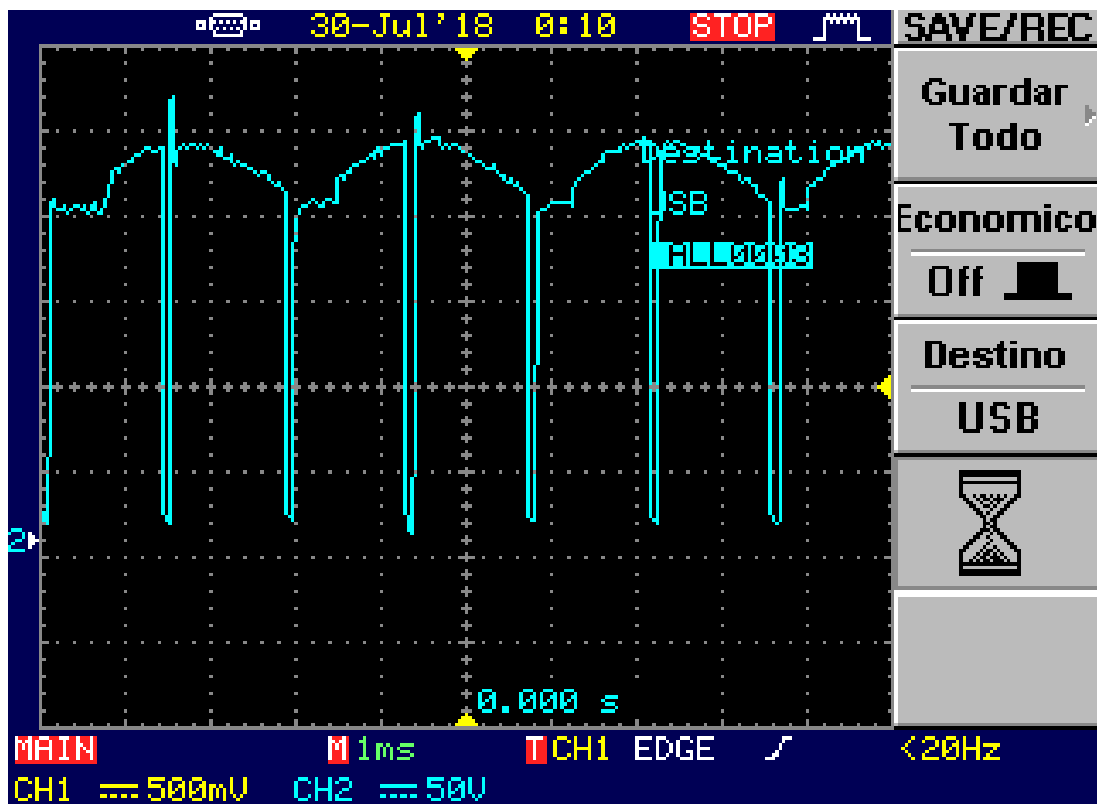
$$I = \frac{3.59 - 2.557}{0.1004} = 10.289 \text{ [A]}$$

Si se comparan los datos obtenidos del pico de corriente de las pruebas con 3 y 6 bombillas se puede observar que son iguales, esto se debe a que en la programación del PLC se estableció que el máximo valor de corriente en el arranque

fuera de 10A y en el momento en el que es alcanzada esta magnitud, el ancho del pulso del PWM no sigue incrementando hasta que disminuya de este valor.

Al medir la tensión final de armadura se obtuvo una magnitud de 192.1V con un ancho de pulso del 98%, en la figura 56 se encuentra la información de la tensión.

Figura 56. Tensión de armadura con el motor acoplado al generador y 6 bombillas como carga.



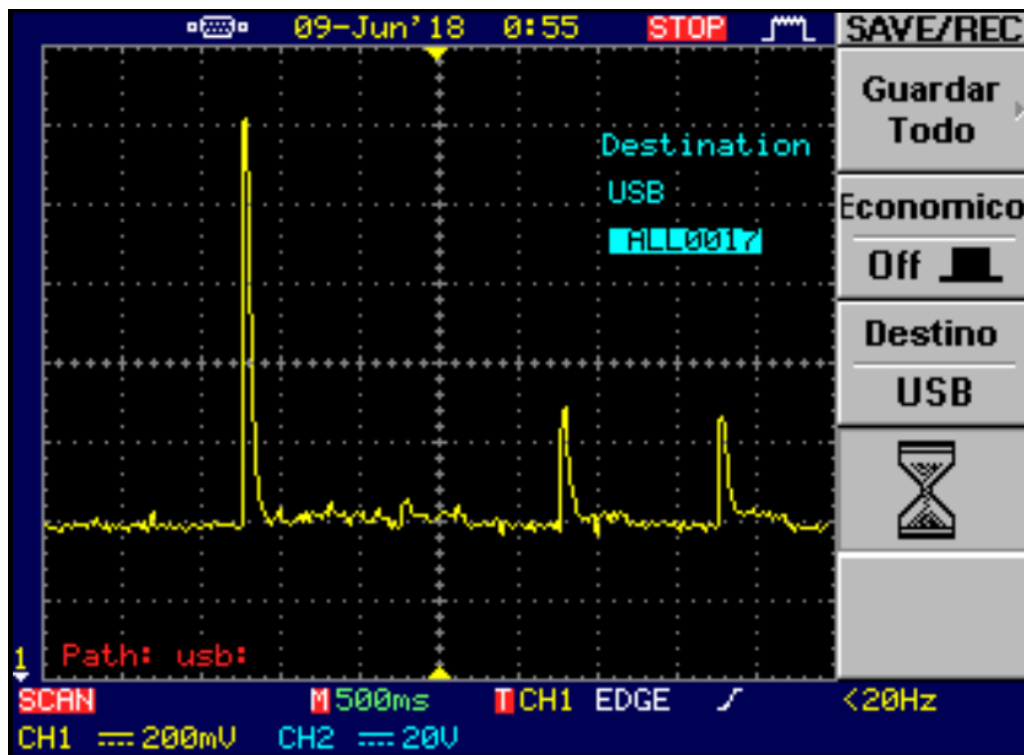
### 6.3 RESULTADOS IMPLEMENTANDO LA FUNCIÓN PID

En la ejecución de la función PID del PLC se encontró un inconveniente debido al tiempo de conmutación en la salida a pulsos (PWM), debido a que el motor alcanza el pico de corriente en el arranque en un tiempo 50ms y se estabiliza en 200 ms como se muestra en el ANEXO A.

El PLC tiene un periodo mínimo de conmutación de 100ms y en el momento que él da la señal para que se inicie el proceso, la máquina es energizada a tensión plena y cuando vuelve a conmutar el transistor, el motor ya ha alcanzado el pico de corriente a tensión nominal (arranque directo), por tanto, no es posible controlar la corriente en el arranque.

Como la realimentación es por velocidad, el PLC intenta llevar el motor a la velocidad de referencia con un tiempo de respuesta demasiado lento, ocasionando que el motor acelere y desacelere de forma brusca generando picos de corriente en la armadura como se muestra en la figura 57. Cabe resaltar que las pruebas se hicieron con el motor en vacío y a tensión reducida por mayor seguridad.

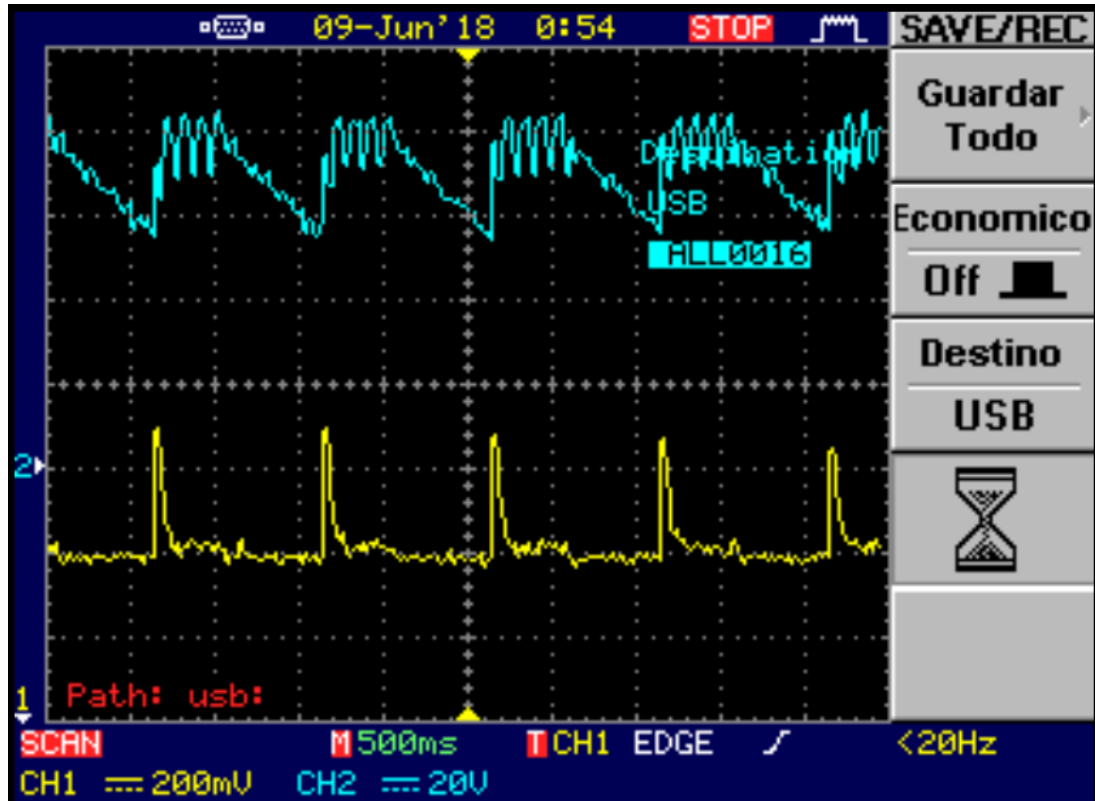
Figura 57. Corriente de la armadura del motor implementando la función PID



Estos picos de corriente dependen de la tensión de alimentación, en este caso se energizó la armadura con 72V obteniéndose un pico de corriente de 10A, a medida

que se incrementa la tensión también lo hace los picos de corriente. En la figura 58 se muestra el comportamiento del proceso descrito anteriormente.

Figura 58. Tensión vs corriente en la armadura al implementar el PID



En el momento que el PLC detecta que la velocidad del motor es inferior a la de consigna, eleva la tensión y se genera el pico de corriente ocasionando que el motor se acelere superando el valor establecido ya que la máquina tiene una respuesta rápida debido al incremento de la tensión promedio de armadura. Para controlar la máquina el PLC ordena que el ancho de pulso se establezca en 0% con el fin de bajar la velocidad, pero al ser tan lenta la frecuencia de conmutación, la velocidad del rotor ya es muy baja, por esta razón no puede estabilizarse.

## 6.4 OBSERVACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos de tensión y corriente al implementar el control por medio del PLC se agrupan en la tabla 13.

Tabla 13. Comparación de los valores en la implementación del arrancador

<b>Práctica</b>	<b>Tensión fuente [V]</b>	<b>Corriente de armadura [A]</b>	<b>Tensión de armadura [V]</b>	<b>Ancho de pulso [%]</b>
<b>En vacío sin acoplamiento</b>	200	7.1	183.9	86
<b>Generador acoplado en vacío</b>		9.1	187.7	90
<b>Generador con 3 bombillas</b>		10.3	192.1	96
<b>Generador con 6 bombillas</b>		10.3	194.4	98
<b>PID</b>	72	10	72	100

Los datos de la tabla 13 fueron obtenidos para la condición de la máxima velocidad del motor (1800rpm). Se puede observar que la corriente en el caso de las 3 y 6 bombillas es del mismo valor, esto se debe a la restricción en el arranque donde el pico de corriente no debe ser superior a los 10A, pero la magnitud de la tensión y el ancho de pulso del PWM finales si varían ya que estos valores se alcanzan después de haberse realizado el arranque controlado y la carga para cada caso es diferente.

## 7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

En este trabajo se utilizó un motor DC que dispone el laboratorio de máquinas eléctricas de la UIS, el cual tiene las siguientes características de operación:

$$V_n = 200V.$$

$$I_n = 12A.$$

$$\Omega_n = 1800\text{rpm}.$$

Medidos los parámetros se concluye que la resistencia equivalente de armadura es de  $3.489\Omega$ , la inductancia equivalente de armadura es de  $69.7339\text{mH}$ , la constante de magnetización equivalente es de  $0.9945\text{V}\cdot\text{s}$  y el momento de inercia equivalente es de  $0.00612\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ .

Para operar el motor en los dos sentidos (directo e inverso) y ejecutar un frenado dinámico fue necesario utilizar contactores (D, I, F), debido a que el PLC solo cuenta con dos salidas a transistor y no es posible implementar un troceador que permita la operación en los cuatro cuadrantes (puente H), esta fue la razón para que el diseño solo tuviera un transistor de potencia (ver figura 21). Si se desea implementar el control directamente con transistores de potencia, se debe comprar un módulo con salidas a transistor para adicionarlo al PLC base.

Utilizando la función PWM del PLC TWDLCAE40DRF la cual se implementa mediante la salida a transistor %Q0.0, se pudo hacer el control del pico de corriente en el arranque manteniendo la tensión en el campo constante, pero variando el ancho de pulso en la armadura de modo tal que, al presionar arranque la tensión sea aproximadamente el 30% de su valor nominal y se incremente hasta finalizar el arranque con un ancho de pulso del 70%. A partir de este momento se puede hacer

el control de velocidad por medio del canal analógico incorporado (potenciómetro del PLC), el cual establece la referencia de velocidad a la que se desea llevar el motor; dependiendo la posición en la que se encuentre el potenciómetro, la máquina busca una velocidad comprendida entre 777rpm y 1800rpm, incrementando o disminuyendo el ancho de pulso.

Cuando se realiza el arranque del motor utilizando la función PID del PLC realizando control realimentado por la señal de velocidad, no es posible limitar el pico de corriente a un valor deseado debido a que el tiempo en el que la máquina alcanza este valor es de 50ms (ver anexo A) y la frecuencia de conmutación en la salida a transistor (%Q0.0) en modo PID es de 100ms presentándose un arranque directo a tensión nominal en el primer periodo. Esta estrategia de control funciona en sistemas que tengan constantes de tiempo grandes como es el caso del control en la temperatura de un horno.

En las simulaciones se puede observar que el arranque tiene una duración de 200ms, es por esto que en la programación para que el ancho de pulso se incremente del 30% al 70% se usa un temporizador con tiempo de preselección de 5ms, es decir que el arranque es de aproximadamente  $5 \cdot (70-30)$  ms siempre y cuando no se supere la corriente de referencia (10A) en el arranque.

Comparando la forma de onda obtenida en la sonda de efecto Hall mediante el osciloscopio, una pinza amperimétrica y las simulaciones, podemos observar que la forma de onda que se presenta en el arranque es muy similar, pero en el momento que está por finalizar el transitorio, la corriente presenta unos valores negativos que se evidencian en la pinza amperimétrica y en las simulaciones, pero en la sonda de efecto Hall no.

La velocidad de referencia a la cual se estabiliza el motor después de terminado el arranque se selecciona mediante el canal analógico incorporado, el cual está

compuesto por potenciómetros, donde estos toman un valor de referencia en tensión y lo convierten en un valor constante entre 0 y 1023 quedando guardado en la palabra %IW0.0.0. Un extremo del potenciómetro equivale a 0 y a medida que se va girando empieza a aumentar linealmente hasta llegar al otro extremo que es 1023.

## BIBLIOGRAFÍA

ALLEGRO MICROSYSTEMS. 2017. <https://www.allegromicro.com>. [En línea] 5 de Junio de 2017. [Citado el: 1 de Agosto de 2018.] <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>.

DANIEL MEJÍA URIBE Y HUGO ALEJANDRO MARTÍNEZ RAMOS, Motores eléctricos: Frenado dinámico y a contracorriente. 2001. Tesis de grado. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.

JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR CONTRERAS, JOSÉ CARLOS BITAR RODRÍGUEZ Y GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA, Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC. 2013. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander

JESUS FRAILE MORA. Máquinas eléctricas. Quinta edición. Mc Graw Hill

MUHAMMAD H.RASHID, Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Segunda edición. Pertice Hall Hispanoamericana.

OGATA KATSUHIKO. Modern Control Engineering. Third edition. Prentice Hall, 1998.

RAÚL OMAR VILA CASADO, Circuitos eléctricos básicos para el estudiante. Universidad Industrial de Santander. 2008.

SCHNEIDER ELECTRIC, Guía de programación y manual de conexionado TWIDO SUITE V2.3. 2010

SCHNEIDER ELECTRIC. 2018. <http://www.naewoielec.co.kr>. [En línea] 2018.  
[Citado el: 1 de Agosto de 2018.]  
<http://www.naewoielec.co.kr/pdf/Photosensor13.pdf>.

SERWAY RAYMOND AND JEWETT JHON, Physics for Scientist and Engineers.  
Sixth Edition. Vol 1, Editorial Cencage Learning, 2008.

# ANEXOS

## **ANEXO A. SIMULACIÓN Y EJECUCIÓN DEL ARRANQUE DIRECTO**

Para tener una idea de los valores pico de corriente y la velocidad a la que se estabiliza la máquina, se hizo el conexionado en el laboratorio que se muestra en la Figura 10 o en la Figura 11, en donde se usa una pinza amperimétrica y un tacómetro digital para realizar las respectivas medidas, para estas mismas condiciones, se realizaron varias simulaciones en las cuales se mantiene la tensión del campo constante y la tensión de armadura se fue incrementando hasta un valor aproximado al 40 % del voltaje nominal esto con el fin de contrastar los valores prácticos con los valores teóricos, como se muestra en la Tabla 8.

### **RESULTADOS DEL ARRANQUE EN EL LABORATORIO**

En el laboratorio de máquinas se realizó el debido conexionado con el fin operar el motor DC con excitación independiente; para el montaje, fue necesario utilizar las dos fuentes de corriente continua con las que cuenta el laboratorio. El devanado del campo se energizó a una tensión constante de 220 [V] mientras que en la armadura se fue variando la tensión y así realizar un arranque directo a tensión reducida.

Con el objetivo de poder observar la corriente en el arranque y la velocidad se utilizaron los siguientes elementos: Una pinza amperimétrica AEMC referencia MN 375, un osciloscopio, un multímetro FLUKE referencia 117, un tacómetro digital UNIT referencia UT-371 y un motor DC de imán permanente que cumplía la función de tacómetro de contacto.

Figura 59. Corriente y Velocidad a 35.1 [v]

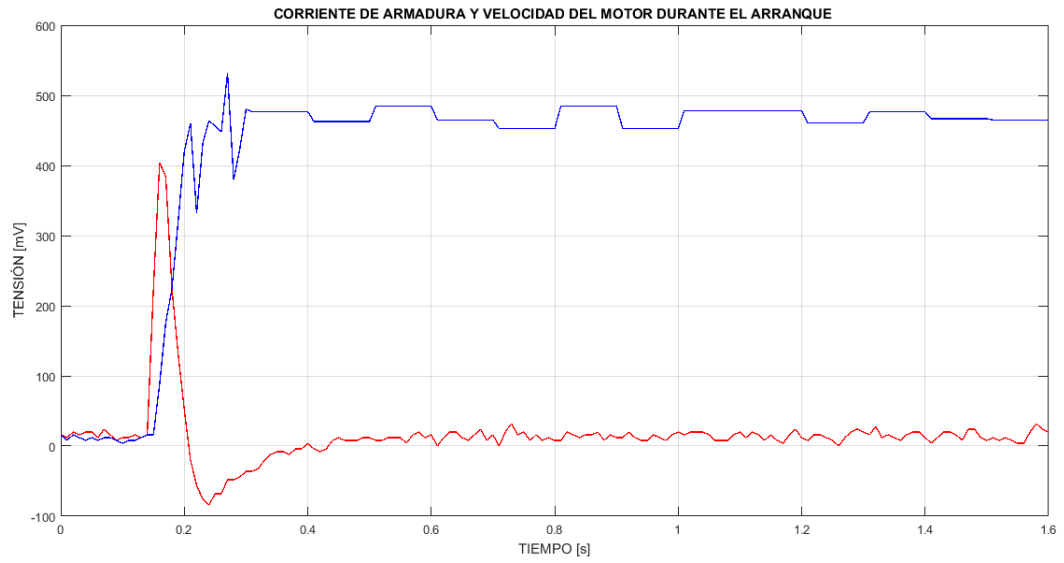


Figura 60. Corriente y Velocidad a 65.7 [v]

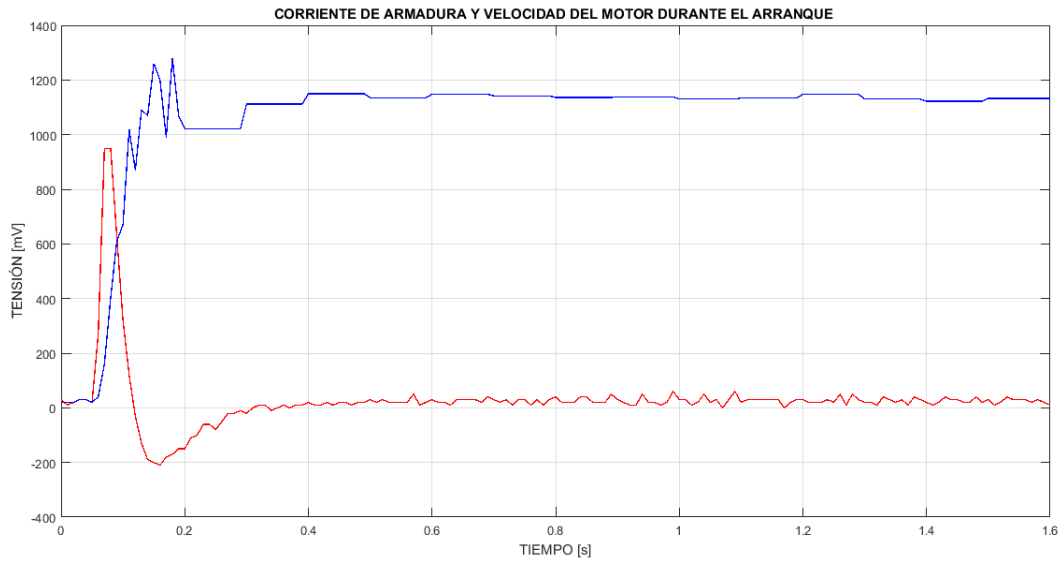


Figura 61. Corriente y Velocidad a 75.2 [v]

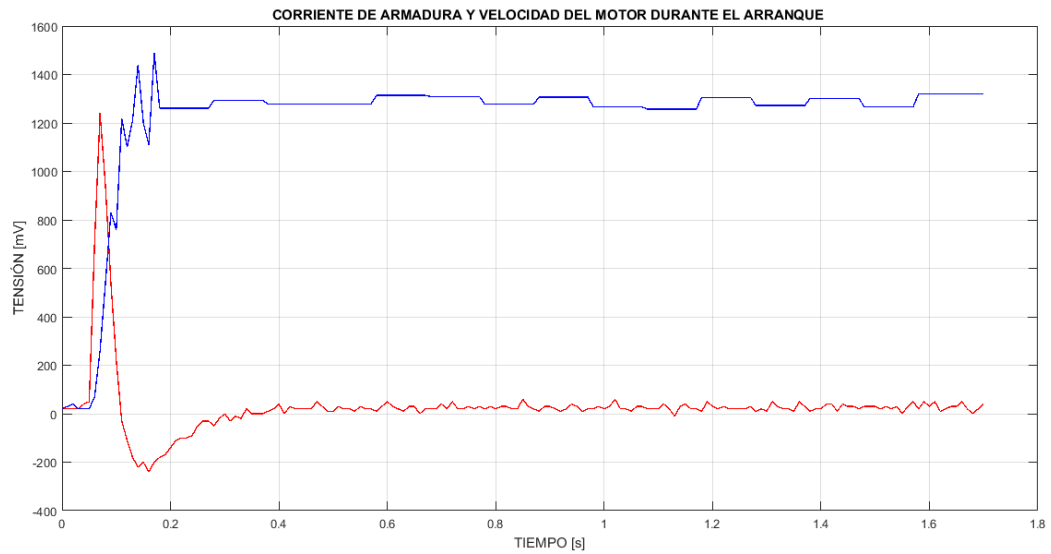
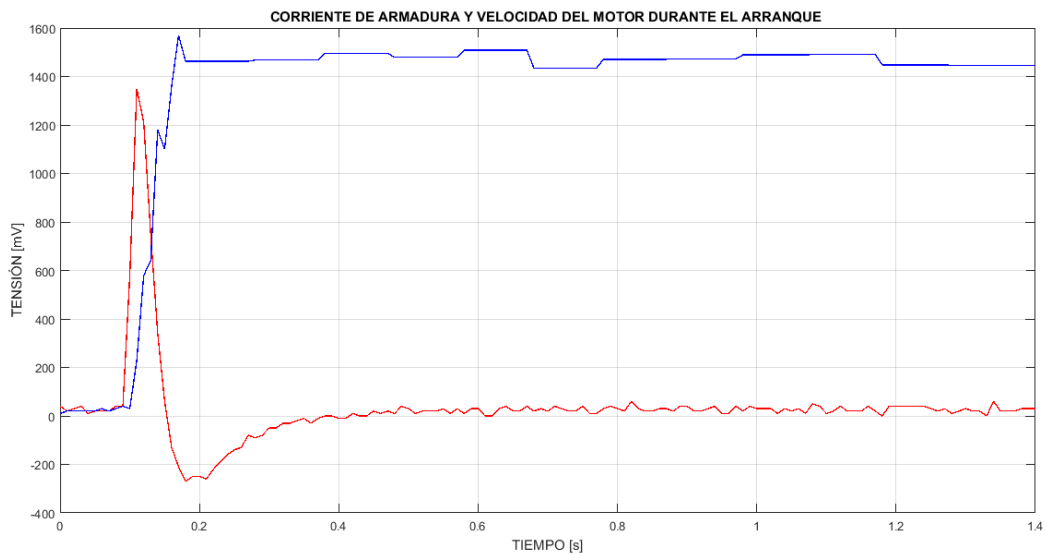


Figura 62. Corriente y Velocidad a 85.5 [v]



## SIMULACIÓN DEL ARRANQUE EN SIMULINK

Las figuras 63, 64, 65 y 66 se obtienen al realizar la simulación del montaje de la figura 11 en el que se trabaja con las funciones que proporciona SIMULINK como

el bloque motor DC, las fuentes DC y los equipos para medir tensión, corriente y velocidad.

Figura 63. Corriente y Velocidad a 35.1 [v]

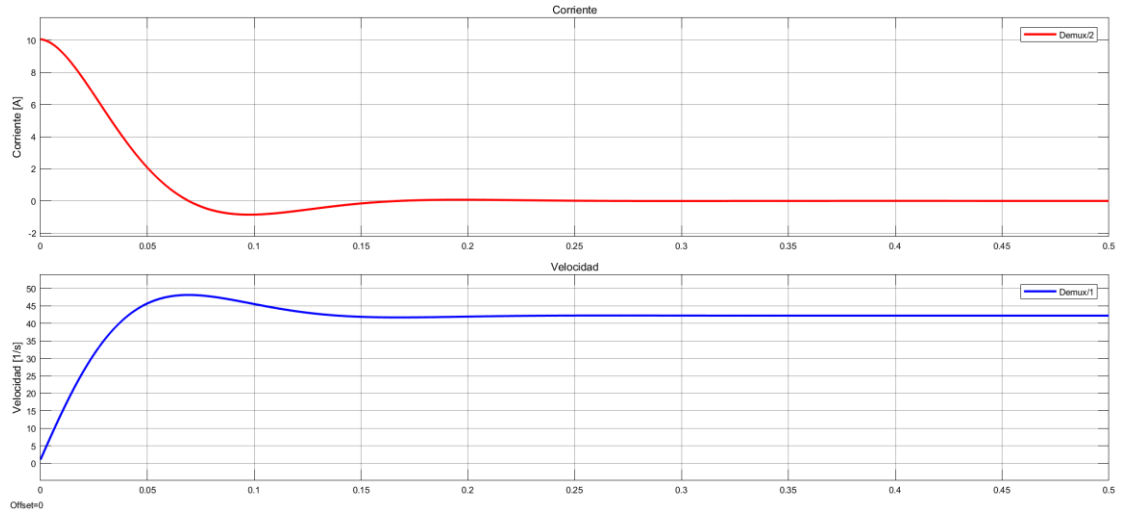


Figura 64. Corriente y Velocidad a 65.7 [v]

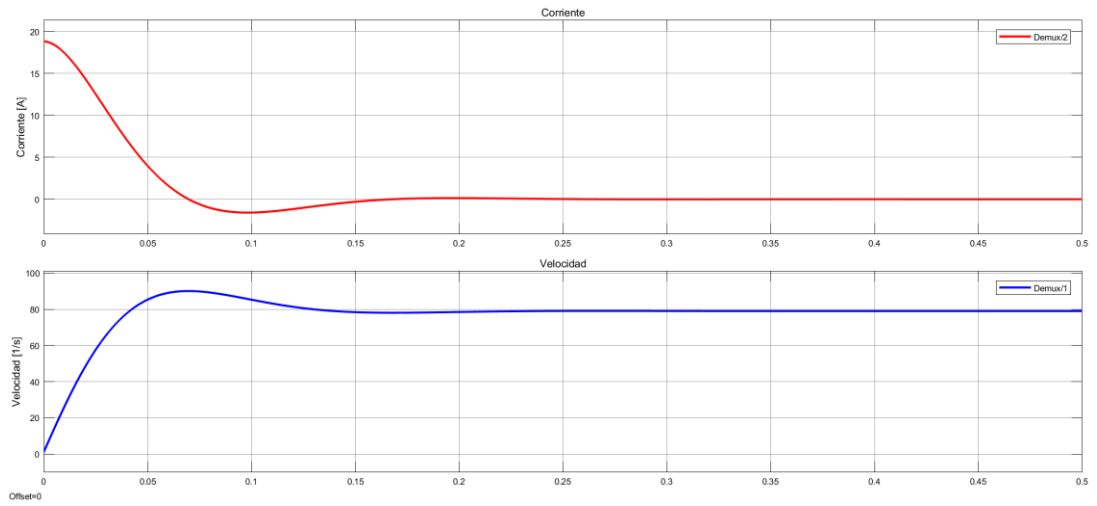


Figura 65. Corriente y Velocidad a 75.2 [v]

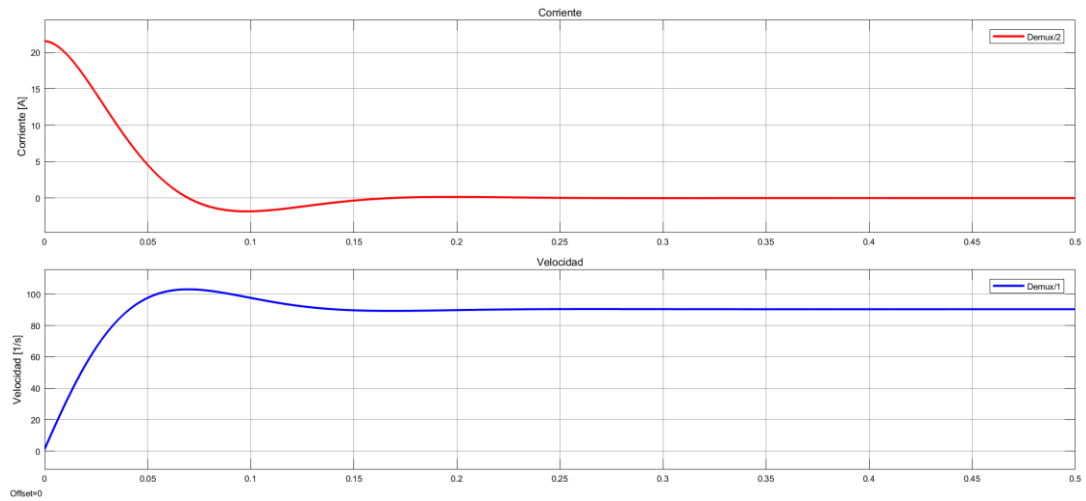
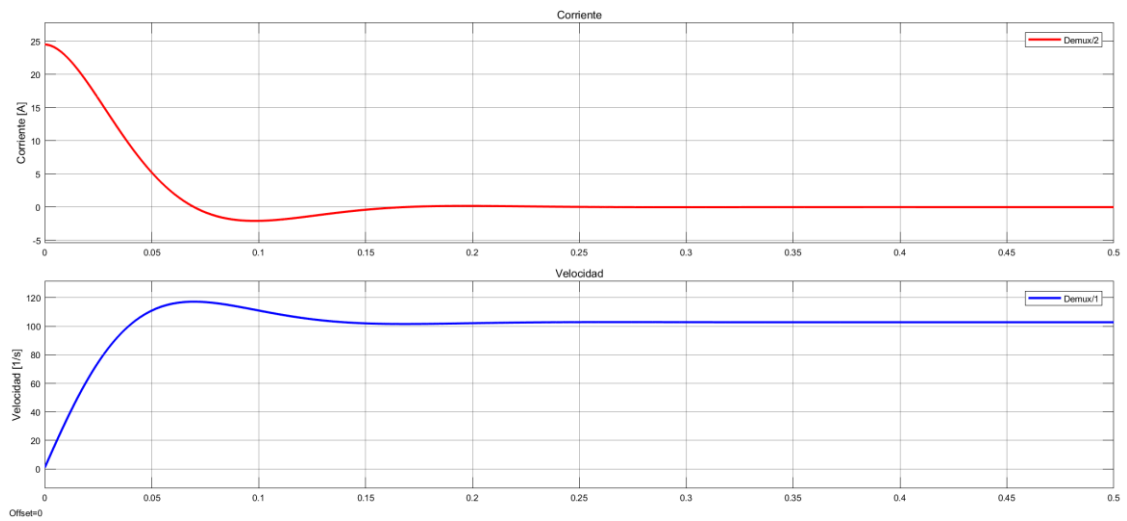


Figura 66. Corriente y Velocidad a 85.5 [v]



## SIMULACIÓN DEL ARRANQUE EN PSIM

Las figuras 67, 68, 69 y 70, se obtienen al realizar la simulación del montaje de la figura 12 en el que se trabaja con las funciones que proporciona PSIM como el bloque motor DC, las fuentes DC y los equipos para medir tensión, corriente y velocidad.

Figura 67. Corriente y Velocidad a 35.1 [v]

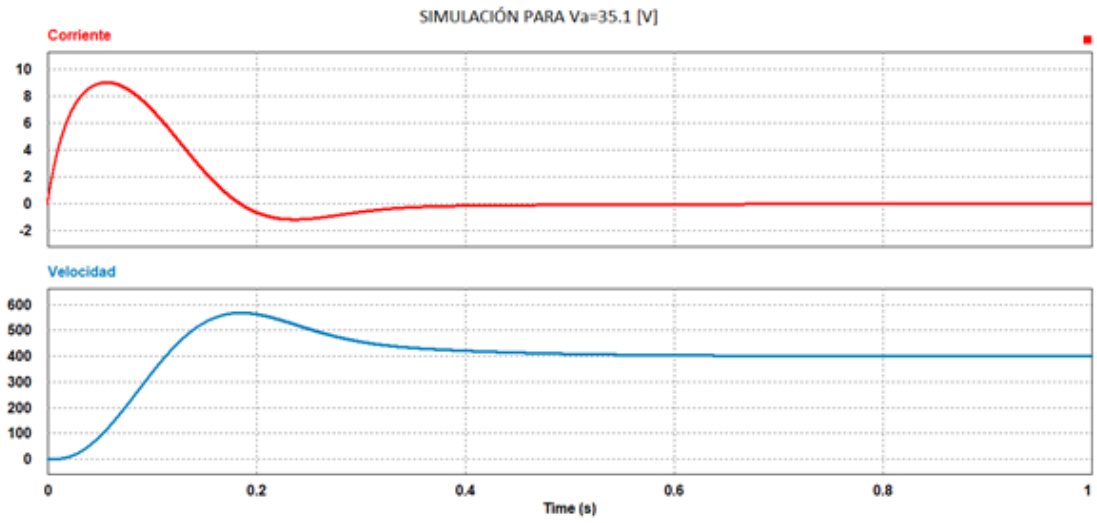


Figura 68. Corriente y Velocidad a 65.7 [v]

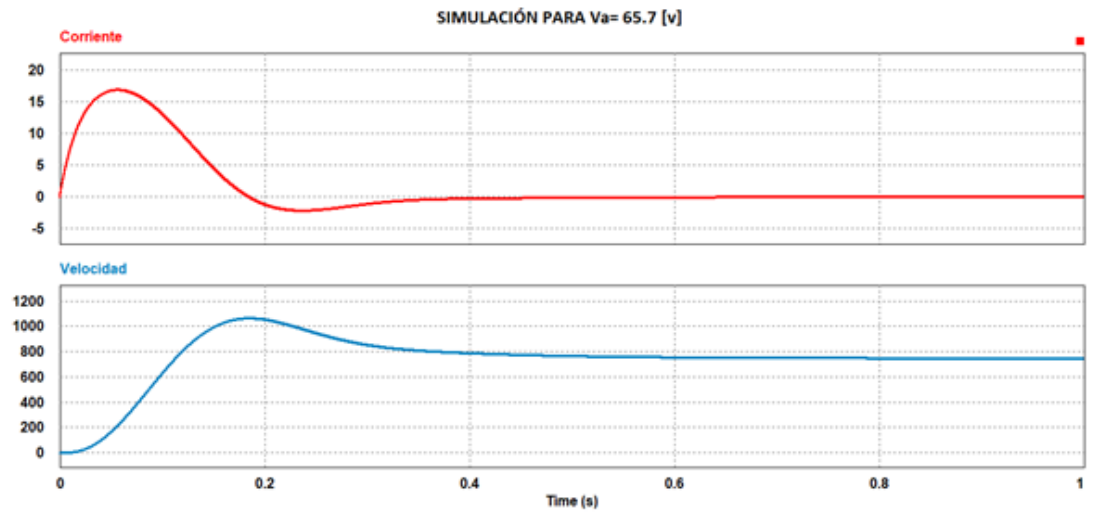


Figura 69. Corriente y Velocidad a 75.2 [v]

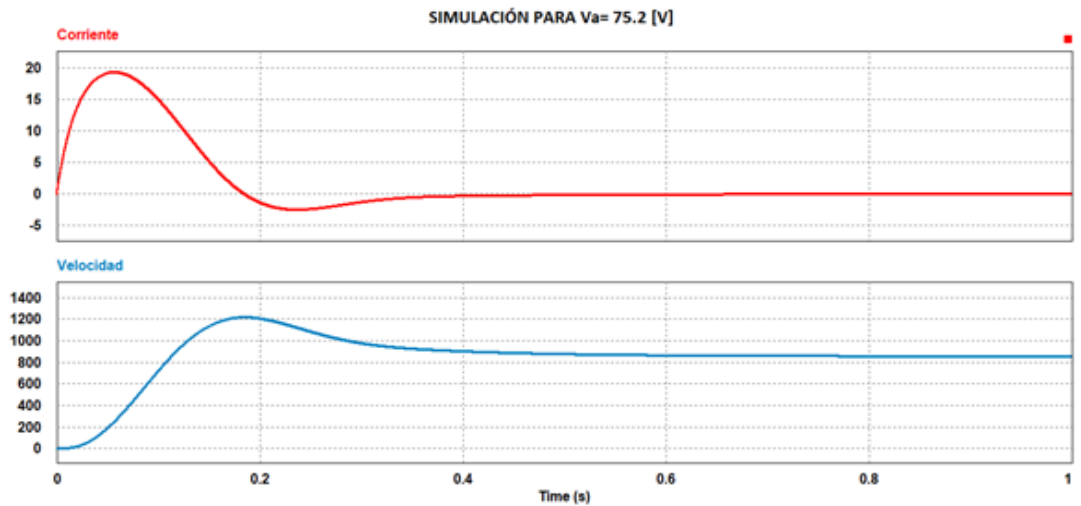
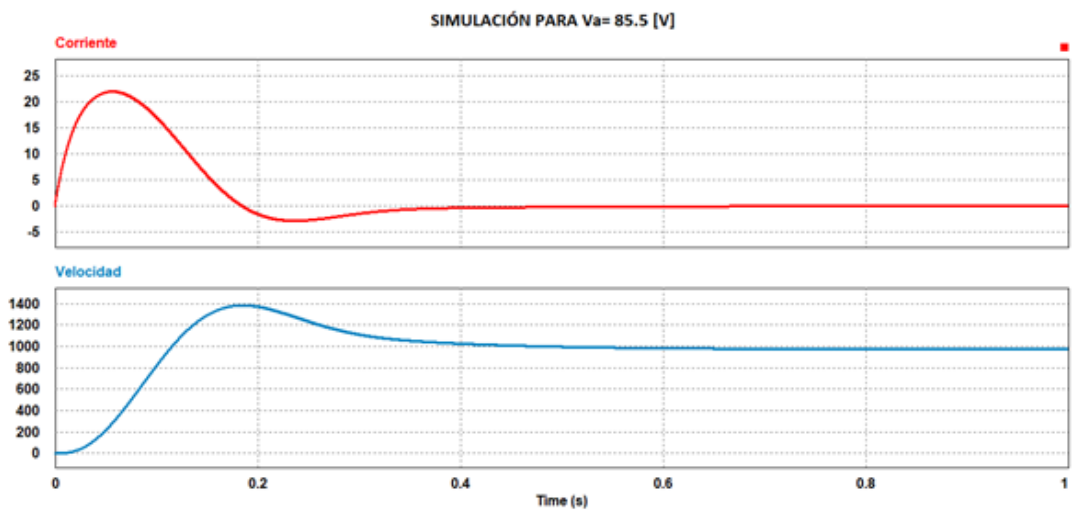


Figura 70. Corriente y Velocidad a 85.5 [v]



La curva de color rojo define la corriente en la armadura, y la curva de color azul expresa la velocidad de la máquina durante el momento de arranque para el tiempo en el que la máquina ya se ha estabilizado, las unidades en el eje de las ordenadas para la corriente y la velocidad son Ampere [A] y radianes por segundo [Rad/s]. Cómo se puede observar la corriente en las simulaciones de MATLAB inician desde el pico de corriente mientras que en las simulaciones de PSIM parten del reposo teniéndose una similitud con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio,

por esta razón SIMULINK no proporciona una información tan exacta como le realiza PSIM, cabe resaltar que al ser simulaciones los valores que estas presentan varían con los datos que se obtienen en el laboratorio.

### **SIMULACION EN PSIM DEL ARRANQUE ENERGIZANDO LA ARMADURA CON UNA TENSIÓN TROCEADA.**

Las siguientes figuras se obtienen al realizar la simulación en PSIM del montaje de la figura 12, en el cual se realiza el arranque mediante una tensión troceada manteniendo constante el devanado de campo a 220V; para la magnitud de la fuente ( $V_{fuente}$ ) se tienen los valores de 85.5V y 200V.

- **Simulación del arranque con una tensión troceada de 85.5V:** Se realizaron simulaciones con 85.5V debido a que fue el máximo valor de tensión con el cual se realizó el arranque directo en el laboratorio y poder comparar los datos obtenidos en los dos casos.

Figura 71. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 20%

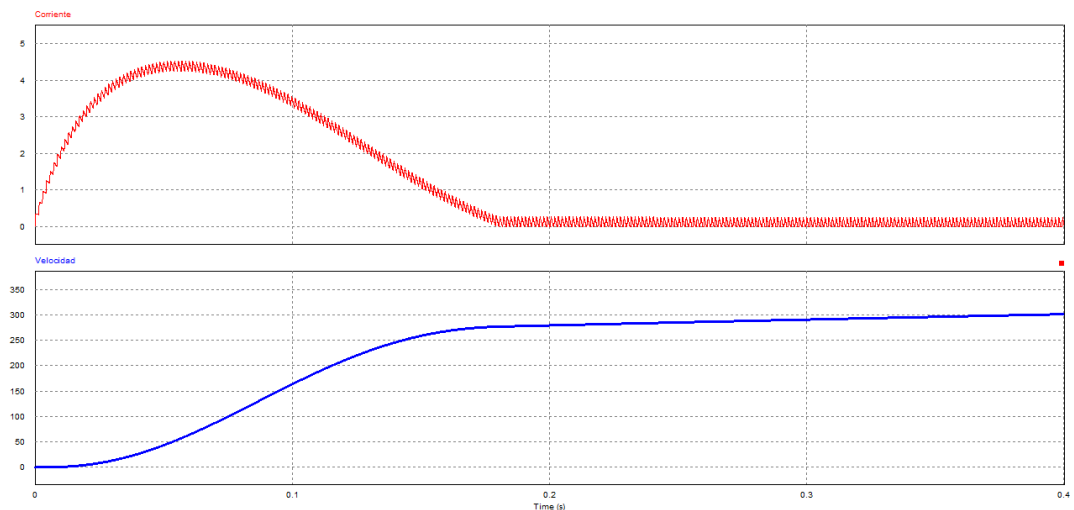


Figura 72. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 30%

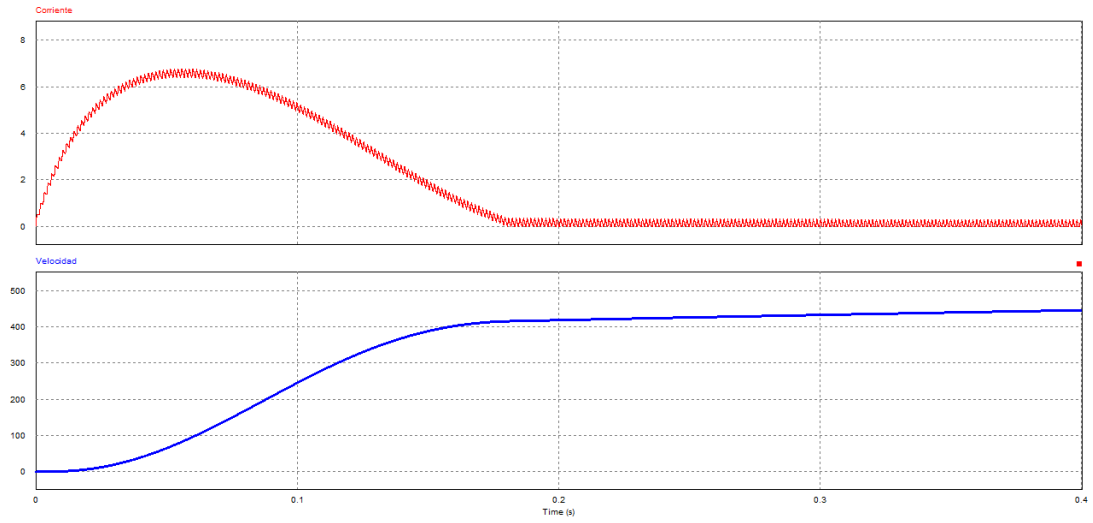


Figura 73. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 50%

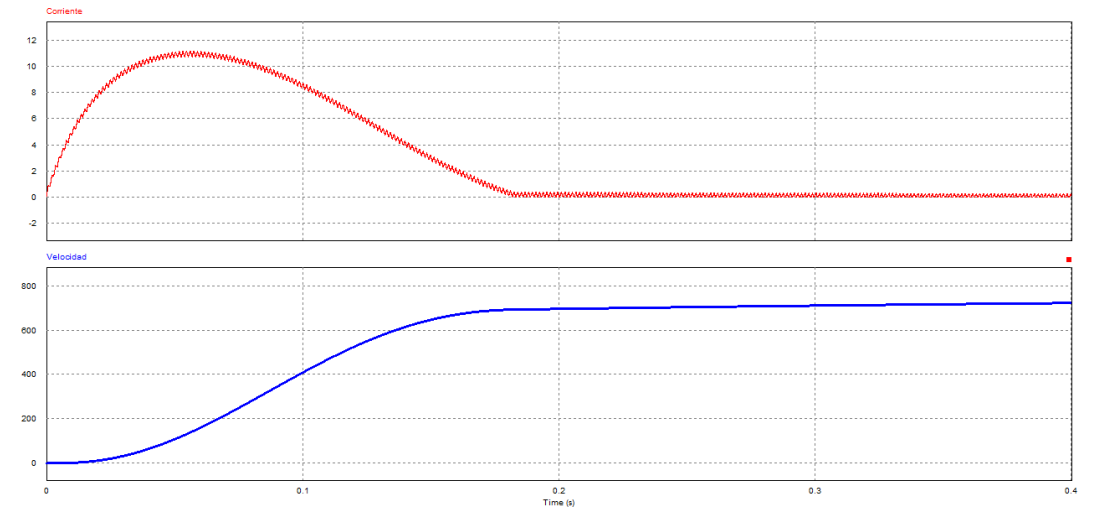
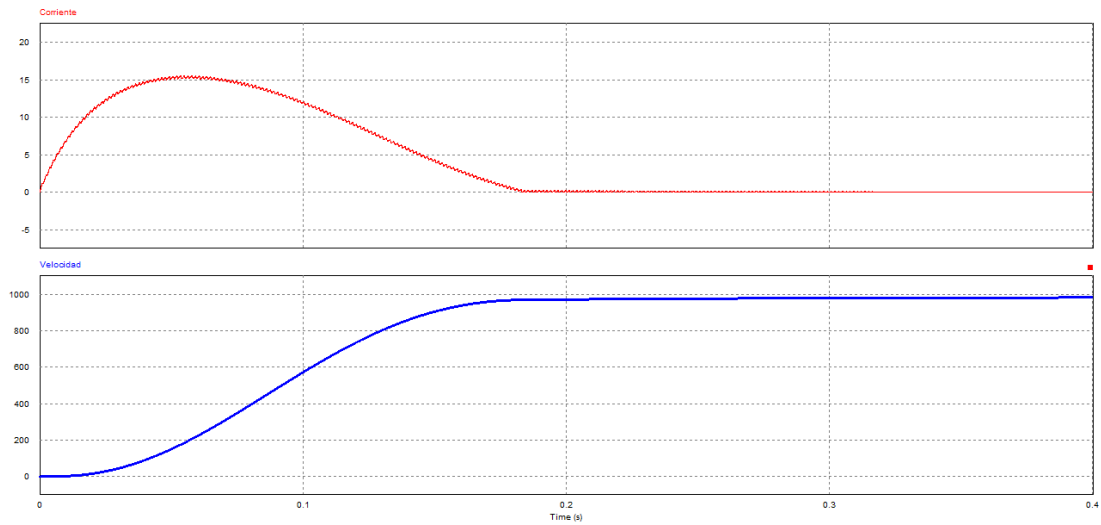


Figura 74. Corriente y Velocidad a 85.5V con un ancho de pulso del 70%



- **Simulación del arranque con una tensión troceada de 200V:** Se realizaron simulaciones con 200V debido a que es el valor nominal de tensión en la armadura del motor y así poder comparar los valores de corriente y velocidad a condiciones nominales con los datos arrojados con las simulaciones anteriores.

Figura 75. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 20%

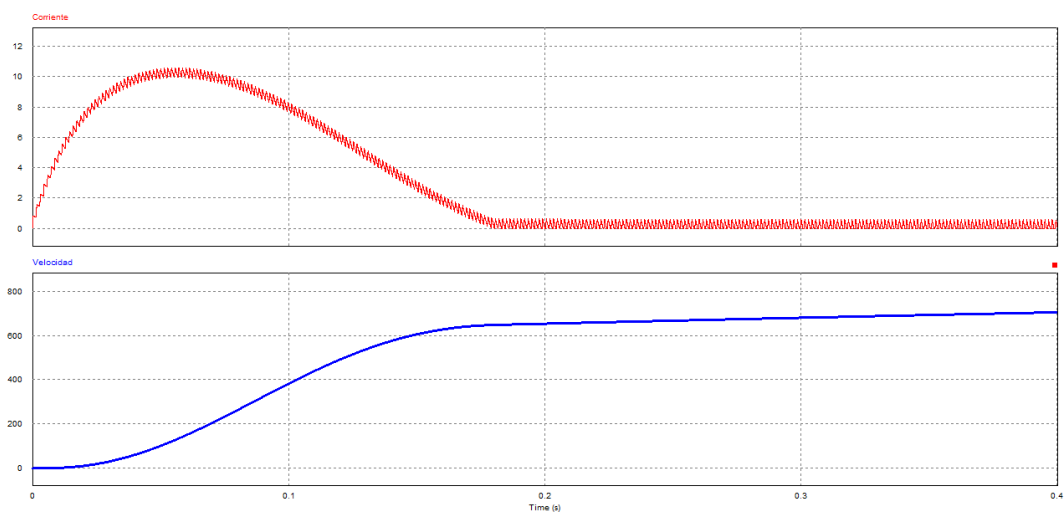


Figura 76. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 30%

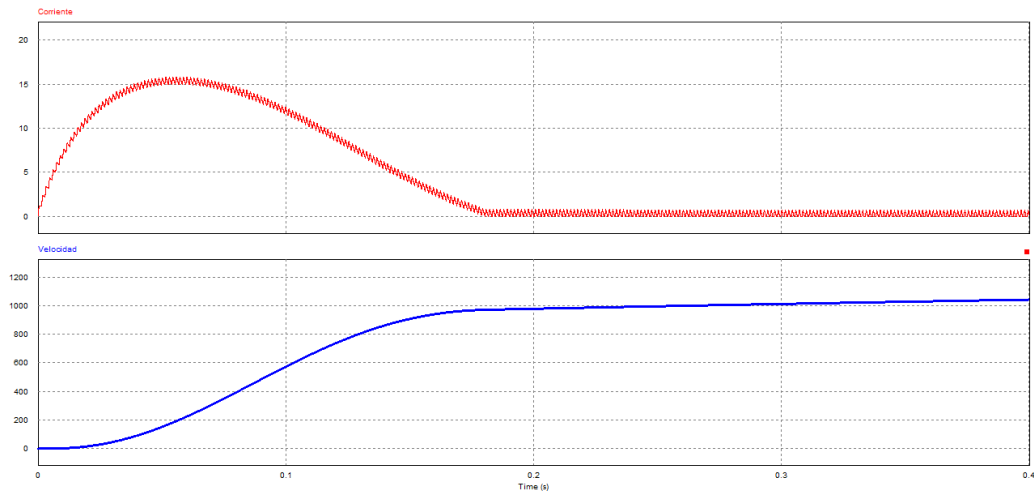


Figura 77. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 50%

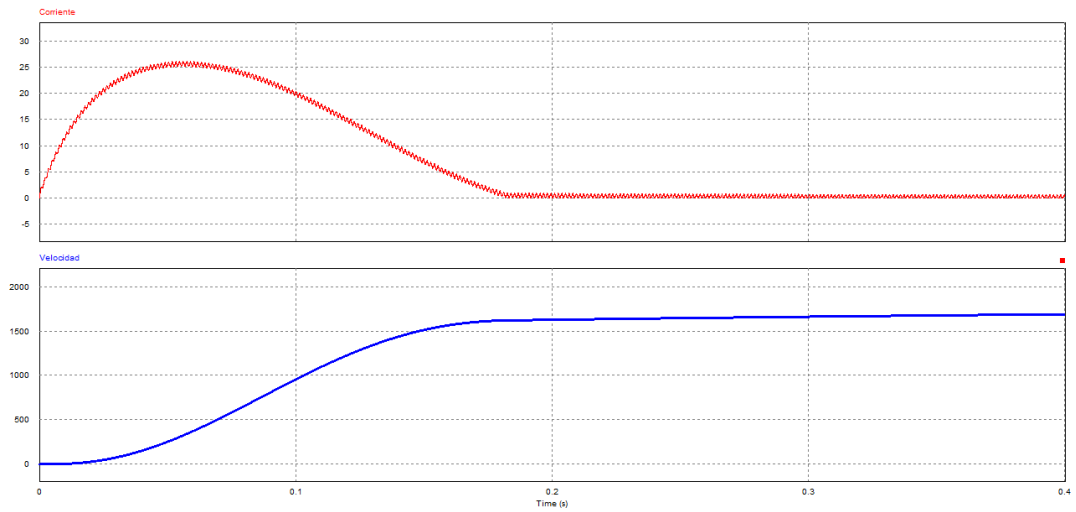
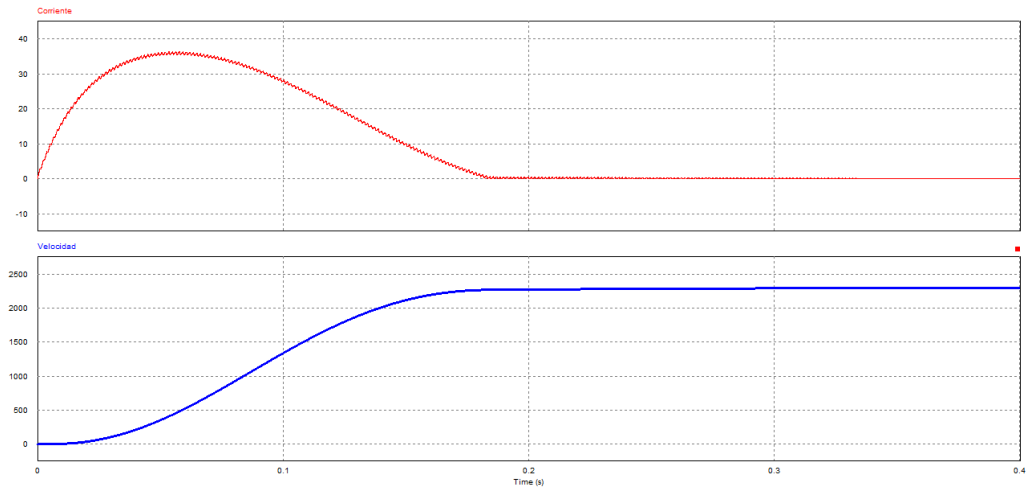


Figura 78. Corriente y Velocidad a 200V con un ancho de pulso del 70%



Como se puede observar en las figuras anteriores, el pico de corriente disminuye al energizar la armadura del motor con una tensión troceada durante el arranque, esta magnitud depende del porcentaje en el ancho de pulso y el valor de tensión con el que se arranca el motor.

## ANEXO B. CONFIGURACION DE LAS FUNIONES PID Y PWM DEL PLC TWIDO TWDLCAE40DRF

### Configuración del PID

#### Paso 1: Configuración de los canales analógicos utilizados para el control

En general, un autómata PID utiliza una señal de realimentación analógica (conocida como "valor del proceso") para medir al valor que debe ajustarse, este valor puede ser un nivel, una temperatura, una distancia entre otros, en nuestro caso vamos a hacer una realimentación por velocidad.

El bloque analógico que está disponible en el laboratorio de pesados y se va a utilizar es el TM2AMM3HT, cuenta con dos entradas y una salida como se muestra en la figura 79, en donde se tienen dos opciones para configurarlas dependiendo la señal que se tenga, una por corriente de 4 a 20mA y otra por tensión de 0 a 10V.

En las columnas de mínimo y máximo los valores 0 y 4095 aparecen por defecto, en el caso que se elija seleccionar la opción personalizada se puede escoger valores entre -32767 y 32767, lo que quiere decir que cuando la señal de entrada es 0V o 4mA el PLC va a convertir ese valor en el que aparezca en la columna de mínimo, y cuando la entrada sea 10V o 20mA va a tomar el valor que esté asignado en máximo.

Figura 79. Configuración de las entradas analógicas

Uso	Dirección	Símbolo	Tipo	Ampliada	Mínimo	Máximo	Unidades
<input checked="" type="checkbox"/>	%IW1.0		0 - 10 V	Personalizad	-32767	32767	Ninguno
<input type="checkbox"/>	%IW1.1		4 - 20 mA	Normal	0	4095	Ninguno
<input type="checkbox"/>	%QW1.0		4 - 20 mA	Normal	0	4095	Ninguno

#### Paso 2. Requisitos previos para la configuración del PID

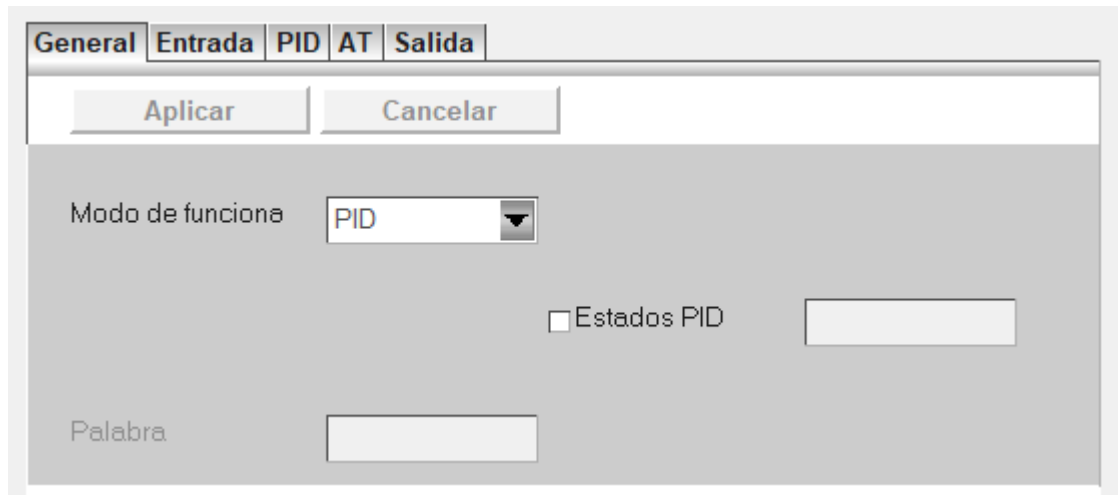


La duración del ciclo debe establecerse en el tamaño del programa y el rendimiento deseado (una duración de 50 ms es un valor adecuado).

### Paso 3. Configuración del PID

Se tiene la opción de usar la función PID simple, en la cual ingresamos las constantes halladas en las simulaciones o la función PID+AT en la que el PLC hace el respectivo ajuste para hacer el control; la opción que se trabajó fue la primera como se muestra en la figura 82.

Figura 82. Selección del entre PID o PID+AT



The image shows a software configuration window with the following elements:

- Tabbed interface with tabs: **General**, **Entrada**, **PID** (selected), **AT**, **Salida**.
- Buttons: **Aplicar** and **Cancelar**.
- Label: **Modo de funciona** next to a dropdown menu showing **PID**.
- Label:  **Estados PID** next to an empty text input field.
- Label: **Palabra** next to an empty text input field.

Con una realimentación por velocidad la entrada es la palabra de memoria %MW10

Figura 83. Configuración de la entrada del PID.

The screenshot shows a software interface for configuring the PID input. At the top, there are tabs: 'General', 'Entrada', 'PID', 'AT', and 'Salida'. Below the tabs are two buttons: 'Aplicar' and 'Cancelar'. The main area is divided into three sections:

- Medida:** A text input field containing the value '%MW10'.
- Conversión:** A checkbox labeled 'Autorizar' is unchecked. Below it are two input fields labeled 'Min' and 'Máx'.
- Alarma:** A checkbox labeled 'Autorizar' is unchecked. Below it are two columns of input fields. The first column has fields labeled 'Baja' and 'Alta'. The second column has fields labeled 'Salida' and 'Salida'.

En la siguiente casilla, lo que se hace es ingresar los valores de las constantes calculadas para hacer el respectivo control, donde la consigna es el valor al que queremos estabilizar nuestro sistema, en este caso a 600 rpm, y también se configura el periodo de muestreo del PID

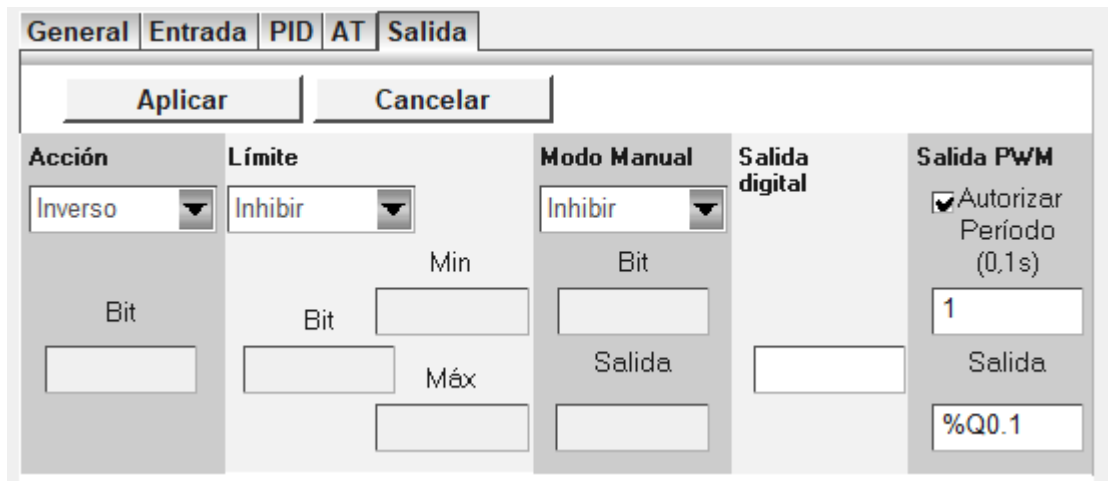
Figura 84. Ingreso de parámetros del PID.

The screenshot shows the same software interface but with the 'PID' tab selected. The 'Consigna' field now contains the value '600'. The 'Corrector tipo' field is a dropdown menu showing 'PID'. The 'Parámetros' section has three input fields: 'Kp (x 0,01)' with the value '724', 'Ti (x 0,1s)' with the value '0', and 'Td (x 0,1s)' with the value '0'. The 'Período de muestreo' section has an input field with the value '1' and the text '(10ms)' below it.

Para la salida queremos un PWM, en el cual se pueda hacer una variación en el ancho de pulso, con el respectivo control en la armadura, se selecciona una de las dos salidas a transistor que tiene autómatas (%Q0.0 y %Q0.1). El periodo del PWM

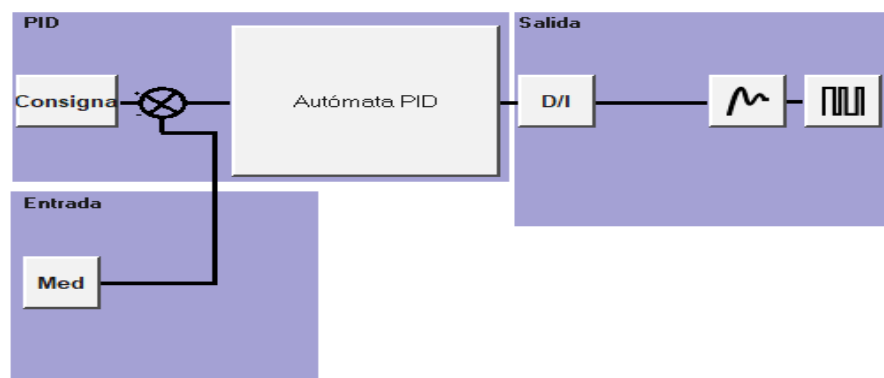
que tiene un valor comprendido entre 1 y 500, el cual se multiplica por una base de 0,1 segundos.

Figura 85. Configuración de la salida PWM del PID.



El esquema que nos representa como está actuando el controlador sobre nuestra planta es el siguiente:

Figura 86. Esquema de funcionamiento del PID

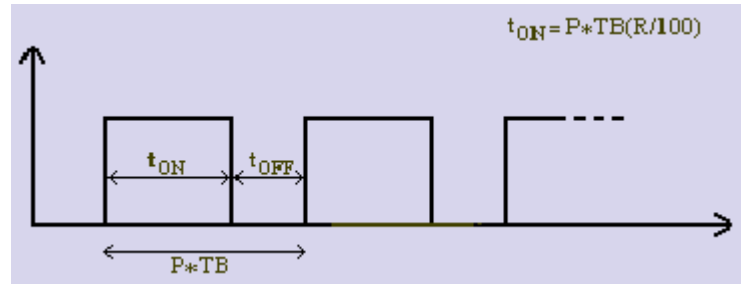


### Configuración del PWM

PWM es una función especial que se puede asignar a una salida. Esta señal rectangular tiene un período P constante (configurable por el usuario) y presenta la

posibilidad de variar el ancho de pulso TON y, por lo tanto, el ciclo de servicio (TON/P).

Figura 87. Ciclo de trabajo del PWM



Para nuestro caso se hicieron las siguientes elecciones, un tiempo de 0.142 ms y un valor de preselección de 10, por lo tanto, vamos a tener una frecuencia de 704Hz lo cual nos permitirá el trabajo normal del Mosfet, que va estar conectado a la salida %Q0.0 cómo se puede observar en la parte inferior de nuestro cuadro de diálogo.

Figura 88. Cuadro de configuración del PWM

<input type="button" value="Aplicar"/>		<input type="button" value="Cancelar"/>	
<b>Tipo PLS/PWM</b>		<b>Base de tiempo</b>	
<input type="radio"/> No utilizado	<input checked="" type="radio"/> 0,142 ms	Preselección	<input type="text" value="10"/>
<input type="radio"/> %PLS	<input type="radio"/> 0,57 ms	<input type="checkbox"/> Palabra doble	
<input checked="" type="radio"/> %PWM	<input type="radio"/> 10 ms	<input type="checkbox"/> Ajustable	
	<input type="radio"/> 1 s		
<b>Salida especializada</b>			
%Q0.0 = Salida de pulsos			