

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC, UTILIZANDO CONTROLADORES PID**

#### **TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA**

**QUIMBITA LASLUIA CARLOS DANIEL**

**[carlos.quimbita@epn.edu.ec](mailto:carlos.quimbita@epn.edu.ec)**

**SANDOVAL CALVACHI EDWIN RAMIRO**

**[edwin.sandoval@epn.edu.ec](mailto:edwin.sandoval@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: ING. CUENCA SÁNCHEZ ALAN DANIEL**

**[alan.cuenca@epn.edu.ec](mailto:alan.cuenca@epn.edu.ec)**

**CODIRECTOR: ING. ROMO HERRERA CARLOS ORLANDO**

**[carlos.romo@epn.edu.ec](mailto:carlos.romo@epn.edu.ec)**

**Quito, Diciembre 2018**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Sandoval Calvachi Edwin Ramiro y Quimbita Lasluisa Carlos Daniel declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Sandoval Calvachí Edwin Ramiro**

**CI: 171842607-3**

---

**Quimbita Lasluisa Carlos Daniel**

**CI: 172108028-9**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por, Sandoval Calvachi Edwin Ramiro y Quimbita Lasluisa Carlos Daniel bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. Alan Cuenca Sánchez**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. Carlos Romo Herrera**

**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
❖ Objetivo general .....	2
❖ Objetivos específicos .....	2
2. METODOLOGÍA.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	4
3.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD .....	4
❖ Motor de corriente continua (DC).....	4
❖ Sensor de velocidad (encoder) .....	5
❖ Módulo de salidas analógicas.....	6
3.2. DISEÑO DEL SISTEMA.....	7
3.3. CONSTRUCCIÓN .....	8
❖ Montaje de signal board en el módulo PLC S7-1200 .....	8
❖ Estructura principal .....	10
❖ Fuente de alimentación.....	10
❖ Circuito de acoplamiento para la señal de entrada .....	11
❖ Circuito de acoplamiento para señal de salida .....	14
❖ Cableado y señalética .....	23
3.4. ALGORITMO DE CONTROL E INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI)....	24
❖ Segmentos de programación del TIA Portal V.13 .....	24
❖ Interfaz Humano Máquina (HMI).....	27
3.5. PRUEBAS .....	28
❖ Conexión de red entre PLC y HMI .....	28
❖ Puesta en servicio del PID compact .....	29
❖ Funcionamiento del sistema de control de velocidad.....	31
❖ Sintonización del control proporcional (P).....	33

❖ Sintonización del control proporcional integral (PI).....	39
❖ Sintonización del control proporcional integral derivativo (PID).....	43
<b>3.6. RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
❖ Resultados del control proporcional (P).....	48
❖ Resultados del control proporcional integral (PI).....	48
❖ Resultados del control proporcional integral derivativo (PID).....	48
❖ Características dinámicas del sistema .....	49
<b>3.7. PRÁCTICAS.....</b>	<b>62</b>
❖ Práctica 1 .....	62
❖ Práctica 2 .....	64
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>68</b>
<b>5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>
❖ Especificaciones técnicas elementos del sistema.....	75
❖ Circuitos electrónicos.....	81
❖ Placas electrónicas.....	85
❖ Manual de usuario.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> Motor DC AmpFlow E30-150 .....	4
<b>Figura 3.2</b> Encoder E6B2-CWZ3E.....	5
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de conexión encoder E6B2-CWZ3E.....	6
<b>Figura 3.4</b> Signal Board 1232 .....	7
<b>Figura 3.5</b> Plano esquemático del sistema de control de velocidad .....	8
<b>Figura 3.6</b> Montaje de Signal Board en la CPU .....	8
<b>Figura 3.7</b> Signal Board conectada en el PLC .....	9
<b>Figura 3.8</b> Cableado de la Signal Board .....	9
<b>Figura 3.9</b> Construcción de la estructura principal .....	10
<b>Figura 3.10</b> Fuente de alimentación .....	11
<b>Figura 3.11</b> Circuito de control de la fuente de alimentación.....	11
<b>Figura 3.12</b> Señal de pulsos original (A) y amplificada (B).....	12
<b>Figura 3.13</b> Placa de acoplamiento de la señal de entrada .....	13
<b>Figura 3.14</b> Señal de pulsos amplificada .....	14
<b>Figura 3.15</b> Circuito de potencia .....	14
<b>Figura 3.16</b> Circuito generador de la señal triangular .....	16
<b>Figura 3.17</b> Circuito generador de tren de pulsos y señal triangular .....	17
<b>Figura 3.18</b> Circuito amplificador diferencial .....	17
<b>Figura 3.19</b> Señal restada (rojo). .....	18
<b>Figura 3.20</b> Circuito seguidor de voltaje.....	18
<b>Figura 3.21</b> Comparador y seguidor de voltaje. ....	19
<b>Figura 3.22</b> Resultados del comparador PWM 80% .....	20
<b>Figura 3.23</b> Resultados del comparador PWM 20% .....	20
<b>Figura 3.24</b> Señal Analógica aproximadamente 5 [V] .....	21
<b>Figura 3.25</b> Valor mínimo de señal analógica. ....	22
<b>Figura 3.26</b> Señal analógica cercana a 10 [V] .....	22
<b>Figura 3.27</b> Placa de circuito impreso de potencia .....	23
<b>Figura 3.28</b> Sistemas de control de velocidad terminados .....	23
<b>Figura 3.29</b> Cableado del Signal Board y motor DC .....	24

<b>Figura 3.30</b> Variables del PLC.....	25
<b>Figura 3.31</b> Configuración del contador rápido .....	25
<b>Figura 3.32</b> Conversión de la señal de entrada .....	26
<b>Figura 3.33</b> Bloque de interrupción cíclica .....	26
<b>Figura 3.34</b> Escalamiento y normalizado de la señal.....	27
<b>Figura 3.35</b> Pantalla HMI .....	28
<b>Figura 3.36</b> Dirección IP de la CPU .....	28
<b>Figura 3.37</b> Dirección IP del PLC.....	29
<b>Figura 3.38</b> Conexión online PLC y PC .....	29
<b>Figura 3.39</b> Puesta en servicio del PID Compact.....	30
<b>Figura 3.40</b> Sistema optimizado .....	30
<b>Figura 3.41</b> Conexión cable Ethernet .....	31
<b>Figura 3.42</b> Sistema control de velocidad de un motor DC en funcionamiento .....	32
<b>Figura 3.43</b> Diagrama de entradas y salidas (I/O) al PLC.....	32
<b>Figura 3.44</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.007$ a 2000 rpm .....	34
<b>Figura 3.45</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.025$ a 2000 rpm .....	35
<b>Figura 3.46</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.040$ a 2000 rpm .....	35
<b>Figura 3.47</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.007$ a 3500 rpm .....	36
<b>Figura 3.48</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.025$ a 3500 rpm .....	36
<b>Figura 3.49</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.040$ a 3500 rpm .....	37
<b>Figura 3.50</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.007$ a 5000 rpm .....	37
<b>Figura 3.51</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.025$ a 5000 rpm .....	38
<b>Figura 3.52</b> Control proporcional (P) con $K_p= 0.040$ a 5000 rpm .....	38
<b>Figura 3.53</b> Control (PI) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.50\text{seg}$ a 2000 rpm .....	40
<b>Figura 3.54</b> Control (PI) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ a 2000 rpm .....	41
<b>Figura 3.55</b> Control (PI) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.50\text{seg}$ a 3500 rpm .....	41
<b>Figura 3.56</b> Control (PI) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ a 2000 rpm .....	42
<b>Figura 3.57</b> Control (PI) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.50\text{seg}$ a 5000 rpm .....	42
<b>Figura 3.58</b> Control (PI) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ a 5000 rpm .....	43
<b>Figura 3.59</b> Control (PID) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ y $T_d= 0.10\text{seg}$ a 2000 rpm..	45
<b>Figura 3.60</b> Control (PID) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ y $T_d= 0.20\text{seg}$ a 2000 rpm..	45
<b>Figura 3.61</b> Control (PID) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ y $T_d= 0.10\text{seg}$ a 3500 rpm..	46

<b>Figura 3.62</b> Control (PID) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ y $T_d= 0.20\text{seg}$ a 3500 rpm ..	46
<b>Figura 3.63</b> Control (PID) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ y $T_d= 0.10\text{seg}$ a 5000 rpm. .	47
<b>Figura 3.64</b> Control (PID) con $K_p= 0.006$ , $T_i= 0.90\text{seg}$ y $T_d= 0.20\text{seg}$ a 5000 rpm ..	47
<b>Figura 3.65</b> Características dinámicas del sistema .....	49
<b>Figura 3.66</b> Características dinámicas del control (P) .....	50
<b>Figura 3.67</b> Características dinámicas del control (PI) .....	54
<b>Figura 3.68</b> Características dinámicas del control (PID) .....	58

### ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Características técnicas del motor DC .....	5
<b>Tabla 3.2</b> Relación entre voltaje, frecuencia y RPM .....	12
<b>Tabla 3.3</b> Relación de voltaje, frecuencia reducida y RPM .....	13
<b>Tabla 3.4</b> Especificaciones técnicas del circuito de acoplamiento .....	15
<b>Tabla 3.5</b> Control proporcional (P) a 5000 rpm .....	53
<b>Tabla 3.6</b> Control proporcional integral (PI) a 5000 rpm .....	57
<b>Tabla 3.7</b> Control proporcional integral derivativo (PID) a 5000 rpm .....	61

## RESUMEN

En el presente proyecto se diseñan y se construyen dos sistemas didácticos, que permite controlar la velocidad de un motor de corriente continua (DC), mediante un Controlador Lógico Programable (PLC).

Se desarrollará una Interfaz Humano Máquina (HMI), para controlar, monitorear, y manipular los parámetros PID.

A continuación, se describe el contenido de los cuatro capítulos que contiene el presente proyecto:

El capítulo uno, Introducción contiene aspectos generales como el planteamiento del problema, justificación, el objetivo general y específicos.

El capítulo dos, Metodología, describe los tipos de investigación y recursos técnicos utilizados para desarrollar el proyecto integrador.

El capítulo tres, Resultados y Discusión, contiene el diseño del sistema de control de velocidad de un motor DC, además de los Algoritmos e Interfaz Humano Máquina (HMI), necesario para el funcionamiento del sistema. En esta sección se incluye pruebas de funcionamiento a base del método prueba y error.

Por último, en el capítulo cuatro se incluyen las conclusiones y recomendaciones.

Palabras claves: Control de velocidad, Motor DC, PLC S7-1200, TIA PORTAL V.13 Siemens, PID.

## ABSTRACT

*In the present project two didactic systems are designed and built, which allows to control the speed of a direct current (DC) motor, by means of a Programmable Logic Controller (PLC).*

*A Human Machine Interface (HMI) will be developed to control, monitor, and manipulate the PID parameters.*

*Next, the content of the four chapters contained in the present project is described: Chapter one, Introduction contains general aspects such as the approach to the problem, justification, the general and specific objective.*

*Chapter two, Methodology, describes the types of research and technical resources used to develop the integrating project.*

*Chapter three, Results and Discussion, contains the design of the speed control system of a DC motor, in addition to the Algorithms and Human Machine Interface (HMI), necessary for the operation of the system. This section includes performance tests based on the test and error method.*

*Finally, chapter four includes conclusions and recommendations.*

*Keywords: Speed control, DC motor, PLC S7-1200, TIA PORTAL V.13 Siemens, and PID.*

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el periodo actual se está realizando la implementación del Laboratorio de Control de procesos industriales en la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT), esto permitirá que los estudiantes de la carrera de Tecnología Electromecánica se relacionen con los dispositivos de control que se utilice en la automatización de procesos, sin embargo en los módulos que se ha implementado dispone de Entradas Analógicas y Digitales, pero sólo está provisto con salidas digitales y no dispone de salidas analógicas por lo que sólo podrá realizar prácticas orientadas al control discreto y secuencial.

En gran parte del sector industrial, existen procesos que requieren de un control continuo, debido a esto es necesario que el estudiante tenga conocimiento del manejo de las Salidas Analógicas de un (PLC), para poder diseñar y ejecutar prácticas de laboratorio orientadas al Control Proporcional, Integral y Derivativo de los procesos, y así pueda consolidar y complementar los fundamentos teóricos. [1] Además, el laboratorio no dispone de sistemas de control de velocidad, por esta razón a través del presente proyecto de titulación se pretende añadir, al laboratorio con módulos de salidas analógicas y sistemas de control de velocidad.

El control de velocidad en lazo cerrado de los motores (DC), permite garantizar el funcionamiento y la confiabilidad de los procesos, manteniendo constante la velocidad de manera automática ante variaciones de la carga. En la industria este tipo de controles son muy utilizados para mejorar la estabilidad de los mismos, por ende, el estudiante requiere realizar prácticas de laboratorio con actuadores que admita mando analógico y permita realizar funciones de regulación y control de procesos continuos. [2]

Para que el estudiante pueda aumentar los conocimientos teóricos necesita manejar los dispositivos utilizados en el campo industrial. Es importante que el laboratorio cuente con sistemas para poder realizar simulaciones del control (PID), en este caso, de velocidad, y así el estudiante pueda observar el comportamiento del proceso y de los controladores utilizando salidas analógicas. [3]

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Si bien la mayor parte de las aplicaciones de los controladores programables están orientadas al control discreto y secuencial, cuando en su arquitectura de hardware se incorpora módulos de entradas y salidas analógicas, su campo de aplicación se extiende al control continuo y de lazo cerrado, por esta razón se propone añadir dos módulos de salidas analógicas Signal Board, para que el instructor de laboratorio pueda dar a conocer al estudiante todas las aplicaciones que tienen los( PLC's) en la automatización de procesos, con esta implementación el estudiante podrá realizar prácticas orientadas al Control Proporcional, Integral y Derivativo de los procesos, en este caso de velocidad. [4]

Para complementar el laboratorio de control industrial de la ESFOT, también se diseñarán y construirán dos sistemas de control de velocidad, dichos sistemas constará de un motor DC y un sensor (ENCODER) que permitirán realizar un control continuo de la velocidad.

Al realizar prácticas de Control Proporcional, Integral y Derivativo de velocidad, los estudiantes de la carrera de Tecnología Electromecánica comprenderán cómo una señal analógica, a través de un algoritmo de control, permite manejar una tensión como referencia de mando, para actuadores que admita mando analógico. [5]

Se utilizarán algoritmos de control para que la velocidad del sistema sea controlada bajo los parámetros de un Control Proporcional (P), un Control Proporcional Integral (PI) y un Control Proporcional Integral y Derivativo (PID), con la finalidad de realizar una comparación entre los controles antes mencionados y determinar cuál es la mejor acción de control. Al final se elaborarán dos prácticas orientadas al control continuo de la velocidad de un motor DC. [6]

## **1.3. OBJETIVOS**

### **❖ OBJETIVO GENERAL**

- Controlar la velocidad de un motor DC utilizando controladores PID.

### **❖ OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los requerimientos de diseño del sistema de control de velocidad.
- Diseñar el sistema de control continuo de velocidad.

- Construir el sistema de control de velocidad utilizando un motor DC y un encoder.
- Utilizar algoritmos de control PID y una Interfaz Humano Máquina (HMI).
- Elaborar dos prácticas orientadas al control continuo de la velocidad.

## 2. METODOLOGÍA

Para la realización del presente proyecto integrador es necesaria la recopilación de datos de sistemas didácticos de control de velocidad a través de controladores PID, por lo tanto, se utiliza la investigación exploratoria que permite adquirir y reunir toda la información necesaria para la correcta realización del proyecto.

Una vez que se disponen de todos los datos e información necesarios, se utiliza la investigación aplicada, ya que el proyecto es de implementación, además se utilizan todos los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de tecnología en Electromecánica.

Los principales requerimientos para la construcción de un sistema de control de velocidad son un motor DC, un encoder (sensor de velocidad) y un Signal Board, el cual proporcionará una señal analógica de voltaje que permitirá regular la velocidad del motor. Una vez determinados los requerimientos del sistema se diseñará el respectivo plano esquemático que permitirá la correcta construcción del mismo.

Se añadirá un módulo de salida para señales analógicas (Signal Board) en dos de los PLC's del Laboratorio de Control Industrial y en base al plano establecido y cumpliendo con normas técnicas se construirán dos sistemas para el control de velocidad.

Se desarrollarán los algoritmos de control utilizando el software PORTAL TIA V.13 Siemens para observar las respuestas del sistema bajo las diferentes acciones de control, para esto se realizará una comparación entre el Control Proporcional (P), el Control Proporcional Integral (PI) y el Control Proporcional Integral Derivativo (PID), con el fin de determinar cuál es la mejor acción de control para mantener estable la velocidad de un motor DC cuando esté sometido a diferentes perturbaciones. [8]

Para monitorear el comportamiento del sistema se diseñará una Interfaz Humano Máquina (HMI), que mostrará cada acción de control. Una vez diseñada la interfaz

se realizará el montaje y la comunicación entre el sistema de control de velocidad y el PLC, para posteriormente, utilizar los respectivos algoritmos de control.

Se llevarán a cabo las pruebas de funcionamiento y se elaborarán dos hojas guías, que servirán como herramienta para que el estudiante pueda manejar el sistema al momento de realizar prácticas de control industrial.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD**

Para este Proyecto Integrador se ha propuesto diseñar y construir dos sistemas para el control de velocidad en lazo cerrado. Al realizar un estudio del funcionamiento del sistema y de los recursos que dispone el Laboratorio de Control Industrial de la ESFOT se determina que los principales requerimientos para la implementación del Sistema de Control de Velocidad son: Motor DC, Sensor (encoder) y Módulo de Salida Analógica.

##### **❖ MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA (DC)**



**Figura 3.1** Motor DC AmpFlow E30-150

Para cumplir con los requerimientos del sistema se utiliza un motor DC de la marca AmpFlow E30 –150, el cual se puede observar en la figura 3.1, ya que dispone de un amplio rango de funcionamiento en cuanto a RPM (revoluciones por minuto), además es económico y muy robusto lo que garantiza una vida útil prolongada. Las RPM son

proporcionales a la tensión, esto permite controlar su velocidad con una señal analógica de voltaje. Los datos técnicos se detallan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Características técnicas del motor DC

<b>MOTOR DC AMPFLOW</b>	
<b>MODELO</b>	<b>E30-150</b>
Voltaje nominal	24 [V]
Diámetro (pulg)	3.1
Longitud total (pulg)	7
RPM@24 [V]	5600
Corriente sin carga	2.1 [A]

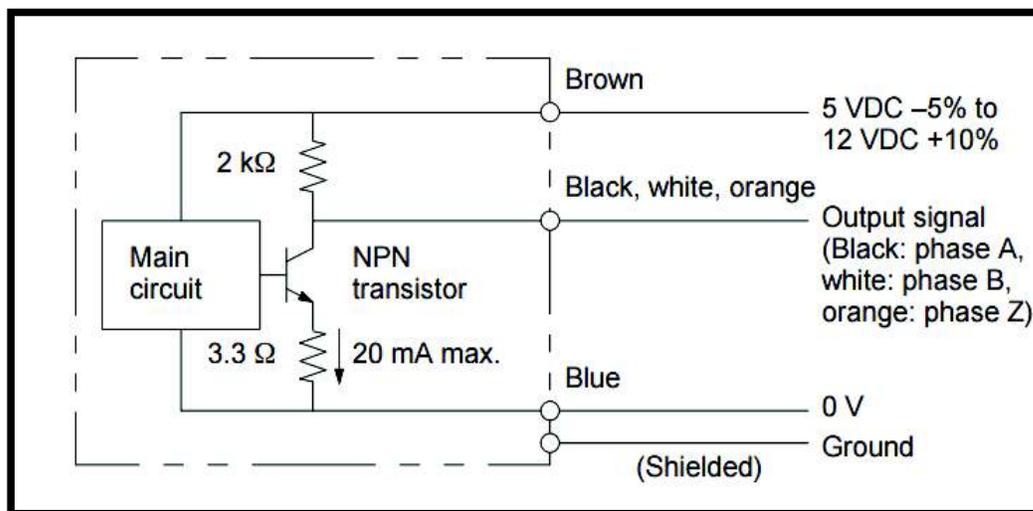
❖ **SENSOR DE VELOCIDAD (Encoder)**



**Figura 3.2** Encoder E6B2-CWZ3E

Para determinar las RPM del motor DC durante el proceso se requiere de un sensor de velocidad (encoder), que es un codificador rotatorio que transforma la posición angular de un eje a un código digital, que lo convierte en una clase de transductor. Este sensor (figura 3.2) necesita un voltaje de alimentación de 5 a 12 [V] DC, además tiene una resolución de 1024 pulsos por revolución y ofrece 3 canales de salida, el

diagrama de conexión se muestra en la figura 3.3. Para más especificaciones técnicas revisar Anexo A Tabla A.1.



**Figura 3.3** Diagrama de conexión encoder E6B2-CWZ3E

El diagrama de conexiones del encoder E6B2-CWZ3E indica que la alimentación se realiza por el terminal de color café con 5 [V] DC mientras que la señal de salida se obtiene en la fase A (color negro), fase B (color blanco) y fase Z de (color naranja) por último el terminal azul es tierra con un voltaje 0 [V].

#### ❖ MÓDULO DE SALIDAS ANALÓGICAS

La velocidad del motor DC se regula variando el voltaje de alimentación en sus polos, debido a esto se requiere de una señal analógica de voltaje para controlar la velocidad del sistema. A diferencia de una señal binaria que solo puede adoptar los estados de señal “Tensión presente” y “Tensión no presente”, la señal analógica puede adoptar cualquier valor dentro de un rango determinado. Por tal motivo se utiliza un módulo de salida analógica Signal Board, (figura 3.4) que proporciona una señal de tensión con un rango de  $\pm 10$  [V] DC (para más especificaciones técnicas ver Anexo A Tabla A.2). Este módulo se añadirá al PLC S7-1200 de SIEMENS.

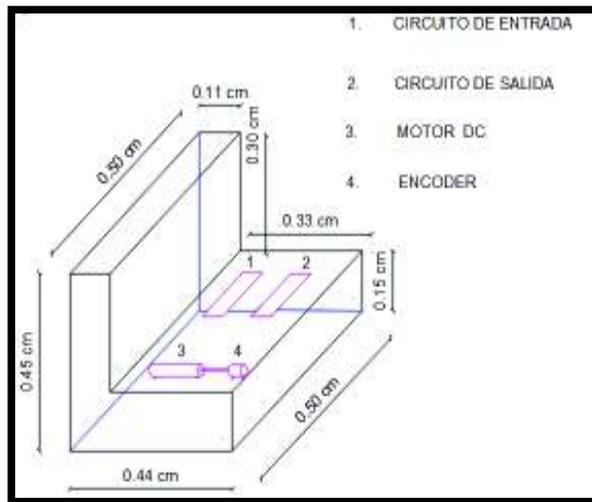


**Figura 3.4** Signal Board 1232

La Signal Board SB 1232 de salida analógica, ofrece la posibilidad de utilizar salidas analógicas, permitiendo una conexión directa de actuadores.

### **3.2. DISEÑO DEL SISTEMA**

Para brindar una fácil integración entre el sistema de control de velocidad y el módulo PLC S7-1200, se determina que la estructura principal debe tener una forma de “L”, con las dimensiones en función de las mesas de trabajo del laboratorio. Además, se debe tener en cuenta que se disponga del suficiente espacio para alojar un motor DC, un encoder, una fuente de alimentación y dos circuitos de acoplamiento, necesarios para el acondicionamiento, tanto de la señal de pulsos enviada por el sensor de velocidad como de la señal analógica de voltaje que proporciona el Signal Board. Las dimensiones de la estructura se detallan en el plano esquemático de la figura 3.5.

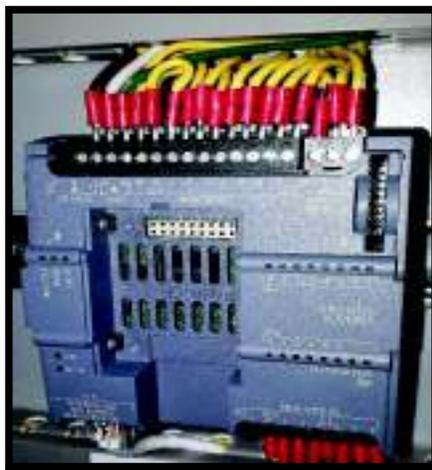


**Figura 3.5** Plano esquemático del sistema de control de velocidad

### 3.3. CONSTRUCCIÓN

#### ❖ MONTAJE DE SIGNAL BOARD EN EL MÓDULO PLC S7-1200

Para el montaje del Signal Board se prepara la CPU desconectando la alimentación y retirando las cubiertas superior e inferior de los terminales de Entradas y Salidas del PLC. Posteriormente se inserta un destornillador en la ranura superior de la CPU en el lado posterior de la tapa y se hace palanca suavemente para retirar la protección donde se instala el Signal Board, como se muestra en la figura 3.6.

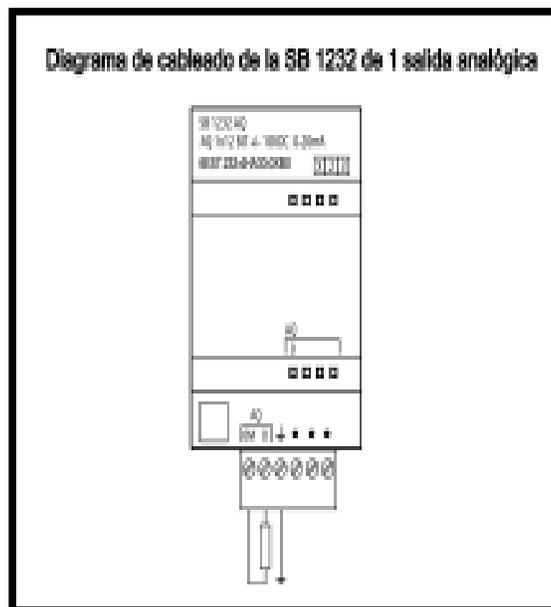


**Figura 3.6** Montaje de Signal Board en la CPU

Posteriormente, se coloca el Signal Board en el lado superior de la CPU y se presiona hasta que encaje en su posición como se muestra en la figura 3.7. Finalmente, se realiza el cableado desde los terminales del Signal Board hasta los terminales de la parte frontal del módulo PLC. El diagrama de cableado y el montaje final en el PLC, se muestran en la figura 3.8.



**Figura 3.7** Signal Board conectada en el PLC



**Figura 3.8** Cableado de la Signal Board

### ❖ ESTRUCTURA PRINCIPAL

En base al plano esquemático de la figura 3.5 se construye una estructura para alojar todos los elementos que componen el sistema de control de velocidad los cuales son: motor DC, encoder, circuitos de acoplamiento y borneras. La estructura es de madera lacada de 2 cm de espesor para que pueda soportar el montaje, funcionamiento y manipulación de los componentes del sistema como se muestra en la figura 3.9.



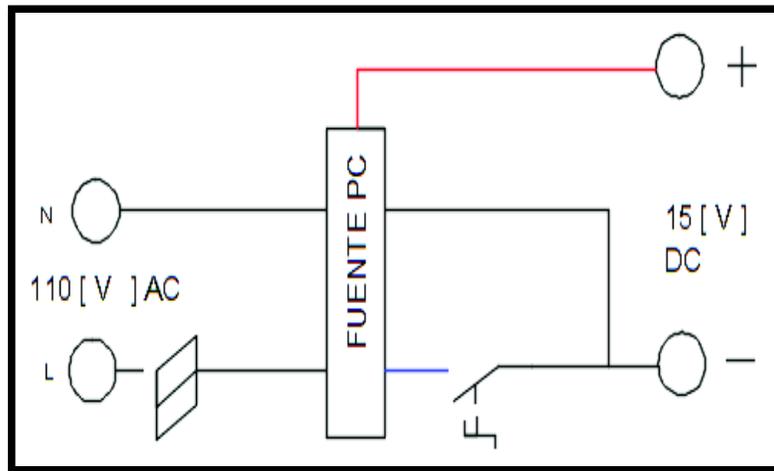
**Figura 3.9** Construcción de la estructura principal

### ❖ FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para la alimentación del sistema de control de velocidad se utiliza una fuente de computadora (figura 3.10), dicha fuente se energiza con 110 [V] AC, y provee diferentes niveles de voltaje. Para alimentar el sistema de control de velocidad propuesto se toma un voltaje de 15 [V] DC, además se utiliza un interruptor para activar y desactivar la fuente permitiendo encender el sistema tal como se muestra en la figura 3.11.



**Figura 3.10** Fuente de alimentación

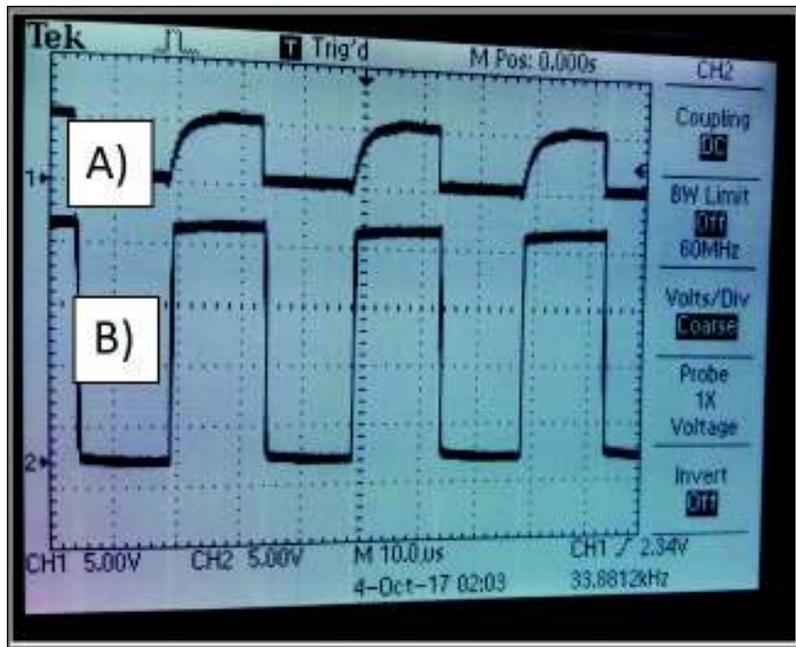


**Figura 3.11** Circuito de control de la fuente de alimentación

El circuito de control de la fuente de alimentación del sistema contiene una entrada de 110 [V] AC y una salida de 15 [V] DC la misma que se utilizará para la alimentación del circuito de entrada.

#### ❖ **CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO PARA LA SEÑAL DE ENTRADA**

La señal transmitida por el sensor de velocidad (encoder) al módulo PLC es de tipo pulso de alta frecuencia 5 [V] DC y 34 KHz (figura 3.12 A). Al revisar los datos técnicos del PLC S7-1200 se determina que la alimentación del sensor debe tener un rango de tensión de 20.4 a 28.4 [V] DC (Ver Anexo A Tabla A.3), por lo que se requiere amplificar la señal de pulsos de 5 a 24 [V] DC (figura 3.12 B). En la Tabla 3.2 se muestra la relación entre voltaje, frecuencia y RPM.



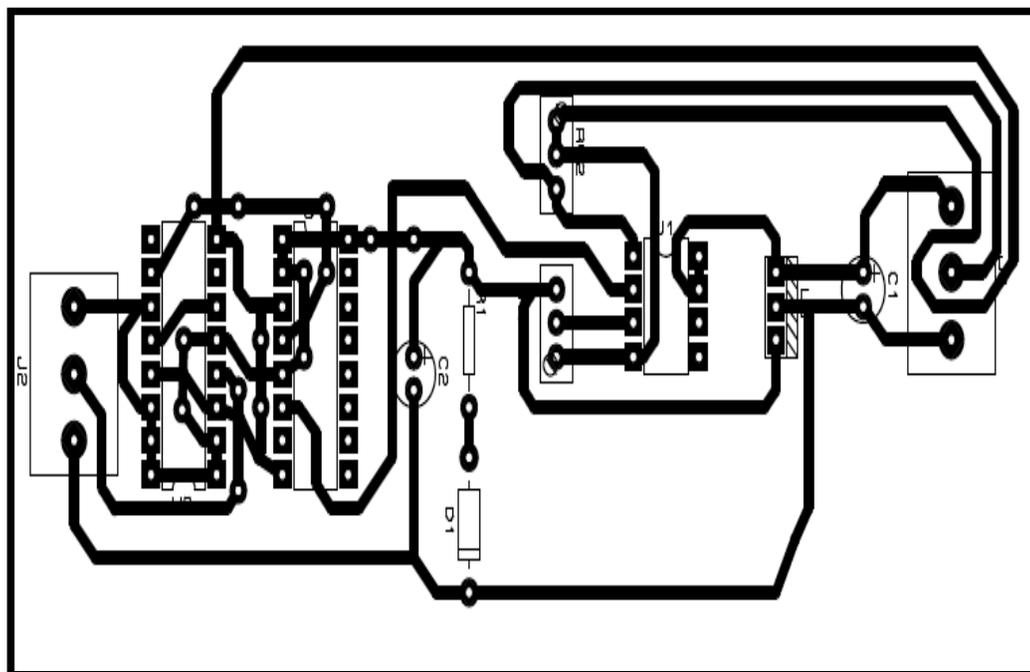
**Figura 3.12** Señal de pulsos original (A) y amplificada (B)

**Tabla 3.2** Relación entre voltaje, frecuencia y RPM

VOLTAJE (V)	FRECUENCIA (KHZ)	RPM
24	90	5600
15	60	3500
8.5	34	2000
0	0	0

La fuente utilizada alimenta al sistema con 15 [V] DC máx, esto proporciona un rango de control de [2000-5000] RPM. Se diseña un circuito para amplificar la señal de pulsos de 5 a 24 [V] DC, y a su vez para reducir la frecuencia en 1/8 (Ver Anexo B, lámina B.1). Al reducir la frecuencia se utiliza el número de pulsos (frecuencia) como RPM, para aumentar el rango de control y realizar un ajuste más fino del proceso, esta

nueva relación se muestra en la Tabla 3.3. Una vez diseñado el circuito se realiza la placa impresa que se muestra en la figura 3.13.

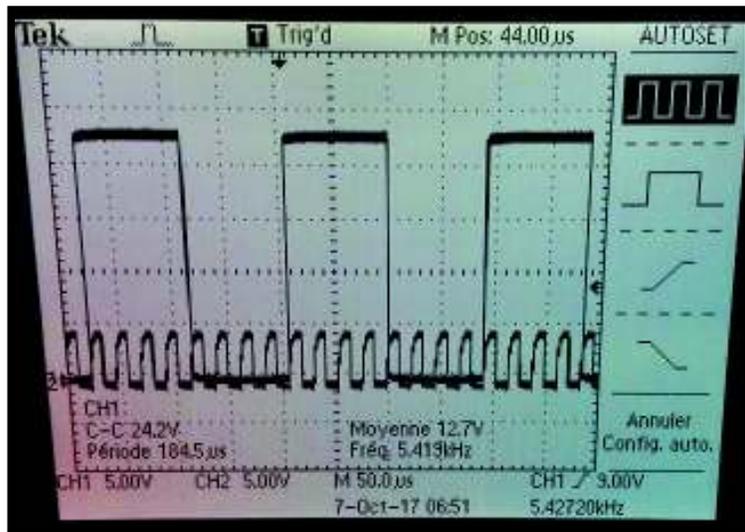


**Figura 3.13** Placa de acoplamiento de la señal de entrada

**Tabla 3.3** Relación de voltaje, frecuencia reducida y RPM

VOLTAJE (V)	FRECUENCIA (KHz) /8	RPM
15	7.5	7500
11	5.4	5400
0	0	0

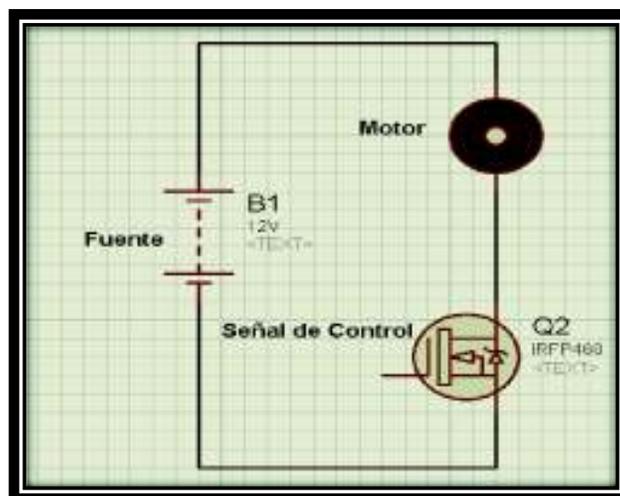
Finalmente, se construye la placa del circuito de entrada (Ver Anexo C, lámina C.1), para comprobar su funcionamiento se visualiza la señal en el osciloscopio como se muestra en la figura 3.14.



**Figura 3.14** Señal de pulsos amplificada

❖ **CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO PARA SEÑAL DE SALIDA**

Para realizar el control de velocidad del motor DC mediante la señal analógica que proporciona el módulo PLC, se necesita diseñar un circuito de acoplamiento que permita regular el voltaje utilizando una fuente de voltaje externa de 15 [V] DC que suministre una corriente de 1.2 [A] necesaria para arrancar el motor DC. (Ver Anexo B, lámina B.2). El circuito de potencia se muestra en la figura 3.15.



**Figura 3.15** Circuito de potencia

**Tabla 3.4** Especificaciones técnicas del circuito de acoplamiento

<b>Especificaciones técnicas del circuito de acoplamiento para la señal de salida</b>	
Fuente:	15 V máx.
Motor:	3 A
Mosfet:	Soporta por lo menos 2A, por lo tanto, se utiliza el Mosfet IRFP460 que soporta 15 A.

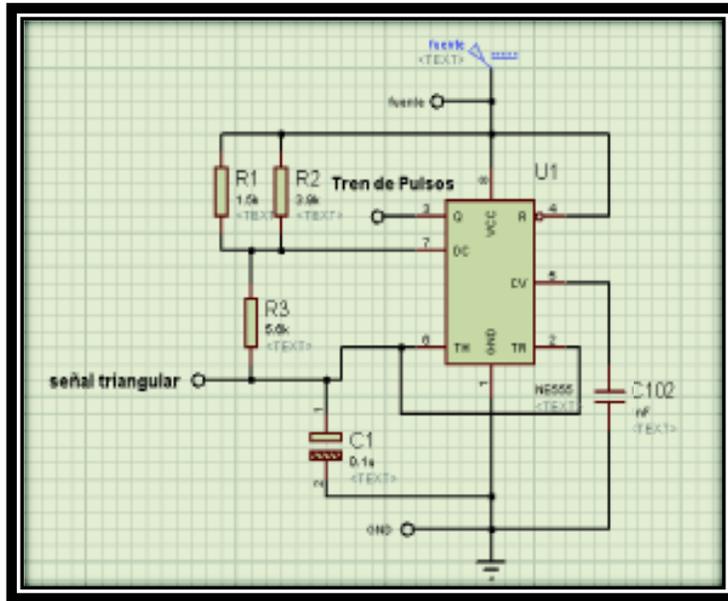
Para el correcto funcionamiento del circuito de acoplamiento la señal de salida se requiere de una fuente externa de 12 [V] DC a 15 [V] DC, este es el voltaje proporcionado por la fuente de una CPU. El motor DC que se utiliza, arranca con una corriente mínima de 1.2 [A] y trabaja a una carga nominal de hasta 3 [A] de corriente como se muestra en la Tabla 3.4. Para manejar una señal PWM, se requiere la utilización de un mosfet que al menos soporte 2 [A] de corriente.

- **SEÑAL DE CONTROL**

Debido a que se tiene una señal analógica, esta se compara con una señal triangular para así obtener una señal PWM que controle la activación del Mosfet y con esto controlar la velocidad del Motor DC.

- **GENERADOR DE LA SEÑAL TRIANGULAR**

Para la generación de la señal triangular se utiliza el Timer NE 555 como se muestra en la figura 3.16.



**Figura 3.16** Circuito generador de la señal triangular

Se genera un tren de pulsos con ancho de pulso entre 50% y 60%, esta señal se obtiene en el PIN 3 del Timer, mientras que la señal triangular se obtiene en el PIN 6 que corresponde a la carga y descarga del capacitor, como se indica en la figura 3.17. Para realizar los cálculos de frecuencia del tren de pulsos se utiliza la Expresión 3.1.

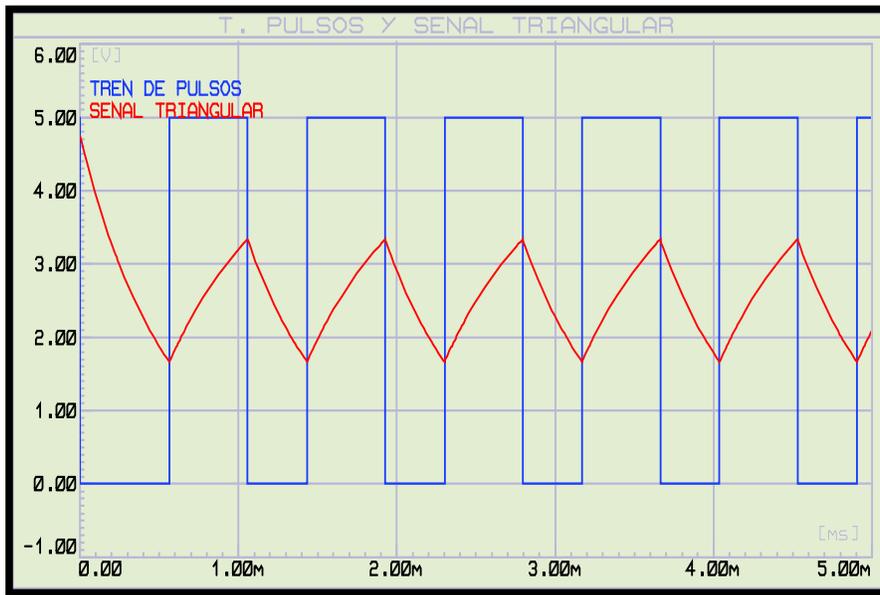
$$f = \frac{1.44}{(R1 \parallel R2 + 2R3) * C} \quad \text{Expresión 3.1}$$

$$R1 = 1.5k\Omega, R2 = 3.9k\Omega, R3 = 5.6k\Omega$$

$f = 1500\text{Hz}$  se debe trabajar con frecuencias mayores a 900 Hz

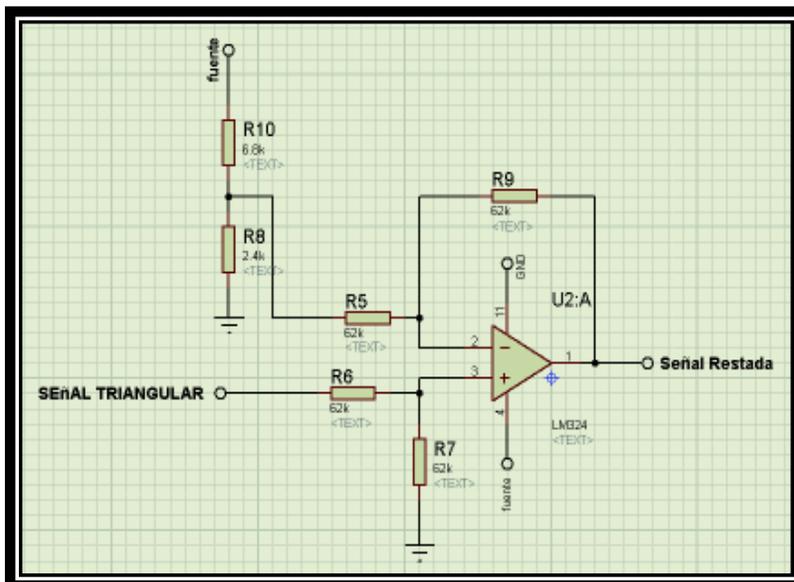
$$C = \frac{1.44}{(1.5k\Omega \parallel 3.9k\Omega + 2 * 5.6k\Omega) * 1500\text{Hz}}$$

$$C = 0.15\mu \approx 0.1\mu F$$



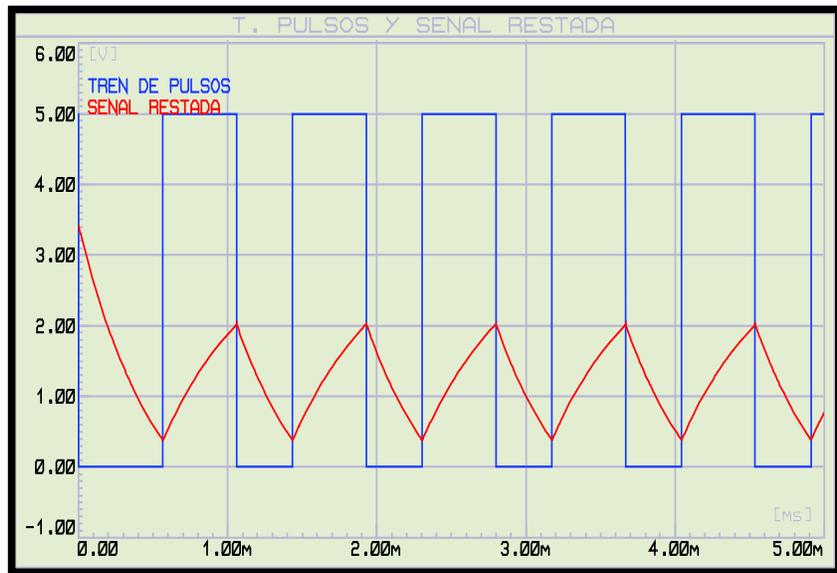
**Figura 3.17** Circuito generador de tren de pulsos y señal triangular

Como se puede observar se tiene una señal triangular con un valor de offset, el mismo que procede a realizar la resta, se utiliza un amplificador operacional en configuración restador no inversor, como se indica en la figura 3.18. Amplificando la señal de 5 [V] DC a 24 [V] DC.



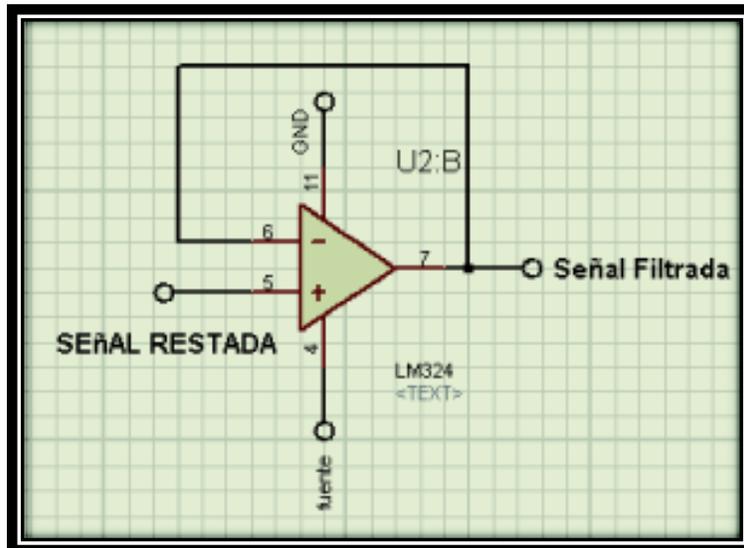
**Figura 3.18** Circuito amplificador diferencial

Con estas consideraciones se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3.19.



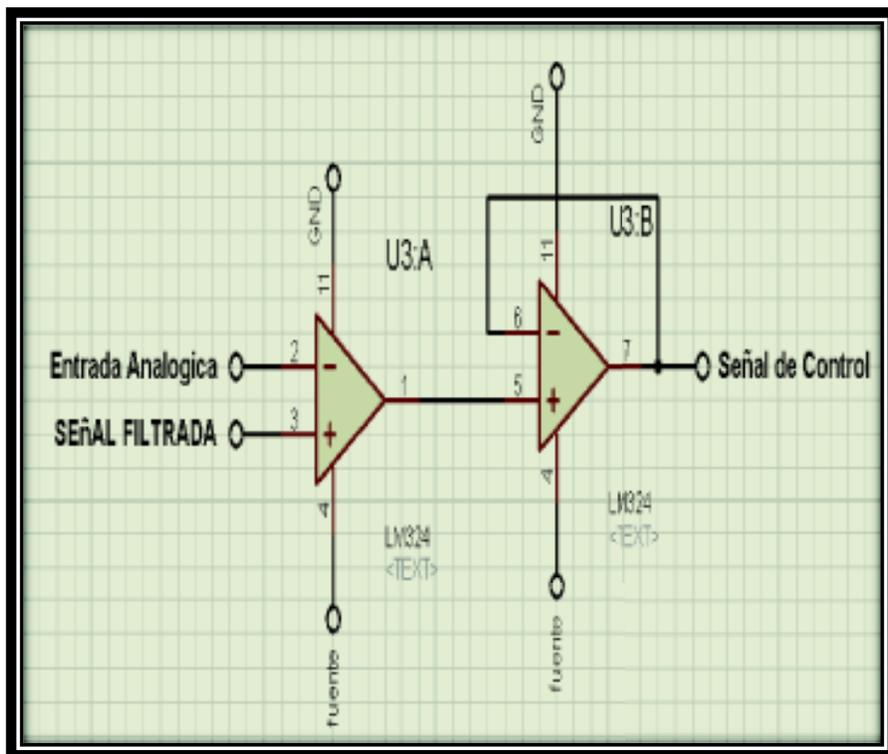
**Figura 3.19** Señal restada (rojo).

Para la siguiente etapa del circuito de salida se realiza un seguidor de voltaje con el propósito de obtener una señal filtrada más robusta, el circuito correspondiente se muestra en la figura 3.20.



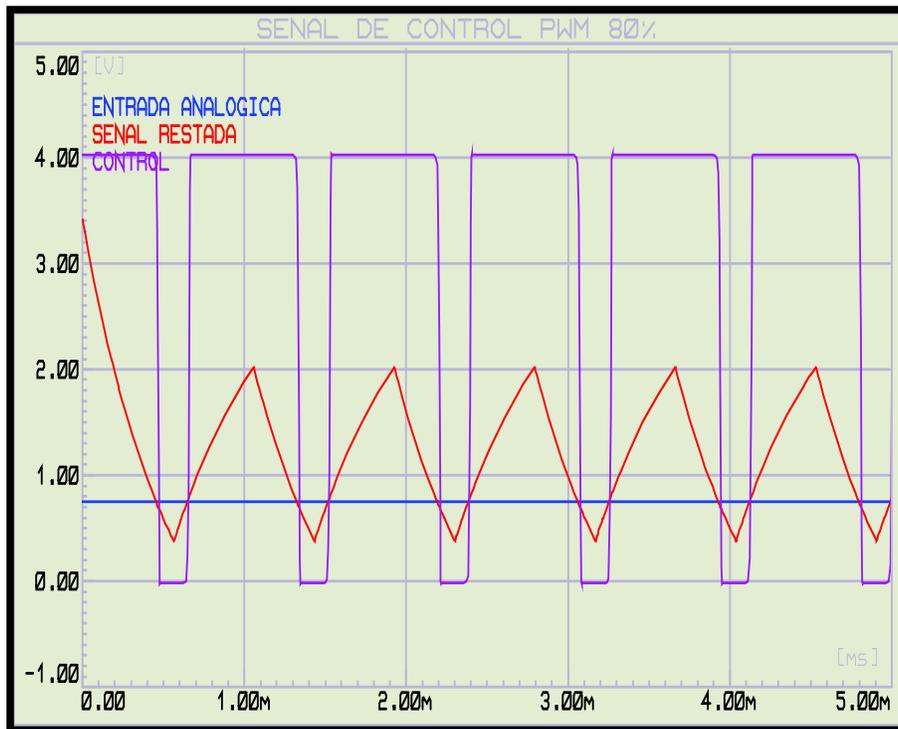
**Figura 3.20** Circuito seguidor de voltaje

Como última etapa se utiliza un amplificador operacional para comparar la Señal Filtrada con la Señal Analógica de tensión que proporciona el Signal Board, consiguiendo así una señal PWM para el control del Mosfet de Potencia, además se implementa un seguidor de voltaje para obtener una señal filtrada como indica la figura 3.21.

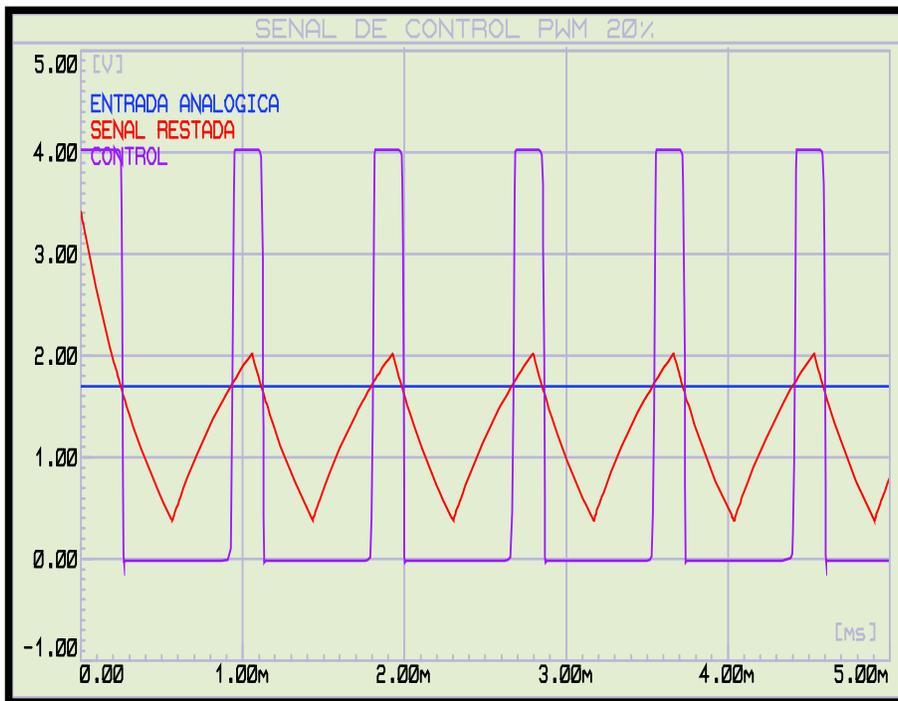


**Figura 3.21** Comparador y seguidor de voltaje.

El circuito proporcionará una señal de control que operará de la siguiente manera: Cuando la señal filtrada es mayor a la señal analógica de voltaje [V] DC, la señal de control, es de la fuente y cuando el valor de la señal filtrada sea menor que la señal analógica de voltaje DC, la señal de control es un valor de 0 (cero), con lo que se obtiene una señal PWM para el control de la velocidad del motor, como se muestra en las figuras 3.22 y 3.23.

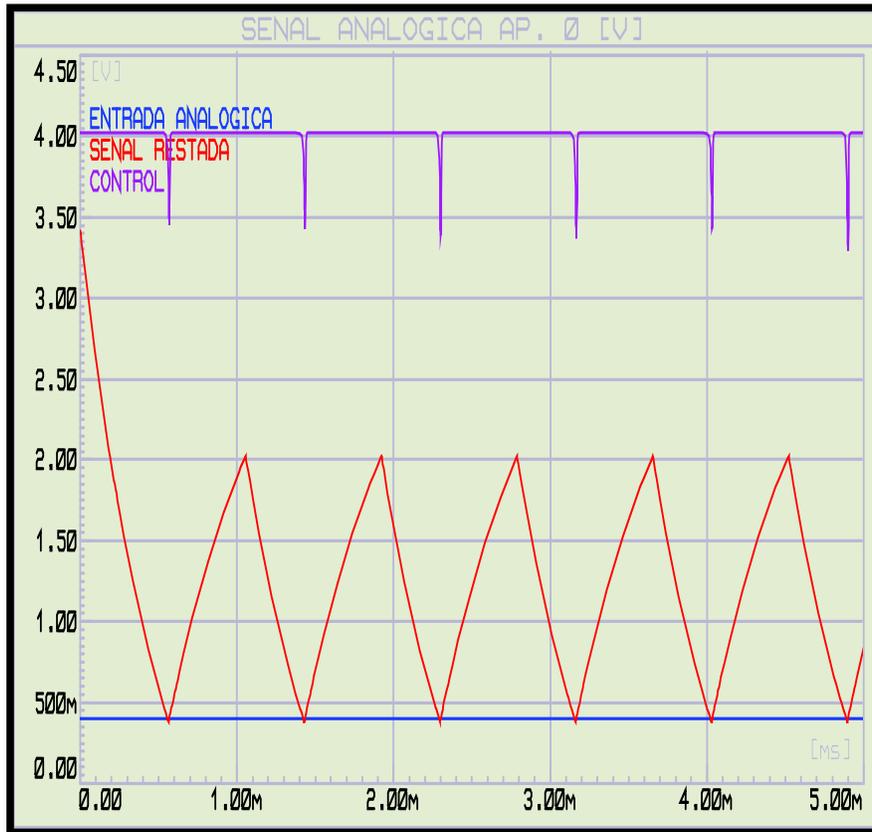


**Figura 3.22** Resultados del comparador PWM 80%



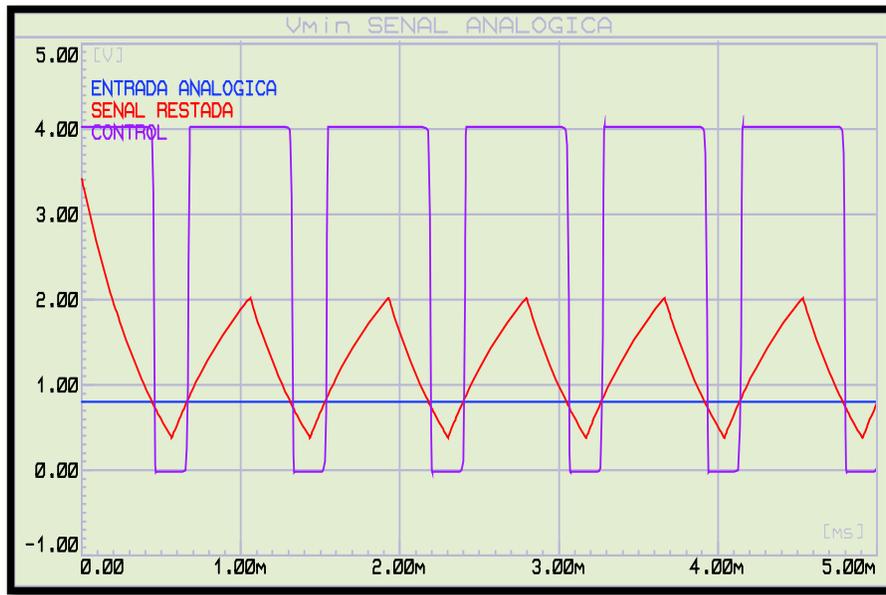
**Figura 3.23** Resultados del comparador PWM 20%

El control del motor DC es de la siguiente manera, si la señal analógica entrega un valor de cero, eso quiere decir que toda la señal triangular es mayor, por lo que, se tendrá una PWM con relación del 100% o un aproximado al 100% lo que significa un valor de velocidad máxima del motor como se muestra en la figura 3.24.



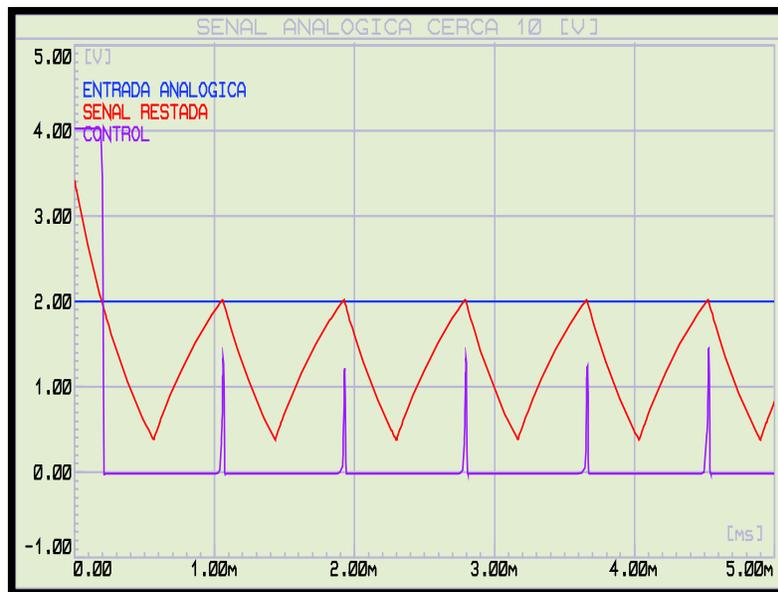
**Figura 3.24** Señal Analógica aproximadamente 0 [V]

Sin embargo, si el valor de la señal analógica va aumentando, la relación de trabajo va disminuyendo, debido a que va a existir un mayor número de puntos de la señal filtrada. Si el valor de la señal analógica disminuye tendría una tendencia a cero, la relación de trabajo aumentará con un valor pequeño de la señal analógica. (figura 3.25).



**Figura 3.25** Valor mínimo de señal analógica.

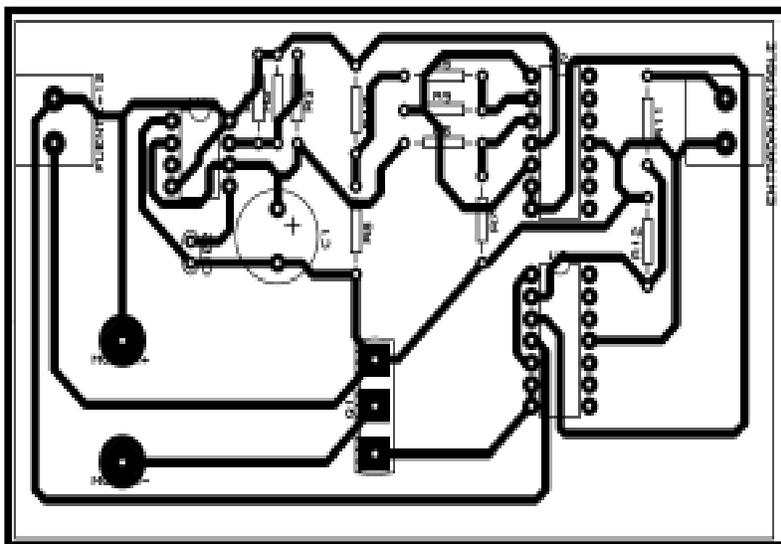
Mientras que para un valor de señal analógica aproximado a 2 [V] se tiene el resultado que muestra la figura 3.26.



**Figura 3.26** Señal analógica cercana a 2 [V]

Por lo que se tiene una relación de trabajo menor y esto es directamente proporcional a la velocidad del motor, al final del diseño se tiene un circuito impreso como muestra

la figura 3.27. Finalmente, se fabrica el circuito con todos los elementos de acuerdo al diseño del circuito obteniendo una placa electrónica. (Ver Anexo C, lámina C.1).



**Figura 3.27** Placa de circuito impreso de potencia

Al finalizar el proceso de diseño y construcción de cada uno de los elementos se procede a ubicarlos de acuerdo al plano esquemático y se obtienen dos sistemas para el control de velocidad, como se muestra en la figura 3.28.

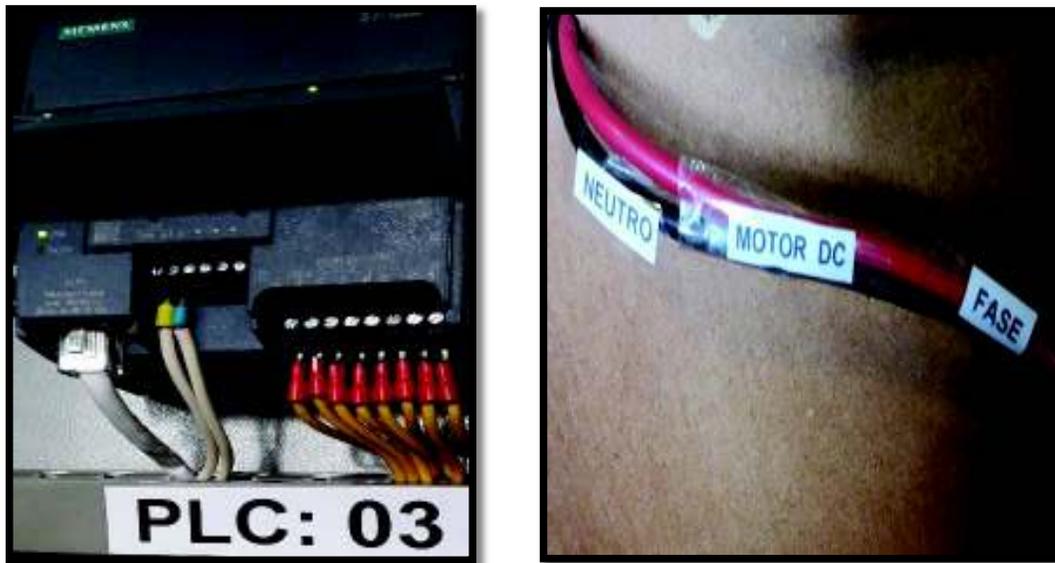


**Figura 3.28** Sistemas de control de velocidad terminados

#### ❖ CABLEADO Y SEÑALÉTICA

El cableado se realiza desde la salida del Signal Board con un cable número 14 AWG color blanco. En los bornes del Signal Board se colocan dos conectores tipo horquilla,

el conector amarillo corresponde al terminal positivo de la salida %QW80 y el conector azul al terminal negativo, todo esto se puede observar en la figura 3.29.



**Figura 3.29** Cableado del Signal Board y motor DC

### **3.4. ALGORITMO DE CONTROL E INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI)**

#### **❖ SEGMENTOS DE PROGRAMACIÓN DEL TIA PORTAL V.13**

Para realizar los algoritmos de control se utiliza el Software Portal TIA V.13 y se declaran las variables que se muestra en la figura 3.30. Una vez declaradas las variables en el primer segmento del bloque principal se coloca la instrucción CTRL\_HSC, que controla los contadores rápidos, dichos contadores permiten contar eventos que ocurren más rápido que la frecuencia de ejecución del bloque de organización (OB), como se muestra en la figura 3.31. Además, es necesario realizar la configuración del contador rápido, para lo cual se elige el contador (HSC1), cuya identificación de hardware es 257. Se utiliza la dirección %I0.0 para recibir la señal de pulsos enviados por el encoder, y estos se almacenan en la dirección %ID1000.

Variables PLC							
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Visibl...	Acces...
1	Contador	Tabla de variables e.	Dint	%MD1000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	pulsos	Tabla de variables e.	Bool	%M0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	periodo	Tabla de variables e.	Bool	%M0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	salida	Tabla de variables e.	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	motor	Tabla de variables e.	int	%QW80	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Tig_1	Tabla de variables e.	Real	%MD10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	PPA	Tabla de variables e.	Real	%MD14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	consigna	Tabla de variables e.	Real	%MD104	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Tig_4	Tabla de variables e.	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Velocidad actual	Tabla de variables e.	Real	%MD100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	VELOCIDAD_PULSOS	Tabla de variables e.	Real	%MD108	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.30 Variables del PLC

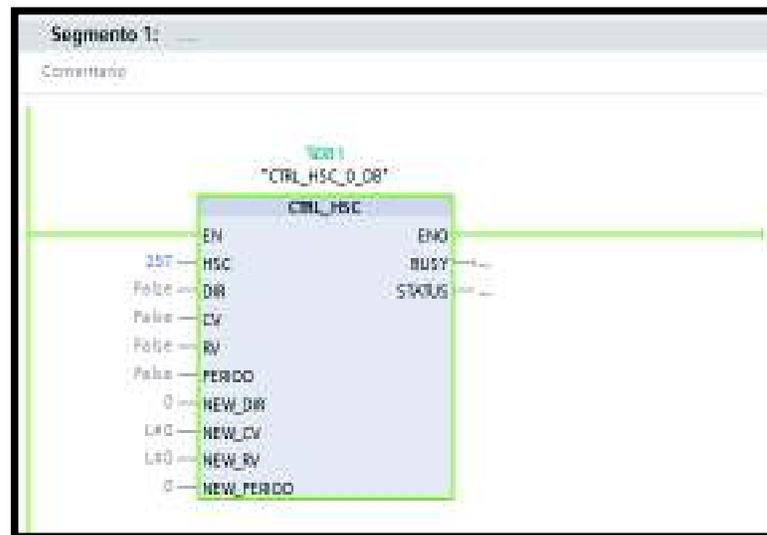
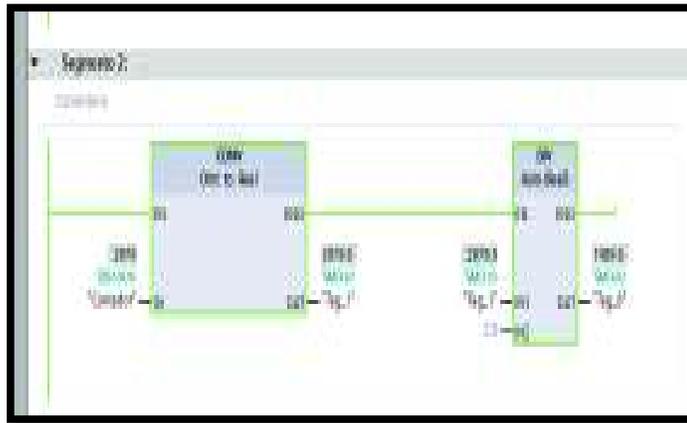


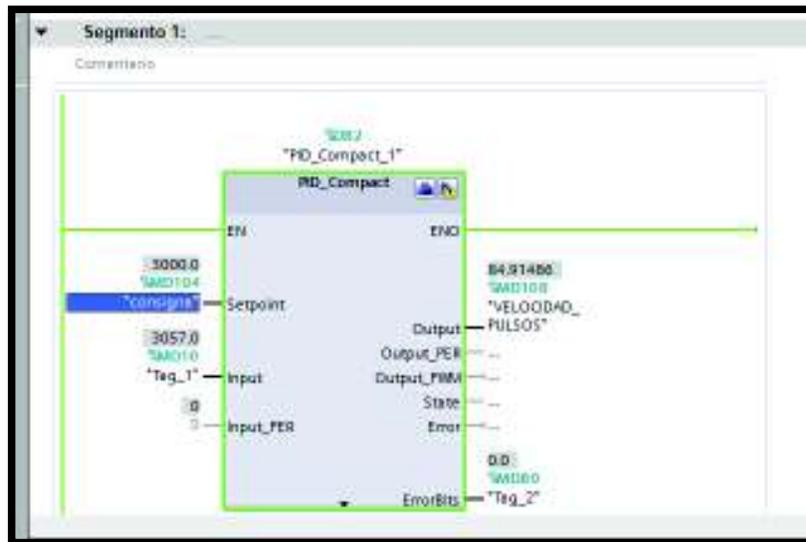
Figura 3.31 Configuración del contador rápido

En el segmento 2 se convierten los pulsos de entrada en un valor real para poder ingresar la variable al Bloque PID como se muestra en la figura 3.32.

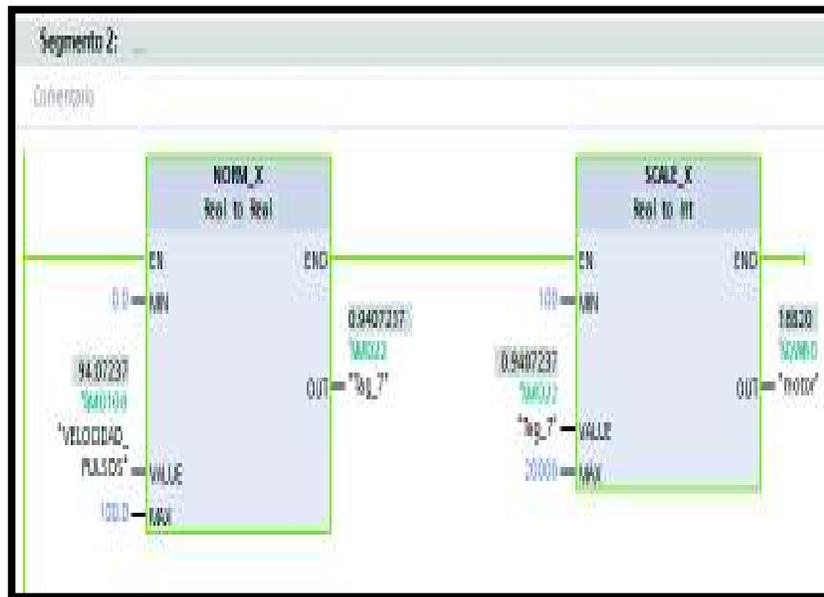


**Figura 3.32** Conversión de la señal de entrada

Para desarrollar el algoritmo PID se debe crear un Bloque de Interrupción Cíclica como se muestra en la figura 3.33. El segmento 1 muestra el PID Compact, en el cual se coloca la variable “Consigna” (%MD104) en el campo Setpoint, en el campo Input se coloca la variable (%MD10) que contiene el valor de pulsos convertidos en valor real. En el campo Output se coloca la variable (%MD108) en la cual se obtendrá un valor en porcentaje del proceso. Finalmente, en el segmento 2 se procede al escalamiento y normalizado de la señal de salida para poder obtener un valor de voltaje en los terminales del Signal Board y el resultado del proceso se coloca en la dirección %QW80 como se muestra en la figura 3.34.



**Figura 3.33** Bloque de interrupción cíclica



**Figura 3.34** Escalamiento y normalizado de la señal

#### ❖ INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

Para permitir al operador interactuar con el sistema y monitorear el proceso se utiliza una Interfaz Humano Máquina (HMI). En la pantalla HMI (figura 3.35) se pueden observar seis campos principales:

- Setpoint (referencia).
- Velocidad (indica la variable del proceso).
- Ganancia Proporcional ( $K_p$ ) es la que reduce o incrementa las oscilaciones; es factible que sólo exista hasta un 30 % de oscilaciones en el sistema.
- Tiempo de Integración ( $T_i$ ) disminuye y elimina el error en estado estacionario.
- Tiempo Derivativo ( $T_d$ ) representa el tiempo de predicción del error.
- La pantalla HMI permitirá al operador ingresar valores de entre 2000 rpm a 5000 rpm, y permitirá observar el comportamiento del proceso en tiempo real, como se muestra en la figura 3.35.

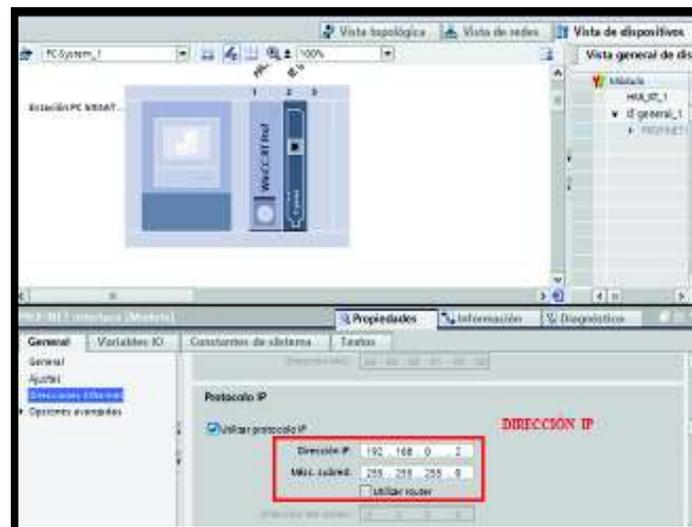


**Figura 3.35** Pantalla HMI

### 3.5. PRUEBAS

#### ❖ CONEXIÓN DE RED ENTRE PLC Y HMI

El computador dispone de un puerto interfaz PROFINET canalizado como un puerto Ethernet que facilita la comunicación entre la PC y el PLC S7-1200 mediante un cable de red. Para configurar el puerto de comunicación se define la dirección IP 192.168.0.7 para el PLC; y la dirección 192.168.0.2 para la estación HMI, la cual corresponde a la dirección del CPU, esto se puede observar en la figura 3.36 y en la figura 3.37.

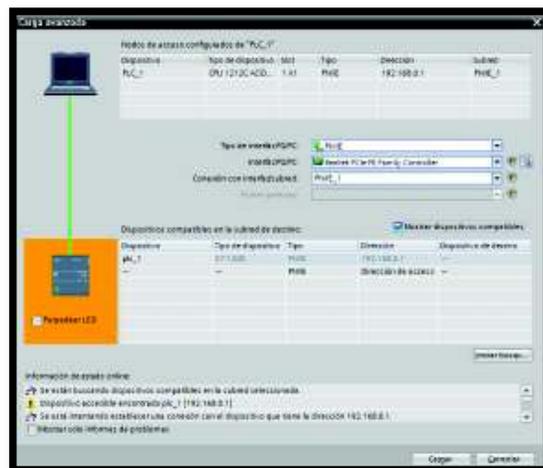


**Figura 3.36** Dirección IP de la CPU



**Figura 3.37** Dirección IP del PLC

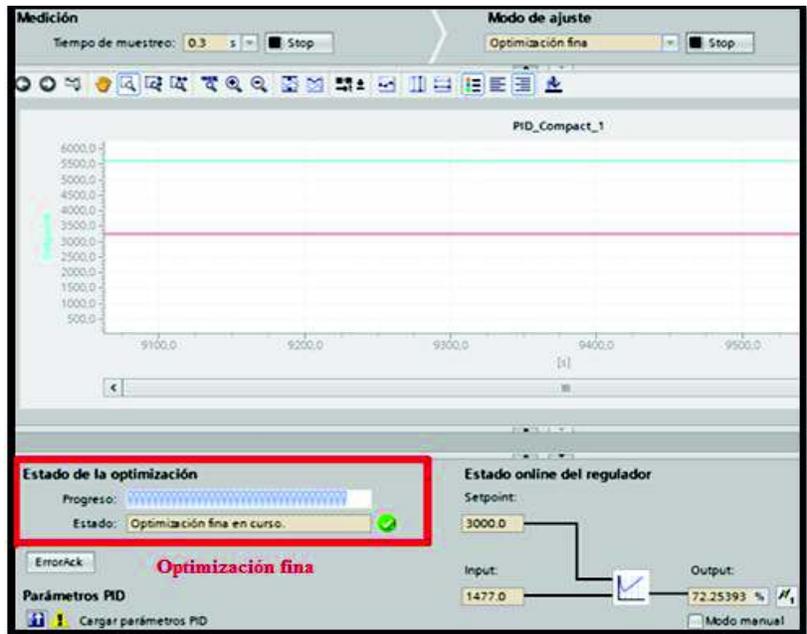
Una vez establecidas las respectivas direcciones se comprueba si los dispositivos se encuentran en red, a través de la conexión online como se muestra en la figura 3.38.



**Figura 3.38** Conexión online PLC y PC

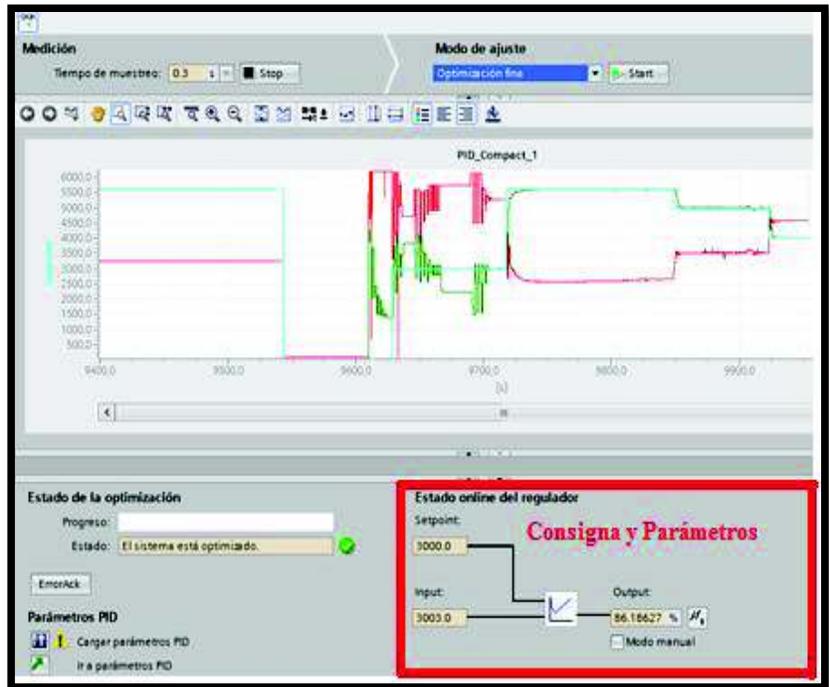
### ❖ PUESTA EN SERVICIO DEL PID COMPACT

Una vez desarrollados los algoritmos de control y la Interfaz Humano Máquina (HMI), se realiza la puesta en servicio del PID\_Compact, para esto se deben compilar todos los segmentos y cargar el programa en el módulo PLC. Después de arrancar el CPU se procede a realizar una optimización fina del sistema. Una vez optimizado el sistema, es posible manipular la consigna y los parámetros PID (figura 3.39).



**Figura 3.39** Puesta en servicio del PID Compact

En la figura 3.40 se puede observar el progreso de la optimización fina al cargar los parámetros que se van a utilizar en el control de velocidad del motor DC.



**Figura 3.40** Sistema optimizado

### ❖ CONEXIÓN DEL MÓDULO PLC Y HMI

Se realiza una correcta conexión entre el módulo PLC y la computadora mediante un cable Ethernet lo cual se muestra en la figura 3.41.

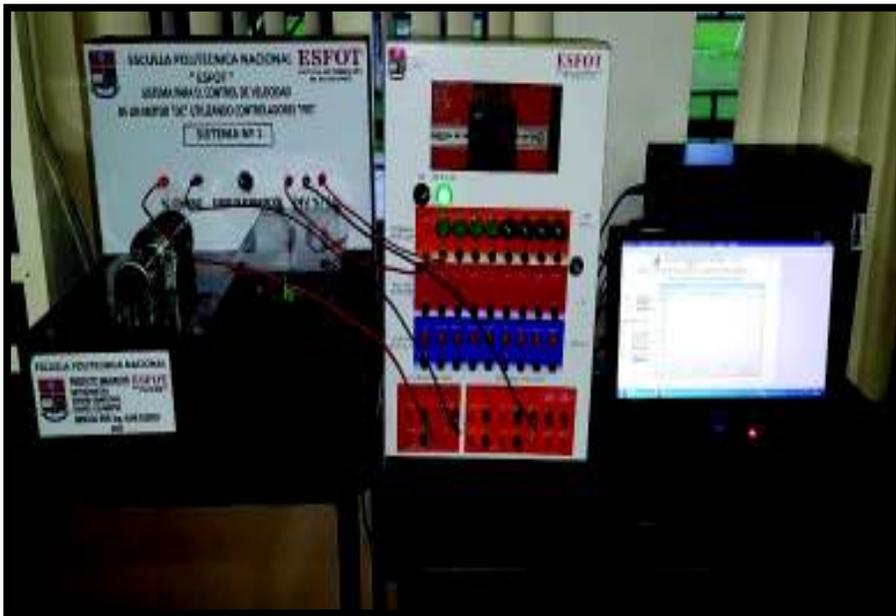


**Figura 3.41** Conexión cable Ethernet

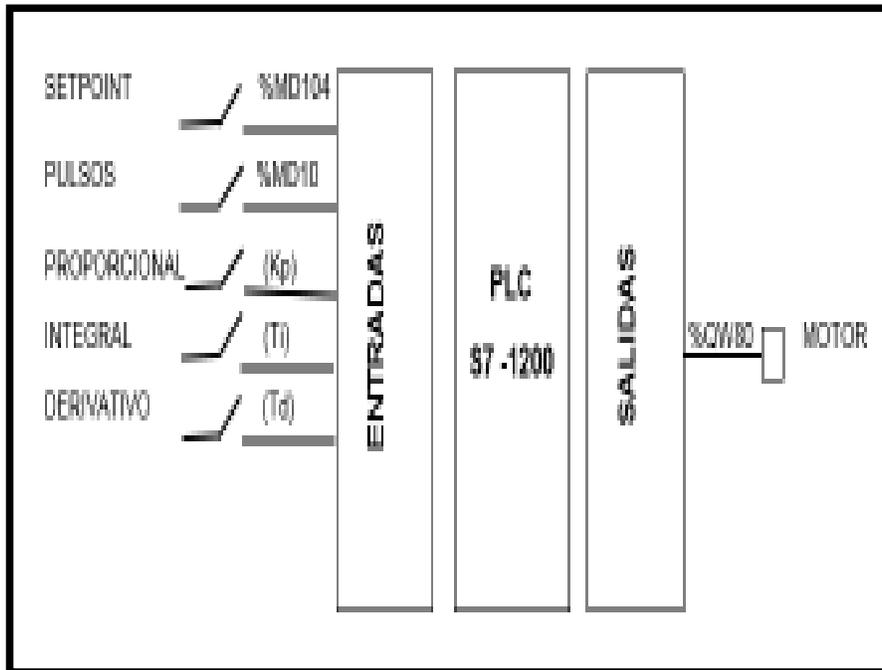
Para verificar el correcto funcionamiento del módulo PLC, el sistema de control de velocidad y la Interfaz Humano-Máquina, se establecen varios valores de velocidad como referencia y se comprueba la respuesta del motor DC.

### ❖ FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

En la figura 3.42 se visualiza el sistema de control de velocidad de un motor DC controlado por la Interfaz Humano Máquina (HMI) comprobando que el sistema funciona correctamente de acuerdo con los parámetros planteados.



**Figura 3.42** Sistema control de velocidad de un motor DC en funcionamiento  
 El respectivo diagrama de entradas y salidas (I/O) del PLC se detalla en la figura 3.43;  
 las entradas corresponden a Setpoint, a la señal del sensor y a los parámetros Kp, Ti  
 y Td. En cuanto a la salida se dispone de la respectiva señal de control.



**Figura 3.43** Diagrama de entradas y salidas (I/O) al PLC

### ❖ SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PROPORCIONAL (P)

Control proporcional.- Es aquel que reduce el error a la mínima expresión pero no lo elimina, se calcula mediante la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ : con la expresión 3.2 [18]

$$u(t) = K_p e(t)$$

**Expresión 3.2**

La acción de control es proporcional a la señal de error; y la función de transferencia es una constante calculada con la expresión 3.3.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

**Expresión 3.3**

$K_p$  corresponde a la ganancia proporcional

#### ➤ CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL PROPORCIONAL

- El controlador proporcional es un amplificador de ganancia ajustable, que tiene una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final del control.
- Cuando se aumenta la ganancia Proporcional ( $K_p$ ) el controlador permite reducir el error en el estado estacionario.
- El sistema evoluciona más rápido, pero con mayor sobre oscilación (sobre impulso máximo).
- Al utilizar valores altos de la ganancia ( $K_p$ ) puede provocar la aparición de saturación en algunos elementos haciendo que el sistema entre en régimen no lineal.
- Los valores altos de la ganancia ( $K_p$ ) pueden generar la inestabilidad del sistema.
- Los valores altos de la ganancia ( $K_p$ ) pueden generar excesivos picos de voltaje en el sistema.

La sintonización es el proceso mediante el cual se calculan los valores de los parámetros del controlador.

Para la sintonización del Controlador Proporcional se utiliza el método de PRUEBA y ERROR, realizando pruebas con valores de referencia de 2000 rpm, 3500 rpm, 5000 rpm para diferentes valores de  $K_p$ .

**a) Setpoint = 2000 rpm.**

Al dar un valor a  $K_p = 0.007$  se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.44.



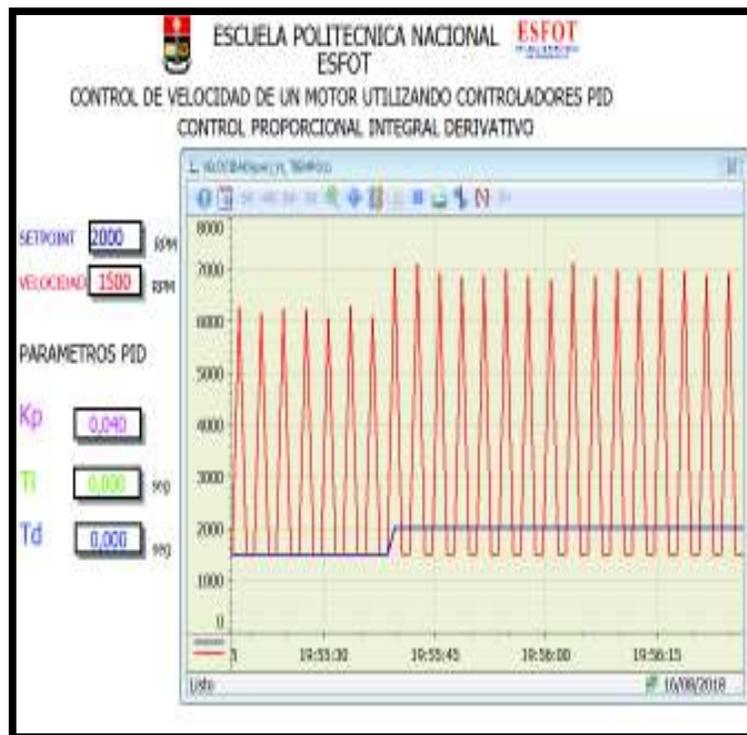
**Figura 3.44** Control proporcional (P) con  $K_p = 0.007$  a 2000 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.025$  se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.45.



**Figura 3.45** Control proporcional (P) con  $K_p = 0.025$  a 2000 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.040$  se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.46.



**Figura 3.46** Control proporcional (P) con  $K_p = 0.040$  a 2000 rpm

b) Setpoint = 35000 rpm.

Al dar un valor a  $K_p = 0.007$  se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.47.



Figura 3.47 Control proporcional (P) con  $K_p = 0.007$  a 3500 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.025$  se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.48.



Figura 3.48 Control proporcional (P) con  $K_p = 0.025$  a 3500 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.040$  se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.49.



Figura 3.49 Control proporcional (P) con  $K_p= 0.040$  a 3500 rpm

c) Setpoint = 50000 rpm.

Al dar un valor a  $K_p = 0.007$  se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.50.

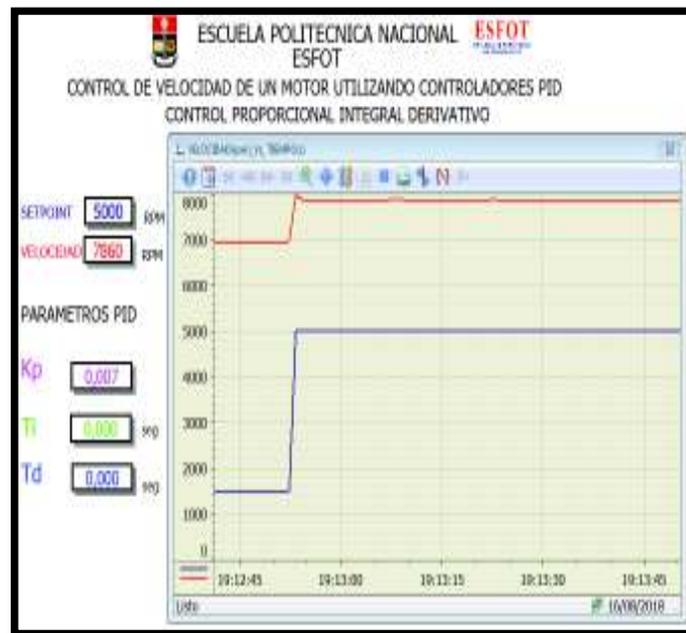


Figura 3.50 Control proporcional (P) con  $K_p= 0.007$  a 5000 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.025$  se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.51.



**Figura 3.51** Control proporcional (P) con  $K_p = 0.025$  a 5000 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.040$  se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.52.



**Figura 3.52** Control proporcional (P) con  $K_p = 0.040$  a 5000 rpm

## ❖ SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

La acción de control integral da una salida al controlador que es proporcional al error acumulado lo que revela que es un control lento.

La acción de Control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por las perturbaciones exteriores las cuales no pueden ser corregidas por el Control Proporcional.

El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable controlada y el punto de consigna. Un Control Proporcional Integral (PI) tiene las siguientes características. [19]

- El tiempo integral ( $T_i$ ) corresponde al tiempo requerido para que la acción integral iguale a la proporcional a error constante.
- Mejora el régimen permanente.
- Efecto similar al proporcional en el transitorio.
- Mejora el error en estado estable considerablemente.
- Reduce el tiempo de respuesta de la variable controlada.
- Aumenta el pico de elevación (sobre impulso).

La señal de control proporcional a la integral del error se calcula mediante la expresión 3.4:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

**Expresión 3.4**

La función de transferencia del controlador PI se muestra en la expresión 3.5:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \frac{S + 1/T_i}{S}$$

**Expresión 3.5**

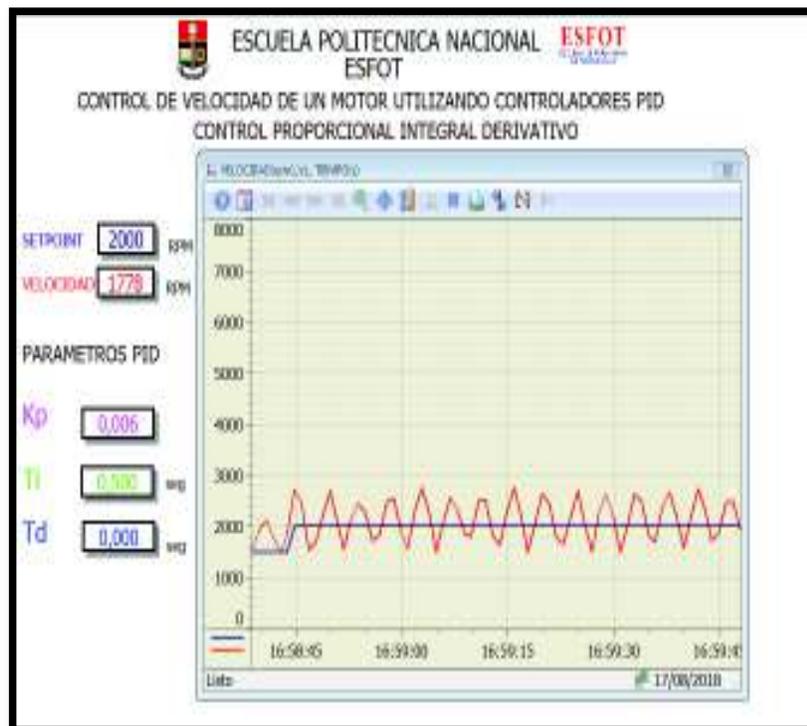
Para la sintonización se deben seguir los siguientes pasos:

- Asignar un valor elevado a  $T_i$  de forma que el controlador (PI) se comporte como P.
- Ajustar  $K_p$  hasta obtener la forma de respuesta deseada sin tomar en cuenta el error en estado estacionario.
- Disminuir lentamente  $T_i$  hasta el mínimo posible, de forma que, se anule el error en estado estacionario, pero manteniendo la forma de la respuesta deseada.

Para la sintonización del Controlador Proporcional Integral se utiliza el método de PRUEBA y ERROR, realizando las pruebas con valores de referencia de 2000 rpm, 3500 rpm, 5000 rpm para diferentes valores de  $K_p$  y  $T_i$ .

**a) Setpoint = 2000 rpm**

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.500$  seg se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.53.



**Figura 3.53** Control (PI) con  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.50$ seg a 2000 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.900$  seg se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.54.



Figura 3.54 Control (PI) con  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$ seg a 2000 rpm

### b) Setpoint = 3500 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.500$  seg se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.55.



Figura 3.55 Control (PI) con  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.50$ seg a 3500 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.90$  seg se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.56.



Figura 3.56 Control (PI) con  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.90$ seg a 2000 rpm

c) **Setpoint = 5000 rpm.**

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.50$  seg se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.57.



Figura 3.57 Control (PI) con  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.50$ seg a 5000 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.90$  seg se observa una acción de control que se muestra en la figura 3.58.



**Figura 3.58** Control (PI) con  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$ seg a 5000 rpm

#### ❖ SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

Tiempo de derivación ( $T_d$ ) es el que genera una acción de control proporcional al cambio del rango del error. Esto tiene un efecto estabilizante, por lo general genera actuaciones de control grandes. [18]

La acción de control Proporcional Integral Derivativo (PID) es el resultado de la combinación de las tres acciones de control (expresión 3.6). [18]

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt = K_p \left[ e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad \text{Expresión 3.6}$$

La función de transferencia del controlador PID se muestra en la expresión 3.7:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[ 1 + sT_d + \frac{1}{sT_i} \right]$$

**Expresión 3.7**

### ➤ **CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL**

#### **DERIVATIVO**

- La acción de control PID permite eliminar el error en estado estacionario logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control.
- Para sintonizar adecuadamente los tres efectos, se debe ir ajustando los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  hasta obtener una respuesta satisfactoria.
- Los parámetros utilizados en la sintonización de las acciones de control Proporcional (P) y Proporcional Integral (PI,) pueden ser usados para el ajuste fino de los parámetros del Control Proporcional Integral (PID).
- Este tipo de control es muy utilizado en la industria.

Para determinar los parámetros óptimos de un Control Proporcional Integral (PID), se van cambiando los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  hasta obtener una respuesta satisfactoria. Para hacer un ajuste fino del Control Proporcional Integral (PID), se usan los parámetros obtenidos en la sintonización de las acciones de Control Proporcional (P) y Proporcional Integral (PI).

Para la sintonización del Control Proporcional Integral Derivativo se utiliza el método de PRUEBA y ERROR, realizando las pruebas con valores de referencia de 2000 rpm, 3500 rpm, 5000 rpm para diferentes valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ .

#### **a) Setpoint = 2000 rpm**

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$  y un  $T_i = 0.90$  seg y  $T_d = 0.10$  seg se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.59.



**Figura 3.59** Control (PID) con  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90\text{seg}$  y  $T_d = 0.10\text{seg}$  a 2000 rpm  
 Al dar un valor a  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$  seg y  $T_d = 0.20$  seg se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.60.



**Figura 3.60** Control (PID) con  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90\text{seg}$  y  $T_d = 0.20\text{seg}$  a 2000 rpm

**b) Setpoint = 3500 rpm**

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$  seg y  $T_d = 0,10$  seg se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.61.



**Figura 3.61** Control (PID) con  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.90$ seg y  $T_d= 0.10$ seg a 3500 rpm  
Al dar un valor a  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$  seg y  $T_d = 0.20$  seg se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.62.



**Figura 3.62** Control (PID) con  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.90$ seg y  $T_d= 0.20$ seg a 3500 rpm

c) Setpoint = 3500 rpm

Al dar un valor a  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$  seg y  $T_d = 0.10$  seg se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.63.



**Figura 3.63** Control (PID) con  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.90$ seg y  $T_d= 0.10$ seg a 5000 rpm. Al dar un valor a  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.90$  seg y  $T_d = 0.20$  seg se observa la acción de control que se muestra en la figura 3.64.



**Figura 3.64** Control (PID) con  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.90$ seg y  $T_d= 0.20$ seg a 5000 rpm

### **3.6. RESULTADOS**

#### **❖ RESULTADOS DEL CONTROL PROPORCIONAL (P)**

Al variar los valores de la Ganancia Proporcional ( $K_p$ ) durante la sintonización, se observa que al ir aumentando el valor de  $K_p$  se reduce el error en estado estacionario pero no se elimina y la respuesta es más rápida; sin embargo el sistema se vuelve inestable, al dar valores muy altos a  $K_p$  ocasiona una sobre oscilación en la Señal Controlada. Para este sistema de control de velocidad el valor óptimo de  $K_p$  es 0.006.

#### **❖ RESULTADOS DEL CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)**

En el Control Proporcional Integral (PI) se tomó como valor óptimo a  $K_p= 0.006$  y un valor de  $T_i= 0.900$  seg, y se visualiza que el error en estado estacionario es mínimo. Al ir reduciendo el valor ( $T_i$ ) se observa que la variable controlada mejora durante el estado estable del proceso, así como también se reduce el tiempo de respuesta de la variable controlada. El sistema de control de velocidad de un motor DC es un sistema muy rápido, al ejecutar todas las pruebas se puede observar en la respuesta que el control proporcional integral mejora significativamente la acción de control debido a que el error es mínimo, el tiempo integral es reducido, mejora el régimen permanente, las oscilaciones persisten en menor cantidad y aumenta el pico de elevación o sobre impulso.

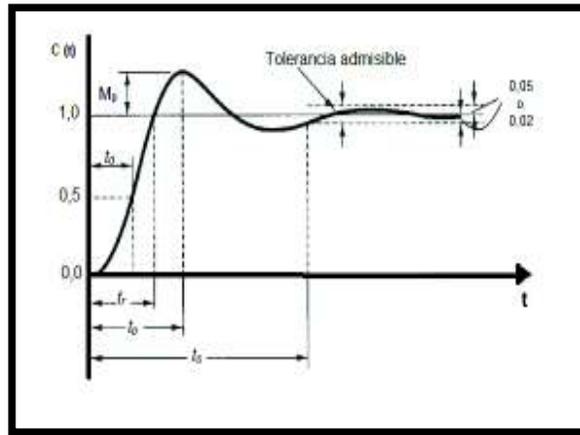
#### **❖ RESULTADOS DEL CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)**

En el Control Proporcional Integral Derivativo (PID) se tomó como valor óptimo  $K_p= 0.006$ ,  $T_i= 0.900$  seg y  $T_d = 0.200$  seg; se visualiza que el error en estado estacionario es pequeño. Al ir reduciendo el valor a  $T_i$  se observa que la variable controlada mejora durante el estado estable del proceso, así como también se reduce el tiempo de respuesta de la variable controlada.

Mientras  $T_d$  sea más grande o su desplazamiento sea mayor el sistema se vuelve lento y si el valor de  $T_d$  es menor la respuesta se vuelve más rápida reduciendo el tiempo de acción. La respuesta de este controlador es aceptable debido a que se suaviza el régimen transitorio, el sobre pico es menor y se reducen las oscilaciones, sin embargo el sistema se vuelve muy lento, por lo tanto para este tipo de sistemas de control en los cuales la magnitud controlada es la velocidad la acción PID no es adecuada.

### ❖ CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SISTEMA

Para realizar una comparación de las tres acciones de control se tomarán en cuenta las características dinámicas del sistema las cuales se pueden observar en la figura 3.65.



**Figura 3.65** Características dinámicas del sistema

### ➤ PARÁMETROS A COMPARAR

- **Tiempo de crecimiento ( $t_r$ ).**- Es el tiempo requerido para que la respuesta aumente de 0 a 100% para sistemas con retroalimentación; del 5 al 95% o del 10 al 90% para sistemas críticamente amortiguados.
- **Tiempo pico ( $t_p$ ).**- es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobre impulso.
- **Sobre impulso máximo ( $M_p$ ).**- Es el valor pico máximo de la curva de respuesta medido desde la unidad o valor deseado. El sobre impulso máximo se obtiene de la respuesta evaluada en el tiempo pico.
- **Tiempo de establecimiento ( $t_s$ ).**- Es el tiempo mínimo donde la curva de respuesta alcanza y se mantiene dentro un rango de error preestablecido, generalmente es del 2% o del 5%; el rango más común es el de 2% para sistemas con retroalimentación.[19]



$$X = \frac{3200 \text{ rpm} * 90 \%}{100\%}$$

**Vel<sub>90%</sub> = 2880 rpm (figura 3.66)**

$$\text{Vel}_{10\%} = 3200 \text{ rpm} \longrightarrow 100 \%$$

$$X \longrightarrow 10 \%$$

$$X = \frac{3200 \text{ rpm} * 10\%}{100 \%}$$

$$\text{Vel}_{10\%} = 320 \text{ rpm}$$

**t<sub>r</sub> = 2 seg (figura 3.66)**

- **Sobre impulso máximo (Mp)**

$$\text{Mp} = 3200 \text{ rpm} \longrightarrow 100\%$$

$$400 \text{ rpm} \longrightarrow X$$

$$X = \frac{5400 \text{ rpm} * 100 \%}{3200 \text{ rpm}}$$

$$\text{Mp} = 168,75 \%$$

- **Cálculo de Tau (τ)**

$$\tau = 3200 \text{ rpm} \longrightarrow 100 \%$$

$$X \longrightarrow 63,2 \%$$

$$X = \frac{3200 \text{ rpm} * 63,2 \%}{100 \%}$$

$$Vel\tau = 2022,4 \text{ rpm}$$

$$\tau = 2,6 \text{ seg (figura 3.66)}$$

- **Cálculo del tiempo de establecimiento (  $t_s$  )**

$$t_s (2\%) = 3\tau$$

$$t_s (2\%) = 3 * 2.6 \text{ seg}$$

$$t_s (2\%) = 7.8 \text{ seg}$$

$$t_s (5\%) = 2\tau$$

$$t_s (5\%) = 2 * 2.6 \text{ seg}$$

$$t_s (5\%) = 5.2 \text{ seg}$$

**Tabla 3.5** Control proporcional (P) a 5000 rpm

<b>CONTROL PROPORCIONAL (P) A 5000 rpm</b>		
Nombre Característica	Simbología	Resultado del control
Error	Error	5,38%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	2 seg
Sobre impulso máximo	$M_p$	168.75%
Tau	$\tau$	2.6 seg
Tiempo de establecimiento al (2%)	$t_s (2\%) = 3\tau$	7.8 segundos
Tiempo de establecimiento al (5%)	$t_s (5\%) = 2\tau$	5.2 segundos

En la tabla 3.5 se establecen las principales características dinámicas del sistema aplicando una acción de control proporcional a 5000 rpm, se puede observar que el tiempo de crecimiento es de 2 seg al igual que el sobre impulso es de 168.75 % determinando, sobre oscilaciones permanentes, el tiempo de establecimiento del sistema al 5 % es de 5.2 segundos y al 2% es 7.8 segundos, determinando que el margen de error es del 5.38 %.

❖ CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

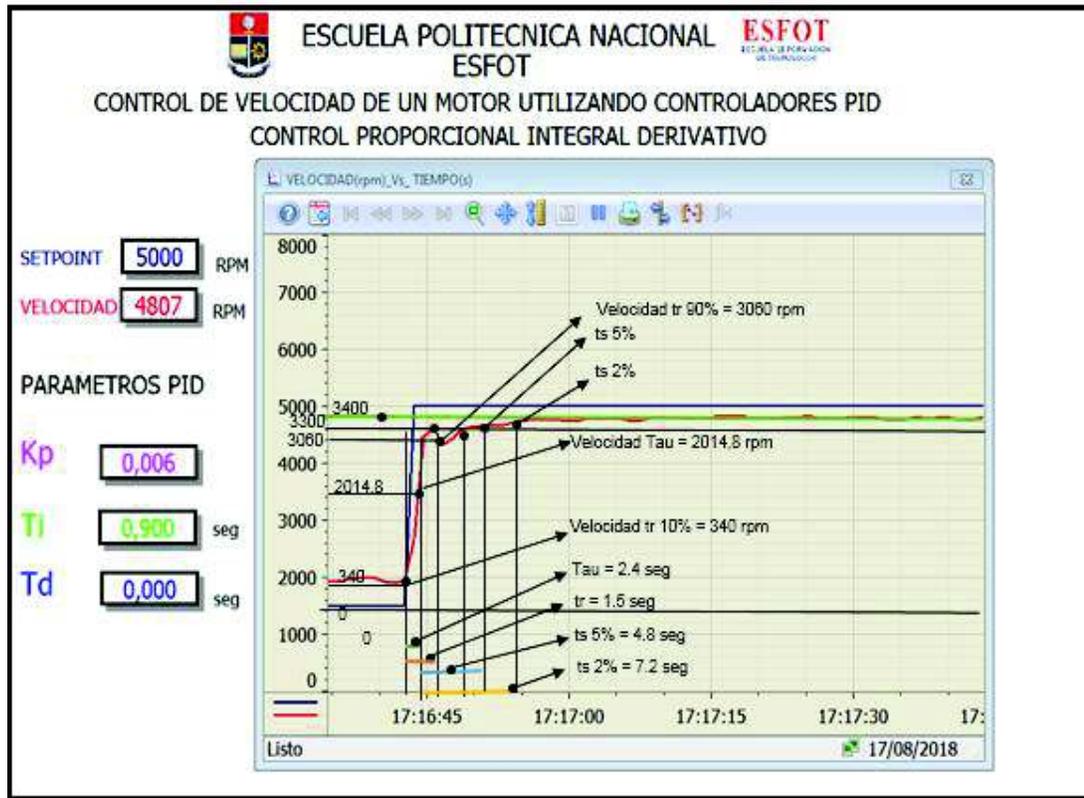


Figura 3.67 Características dinámicas del control (PI)

- Cálculo del error en estado estacionario a 5000 rpm.

$$\text{Error} = \left| \frac{\text{SP}-\text{PV}}{\text{SP}} \right| * 100 \%$$

$$\text{Error} = \left| \frac{5000 \text{ rpm} - 4807 \text{ rpm}}{5000 \text{ rpm}} \right| * 100 \%$$

$$\text{Error} = 3.86 \%$$

- **Cálculo del tiempo de crecimiento entre 90% - 10%**

$$\begin{array}{lcl} \text{Vel}_{90\%} = 3400 \text{ rpm} & \longrightarrow & 100 \% \\ X & \longrightarrow & 90 \% \end{array}$$

$$X = \frac{3400 \text{ rpm} * 90 \%}{100 \%}$$

**Vel<sub>90%</sub> = 3060 rpm** ver en la figura 3.67

$$\begin{array}{lcl} \text{Vel}_{10\%} = 3400 \text{ rpm} & \longrightarrow & 100\% \\ X & \longrightarrow & 10\% \end{array}$$

$$X = \frac{3400 \text{ rpm} * 10 \%}{100 \%}$$

**Vel<sub>10%</sub> = 340 rpm**

**t<sub>r</sub> = 1.5 seg** (figura 3.67)

- **Sobre impulso máximo (Mp)**

$$\begin{array}{lcl} \text{Mp} = 3400 \text{ rpm} & \longrightarrow & 100\% \\ 3300 \text{ rpm} & \longrightarrow & X \end{array}$$

$$X = \frac{330 \text{ rpm} * 100 \%}{3400 \text{ rpm}}$$

**Mp = 9.70 %**

No existe un sobre impulso máximo sobre el Setpoint

$$Mp = 100\% - 9,70\%$$

$$Mp = 90,3\%$$

▪ **Cálculo de Tau ( $\tau$ )**

$$\begin{array}{rcl} \tau = & 3400 \text{ rpm} & \longrightarrow 100 \% \\ & X & \longrightarrow 63.2\% \end{array}$$

$$X = \frac{3400 \text{ rpm} * 63.2 \%}{100 \%}$$

$$Vel \tau = 2148,8 \text{ rpm}$$

$$\tau = 2.4 \text{ seg (figura 3.67)}$$

▪ **Cálculo del tiempo de establecimiento ( $t_s$ )**

$$t_s (2\%) = 3\tau$$

$$t_s (2\%) = 3 * 2.4 \text{ seg}$$

$$t_s (2\%) = 7.2 \text{ seg}$$

$$t_s (5\%) = 2\tau$$

$$t_s (5\%) = 2 * 2.4 \text{ seg}$$

$$t_s (5\%) = 4.8 \text{ seg}$$

**Tabla 3.6** Control proporcional integral (PI) a 5000 rpm

<b>CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI) A 5000 rpm</b>		
Nombre Característica	Simbología	Resultado del control
Error	Error	3.86%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	1.5 seg
Sobre impulso máximo	Mp	90.3%
Tau	$\tau$	2.4 seg
Tiempo de establecimiento al (2%)	$t_s (2\%) = 3\tau$	7.2 seg
Tiempo de establecimiento al (5%)	$t_s (5\%) = 2\tau$	4.8 seg

En la tabla 3.6 se establecen las principales características dinámicas del sistema aplicando una acción de control proporcional integral a 5000 rpm, se puede observar que el tiempo de crecimiento es de 1.5 segundos, no existe sobre impulso, mientras que las sobre oscilaciones son mínimas, el tiempo de establecimiento del sistema al 5 % es de 4.8 segundos y al 2% es 7.2 segundos, determinando que el margen de error es del 3.86 %.

❖ CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

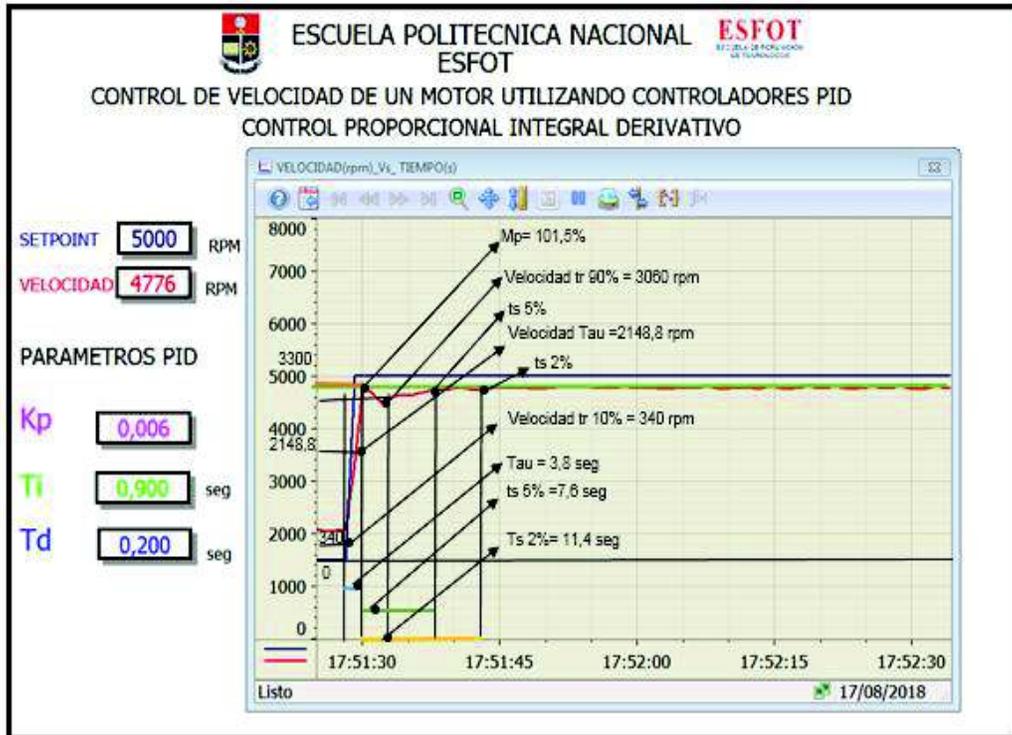


Figura 3.68 Características dinámicas del control (PID)

- Cálculo del error en estado estacionario a 5000 rpm.

$$\text{Error} = \left| \frac{\text{SP} - \text{PV}}{\text{SP}} \right| * 100 \%$$

$$\text{Error} = \left| \frac{5000 \text{ rpm} - 4776 \text{ rpm}}{5000 \text{ rpm}} \right| * 100 \%$$

$$\text{Error} = 4.48 \%$$

- **Cálculo del tiempo de crecimiento entre 90% - 10%**

$$\begin{array}{l} \text{Vel}_{90\%} = 3400 \text{ rpm} \longrightarrow 100 \% \\ X \longrightarrow 90 \% \end{array}$$

$$X = \frac{3400 \text{ rpm} * 90 \%}{100 \%}$$

$\text{Vel}_{90\%} = \mathbf{3060 \text{ rpm}}$  ver en la figura 3.68

$$\begin{array}{l} \text{Vel}_{10\%} = 3400 \longrightarrow 100\% \\ X \longrightarrow 10\% \end{array}$$

$$X = \frac{3400 \text{ rpm} * 10 \%}{100 \%}$$

$\text{Vel}_{10\%} = \mathbf{340 \text{ rpm}}$

$t_r = \mathbf{2.5 \text{ seg}}$ (figura 3.68)
--

- **Sobre impulso máximo (Mp)**

$$\begin{array}{l} \text{Mp} = 3300 \text{ rpm} \longrightarrow 100 \% \\ 3350 \text{ rpm} \longrightarrow X \end{array}$$

$$X = \frac{3350 \text{ rpm} * 100 \%}{3300 \text{ rpm}}$$

$\text{Mp} = \mathbf{101.5 \%}$

▪ **Cálculo de Tau ( $\tau$ )**

$$\begin{array}{l} \tau = 3400 \longrightarrow 100\% \\ X \longrightarrow 63,2\% \end{array}$$

$$X = \frac{3400 \text{ rpm} * 63.2 \text{ rpm}}{100 \%}$$

$$\mathbf{Vel\tau = 2148,8 \text{ rpm}}$$

$$\mathbf{\tau = 3.8 \text{ seg (figura 3.68)}}$$

▪ **Cálculo del tiempo de establecimiento ( $t_s$ )**

$$t_s (2\%) = 3 * \tau$$

$$t_s (2\%) = 3 * 3.8 \text{ seg}$$

$$\mathbf{t_s (2\%) = 11.4 \text{ seg}}$$

$$t_s (5\%) = 2 * \tau$$

$$t_s (5\%) = 2 * 3.8 \text{ seg}$$

$$\mathbf{t_s (5\%) = 7.6 \text{ seg}}$$

**Tabla 3.7** Control proporcional integral derivativo (PID) a 5000 rpm

<b>CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) A 5000 rpm</b>		
Nombre Característica	Simbología	Resultado del control
Error	Error	4.48 %
Tiempo de crecimiento	$t_r$	2.5 segundos
Sobre impulso máximo	$M_p$	101.5%
Tau	$\tau$	3.8seg
Tiempo de establecimiento	$t_s (2\%) = 3\tau$	11.4 segundos
Tiempo de establecimiento	$t_s (5\%) = 2\tau$	7.6 segundos

En la tabla 3.7 se establecen las principales características dinámicas del sistema aplicando una acción de control proporcional integral derivativo a 5000 rpm, se puede observar que el tiempo de crecimiento es de 2.5 segundos, existe un sobre impulso del 101.5%, mientras que las sobre oscilaciones son mínimas. El tiempo de establecimiento del sistema al 5 % es de 7.6 segundos y al 2% es 11.4 segundos, determinando que el margen de error es del 4.48 %.

Una vez finalizada la determinación de las características dinámicas se puede observar la comparación del error tanto para el Proporcional (P), Proporcional Integral (PI), Proporcional Integral Derivativo (PID) siendo mínimo el error en el Control Proporcional Integral.

Porcentaje de error:

- Control Proporcional (P) = 5.38 %
- Control Proporcional Integral (PI) = 3.86 %
- Control Proporcional Integral Derivativo (PID) = 4.48 %

En cuanto al tiempo de establecimiento, el sistema se estabiliza mucho más rápido en el control Proporcional Integral (PI).

- Control Proporcional (P) = 7.8 seg
- Control Proporcional Integral (Ti) = 7.2 seg
- Control Proporcional Integral Derivativo (PID) = 11.4 seg

Se puede observar que la inestabilidad o las oscilaciones son mayores en el control Proporcional (P) y son menores en el control Proporcional Integral Derivativo (PID).

### 3.7. PRÁCTICAS

#### ❖ PRÁCTICA 1

**Tema:** Contadores rápidos

**Objetivo:**

- Configurar la instrucción CTRL\_HSC.
- Visualizar la variación de pulsos.

**Equipos y materiales:**

- Módulo PLC disponible en el Laboratorio
- Computador con el software TIA Portal V.13
- Sistema de control de velocidad de un motor DC
- Cables de conexión

**Información:**

- **Contadores rápidos.-** El contador rápido cuenta el número de pulsos que se ejecutan a una frecuencia mayor, tiene un ciclo completo del programa de la CPU. Se utiliza contadores de pulsos generados por un eje que gira a una velocidad constante provisto de un sensor.
- **Sensor de velocidad (encoder).-** Es un codificador rotatorio que transforma la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor.

**Trabajo preparatorio:**

Desarrollar un algoritmo de control utilizando el software PORTAL TIA V.13 SIEMENS para visualizar la variación de pulsos generados por el encoder, que cumpla con las siguientes exigencias.

- En la Interfaz Humano Máquina (HMI) se crean dos variables la primera para el Setpoint que permita ingresar valores de referencia en rpm y la segunda para visualizar la velocidad del motor DC.
- Configurar el contador rápido, eligiendo el contador (HSC1), cuya identificación de hardware es 257, utilizar la dirección (%I0.0) para recibir la señal de pulsos enviados por el encoder, almacenándolos en la dirección %ID1000.
- El sistema debe permitir que el operador manipule un rango de variación de entre 1000 rpm y 5000 rpm para visualizar el cambio del número de pulsos.

**Procedimiento:**

- El instructor explicará el procedimiento para ingresar al software de programación TIA PORTAL V.13, así como las principales opciones del menú para crear y configurar un proyecto.
- Conectar el sistema con el PLC y establecer la conexión online.
- Configurar el contador rápido y cargar el programa al PLC.

**Informe:**

- Presentar la configuración del contador CTRL\_HSC.
- Añadir una tabla con todas las variables utilizadas con sus respectivos nombres (puede utilizar la tabla de variables creada en el programa).
- Presentar el diagrama de conexiones de entradas y de salidas al módulo PLC.
- En la sección de cuestionario incluir lo siguiente:  
¿Cuáles son las principales ventajas de los contadores rápidos?
- Realizar una tabla para diferentes velocidades, calculando el número de pulsos y el porcentaje de error.

Velocidad (rpm)	Número de pulsos	% de error
1000 rpm		
2000 rpm		
3000 rpm		
4000 rpm		
5000 rpm		

## ❖ PRÁCTICA 2

**Tema:** Sistema de control de velocidad

### Objetivos:

- Controlar la velocidad de un motor DC utilizando controladores PID.
- Utilizar las herramientas disponibles en el PORTAL TIA V.13 para desarrollar un Interfaz Humano Máquina HMI que permita monitorear y controlar el sistema.

### Equipos y materiales:

- Módulo PLC disponible en el laboratorio
- Sistema de control de velocidad de un motor DC
- Cables de conexión

### Información:

- **Controladores Lógicos Programables.-** Son dispositivos utilizados a nivel industrial para el control de procesos en los cuales se puede medir, controlar, supervisar temperaturas, presión, caudal etc. Con la ayuda de una interfaz Humano Máquina se puede interactuar con el proceso de forma más eficiente.
- **Motores DC.-** Es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio.
- **Controladores PID.-** Es un sistema de control simultáneo por realimentación en lazo cerrado, ampliamente usado en sistemas de control

industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado en un lazo cerrado.

### **Trabajo preparatorio**

Desarrollar un algoritmo de control utilizando el software PORTAL TIA V.13 SIEMENS para controlar la velocidad de un motor DC, que cumpla con las siguientes exigencias.

- Revisar las transparencias de clase sobre el manejo del PORTAL TIA V.13 y HMI.
- Conocer la velocidad en rpm, máxima y mínima, del motor DC AmpFlow E30-150.
- Realizar una Interfaz Humano Máquina para el control y monitoreo del sistema que cumpla con los siguientes parámetros.
  - Un campo I/O para ingresar el Setpoint
  - Un campo I/O para visualizar la velocidad.
  - Tres campos de I/O para introducir valores independiente para Kp, Ti y Td
- Alimentar la fuente de la PC con 110 [V] AC, al circuito con 24 [V] DC desde el PLC, enlazar la salida del sistema %I0.0 a la entrada %I0.0 del PLC.
- Conectar al motor la salida analógica %QW80.

### **Configuración y programación del controlador PID**

El sistema de control PID debe realizar las siguientes operaciones:

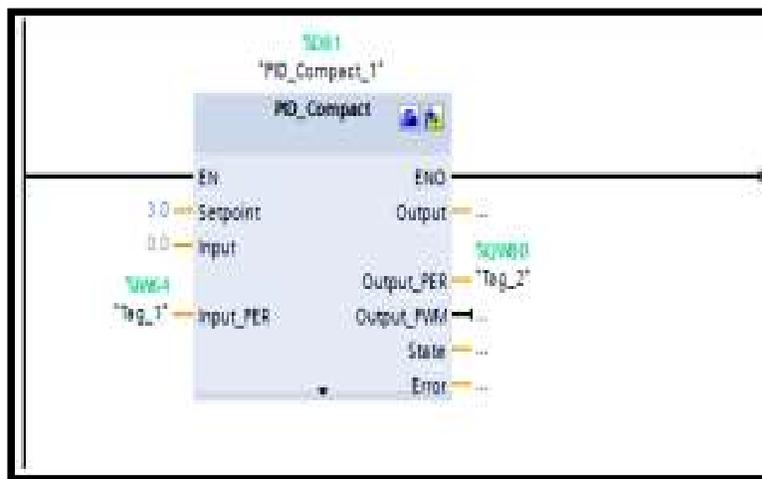
- Leer la entrada analógica correspondiente a la velocidad del motor DC.
- Comparar la medida con la referencia (velocidad deseada) y obtener el error.
- Aplicar el algoritmo de control PID, calculando el efecto proporcional, integral y derivativo.
- Observar en la pantalla HMI las curvas características de cada parámetro.

### **Procedimiento práctico**

- Utilizar un nuevo bloque de programa organización del tipo "interrupción cíclica", indicando el tiempo de ciclo 1 mili segundo (periodo de muestreo del controlador).
- Añadir en el bloque de interrupción cíclica creando una instrucción del tipo "PID\_Compact". Para ello, arrastrar la instrucción del bloque que puede

encontrarse en la columna de instrucciones de la derecha, en la columna de "Tecnología", y dentro de la carpeta "PID Control".

- Ubicar esta instrucción en el primer segmento de la interrupción cíclica. Al colocar aparecerá una ventana para configurar el bloque de datos (DB) del PID. En esta ventana no modificar ninguna opción y pulsar el botón aceptar.
- La instrucción PID\_Compact ayuda a programar un controlador PID general con optimización integrada.
- Se debe ingresar los siguientes parámetros:
  - a) Setpoint;
  - b) Input\_PER: %IW64
  - c) Output\_PER: %QW80



- Setpoint es el parámetro de entrada de tipo REAL y representa la consigna o referencia del controlador PID en modo automático. Representa la velocidad del motor DC deseada.
- Input\_PER es el parámetro de entrada de "periferia" de tipo WORD y representa la entrada analógica al controlador PID. Esta entrada analógica será la velocidad real de giro del motor, que será comparada (restada) con la referencia (Setpoint). El valor real de entrada analógica se almacena en la

dirección %IW64 por este motivo se escribe esta dirección en el parámetro Input\_PER.

- Output\_PER es el parámetro de salida de "periferia" de tipo WORD y representa la salida analógica del controlador PID. En este caso esta salida será la señal de control generada por el PID expresada como el voltaje necesario para que el motor gire a la velocidad deseada (Setpoint), el valor de esta salida se deberá almacenar en la dirección %QW80.
- Visualizar los resultados finales en la pantalla HMI.
- Sintonizar los parámetros Kp, Ti y Td para diferentes velocidades 2000 rpm, 3500 rpm y 5000 rpm.
- Ingresar los parámetros para el control proporcional Kp sintonizar con valores que este en un rango 0.001 hasta 0.006, para el control proporcional integral Kp y Ti sintonizar con valores que cumpla un rango de 0,500 segundos hasta 0,900 segundos.
- Para el control proporcional integral y derivativo Kp, Ti y Td sintonizar con valores que cumpla un rango de 0.100 segundos hasta 0.200 segundos.

**Informe:**

- Añadir una tabla con las variables utilizadas en el algoritmo de control, con sus respectivos nombres (puede utilizar la tabla de variables creada en el programa).
- En la sección de cuestionario incluir lo siguiente:
  - Cuáles son las principales ventajas de utilizar la HMI, contadores rápidos y PID\_Compact.
- Realizar una matriz de cada uno de los elementos utilizados en la HMI con su respectiva descripción y su función dentro del proceso.
- Determinar la mejor acción de control proporcional (P), proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID) del sistema utilizando las gráficas de respuesta variando los parámetros de cada control.
- Realizar una tabla con las diferentes velocidades y valores óptimos del PID.

<b>Control PID</b>	<b>Proporcional</b>	<b>Proporcional Integral</b>	<b>Proporcional Integral y Derivativo</b>
<b>Velocidad</b>	Kp = [0,001 a 0,006]	Kp= [0,001 a 0,006] Ti = [0,500 a 0,900] seg	Kp= [0,001 a 0,006] Ti = [0,500 a 0,900] seg Td = [0,100 a 0,200] seg
<b>2000rpm</b>			
<b>3500rpm</b>			
<b>5000rpm</b>			

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### ❖ CONCLUSIONES

- Con la realización de este proyecto de titulación se logra cumplir con el objetivo general, que es controlar la velocidad de un motor DC, utilizando controladores PID.
- Se cumplen los objetivos específicos al diseñar y construir, dos sistemas de control de velocidad que brinden una fácil integración entre el módulo PLC S7-1200 y la Interfaz Humano Máquina (HMI).
- Los sistemas construidos ayudarán a los estudiantes y facilitadores a realizar prácticas para comprobar el control de velocidad de un motor DC mediante la sintonización de controladores PID.
- La Interfaz Humano Máquina (HMI) permite controlar, monitorear y supervisar el sistema de control de velocidad de forma eficiente además una correcta interacción del operador con el proceso.
- Al variar los valores de la ganancia Proporcional (Kp) durante la sintonización, se observa que al ir aumentando el valor (Kp) se reduce el error en estado estacionario y la respuesta de la acción de control es más rápida, pero esto

ocasiona una sobre oscilación de la señal controlada, además se comprueba que para valores muy altos de ( $K_p$ ) el proceso es inestable.

- Al variar los valores del control Proporcional ( $K_p$ ) desde 0.001 hasta 0.006 el sistema sufre varias averías verificando que el valor más alto que puede tener es de 0.006, en este valor el error en estado estacionario es mínimo ya que si sobrepasa dicho valor el sistema se vuelve inestable.
- Para realizar la sintonización del Control Proporcional integral (PI) se tomó el valor de  $K_p = 0.006$  y el tiempo de integración ( $T_i$ ) en un intervalo de  $T_i = 0.500$  segundos hasta  $T_i = 0.900$  segundos. Al ir reduciendo el valor del tiempo de integración ( $T_i$ ) se observa que la variable controlada mejora durante el estado estable del proceso, así como también se reduce el tiempo de respuesta de la variable controlada.
- Al ejecutar las pruebas asignando valores al tiempo de integración ( $T_i$ ) desde 1.500 segundos hasta 0.900 segundos se determina que a valores altos de ( $T_i$ ) aumenta el error en estado estacionario sin embargo si estos valores son bajos disminuyen el error en estado estacionario y el sobre impulso se incrementa, por lo que el valor optimo es 0.900 segundos.
- Al realizar la sintonización del PI se logra una fina estabilidad relativa verificando que se eliminan las perturbaciones con un valor óptimo de  $K_p = 0.006$  y  $T_i = 0.900$  segundos respectivamente.
- Para determinar los parámetros óptimos de un Control Proporcional Integral Derivativo (PID), se va modificando los parámetros ( $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) hasta obtener una respuesta satisfactoria. Para hacer un ajuste fino del Control Proporcional Integral y Derivativo (PID), se usan los parámetros obtenidos en la sintonización de las acciones de Control Proporcional (P) y Proporcional Integral (PI).
- Al realizar la sintonización del PID se logra una adecuada estabilidad relativa incrementando el valor del tiempo de derivación ( $T_d$ ) desde 0.00 segundos hasta 0.200 segundos, verificando que se eliminan las perturbaciones con un valor óptimo de  $K_p = 0.006$ ,  $T_i = 0.900$  y  $T_d = 0.200$  segundos respectivamente.
- Al realizar la comparación entre las tres acciones de control para un sistema de control de velocidad de un motor DC se determina que la mejor acción es el Control Proporcional Integral (PI), ya que al realizar una sintonización adecuada

el porcentaje de error y las oscilaciones son menores, la respuesta del sistema no es inestable ni tampoco lenta, por lo tanto dicha acción de control establece un equilibrio en el régimen transitorio y permanente.

- Se elaboró un manual de usuario con información relevante como diagramas de conexión de los componentes y los planes de mantenimiento del sistema, además se detallan los procedimientos de operación paso a paso para su óptima operación.

#### ❖ RECOMENDACIONES

- Adquirir los conocimientos necesarios en cuanto a los controladores PID, lenguajes de programación, sintonización etc. Para utilizar el sistema de forma correcta.
- Se debe cumplir con todas las instrucciones de uso del sistema, siguiendo los pasos de operación que están incluidos en este documento con el fin de manipular el sistema de forma correcta.
- Si se modifican los bloques o algoritmos de control, se debe tener en cuenta que las variables creadas están vinculadas directamente con los elementos de la Interfaz HMI por lo que al modificarlas puede generar un error al momento de compilar el programa.
- Antes de operar el sistema de control de velocidad de un motor DC se debe verificar las conexiones entre el módulo y el PLC para evitar daños graves en el encoder y placas del sistema.
- Para realizar posibles ampliaciones del sistema tomar en cuenta el espacio disponible del módulo, analizar los planos de construcción para evitar daños en la estructura de madera y circuitos.
- Comprobar la polaridad de la fuente de 24 [V] DC que se toma del Módulo PLC S7-1200 antes de energizar el circuito de entrada, ya que si se conecta con polaridad inversa, ocasionará daños en los componentes de la placa electrónica.
- Leer detalladamente el funcionamiento del circuito de potencia (Sección 3), ya que el sistema funciona con relación inversa. Al momento de realizar el escalamiento y normalizado se debe asegurar que el voltaje de alimentación al

motor DC no sea menor de 2 [V] DC, ya que esto ocasionaría que el motor no pueda vencer la inercia, consumiendo demasiada corriente de la fuente, esto podría causar que el motor se caliente excesivamente.

- Realizar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo en los sistemas esto permitirá conservar y prolongar la vida útil de los equipos y dispositivos utilizados en el control de velocidad de un motor DC.
- Mantener la sintonización permanentemente dentro de los rangos de valores permitidos de los parámetros PID según el sistema a controlar.
- Para optimizar el sistema de control de velocidad se debe verificar que el valor del Setpoint sea siempre un valor superior a los 1500 rpm de tal manera que este valor permita optimizar el sistema sin errores, ya que si no se inicia con un rango de velocidad mínima permitido este no vence la inercia lo que produce que se incremente la temperatura del motor y elementos electrónicos produciendo daños en las placas electrónicas.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. D Rairan, Análisis del sistema dinámico y control PID, U. distrital Francisco José de C, 2012.
- [2] Alldatasheet. (2017). *Electronic Components Datasheet Search*. Obtenido de <http://html.alldatasheet.com/html/pdf/2846/MOTOROLA/4N25/255/1/4N25.html>
- [3] S. G. Castro, Teoría del control Barcelona España: UPC, S. L, 2002.
- [4] J. Moreno, C. Fernando and D. Lasso, Instalaciones Eléctricas de un PLC, Madrid: Paraninfo S.A, 2010.
- [5] Angulo, P. (Septiembre de 2014). *Blog de Pablo Angulo*. Obtenido de <http://pabloangulo.blog.epn.edu.ec/wp-content/uploads/sites/174/2014/09/EI-Contactor-Electromagn%C3%A9tico.pdf>.
- [6] Atmel Corporation. (Agosto de 2016). *Atmel Corporation*. Obtenido de [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42742-ATmega164P\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42742-ATmega164P_Datasheet.pdf)
- [7] Barros, M. & Tipan, S. (2017). *Construcción de un dispositivo de protección para motores DC de inducción basado en el microcontrolador Pic*. Quito.

- [8] Blogspot. (15 de Febrero de 2013). *Electricidad Práctica*. Obtenido de <http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com/2011/07/motores-electricos.html>
- [9] Bowerl, A. B. (Agosto de 2012). Cuaderno de Aplicaciones Técnicas. *El motor asíncrono trifásico*. Barceloma, España.
- [10] Brunk. (Enero de 2015). *Brunk Technology*. Obtenido de <http://brunk.es/es/pulsadores-interruptores/2726-pulsador-metalico-rojo-155mm-de-diametro-circuito-abierto.html>
- [11] Explico Fácil. (22 de Febrero de 2016). *Explico Fácil*. Obtenido de <http://www.explicofacil.com/2016/02/la-importancia-de-una-buena-fuente-de.html>
- [12] Galarza, M. & Quisaguano, J. (2009). *Diseño y construcción del sistema de frenado dinámico para un vehículo eléctrico*. Quito.
- [13] GHI Electronics. (Enero de 2010). *GHI Electronics*. Obtenido de <https://www.ghielectronics.com/downloads/man/20084141716341001-RelayX1.pdf>
- [14] Ingelcom. (31 de Julio de 2016). *Ingelcom*. Obtenido de [https://issuu.com/frogcreativos/docs/cat\\_\\_logo\\_ingelcom\\_siemens?workerAddress=ec2-107-22-128-5.compute-1.amazonaws.com](https://issuu.com/frogcreativos/docs/cat__logo_ingelcom_siemens?workerAddress=ec2-107-22-128-5.compute-1.amazonaws.com)
- [15] Lopez, D. (Marzo de 2010). El mundo es ELección. Obtenido de <http://elmundoeselectronica.blogspot.com/2010/03/proteus-herramienta-proteus-proteus-es.html>.
- [16] Siemens, «support.industry.siemens.» 06 Diciembre 2016.  
Available:<https://support.industry.siemens.com/tedservices/>
- [17] DatasheetService/DatasheetService?format=pdf&mlfbs=6ES7212-1BE40-0XB0&language=en&caller=SIOS.
- [18] Cuenca Alan.(Febrero de 2017) Diapositivas control PID
- [19] [https://www.ecured.cu/Control\\_integral](https://www.ecured.cu/Control_integral)

# ANEXOS

**ANEXO A.** Especificaciones técnicas elementos del sistema

**ANEXO B.** Circuitos electrónicos

**ANEXO C.** Placas electrónicas

**ANEXO D.** Manual de usuario

## **ANEXO A**

### **❖ ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA**

**Tabla A.1** Especificaciones técnicas encoder E6B2-ZW3E

<b>DATOS TÉCNICOS</b>	<b>E6B2-CWZ6C</b>
Fuente de alimentación voltaje	5 [V] DC- 5% A 24 [V] DC+ 15%
Corriente	70 [mA] máx.
Resolución	10/20/30/40/50/60/100/200 /300/400/500/600/720/800/ 1000/1024/1200/1500/1800 2000 RPM
Salida de faces	A,B y Z (reversible)
Configuración de salidas	Abrir colección
Capacidad de salida	30 [V] DC máx. 35 [mA] máx. Voltaje residual 0.4 [V]
Respuesta máxima de frecuencia	100 KHZ
Faces diferentes de salida	90° ± 45° entre A y B
Tiempo de subida y bajada en la salida	1μ máx. Control salida de voltaje 5[v] Resistencia de carga 1kΩ Longitud de cable 0,5 [m]
Resistencia de aislamiento	20MΩ min at 500 [V] DC
Resistencia dieléctrica	500 [V] DC 50/60 Hz por 1 minuto

**Tabla A.2** Especificaciones técnicas Signal Board 1232

<b>SIGNAL BOARD 1232</b>	
Datos Técnicos	SB 1223AQ 1 x 12bit
Dimensiones A x A x P(mm)	38x62x21 mm
Disipación de potencia	1.5 W
Consumo de corriente(bus SM)	15 [ mA ]
Consumo de corriente(24[v] DC)	40 [ mA ] (sin carga)
<b>Salida Analógicas</b>	
Número de salidas	1
Tipo	Tensión intensidad
Rango	±10 [V] o 0a 20 [ mA ]
Resolución	Tensión 12 bits Intensidad 11 bits
Rango total (palabra de dato)	Tensión -27.648 a27.648 Intensidad 0 a 27.648
Tiempo de estabilización (95%del nuevo valor )	Tensión 300uS ® 750 u s (1uF) Intensidad 600 u s (1mH) 2ms (10mH)

**Tabla A.3** Datos técnicos módulo PLC S7-1200

<b>DATOS TÉCNICOS</b>		
<b>Modelo</b>	<b>CPU 1212C ADC/DC relé</b>	<b>CPU 1212C DC/DC relé</b>
Tiempo de mantenimiento (perdida de potencia )	20ms a 120 [V] AC 80ms a 240 [V] AC	10ms a 24 [V] DC
Fusible interno , no reemplazable por el usuario	3 [A], 250 [V] de acción lenta	
<b>Alimentación de sensores</b>		
Rango de tensión		
Intensidad de salida nominal (máx.)	300 [ mA ] protegido contra cortocircuitos	
Ruido de rizado máximo (<10 MHz)	< 1 [V] pico a pico	Igual a la línea de entrada
Aislamiento(Lógico de la CPU a alimentación de sensores)	Sin aislamiento	
<b>Entradas digitales</b>		
Número de entradas	8	
Tipo tensión nominal	Sumidero fuente (tipo 1 IEC sumidero	
Tensión nominal	24 [V] DC A 4 [ mA ] nominal	

Tensión continua admisible	30 [V] DC máx.	
Sobre tensión transitoria	35 [V] DC durante 0,5 seg	
Señal1 lógica (min)	15 [V] DC a 2.5 mA	
Señal 0 lógica (máx.)	5 [V] DC a 1mA	
Aislamiento (campo a lógica)	5000 [V] AC durante 1 minuto	
Grupos de aislamiento	1	
Tiempos de filtro	0.2, 0,4 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8 ms ( seleccionable en grupos de 4)	
Frecuencia de entrada de reloj HSC (máx.) señal 1 lógica =15 a 26 V DC	Fase simple 100 KHz (la 6 a la 7)	
Número de entradas ON simultáneamente	8	
Longitud de cable en metros	500 apantallado 300 no apantallado	

**Tabla A. 04** Datos técnicos Mosfet IRFP460

<b>MOSFET IRFP460</b>	
$V_{DS}$ (V)	500
$R_{DS(ON)}$ ( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10$ [V] 0.27
$Q_g$ (Max.) (nC)	105
$Q_{gs}$ (nC)	26
$Q_{gd}$ (nC)	42
Configuration	Single
$V_{DS}$ (V)	500
$R_{DS}$ (ON)( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10$ [V] 0.27
$Q_g$ (Máx.) (nC)	210
$Q_g$ (nC)	29
$Q_{gd}$ (nC)	110
Voltaje de drenaje	500 [V] DC
Voltaje patrón	$\pm 20V_{GS}$
Corriente	$I_D$ 20 [A] a $T_c$ 25°C $I_D$ 13 [A] a $T_c$ 100°C
Máxima disipación	$T_c = 25^\circ\text{C}$ $P_D = 280$ W
Torque de trabajo	1.1 N.m

## **ANEXO B**

### **❖ CIRCUITOS ELECTRÓNICOS**

## **CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO DE ENTRADA**

**B1**

## **CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO DE SALIDA**

**B2**

## **ANEXO C**

### **❖ PLACAS ELECTRÓNICAS**

**A) PLACA ELECTRÓNICA PARA ACONDICIONAMIENTO DE LA  
SEÑAL DE ENTRADA**

**B) PLACA ELECTRÓNICA PARA ACONDICIONAMIENTO DE  
LA SEÑAL DE SALIDA**

## **ANEXO D**

### **❖ MANUAL DE USUARIO**

## **PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN**

El presente manual tiene como objetivo informar el funcionamiento del sistemas de control de velocidad de un motor DC, utilizando controladores PID implementados, así como también mostrar las acciones de mantenimiento periódicas, que se deben ejecutar para mantener los equipos en condiciones óptimas, ya que son herramientas de aprendizaje que deben estar en completa disposición de los estudiantes en cada sesión de laboratorio.

### **❖ NORMAS DE SEGURIDAD**

- Ingresar al laboratorio de control con total calma y aguardar en la mesa de trabajo, a la espera de las instrucciones del instructor.
- Comprobar el funcionamiento de los algoritmos de control antes de realizar las conexiones eléctricas.
- Realizar las conexiones entre el módulo y el PLC.
- Durante el funcionamiento del motor DC y encoder evitar el contacto con el eje de, anillos, cadenas, pulseras, cabellos, mangas de los sacos o buzos del operador.
- Evitar la manipulación de cables y borneras que estén conectados en el sistema, cuando este energizado el motor.
- Al finalizar cada sesión de práctica realizar la limpieza de cada módulo utilizado.

### **❖ EL FUNCIONAMIENTO**

El sistema de control de velocidad de un motor DC tiene un objetivo controlar la velocidad utilizando controladores (PID).

- Realizar la conexión entre la CPU y el autómata Lógico Programable (PLC) mediante la conexión del cable Ethernet.
- Configurar las direcciones IP de la CPU y la del WinCC Professional con la dirección 192.168.0.3 del PLC con la dirección 192.168.0.1.
- Con la ayuda de cables número 14 AWG se alimenta al motor con 24 [V] DC desde el (PLC).

- Se alimenta la fuente externa del sistema con 110 [V] AC, de la salida analógica del PLC %QW80, se conecta al sistema a la dirección %QW80 y de la entrada digital del PLC de dirección (%I0.0).
- Se conecta a la salida digital del sistema con la dirección (%I0.0), como se muestra en el anexo D, lámina D.1.
- Finalmente se conecta desde la entrada digital 24 [V] DC al motor y el neutro se le conecta al común del PLC, compilar los bloques Main,Cyclic Interrupts y imagen cargar al PLC cambiar la consigna a 1500 rpm y al final optimizar el sistema.

Desde la Interfaz Humano Máquina (HMI), se realiza el cambio de valores a los parámetros (PID) para obtener el control del sistema.

Para garantizar el control se observa las gráficas de las curvas características o curvas patrón.

- **MARCHA DEL SISTEMA (ON)**
  - Verificar que CPU, PLC, y la fuente externa del sistema esté en modo ON (energizados).
  - Comprobar que la luz led del PLC y del sistema este encendido.
  - Constatar que el motor este encendido y que su eje gire.
- **APAGADO DEL SISTEMA (OFF)**
  - Parar el sistema desde el bloque Main opción Online parar PC.
  - Girar la perilla de la fuente de alimentación del sistema ubicar el selector en modo (OFF) apagado.
  - Girar el selector el PLC al modo (OFF) apagado
- **PLAN DE MANTENIMIENTO**

Consta de inspecciones visuales, ajustes, limpieza y accionamiento. Esto garantiza que el sistema se encuentre operativo en cualquier momento que se lo requiera.

- **CIRCUITOS**

**Sin Energizar**

- Limpiar el polvo de las dos placas electrónicas y la fuente de corriente continua (DC)
- Ajustar todos los terminales con destornilladores de uso eléctrico.

**Energizado**

- Medir voltaje de alimentación en los terminales de la fuente 12 [V] DC.
- Medir voltaje del PLC 24 [V] DC que alimentará al circuito de entrada.
- Medir voltaje de alimentación sensor (encoder) 5 [V] DC.

**MOTOR**

- **Sin energizar**

- Limpiar el polvo del motor.
- Ajustar todos los tornillos de la base del motor al soporte de madera.
- Ajustar el acople del motor con el sensor (encoder).

- **Energizado**

- Medir el voltaje de alimentación al motor 12 [V] DC.
- Medir el voltaje de alimentación del sensor (encoder) 5 [V] DC.

**NOTA 1:** Esta operación se debe realizar cada 6 meses por lo menos.

**NOTA 2:** En caso de no cumplir las comprobaciones o verificaciones de voltaje de los elementos del sistema, consultar en la sección averías.

**AVERIAS EN EL SISTEMA**

En la mayoría de los casos las averías son exteriores, en las placas electrónicas las más frecuentes son:

<b>AVERÍA</b>	<b>CAUSA</b>	<b>SOLUCIÓN</b>
Circuito de entrada, N°1 aumenta la temperatura excesivamente.	El disipador de calor del mosfet LM311 esta averiado	Cambiar el disipador de calor.
	El mosfet LM 311 está quemado.	Reemplazar por uno nuevo.

Alimentación del circuito N°1 es mayor a 24 V	Los flaps-flops integrados 74109 están quemados.	Es prudente cambiar los 2 flaps-flops.
Circuito de salida, N°2 aumenta la temperatura excesivamente.	El disipador de calor del mosfet IRFP - 460 está roto.	Cambiar el disipador de calor por uno más grande.
	El mosfet IRFP - 460 este quemado.	Reemplazar por uno nuevo de iguales características.

**NOTA 1:** Para cambiar los elementos, la persona que realice los trabajos debe ser preferentemente con formación técnica.

**NOTA 2:** Cuando el problema no se pueda solucionar y no conste dentro de la tabla de averías, apague el sistema desde el interruptor y consulte con un técnico certificado.

## **VISTA FRONTAL DEL MÓDULO DIDACTICO**

**D1**