



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

### **“IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE POSICIÓN, TEMPERATURA Y VELOCIDAD, EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

**CÓRDOVA COX ERICK ALEXIS  
RIVADENEIRA AGUIRRE ELVIS DANILO**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN**

Para la obtención del Título de:

# **INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2016**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2015-10-15

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**CÓRDOVA COX ERICK ALEXIS  
RIVADENEIRA AGUIRRE ELVIS DANILO**

---

Titulado:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA PARA EL CONTROL  
AUTOMÁTICO DE POSICIÓN, TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL  
LABORATORIO DE CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA  
FACULTAD DE MECÁNICA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Pablo Montalvo Jaramillo  
**DIRECTOR**

---

Dr. Marco Haro Medina  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

## **EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CÓRDOVA COX ERICK ALEXIS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN: “IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE POSICIÓN, TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

**Fecha de Examinación: 2016-11-10**

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Carlos Santillán Mariño <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Pablo Montalvo Jaramillo <b>DIRECTOR</b>			
Dr. Marco Haro Medina <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

\_\_\_\_\_  
Ing. Carlos Santillán Mariño  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## **EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** RIVADENEIRA AGUIRRE ELVIS DANILO

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE POSICIÓN, TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2016-11-10

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Carlos Santillán Mariño <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Pablo Montalvo Jaramillo <b>DIRECTOR</b>			
Dr. Marco Haro Medina <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

## **DERECHOS DE AUTORIA**

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los Autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Córdova Cox Erick Alexis**

---

**Rivadeneira Aguirre Elvis Danilo**

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Rivadeneira Aguirre Elvis Danilo y Córdova Cox Erick Alexis, declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente, están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

---

**Córdova Cox Erick Alexis**

Cédula de Identidad: 150078431-7

---

**Rivadeneira Aguirre Elvis Danilo**

Cédula de Identidad: 140069769-2

## **DEDICATORIA**

Dedico este Trabajo de Titulación a Dios y a mis padres; a Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome la fortaleza para continuar hacia adelante, a mis padres pilares fundamentales en mi vida sin ellos jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora, su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, también dedico este proyecto a mi esposa y a mi hija, mis compañeras inseparables de cada jornada, en ellas representó el gran esfuerzo y tesón en momentos de decline y cansancio. A ellos este proyecto, que sin su ayuda, no hubiese podido ser.

**Erick Alexis Córdova Cox**

El presente trabajo se lo dedico a Dios porque es él quien me acompaña y está a mi lado siempre, guiándome en cada paso que doy para hoy ver cumplido el objetivo de esta etapa de mi vida, por concederme la fortaleza física y espiritual necesaria para no darme por vencido y superar todas las dificultades que se han presentado a lo largo del camino recorrido.

A mis padres Lino Enrique Rivadeneira y Carmen Aguirre, las personas que me han apoyado siempre, quienes han sido mi ejemplo y mis primeros maestros, los que me enseñaron que el camino correcto no siempre es fácil de recorrerlo, que mientras más lejos llega una persona, más humilde, respetuosa, trabajadora y honesta debe ser y que el amor a dios y a la familia son fundamentales para alcanzar el éxito.

A mis hermanos Jairo, Estrella y Vannesa quienes siempre han confiado en mí dándome su apoyo incondicional, no olviden que el éxito se alcanza trabajando duro sin darse por vencido para superar todos los obstáculos que se nos presenten.

A mis tíos y primos quienes me han apoyado siempre en los buenos y malos momentos.

**Rivadeneira Aguirre Elvis Danilo**

## **AGRADECIMIENTO**

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo de titulación. Por esto agradezco a nuestro Director de trabajo de titulación Ing. Pablo Montalvo, Asesor Ing. Ángel Silva y a mi amigo Elvis Rivadeneira, quienes a lo largo de este tiempo han puesto a prueba sus capacidades y conocimientos en el desarrollo de este trabajo el cual ha finalizado llenando todas nuestras expectativas. A mis padres quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades. A mi esposa y a mi hija que nunca declinaron y me apoyaron en las buenas y las malas dándome fortaleza para seguir adelante y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa Universidad la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

**Erick Alexis Córdova Cox**

Agradezco a Dios, a mis padres, hermanos y toda mi familia por han estado a mi lado siempre, brindándome su apoyo y fortaleza para culminar con este trabajo que es resultado y la muestra de todo el estudio a lo largo de la carrera.

Agradezco al Ing. Pablo Montalvo, al Ing. Ángel Silva y al Dr. Marco Haro quienes además de ser unos excelentes maestros y amigos, nos ayudaron de manera desinteresada a culminar exitosamente con este trabajo.

Agradezco mi compañero Erick Cordova con quien desarrollé este trabajo de titulación por su perseverancia y trabajo arduo, de quien aprendí muchas cosas y con quien es muy grato alcanzar esta meta juntos.

Finalmente agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrimos sus puertas y darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente como Ingenieros.

**Rivadeneira Aguirre Elvis Danilo**

## CONTENIDO

Pag.

### CAPÍTULO I

#### 1. INTRODUCCIÓN.

1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3	OBJETIVOS .....	3
1.3.1	<i>Objetivo General</i> .....	3
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	3

### CAPÍTULO II

#### 2. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO PARA LA EJECUCIÓN DEL CONTROL DE POSICIÓN, TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL ÁREA DE CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTIC.

2.1	Principios de Funcionamiento de los Principales Componentes del Módulo..	4
2.1.1	<i>Motor 12V DC.</i> .....	4
2.1.2	<i>Motor Paso – Paso.</i> .....	5
2.1.3	<i>Encoder Óptico de Conteo.</i> .....	6
2.1.4	<i>Sensor LM35.</i> .....	6
2.1.5	<i>Acelerómetro.</i> .....	7
2.1.6	<i>Ventilador 12V.</i> .....	7
2.1.7	<i>Bombillo Halógeno 120V AC.</i> .....	8
2.1.8	<i>Relé 12V.</i> .....	8
2.2	DAQ MULTIFUNCIÓN NI USB-6009.....	9
2.3	LABVIEW .....	10
2.4	TIPOS DE SEÑALES .....	11
2.5	SISTEMAS DE CONTROL DINÁMICO LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO .....	12
2.5.1	<i>Sistemas de Control Lazo Abierto.</i> .....	12
2.5.2	<i>Sistemas de Control Lazo Cerrado</i> .....	13
2.6	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	13
2.7	POLOS Y CEROS .....	14
2.7.1	<i>Patrón de Polos y Ceros.</i> .....	15
2.8	ANÁLISIS DEL LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES .....	16
2.8.1	<i>Lugares Geométricos de las Raíces.</i> .....	16
2.8.2	<i>Resumen de las Reglas Generales para construir los lugares de las Raíces.</i> 17	
2.9	SISTEMAS DE CONTROL.....	18
2.9.1	<i>Sistemas de Control en Tiempo Discreto.</i> .....	19
2.9.2	<i>Discretización de Sistemas de Tiempo Continúo.</i> .....	20
2.10	TIPOS DE CONTROL INDUSTRIAL.....	21

2.10.1	<i>Control de dos Posiciones Todo – Nada.</i>	22
2.10.2	<i>Control Flotante.</i>	22
2.10.3	<i>Control Proporcional (P).</i>	23
2.10.4	<i>Control Proporcional Integral (PI).</i>	24
2.10.5	<i>Control Proporcional Derivativo (PD).</i>	26
2.10.6	<i>Control Proporcional Integral Derivativo (PID).</i>	27
2.11	CRITERIOS DE ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS DE CONTROL....	28
2.12	MÉTODOS DE AJUSTE DE CONTROLADORES .....	29
2.13	AUTOSINTONIZACIÓN DE CONTROL PID.....	29
2.14	MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS.....	30
2.14.1	<i>Control PID de Plantas..</i>	30
2.14.2	<i>Reglas de Ziegler-Nichols para Sintonizar Controladores PID.....</i>	30
2.14.2.1	<i>Primer Método.</i>	30
2.14.2.2	<i>Segundo Método..</i>	32
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DE LA PLACA ELECTRONICA Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE ENTRENAMIENTO.</b>	
3.1	NORMAS PARA EL DISEÑO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS .....	34
3.2	ELABORACIÓN DE LA TARJETA ELECTRÓNICA DEL MÓDULO DE ENTRENAMIENTO .....	35
3.2.1	<i>Control de Posición de un Pototor Paso a Paso..</i>	37
3.2.2	<i>Control de Velocidad de un Motor DC.</i>	37
3.2.3	<i>Control de Temperatura mediante sensor LM35, bombillo halógeno y ventilador.....</i>	38
3.2.4	<i>Monitoreo de Posición del Módulo de Entrenamiento en sus tres ejes. ....</i>	39
3.2.5	<i>Control de Accionamiento por Relé.....</i>	40
3.3	ENSAMBLAJE DEL MÓDULO DE ENTRENAMIENTO.....	42
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y PUEBAS DE SEGURIDAD Y FUNCIONAMIENTO DEL MODULO.</b>	
4.1	PRUEBAS DE SEGURIDAD Y FUNCIONAMIENTO.....	46
4.2	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE APLICACIÓN DE CONTROL PID DE TEMPERATURA A 60°C.....	47
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	
5.1	CONCLUSIONES .....	53
5.2	RECOMENDACIONES.....	54
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols.....	31
2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols.....	33
3. Equipos y materiales .....	42
4. Tabla Valores control PID con ganancia proporcional 1.0.....	50
5. Tabla Valores control PID con ganancia proporcional 0.1.....	51
6. Tabla Valores control PID con ganancia proporcional 0.01.....	52

## LISTA DE FIGURAS

1. Motor DC 12V .....	5
2. Motor Paso - Paso .....	5
3. Encoder óptico .....	6
4. Sensor LM35.....	6
5. Sensor MMA7361.....	7
6. Ventilador 12V. ....	7
7. Bombillo Halógeno.....	8
8. Relé 12V .....	8
9. USB2Dynamixel.....	9
10. DAQ NI USB-6009 .....	10
11. Software LabVIEW .....	11
12. Señal analógica .....	11
13. Señal discreta en amplitud .....	12
14. Señal discreta en tiempo .....	12
15. Modelo del sistema lineal invariante en el tiempo .....	14
16. Patrón de polos y ceros .....	16
17. Sistema en lazo cerrado .....	16
18. Diagrama de sistema de control.....	18
19. Control digital o discreto .....	19
20. Diagrama de bloques de un sistema de control discreto .....	19
21. Respuesta del sistema analógica y del sistema discreto .....	21
22. Sistema de control.....	21
23. Control todo o nada / on-off .....	22
24. a) Velocidad constante      b) Velocidad constante con zona neutra.....	23
25. Control proporcional $k=1.5$ y $k=5$ .....	24
26. Control integral, señal de error $e(t)$ y señal de control $m(t)$ .....	25
27. a) Control PI con $k=1$ , $k_i=2$ b) Control PI con $k=1$ , $k_i=10$ .....	26
28. Control derivativo .....	27
29. Acciones PID .....	28
30. Curva de amortiguación $1/4$ .....	29
31. Criterios de estabilidad .....	29
32. Control PID de una planta .....	30
33. Respuesta a un escalón unitario de una planta.....	31
34. Curva de respuesta en forma S .....	31
35. Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.....	32
36. Oscilación sostenida con periodo $P_{cr}$ ( $P_{cr}$ se mide en seg.).....	32
37. Mascara de componentes .....	36
38. Circuito electrónico de la placa .....	36
39. Circuito de control de posición.....	37
40. Circuito de control de velocidad.....	38
41. Circuito de control de accionamiento de bombillo halógeno .....	39

42. Circuito de control de ventilador .....	39
43. Circuito de control sensor LM35 .....	39
44. Circuito de sensor acelerómetro .....	40
45. Circuito de control de accionamiento por relé.....	40
46. Circuito de protección del modulo.....	41
47. Circuito de sensor encoder óptico.....	41
48. Placa de circuito impreso remarcada .....	43
49. Placa de circuito impreso limpia.....	43
50. Vista posterior de la placa electrónica ensamblada .....	44
51. Vista superior de la placa electrónica ensamblada .....	44
52. Placa electrónica montada al interior de la caja de acrílico .....	45
53. Módulo de entrenamiento de control terminado.....	45
54. Diagrama de conexión para control PID de temperatura.....	48
55. Panel frontal programa control PID de temperatura. ....	48
56. Diagrama de bloques programa control PID de temperatura. ....	49
57. Grafica control PID de temperatura. ....	49
58. Grafica de respuesta del sistema de control PID 1.0 .....	50
59. Grafica de respuesta del sistema de control PID 0.1 .....	51
60. Grafica de respuesta del sistema de control PID 0.01 .....	52

## LISTA DE ABREVIACIONES

A/D	Analógica/Digital
AC	Corriente Alterna
Bits	Dígitos Binarios
DAQ	Dispositivo de Adquisición de Datos
DC	Corriente Directa
°C	Grados Celsius
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
G	Grafica
GND	Conexión a Tierra
IP	Protocolo de Internet
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LED	Diodo Emisor de Luz
LGR	Lugar Geométrico de las Raíces
MMA	Acelerómetro Micromecanizado de Eje de Baja Gravedad
ms	Milisegundos
mV	Milivoltios
NI	National Instrument
OFF	Apagar
ON	Encendido
P	Proporcional
PI	Proporcional Integral
PD	Proporcional Derivativo
PID	Proporcional Integral Derivativo
PAD	Superficie de Cobre
PCB	Placa de Circuito Impreso
PMW	Modulación por Ancho de Pulso
SLIT	Sistema Lineal Invariante en el Tiempo
TTL	Transistor-Transistor Logic
USB	Bus Universal en Serie
V	Voltios
Vdc	Voltios de Corriente Directa
Vs	Voltaje de Salida
VOut	Voltaje de Salida
VI	Instrumento Virtual
P1	Entradas/Salidas digitales
P0	Salidas/Entradas digitales
AI	Entradas analógicas
AO	Salidas analógicas

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** Etiqueta de conexión del módulo de entrenamiento.
- B** Tarjeta DAQ USB NI-6009.
- C** Medidas de la tarjeta DAQ USB NI-6009.
- D** Software LabVIEW
- E** USB to DYNAMIXEL
- F** Polaridad del servomotor DYNAMIXEL AX12
- G** Servomotor DYNAMIXEL AX12
- H** Guía de prácticas y Guía de mantenimiento y Seguridad

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en implementar un módulo de entrenamiento para realizar el control y monitoreo de posición, temperatura y velocidad con aplicaciones de control PID de las mismas variables mediante una planta real representada por el módulo de entrenamiento, permitiendo fortalecer el estudio práctico dentro del laboratorio de control y manipulación automática. Tanto el módulo de entrenamiento como los programas de control y monitoreo se construyen aplicando conocimientos adquiridos durante la investigación del estudio bibliográfico y teoría de varias materias estudiadas a lo largo nuestra formación profesional dentro de la carrera, para el diseño de la placa electrónica se aplican las normas para el diseño de PCBs, el cual nos muestra cómo se acoplan los elementos y dispositivos que integran el modulo, así como el funcionamiento general del mismo. La placa está limitada para que los circuitos que están agrupados en bloques o secciones funcionen con una fuente de alimentación de 12Vdc. El módulo se conecta a una DAQ Multifunción NI USB-6009 mediante sus respectivas entradas y salidas tanto analógicas como digitales y mediante este a un programa de control y monitoreo desarrollado a través del software LabVIEW con la ayuda de un equipo computarizado y en el cual se puede visualizar de mejor forma el control de las diferentes variables. El control automático de posición, temperatura y velocidad se realiza al llevar a cabo las instrucciones y recomendaciones de la guía de prácticas, así como también de la guía de mantenimiento y seguridad del módulo, constituyendo una gran herramienta para ayudar a fortalecer los conocimientos en el área de control y manipulación automática, adquiridos durante el proceso pedagógico de enseñanza y aprendizaje entre maestros y estudiantes.

**PALABRAS CLAVES:** <MÓDULO DE ENTRENAMIENTO DE CONTROL>, <PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)>, <CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTICA>, <PLACA ELECTRÓNICA>, <DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)>, <PLATAFORMA DE INGENIERÍA DE INSTRUMENTOS VIRTUALES DE LABORATORIO (LABVIEW)>, <INSTRUMENTO VIRTUAL (VI)>, <SEÑALES ANALÓGICAS/DIGITALES>.

## **ABSTRACT**

The present titling work consists of implementing a training module to perform the control and monitoring of position, temperature and speed with PID control applications of the same variables through a real plant represented by the training module, allowing to strengthen the practical study within of the laboratory of control and automatic manipulation both the training module and the control and monitoring programs are built using knowledge acquired during the research of the bibliographic study and theory, of several subjects studied throughout our professional training in the career, for the design of the electronic plaque we apply the rules for the design of PCBs, which shows us how the elements and devices that make up the module are coupled, as well as the general operation of the same. The plaque is limited so that circuits that are grouped in the blocks or sections operate with a 12V dc power supply. The module is connected to a DAQ Multifunction NI USB-6009, through their respective analog and digital inputs and outputs and through this to a control and monitoring programs developed through the LabVIEW software with the aid of a computerized computer and in which the control of the different variables can be better visualized. The automatic control of position, temperature and speed is carried out by carrying out the instructions and recommendations of the practical guide, as well as the maintenance and safely guide of the module, providing a great tool to help strengthen the knowledge in the area of control and automatic manipulation, acquired during the pedagogical process of teaching and learning between teachers and students.

**KEYWORDS:** <CONTROL TRAINING MODULE>, <PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)>, <AUTOMATIC CONTROL AND HANDLING>, <ELECTRONIC PLAQUE>, <DATA ACQUISITION DEVICE (DAQ)>, <PLATTFORM OF ENGINEERING OF VIRTUAL INSTRUMENTS OF LABORATORY (LABVIEW)>, <VIRTUAL INSTRUMENTS (VI)>, <ANALOG / DIGITAL SIGNALS>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El control automático ha tenido un rápido desarrollo en los últimos años. Sin embargo a lo largo del tiempo ha sufrido un proceso de evolución que se inició aproximadamente hace 300 A.C., cuando los griegos empezaron a tener la necesidad de medir empíricamente el tiempo, y ha continuado evolucionando a través de la historia con etapas tan importantes como la revolución industrial y las guerras mundiales. (Patricio, 2012)

En la actualidad la automatización, control y monitoreo de equipos y sistemas ha desempeñado una función importante, convirtiéndose en parte integral del avance y desarrollo tecnológico de los procesos modernos de manufactura en los diferentes sectores económicos de la industria, en el sector automotriz, aeroespacial, alimentos, de la construcción y en general dentro de la industria de elaboración de productos y servicios para el diseño, control y monitoreo de máquinas-herramientas como cortadoras, fresas, prensas, tornos, entre otros.

En resumen, actualmente el control automático de flujo, humedad, posición, presión, temperatura, velocidad y viscosidad son parte esencial durante las operaciones que se llevan a cabo en los procesos o sistemas de producción industrial, así como también durante las operaciones de control y monitoreo de equipos y dispositivos.

La Escuela de Ingeniería de Mantenimiento de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH cuenta con un laboratorio de control y manipulación automática, en donde los estudiantes realizan el análisis y estudio práctico de los conocimientos adquiridos sobre los dispositivos, equipos, métodos y software utilizados para la automatización, control y monitoreo durante la operación de equipos, procesos y sistemas de producción industrial, analizados durante el estudio teórico.

## **1.2 Justificación**

La automatización y control de procesos ha venido desarrollándose rápidamente durante los últimos años alrededor de todo el mundo, hasta alcanzar un importante avance tecnológico en la actualidad, dentro de la industria nacional y mundial, por lo que la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento de la Facultad de Mecánica se ve en la necesidad de modernizar los equipos y dispositivos de su Laboratorio de Control y Manipulación Automática, cumpliendo con los modernos requerimientos de formación profesional del Ingeniero de Mantenimiento, acordes con los avances, cambios y desarrollo tecnológico de nuevos equipos, dispositivos, software y métodos actuales para la automatización, control y monitoreo de procesos y sistemas de producción dentro de cualquier sector de la industria.

Debido a esto el presente trabajo de titulación, consiste en realizar el diseño e implementación de un módulo de entrenamiento para el control automático y monitoreo de posición, temperatura y velocidad de un sistema real, además también permite realizar aplicaciones de control PID, capaz de detectar cambios en los valores de dichas variables, para luego compararlas y mantenerlas en los valores de seteo seleccionados por el usuario mediante el adecuado VI desarrollado utilizando el software de programación de interfaz gráfica LabVIEW y el dispositivo DAQ Multifunción NI USB-6009 el cual hace la adquisición y procesamiento de las señales recibidas de los diferentes elementos que componen el módulo de entrenamiento de control automático.

Este módulo de entrenamiento de control automático tiene como objetivo principal, verificar mediante un análisis y estudio práctico los conocimientos adquiridos sobre los dispositivos, equipos, métodos y software utilizados para la automatización, control y monitoreo en la operación de equipos, procesos y sistemas de producción industrial, analizados durante su estudio teórico, de manera que se complemente y fortalezca el proceso pedagógico de enseñanza-aprendizaje entre maestros y estudiantes.

De esta forma se cumple con el objetivo de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que es “Formar profesionales competitivos, emprendedores, conscientes de su identidad nacional, justicia social, democracia y preservación del ambiente sano, a través de la generación, transmisión, adaptación y aplicación del conocimiento científico y tecnológico para contribuir al desarrollo sustentable de nuestro país”

### **1.3      Objetivos**

**1.3.1**      *Objetivo General.* Implementar un módulo de entrenamiento para el control automático de posición, temperatura y velocidad en el laboratorio de control y manipulación automática de la facultad de mecánica.

**1.3.2**      *Objetivos Específicos.*

- Realizar el estudio bibliográfico sobre el control automático de posición, temperatura y velocidad, para la construcción e implementación del módulo de entrenamiento.
- Diseñar y construir la placa electrónica del módulo de entrenamiento que permita realizar el control automático de las variables posición, temperatura y velocidad a través de sus principales componentes: motor 12V DC, motor paso – paso, servomotores Dynamixel AX12, Bombillo Halógeno y ventilador 12V DC.
- Diseñar un VI con aplicaciones PID para el control y monitoreo de posición, temperatura y velocidad, utilizando el software de programación de interfaz gráfica LabVIEW.
- Utilizar el dispositivo NI USB-6009 para realizar la adquisición y procesamiento de datos.
- Elaborar la guía de prácticas para el control automático de posición, temperatura y velocidad, así como el respectivo manual de mantenimiento y seguridad del módulo de entrenamiento.

## CAPÍTULO II

### 2. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO PARA LA EJECUCIÓN DEL CONTROL DE POSICIÓN, TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL ÁREA DE CONTROL Y MANIPULACIÓN AUTOMÁTICA

En correspondencia con el problema planteado el presente capítulo tiene por objetivo, analizar y estudiar los fundamentos teóricos para llevar a cabo el monitoreo y control automático, así como también el control PID de parámetros de posición, temperatura y velocidad mediante el desarrollo un sistema de adquisición de datos y el uso del software de programación de interfaz gráfica LabVIEW, con el cual se puede representar de forma práctica el funcionamiento y control de un proceso industrial.

El controlador PID tiene tres parámetros: ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa. En los sistemas de control industriales más de la mitad de los controladores empleados son controladores PID. El comportamiento de los controladores PID depende de las magnitudes relativas de estos tres parámetros.

#### 2.1 Principios de funcionamiento de los principales componentes del módulo.

Es importante conocer el principio de funcionamiento de los principales componentes que integran el módulo de entrenamiento de control, de manera que su selección sea la más adecuada y el diseño de la placa electrónica y posterior ensamble del módulo se desarrolle con total normalidad.

**2.1.1 Motor 12V DC.** Un motor 12V DC es un dispositivo electromecánico que requiere de poca potencia para poner en funcionamiento sus mecanismos, utilizan como fuente de alimentación pilas, baterías o un convertidor de corriente alterna en directa. Su principio de funcionamiento se basa en la atracción y repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado sobre el eje permitiendo que este gire libremente. Cuando la corriente circula por la bobina de este electroimán giratorio, el campo electromagnético interactúa con el campo magnético del imán permanente, si los polos

del imán permanente y del imán giratorio coinciden se produce un rechazo y por lo tanto un par de fuerza que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj o en el sentido contrario de acuerdo a la conexión de la fuente de alimentación. (*ASI FUNCIONA*)

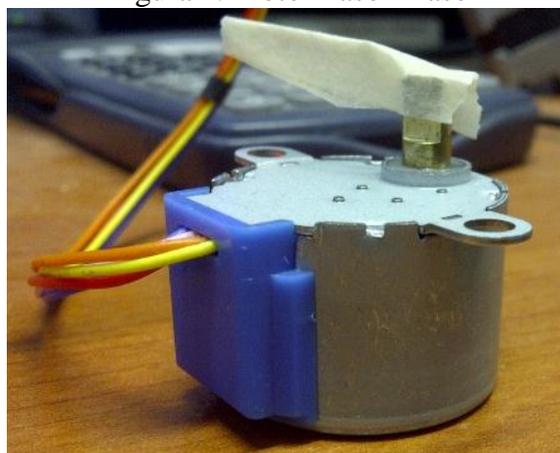
Figura 1. Motor DC 12V



Fuente: [www.ti.com](http://www.ti.com)

**2.1.2** *Motor Paso – Paso.* Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico capaz de convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, de manera que a diferencia de un motor convencional que gira de forma continua, un motor paso a paso es capaz de girar o avanzar una serie de grados a la vez dependiendo del estado de sus entradas, por cada pulso recibido, el rotor gira un determinado número discreto de grados. (*Cruz, 2007*)

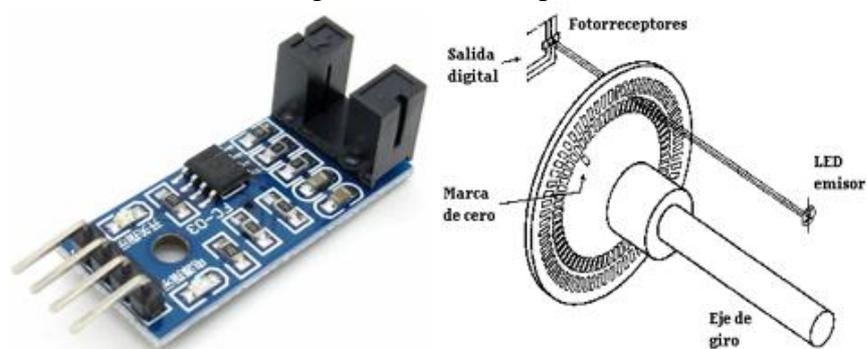
Figura 2. Motor Paso - Paso



Fuente: <https://hetpro-store.com>

**2.1.3** *Encoder óptico de conteo.* Un encoder óptico de conteo es un transductor que convierte una magnitud de un mecanismo, tanto posición lineal como angular a una señal digital (a través de un potencial), en definitiva se trata de un sensor que permite detectar el movimiento de rotación de un eje. Su principio de funcionamiento se basa en los fotoacopladores, que son pequeños chips que se encargan de detectar la presencia o ausencia de luz a través de discos concéntricos acoplados al eje, los cuales poseen ranuras que dejan pasar la luz en función de una codificación para obtener la medida final. *(Texas Instruments)*

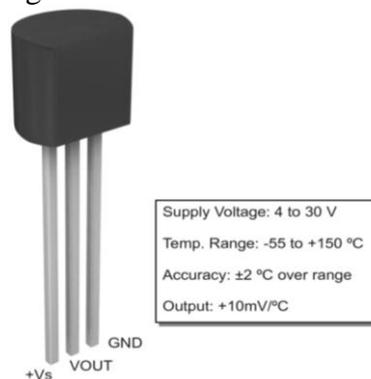
Figura 3. Encoder óptico



Fuente: [www.ti.com](http://www.ti.com)

**2.1.4** *Sensor LM35.* Un LM35 es un sensor de temperatura capaz de tomar lecturas entre  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $150^{\circ}\text{C}$ , calibrado de fábrica con una precisión de  $1^{\circ}\text{C}$ , este sensor tiene tres pines, dos de entrada o alimentación ( $+V_s$ , GND) y una de salida para entrega de datos (VOUT), la misma que lo hace de forma lineal, por cada grado de temperatura que se eleva, tenemos 10mV mas en la salida. Debido a la simpleza de su construcción no necesita de un circuito externo para su funcionamiento. *(Texas Instruments)*

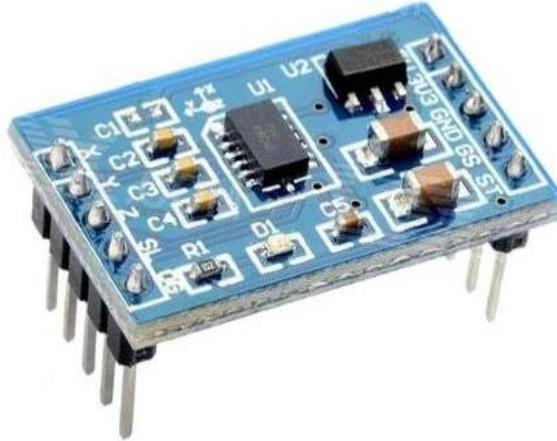
Figura 4. Sensor LM35



Fuente: [www.ti.com](http://www.ti.com)

**2.1.5** *Acelerómetro.* Es un sensor de 3 ejes, de acuerdo al nivel de las medidas del acelerómetro, nos permite medir la aceleración o inclinación de una plataforma con respecto al eje terrestre. Este sensor funciona con una fuente de alimentación de 2.2Vdc a 3.6Vdc y tiene un consumo de 400 $\mu$ A. (*hetpro-store*)

Figura 5. Sensor MMA7361



Fuente: <https://hetpro-store.com>

**2.1.6** *Ventilador 12V.* Un ventilador es un dispositivo que se encarga de extraer el calor que se genera al interior de un proceso o equipo debido a la ejecución de un trabajo, de manera que el resto de elementos se mantenga a una temperatura adecuada impidiendo que se calienten de forma excesiva.

Figura 6. Ventilador 12V.



Fuente: <https://hetpro-store.com>

**2.1.7** *Bombillo halógeno 120V AC.* Un bombillo halógeno de 120v AC, es un dispositivo que produce luz, mediante el calentamiento de un filamento metálico, debido a la circulación de corriente eléctrica a través del mismo, sin embargo, una gran parte de la energía que consume la lámpara se transforma en calor.

Figura 7. Bombillo Halógeno



Fuente: <http://instalacioneselectricas4.blogspot.com>

**2.1.8** *Relé 12V.* Un relé es un dispositivo electromagnético que permite activar una línea eléctrica de alta o media potencia de tensión alterna o continua, a través de un circuito electrónico de baja potencia de tensión continua, de forma que la línea eléctrica está completamente aislada de la parte electrónica que controla el relé. Es decir, se puede controlar cualquier tipo de dispositivo o equipo conectado a la red eléctrica a través del relé de un circuito electrónico como un temporizador o una fotocélula.

Un relé está integrado por una bobina, una armadura metálica y un grupo de contactos que pueden ser conmutados a través de un campo magnético. (*inventable.eu*)

Figura 8. Relé 12V



Fuente: [www.inventable.eu](http://www.inventable.eu)

**2.1.9** *USB2Dynamixel.* USB2Dynamixel es un dispositivo que se utiliza para operar Dynamixel directamente desde un computador, el dispositivo se conecta al puerto USB del PC de manera que varios tipos de Dynamixel pueden ser conectados mediante los puertos de compatibilidad de 3pin y 4pin con los que el dispositivo está equipado. (*robotis.inc*)

Figura 9. USB2Dynamixel



Fuente: [www.robotis.inc](http://www.robotis.inc)

## **2.2 DAQ multifunción NI USB-6009.**

NI USB-6009 es un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) compacto, portátil y energizado por USB, que permite realizar mediciones y análisis de señales de manera que se fortalezca el estudio práctico fuera del entorno de laboratorio, mediante el uso de herramientas y métodos estándares utilizados en la industria.

El USB-6009 brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas. Entre sus principales características tenemos:

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s).
- 2 salidas analógicas estáticas (12 bits); 12 E/S digitales; contador de 32 bits.
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada.
- Compatible con LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio. NET

Figura 10. DAQ NI USB-6009



Fuente: [www.ni.com](http://www.ni.com)

### 2.3 LabVIEW

LabVIEW es un software que permite desarrollar una solución óptima que cumpla con los requerimientos personalizados y resolver los problemas planteados, es un entorno de desarrollo integrado y diseñado específicamente para acelerar la productividad de ingenieros y científicos que desarrollan sistemas de medidas y control. LabVIEW posee un lenguaje de programación gráfica (G) nativo, IP integrado para análisis de datos y procesamiento de señales y una arquitectura abierta que permite la integración de cualquier dispositivo de hardware y cualquier enfoque de software, utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, permitiendo escribir un código funcional utilizando un diseño visual que se asemeja a su proceso de pensamiento. Esto significa menos tiempo en la verificación del punto y coma y la sintaxis y más tiempo en la solución de los problemas que importan. LabVIEW puede aplicarse en diferentes áreas de la industria y ciencia como: Automatización de sistemas de pruebas y validación, automatización de medidas y procesamiento de datos de señales, control de instrumentos, diseño de sistemas de monitoreo y control embebidos y enseñanza académica.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman instrumentos virtuales VIs y constan de tres partes principales:

- El panel frontal que es la ventana de interfaz del usuario de un programa, contiene los controles que son las entradas y los indicadores que son las salidas.

- El diagrama de bloques es el código ejecutable compuesto por nodos, terminales y cables, contiene la barra de menú, la paleta de funciones para colocar nodos (funciones y subVIs) y la paleta de tools para realizar las tareas de operación, edición y depuración.
- El icono o conector. (National Instruments)

Figura 11. Software LabVIEW



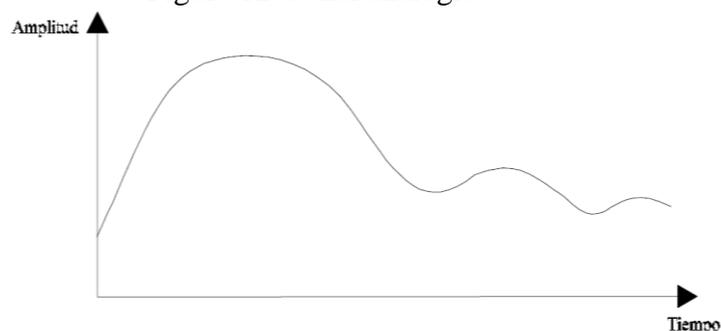
Fuente: [www.ni.com](http://www.ni.com)

## 2.4 Tipos de señales

Las señales son oscilaciones de datos de entrada o salida de un sistema que se generan en función del tiempo, estas pueden ser señales analógicas o señales discretas, teniendo diversas unidades físicas de medición, de acuerdo a la naturaleza de la señal.

- Señales analógicas: Son aquellas que pueden tomar cualquier valor real en cualquier intervalo de tiempo, son señales en las cuales su variación u oscilación en función del tiempo (amplitud y longitud de la señal) es continua.

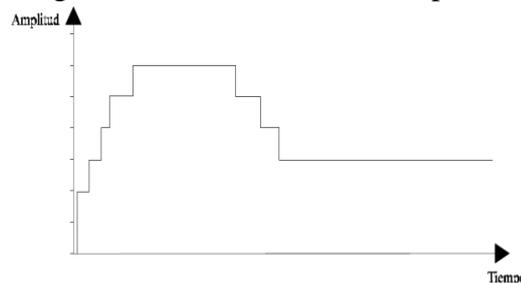
Figura 12. Señal analógica



Fuente: Teoría de control, diseño electrónico.

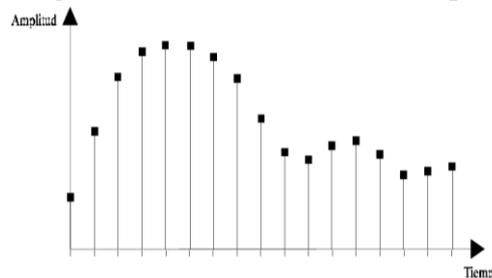
- Señales discretas: Son aquellas señales en las que su variación u oscilación en función del tiempo (amplitud y longitud de la señal) no es continua como las señales analógicas, tomando un valor de un conjunto determinado de valores probables y dependiendo donde se tome dichos valores estas pueden ser señales discretas en amplitud, señales discretas en tiempo o señales discretas en amplitud y tiempo. (SPARTACUS, y otros, 2000)

Figura 13. Señal discreta en amplitud



Fuente: Teoría de control, diseño electrónico.

Figura 14. Señal discreta en tiempo



Fuente: Teoría de control, diseño electrónico.

## 2.5 Sistemas de control dinámico lazo abierto y lazo cerrado

**2.5.1** *Sistemas de control lazo abierto.* En los sistemas de control en lazo abierto, la comparación entre las señales de salida y las señales de entrada de referencia no se lleva a cabo, correspondiéndole a cada señal de entrada una operación ya establecida sobre la señal de salida, siendo fundamental comprender la relación entre las señales de salida y las señales de entrada, por lo que debe garantizarse la inexistencia de perturbaciones en los parámetros externos e internos del sistema, de tal manera que la exactitud o variaciones en el sistema depende en gran parte de su calibración y como resultado el cumplimiento satisfactorio o no de la función establecida. Pero esto implica que en la práctica estos sistemas resulten exageradamente costosos de ejecutar debido a la gran

exactitud que deben cumplir los parámetros.

**2.5.2** *Sistemas de control lazo cerrado.* En los sistemas de control en lazo cerrado, la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control, denominando a este efecto como realimentación.

La señal controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control, que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal medida a la salida, con el objetivo de corregir el error o desviación que pudiera existir.

La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al conjunto menos sensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos que los sistemas en lazo abierto. (SPARTACUS, y otros, 2000)

## **2.6 Función de transferencia**

La función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo (SLIT), se consigue mediante la transformada de Laplace de la ecuación característica del sistema (ecuación diferencial), en condiciones iniciales nulas, ya que el análisis del sistema mediante su ecuación característica resulta muy complejo.

La función de transferencia contiene toda la información de la dinámica del sistema, la misma que depende principalmente de las raíces del denominador, denominadas también como polos de la función de transferencia y al polinomio en el denominador se lo denomina como polinomio característico.

También es importante conocer que la ecuación diferencial permite modelar cualquier sistema lineal invariante en el tiempo y conocer la respuesta de dicho sistema a una señal de entrada determinada, acoplando la señal de salida  $Y(t)$  con la señal de entrada  $X(t)$ .

Figura 15. Modelo del sistema lineal invariante en el tiempo



Fuente: Teoría de control, diseño electrónico.

Ecuación característica:

$$a_0y^{(n)} + a_1y^{(n-1)} + a_2y^{(n-2)} + \dots + a_ny = b_0x^{(m)} + b_1x^{(m-1)} + b_2x^{(m-2)} + \dots + b_mx \quad (1)$$

Transformada de Laplace con condiciones iniciales nulas:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n} \quad (n \geq m) \quad (2)$$

Donde:  $n = \text{Orden del sistema}$

“El orden del sistema del denominador debe ser mayor o igual que el orden del sistema del numerador para garantizar que el sistema sea físicamente realizable y causal” (SPARTACUS, y otros, 2000)

Función de transferencia:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \text{ con Condiciones Iniciales (CI) = 0} \quad (3)$$

## 2.7 Polos y ceros

La función de transferencia en lazo cerrado  $G(s)$  de un sistema, en general se puede representar mediante:

$$G(s) = \frac{K(s^m + a_{m-1}s^{m-1} + a_{m-2}s^{m-2} + \dots + a_1s + a_0)}{(s^n + b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0)} \quad (4)$$

Y, si las raíces del denominador y del numerador se establecen como:

$$G(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (5)$$

Donde las raíces del numerador son  $z_1, z_2, \dots, z_m$  y se denomina ceros y las raíces del denominador son  $p_1, p_2, \dots, p_n$  y se denominan polos,  $K$  es una constante multiplicadora o la ganancia del sistema.

Los ceros son los valores de  $s$  para los cuales la función de transferencia se convierte en cero. Los polos son los valores de  $s$  para los cuales la función de transferencia es infinita, es decir, éstos hacen que el valor del denominador sea cero. Los polos y los ceros pueden ser cantidades reales o complejas.

En general, los polos y los ceros se pueden escribir como:

$$s = \sigma + j\omega \quad (6)$$

Dónde:  $\sigma$  es la parte real y  $j\omega$  es la parte imaginaria.

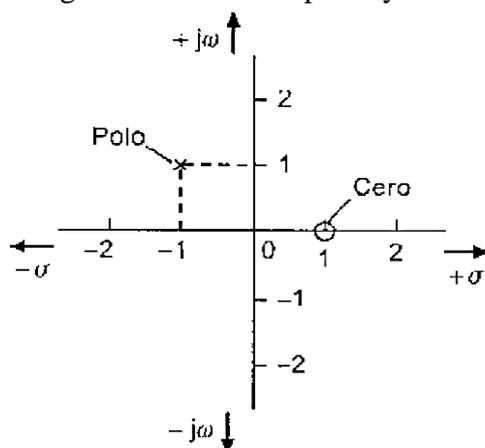
Como indica la ecuación enunciar los valores de los ceros y los polos de un sistema, juntos con el valor de una ganancia  $K$ , permite especificar por completo la función de transferencia del sistema.

**2.7.1 Patrón de polos y ceros.** Los polos y los ceros de una función de transferencia se pueden representar en un diagrama llamado el patrón de polos y ceros.

El eje  $x$  es la parte real del polo o cero y el eje  $y$  la parte imaginaria, la posición de un polo se marca con una cruz "X" mientras que la posición de un cero se marca con un pequeño círculo "O".

La grafica en dos dimensiones se conoce como *plano  $s$* , los polos o ceros en el lado izquierdo de la gráfica son negativos, mientras que los polos o ceros en lado derecho son positivos. Los polos o ceros son reales o pares del tipo  $\sigma \pm j\omega$ . (Bolton, 2001)

Figura 16. Patrón de polos y ceros



Fuente: Ingeniería de control.

## 2.8 Análisis del lugar geométrico de las raíces

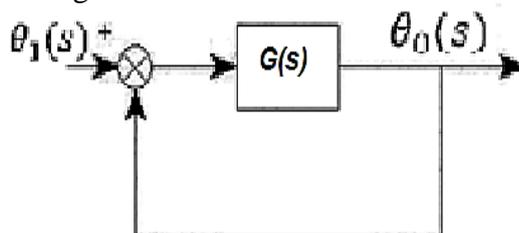
Las raíces en el denominador del polinomio de la función de transferencia de un sistema (polos), determinan la forma general de la respuesta transitoria de ese sistema.

De tal forma que, al cambiar la posición de los polos,  $p_1$  y  $p_2$ , en el plano  $s$  cambia la respuesta transitoria cuando el sistema está sujeto a un impulso. La técnica que se utiliza para este análisis se denomina *método del lugar geométrico de las raíces*. (Bolton, 2001)

$$G(s) = \frac{K}{(s+p_1)(s+p_2)} \quad (7)$$

**2.8.1 Lugares geométricos de las raíces.** El lugar geométrico de las raíces es la trayectoria formada por las raíces de una ecuación polinómica cuando un parámetro de ésta varía. En el caso de sistemas de control, la ecuación polinómica resultante es la ecuación característica, y el LGR es la trayectoria en el plano  $S$  (complejo).

Figura 17. Sistema en lazo cerrado



Fuente: Ingeniería de control.

Los polos serán los valores de  $S$  por lo que el denominador del polinomio es cero,  $G_0(s)$  se puede obtener a partir del argumento de varios elementos, cada uno de los cuales tienen su propia función de transferencia.

Los valores de  $S$  que cumplen tanto las condiciones de ángulo como las de magnitud son las raíces de la ecuación característica, o los polos en lazo cerrado. El lugar geométrico de las raíces es una gráfica de los puntos del plano complejo que sólo satisfacen la condición de ángulo.

En muchos casos,  $G(s)H(s)$  contiene un parámetro de ganancia  $K$ , y la ecuación característica se escribe como

$$1 + \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} = 0 \quad (8)$$

Donde:  $K$  es una constante,  $z_1, z_2, \dots, z_m$  son los ceros y  $p_1, p_2, \dots, p_n$  los polos.

Entonces, los lugares de las raíces para el sistema son los lugares de los polos en lazo cerrado, cuando la ganancia  $K$  varía de cero al infinito. Para empezar a dibujar los lugares de las raíces de un sistema mediante el método analizado aquí, se debe conocer la localización de los polos y los ceros de  $G(s)H(s)$ . (Ogata, 2010)

$$G(s)H(s) = \frac{K(s+z_1)}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_4)} \quad (9)$$

**2.8.2** *Resumen de las reglas generales para construir los lugares de las raíces.* En un sistema complejo en lazo abierto con muchos polos y ceros, construir una gráfica del lugar geométrico de las raíces puede parecer complicado, pero no es difícil si se aplican las siguientes reglas:

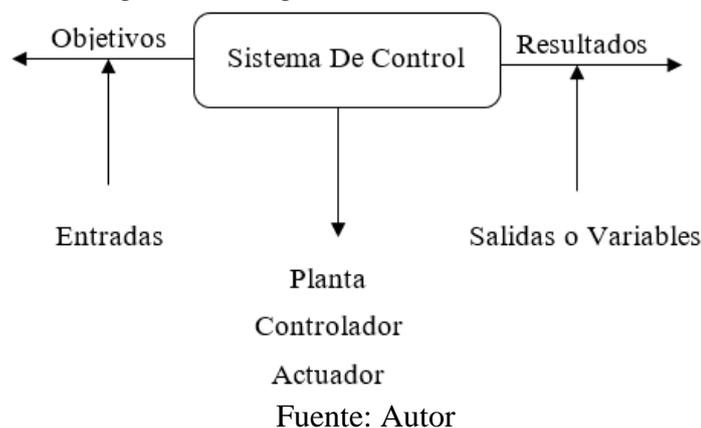
- Situar los polos y ceros de  $G(s)H(s)$  en el plano  $S$ , las ramas del lugar de las raíces empiezan en los polos en lazo abierto y terminan en los ceros (ceros finitos o ceros en infinito).
- Determinar los lugares de las raíces sobre el eje real.

- Determinar las asíntotas de los lugares de las raíces.
- Encontrar los puntos de ruptura y de ingreso.
- Determinar el ángulo de salida (ángulo de llegada) de un lugar de las raíces a partir de un polo complejo (un cero complejo).
- Encontrar los puntos donde los lugares de las raíces cruzan el eje imaginario.
- Tomando una serie de puntos de prueba en la cercanía del origen del plano  $s$ , dibujar los lugares de las raíces.
- Determinar los polos en lazo cerrado. (Ogata, 2010)

## 2.9 Sistemas de control

Un sistema o proceso está constituido por varios elementos relacionados entre sí, los cuales nos proporcionan señales o datos de salida en función a las señales o datos de entrada. De esta manera no es necesario conocer el funcionamiento interno de los diferentes elementos del sistema, debiendo conocer únicamente la relación existente entre las entradas y salidas del sistema es decir el comportamiento las señales de salida con relación a las variaciones de las señales de entrada, permitiéndonos predecir el resultados del sistema y posteriormente seleccionar la acción de control más adecuada de acuerdo a la dinámica del sistema requerido y el cumplimiento final del objetivo del mismo.

Figura 18. Diagrama de sistema de control



**2.9.1** *Sistemas de control en tiempo discreto.* Los sistemas de control discreto particularmente se caracterizan por procesar señales discretas en el tiempo y son diseñados para que el sistema de control cumpla con las especificaciones requeridas por el proceso, operando en instantes de tiempo establecidos (múltiplos del periodo de muestreo), por lo que se trata de un sistema síncrono.

El sistema queda planteado por la siguiente ecuación en diferencias:



Fuente: Teoría de control diseño electrónico.

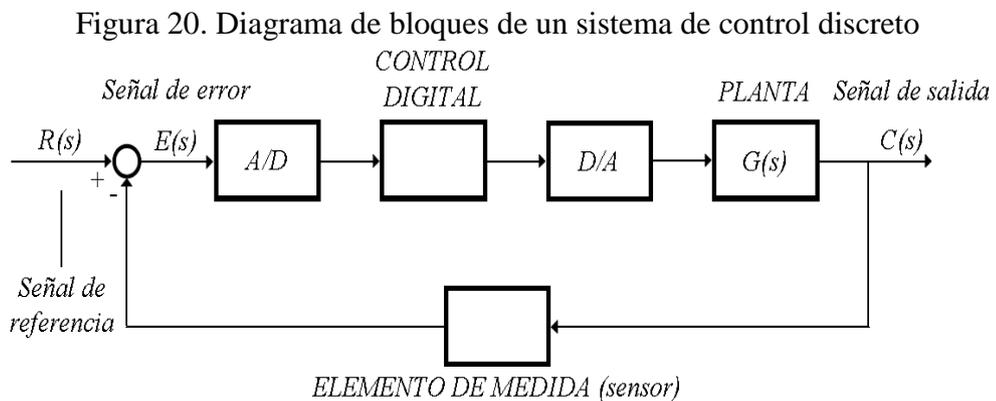
$$y(n) = \sum_{p=1}^P a(p) \cdot y(n - p) + \sum_{q=0}^Q b(q) \cdot x(n - q) \quad (10)$$

Donde:

$y(n)$  = Muestra de salida del sistema procesador

$x(n)$  = Muestra de entrada del sistema procesador

Las interfaces A/D y D/A que convierte señales analógicas en señales discretas y señales discretas en señales analógicas permiten que el procesador discreto del sistema de control reconstruya temporalmente la señal discreta en una señal continua en el tiempo.



Fuente: Teoría de control diseño electrónico.

**2.9.2** *Discretización de sistemas de tiempo continuo.* Los sistemas de control de tiempo continuo se diseñan cuando se requiere implementar un elemento de tipo hardware (circuito electrónico), mientras que cuando se requiere implementar o realizar un software (programa) se diseñan sistemas de control de tiempo discreto.

Existe también la posibilidad de transformar los sistemas de control de tiempo continuo en sistemas de control de tiempo discreto transformando el hardware y las características dinámicas del sistema de control, obteniendo los parámetros adecuados del sistema de tiempo discreto en función de los parámetros de la función de transferencia del sistema de tiempo continuo.

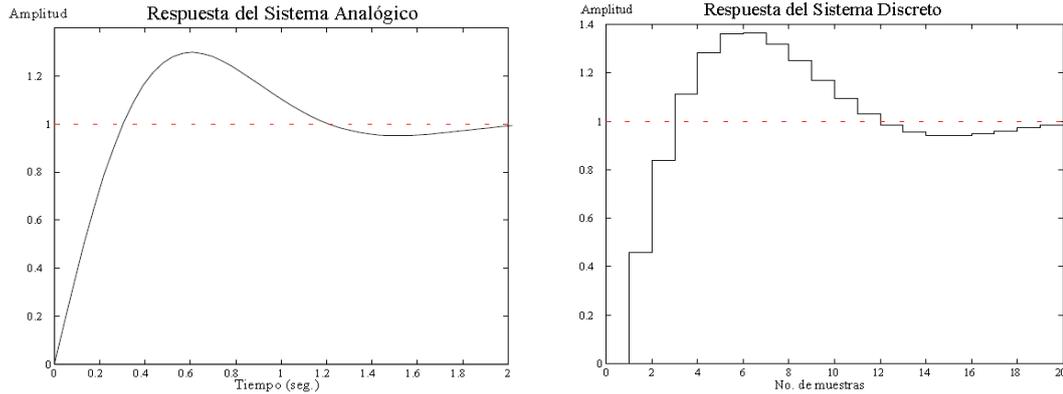
Un método eficaz y simple para la discretización de sistemas o filtros analógicos es el método del mapeo cero-polo.

El mismo que consiste en aplicar independientemente la transformación  $z = e^{sT}$  a los ceros y polos de la función de transferencia de tiempo continuo  $G(s)$  para obtener la función de transferencia transformada de tiempo discreto  $G(z)$ , manteniendo la ganancia de dicha función de transferencia para  $s = 0$  o  $z = 1$  según el dominio de estudio.

El procedimiento de discretización por el método de mapeo cero-polo se resume en los siguientes pasos:

- Debe factorizarse  $G(s)$  obteniendo sus ceros y polos, transformándolos del plano  $S$  al plano  $Z$  aplicando la relación  $z = e^{sT}$
- Los ceros en infinito de  $G(s)$  se mapean al punto  $z = -1$  (manteniendo su multiplicidad, en conclusión, por cada cero en infinito de  $G(s)$  se origina un factor  $z + 1$  en la función de transferencia  $G(z)$ ).
- Debe ajustarse la ganancia en continua del sistema discretizado para adquirir el mismo valor que la ganancia en continua del sistema de tiempo continuo, verificando la coincidencia de la ganancia de  $G(z)$  en  $z = 1$  y de la ganancia de  $G(s)$  en  $s = 0$  (SPARTACUS, y otros, 2000)

Figura 21. Respuesta del sistema analógica y del sistema discreto

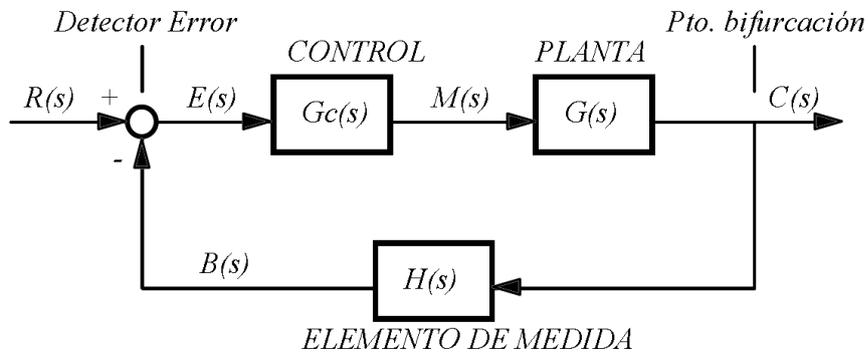


Fuente: Teoría de control diseño electrónico.

## 2.10 Tipos de control industrial.

El control es el elemento encargado de “procesar” la señal de error y “generar” una señal cuyo valor de error sea menor, con el objetivo de lograr la máxima precisión permisible del sistema de control. El procedimiento mediante el cual el controlador genera la señal de control se denomina acción de control.

Figura 22. Sistema de control



Fuente: Teoría de control diseño electrónico.

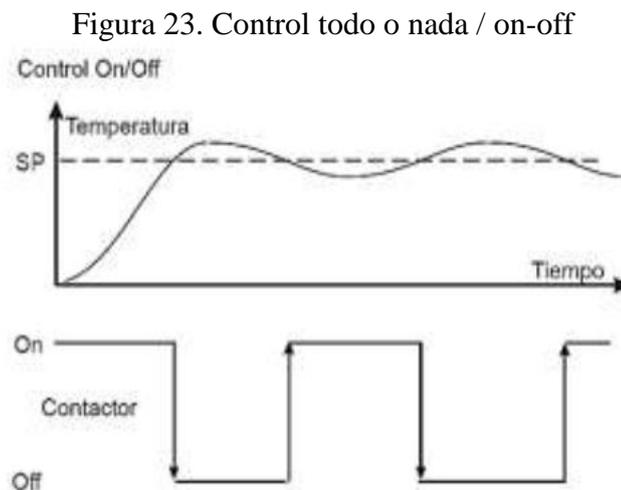
Dentro de los procesos industriales se utilizan algunos de los siguientes sistemas de control, los sistemas típicos de control en tiempo continuo son:

- Control de dos posiciones (todo – nada)
- Control flotante
- Control proporcional (P)

- Control proporcional integral (PI)
- Control proporcional derivativo (PD)
- Control proporcional integral derivativo (PID)

**2.10.1** *Control de dos posiciones todo – nada.* Este tipo de sistema de control se caracteriza porque el elemento final de control puede asumir solamente dos posiciones: abierta o cerrada (on/off), de acuerdo al valor o condición de la variable controlada, permitiendo una entrada y salida de energía ligeramente superior o inferior, a las requeridas por el proceso para su normal operación.

En un sistema de control todo-nada la variable controlada oscila continuamente por lo que tiene un ciclo permanente de cambio, variando tanto en frecuencia como en magnitud al momento de presentarse cambios de carga en el proceso. (Ogata, 2010)

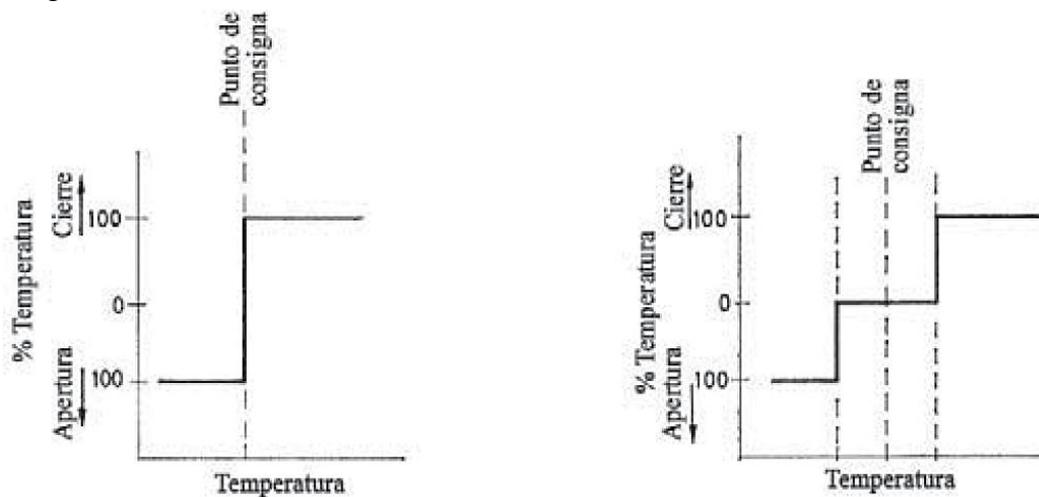


Fuente: Control & Instrumentación

**2.10.2** *Control flotante.* A este tipo de control se lo denomina también control flotante de velocidad constante, obteniéndose al combinar un sistema de control todo-nada con una zona neutra (válvula motorizada reversible de baja velocidad), permaneciendo estática si la variable se mantiene dentro de la zona neutra y se mueve en la dirección adecuada cuando la variable rebasa dicha zona hasta que la variable retorne nuevamente al interior de la zona neutra, de este modo el instrumento final de control en algunos casos puede llegar a alcanzar su máxima posición de apertura o cierre.

El control flotante tiende a generar oscilaciones en la variable controlada, las mismas que se pueden minimizar seleccionando una velocidad adecuada para el elemento de control que satisfaga las necesidades del proceso, es decir para que la variable de control permanezca estable frente a los cambios de carga repentinos que pueden ocurrir en el proceso, el instrumento de control debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida, de forma que compense los cambios de carga lentos que puedan ocurrir en el proceso, pero no es apropiado si los cambios de carga son muy rápidos, aunque los mismos sean muy pequeños o si el retardo es importante. (Creus, 2010)

Figura 24. a) Velocidad constante      b) Velocidad constante con zona neutra



Fuente: Instrumentación industrial.

**2.10.3 Control proporcional (P).** En este tipo de sistema el elemento final de control se mueve proporcionalmente al valor de desviación de la variable controlada debido a que a la salida del proceso se genera una señal de control proporcional a la señal de error, de tal forma que existe una relación de proporcionalidad entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. De tal modo que:

$$m(t) = k \cdot e(t) \Rightarrow M(s) = K \cdot E(s) \quad (11)$$

Entonces tenemos que la función de transferencia del control proporcional es:

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k \quad (12)$$

Donde:

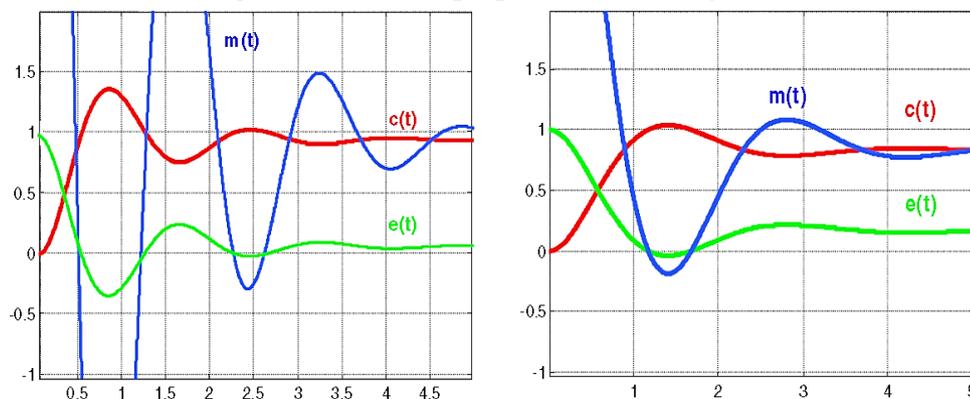
$e(t)$ = Señal de error.

$m(t)$ = Señal de control.

$c(t)$ = Señal de salida.

$k$ =Sensibilidad proporcional o ganancia proporcional

Figura 25. Control proporcional  $k=1.5$  y  $k=5$



Fuente: Teoría de control diseño electrónico.

Por ejemplo una válvula se mueve de forma inversa al valor de desviación de la variable controlada (posición, velocidad, temperatura), cuyo intervalo de operación es de  $0^{\circ}\text{C}$  -  $100^{\circ}\text{C}$  y su punto de consigna  $50^{\circ}\text{C}$ , así cuando la variable se encuentra en  $0^{\circ}\text{C}$  o menos la válvula se encuentra totalmente abierta, por el contrario si la variable esta en  $100^{\circ}\text{C}$  o más, la válvula se encuentra totalmente cerrada, de esa forma cuando la variable se mantiene dentro de su rango de operación  $0^{\circ}\text{C}$  -  $100^{\circ}\text{C}$ , la válvula se mueve proporcionalmente al valor en el que la variable que se encuentre, si la variable se encuentra a  $25^{\circ}\text{C}$  entonces la válvula estará abierta un 75% y a  $50^{\circ}\text{C}$  la válvula estará abierta en 50%.

**2.10.4 Control proporcional integral (PI).** La acción de control proporcional integral genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción integral, así como también combina la ventaja de la acción de control integral para eliminar el error estacionario y la ventaja de la acción de control proporcional para reducir el riesgo de inestabilidad.

La acción de control integral genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error, siendo esta la acción correctora que proporciona una señal de control diferente de cero a pesar de que la señal de error sea cero y la señal de control sea función de la señal de error.

$$m(t) = ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \Rightarrow M(s) = \frac{ki}{s} \cdot E(s) \quad CI = 0 \quad (12)$$

El control integral nos permite obtener un error estacionario nulo en un sistema de control mediante la introducción de un elemento integrador en la función de transferencia de lazo abierto.

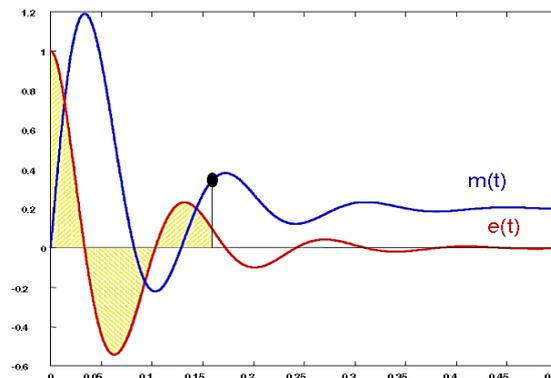
El control proporcional integral se realiza cuando entre la variable y el punto de consigna se produce una desviación, la misma que se integra en el tiempo y se suma a la acción proporcional.

Este tipo de control se caracteriza por el tiempo de acción integral dado en minutos por repetición o repeticiones por minutos que es su inversa, siendo este el tiempo que el elemento de control repite el mismo movimiento perteneciente a la acción proporcional o dicho de otra manera el número de veces por minuto que el elemento de control repite el mismo movimiento perteneciente a la acción proporcional, entonces la acción integral se puede comprobar mediante el instrumento de control en bucle abierto.

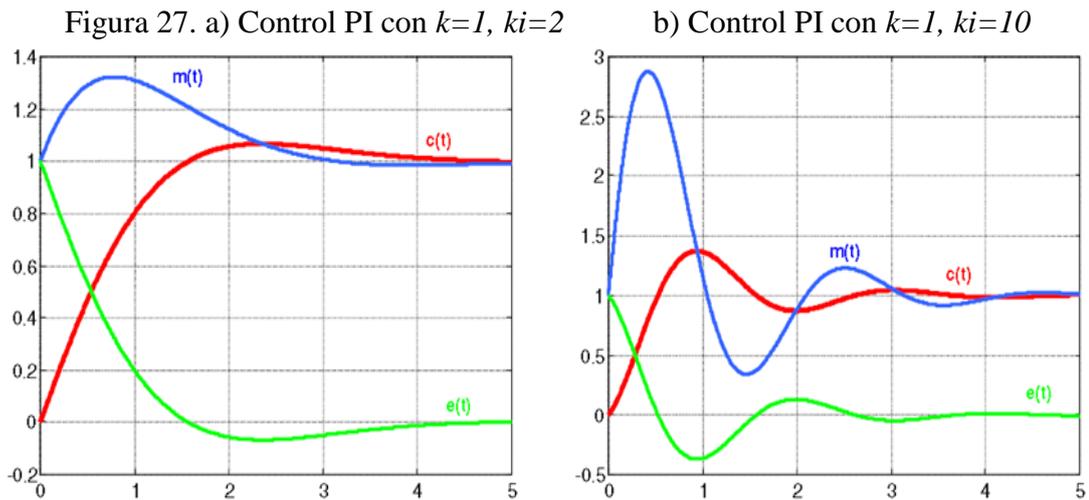
$$m(t) = k \cdot e(t) + ki \int_0^t e(t) \cdot d(t) = k \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{Ti} \cdot \int_0^t e(t) \cdot d(t) \right] \quad (13)$$

$$M(s) = k \cdot \left[ 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \cdot E(s) \Rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = k \cdot \left[ 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \quad (14)$$

Figura 26. Control integral, señal de error  $e(t)$  y señal de control  $m(t)$



Fuente: Instrumentación industrial.



Fuente: Instrumentación industrial.

**2.10.5 Control proporcional derivativo (PD).** La acción de control derivativa genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error, produciéndose una corrección anticipada de la señal de error debido a la acción de control derivativa, aumentando la sensibilidad (estabilidad relativa) del sistema, sin embargo no puede reaccionar a una señal de error constante por lo que siempre debe utilizarse en conjunto con otros tipos de control.

$$m(t) = kd \cdot \frac{de(t)}{dt} \Rightarrow M(s) = kd \cdot s \cdot E(s) \quad (15)$$

$$e(t) = cte \Rightarrow m(t) = 0$$

Un sistema de control adquiere mayor estabilidad relativa y una respuesta transitoria con menor sobreimpulso mediante el control proporcional derivativo.

$$m(t) = k \cdot e(t) + kd \cdot \frac{de(t)}{dt} = k \cdot \left[ e(t) + Td \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (16)$$

Donde:

$Td =$  Tiempo derivativo

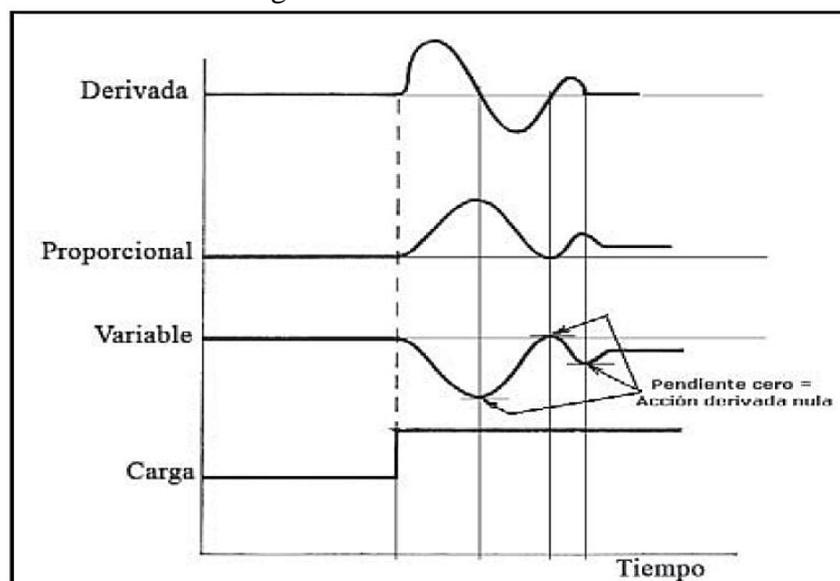
$$\frac{TL}{CI} = 0$$

$$M(s) = k \cdot (1 + Td) \cdot E(s) \Rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = k \cdot (1 + Td \cdot s) \quad (17)$$

El control derivativo se realiza cuando se producen cambios en la variable controlada, de manera que existe una relación lineal entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición de elemento final de control, la misma que es proporcional a la pendiente de la variable (derivada).

Este tipo de control es adecuado cuando existe un retraso entre del movimiento del elemento final de control y su repercusión en la variable controlada, sin embargo si el tiempo de acción es demasiado grande puede provocar inestabilidades en el proceso, pero si el tiempo de acción es demasiado pequeño puede provocar que la variable este oscilando demasiado tiempo con relación al punto de consigna, de manera que el tiempo óptimo de acción derivativa es aquel que retorna el valor de la variable controlada al punto de consigna, con el mínimo de oscilaciones.

Figura 28. Control derivativo



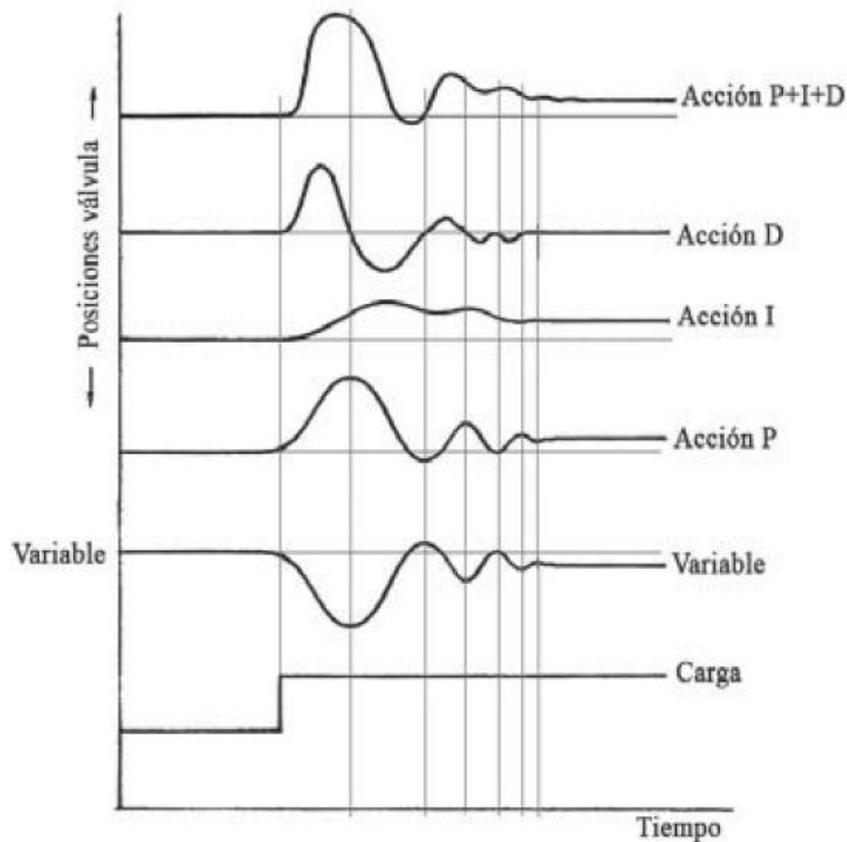
Fuente: Instrumentación industrial.

**2.10.6 Control proporcional integral derivativo (PID).** Este tipo de sistema de control combina los tres tipos de acciones proporcional, integral y derivativo formando el sistema de control PID.

Por lo tanto la acción de control proporcional varía la posición del elemento final de control (válvula) conforme a la desviación del valor de la variable de control de su punto de consigna, la acción de control integral varia proporcionalmente la velocidad de activación del elemento final de control (válvula) con respecto a la desviación del valor

del punto de consigna, obteniendo un control más rápido mediante la disminución del tiempo de acción integral y la acción de control derivativa ajusta la posición del elemento final de control conforme a la velocidad de variación de la variable controlada, anticipando su posición en el tiempo mediante la acción proporcional, con lo que tenemos un control más rápido. (Creus, 2010)

Figura 29. Acciones PID



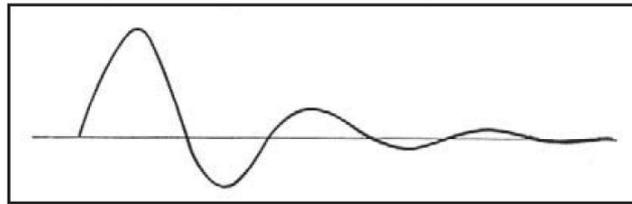
Fuente: Instrumentación industrial.

## 2.11 Criterios de estabilidad en los sistemas de control

La estabilidad en los sistemas de control, causa que la variable de control retorne al punto de consigna luego de producirse una perturbación en el proceso.

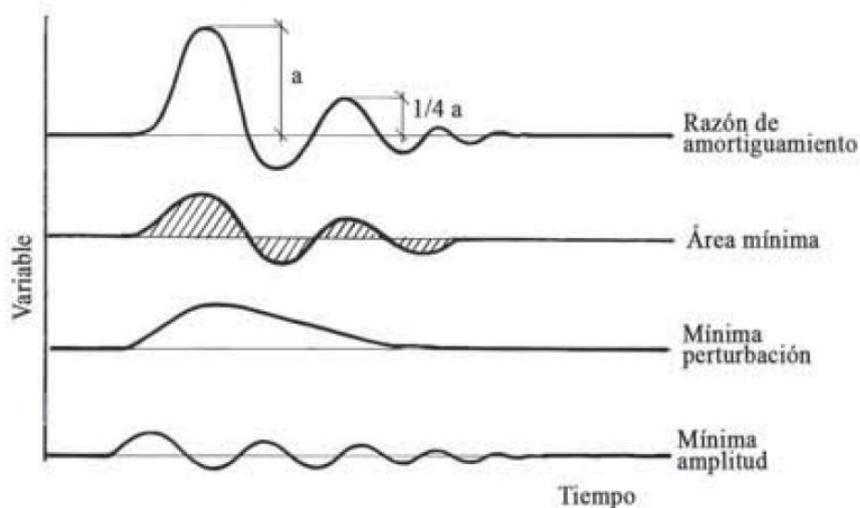
De tal forma que el criterio de estabilidad más empleado es el de razón de amortiguamiento  $1/4$ , en el cual la variable se estabiliza una vez que la relación entre las amplitudes de las crestas de recuperación sucesiva sea de 4 a 1, de manera que vincula la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez con que la variable controlada retorna a un valor estable. (Creus, 2010)

Figura 30. Curva de amortiguación 1/4



Fuente: Instrumentación industrial.

Figura 31. Criterios de estabilidad



Fuente: Instrumentación industrial.

## 2.12 Métodos de ajuste de controladores

Para el ajuste de los controladores: la ganancia (banda proporcional), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) deben acoplarse de manera correcta con el resto de elementos del bucle, de forma que ante una perturbación la curva de recuperación sea estable, satisfaciendo los criterios antes mencionados, en particular con una relación de amortiguamiento de 1/4 (0,25) entre crestas consecutivas de la onda. (Creus, 2010)

## 2.13 Autosintonización de control PID

La autosintonización, sintonización automática o también autotuning de control PID permite obtener el valor de los parámetros PID que actúan sobre la planta en la cual se ejecuta este tipo de control de manera que se asegura el correcto funcionamiento de los equipos.

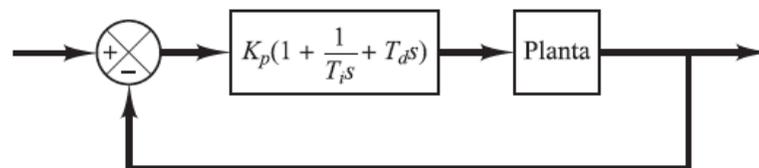
El sistema de autosintonización o sintonización automática de control PID proporciona la función de autoajuste, que permite determinar o identificar de forma continua y automática el modelo que rige el proceso o sistema de una planta con el fin de realizar un seguimiento de posibles cambios de las variables dinámicas relacionadas con el sistema de control. (Creus, 2010)

## 2.14 Método de Ziegler-Nichols

**2.14.1 Control PID de plantas.** La Figura 32, Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de  $K_p$  que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional.

Figura 32. Control PID de una planta



Fuente: Ingeniería de control moderna.

### 2.14.2 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID.

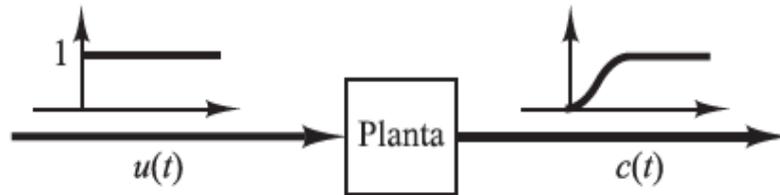
**2.14.2.1 Primer método.** La respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de  $S$ .

Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de  $S$ . Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo  $T$ .

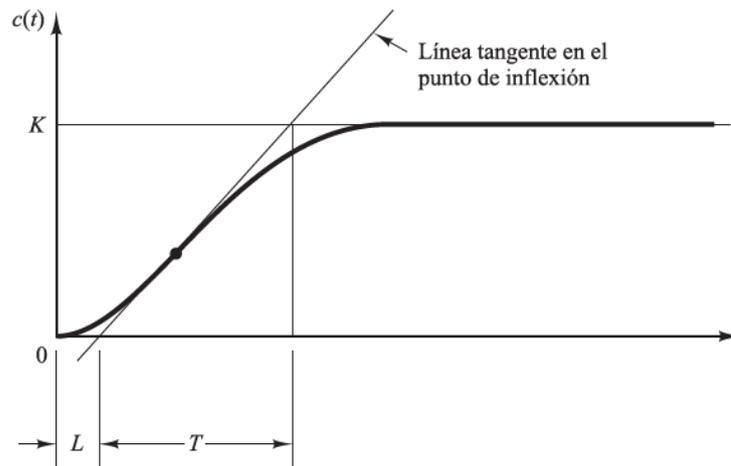
Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 1.

Figura 33. Respuesta a un escalón unitario de una planta



Fuente: Ingeniería de control moderna.

Figura 34. Curva de respuesta en forma S



Fuente: Ingeniería de control moderna.

Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols

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

Fuente: Ingeniería de control moderna.

Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (18)$$

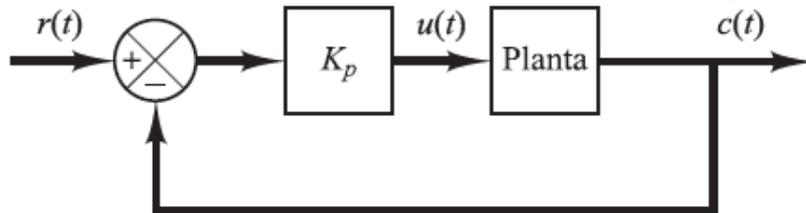
$$G_c(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right)$$

$$G_c(s) = 0.6T \frac{\left( s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en  $s = -1/L$ .

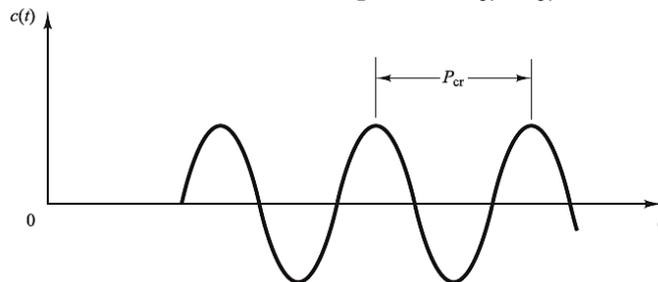
2.14.2.2 *Segundo método.* Primero se fija  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa  $K_p$  desde 0 hasta un valor crítico  $K_{cr}$ , en donde la salida presenta oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$ , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo  $P_{cr}$  correspondiente se determinan experimentalmente. Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 2.

Figura 35. Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional



Fuente: Ingeniería de control moderna.

Figura 36. Oscilación sostenida con periodo  $P_{cr}$  ( $P_{cr}$  se mide en seg.).



Fuente: Ingeniería de control moderna.

Tabla 2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: Ingeniería de control moderna.

Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (19)$$

$$G_c(s) = 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right)$$

$$G_c(s) = 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left( s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}$$

El controlador PID tiene un X en el origen y un 0 doble en  $s = -4/P_{cr}$ . (Ogata, 2010)

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE LA PLACA ELECTRONICA Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE ENTRENAMIENTO.

Este capítulo explica de forma detallada el procedimiento para el diseño de la placa electrónica, donde se muestra cada uno de los bloques o secciones que constituyen el módulo y la estructura de funcionamiento del sistema de control para posteriormente ensamblar todos los elementos y dispositivos necesarios para la construcción del módulo de entrenamiento de control.

#### 3.1 Normas para el diseño de tarjetas electrónicas

Para el diseño de tarjetas electrónicas existen diferentes normas que se toman como reglas generales para el diseño de PCB's en la construcción del módulo de entrenamiento, a continuación, se presentan de forma detallada las más importantes:

- En el diseño siempre se debe evitar los ángulos agudos cuando realicemos los cambios de dirección de una pista o en las intersecciones entre pistas.
- En las pistas que sean portadoras de alta frecuencias igual o mayor a 1Mhz se debe evitar los ángulos de 90°.
- Cuando se tienen más de dos pistas que discurren paralelamente, su distancia de separación entre ellas debe ser uniforme.
- En las uniones Pista-PAD, la pista debe ser radial a dicho PAD y no tangencial.
- No se debe unir directamente dos o más PADs. Dicha unión se la debe hacer mediante una pista, aunque sea de pequeña longitud.
- En cada PAD que tenemos en el diseño solo se puede unir cuatro pistas como máximo, y no se debe formar ángulos agudos entre ellas.

- Normalmente se trata de realizar un diseño lo más sencillo posible y mientras más cortas sean las pistas, mejor.
- El grosor de la pista se la realiza de acuerdo a la corriente que esta debe soportar.
- La separación mínima de las pistas que operan para bajas tensiones es de 0,3mm.
- El diámetro de los PADS debe ser el doble que el de la pista más ancha que esté conectado a él.
- Entre las pistas y el doble de la placa debe haber un espacio de separación de 2mm o 3mm.
- La anchura mínima de las pistas de alimentación será de 1mm o 2mm, independientemente de la corriente que el circuito consuma.

### **3.2 Elaboración de la tarjeta electrónica del módulo de entrenamiento**

Para el diseño de la placa o tarjeta electrónica del módulo de entrenamiento se aplicaron correctamente cada una de las reglas para el diseño de placas de circuitos impresos detalladas anteriormente, de tal forma que el diseño del circuito electrónico de la placa, muestre la estructura general de funcionamiento y la manera como están integrados todos los elementos y dispositivos que componen en su totalidad el módulo de entrenamiento de control.

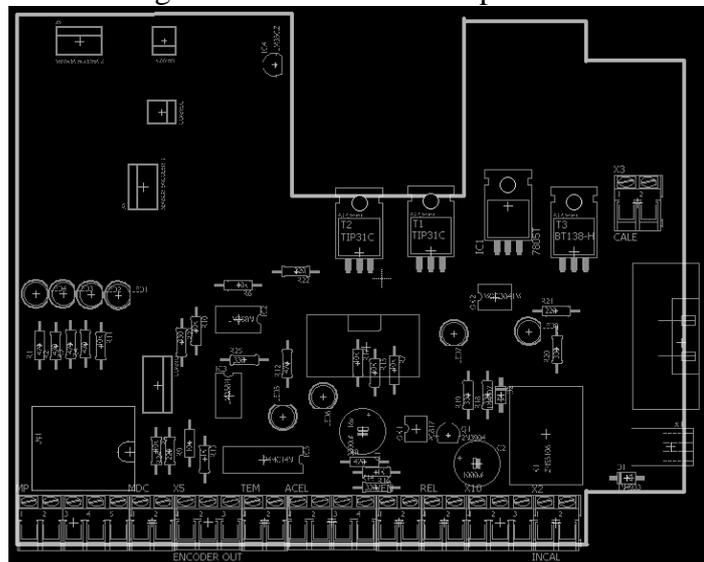
La placa electrónica funciona con una fuente de alimentación de 12v, está formada por varios circuitos electrónicos agrupados en bloques o secciones, para realizar el control y monitoreo de las variables correspondientes de cada uno de los elementos que componen el módulo de entrenamiento de control.

Cada uno de los circuitos que conforman la placa del módulo de entrenamiento se los presenta a continuación de forma detallada:

- Bloque 1 Control de posición de un motor paso a paso.

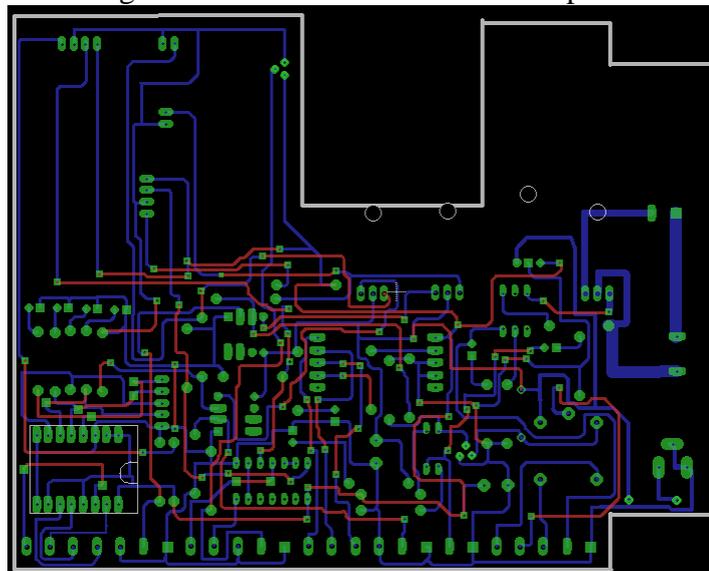
- Bloque 2 Control de velocidad de un motor DC.
- Bloque 3 Control de temperatura mediante sensor LM35, bombillo halógeno y ventilador.
- Bloque 4 Monitoreo de posición espacial del módulo de entrenamiento en sus tres ejes.
- Bloque 5 Control de accionamiento por relé.

Figura 37. Mascara de componentes



Fuente: Autores

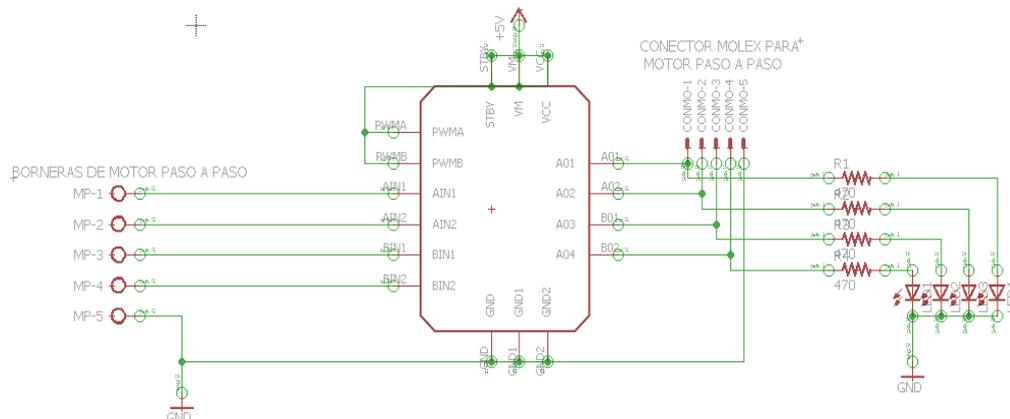
Figura 38. Circuito electrónico de la placa



Fuente: Autores

**3.2.1** *Control de posición de un motor paso a paso.* Este bloque se diseñó de tal manera que se pueda controlar la velocidad y el sentido de giro de un motor paso a paso bipolar, cuenta con borneras que han sido consideradas como entradas desde el sistema de control a utilizar, tiene un conector para acoplar el motor de forma directa, además de indicadores que muestran que bobina del motor se está accionando, el motor a utilizar debe estar limitado a 5 voltios ya que, al usar un motor de mayor voltaje, este provocara daños en el circuito.

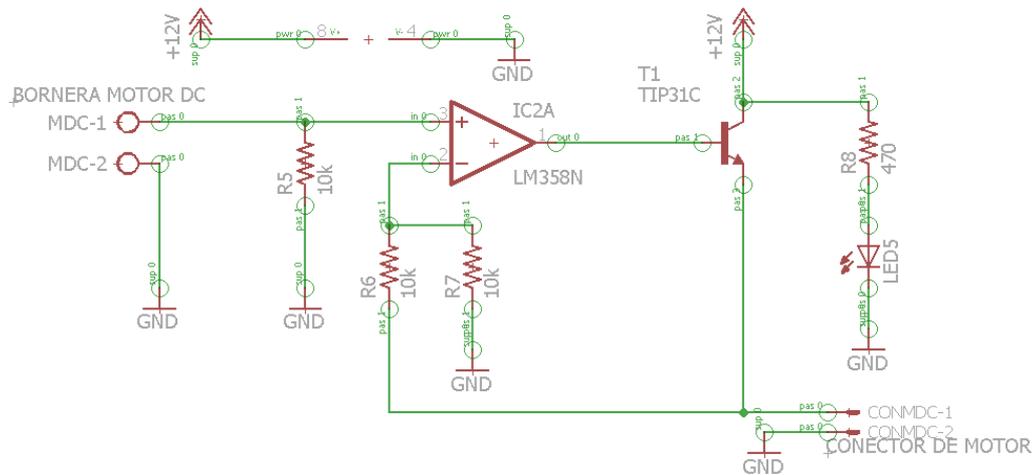
Figura 39. Circuito de control de posición



Fuente: Autores

**3.2.2** *Control de velocidad de un motor DC.* Este bloque se ha desarrollado para realizar el control de velocidad y obtener las revoluciones precisas de un motor de corriente continua, además también se puede realizar el control PID del mismo motor, ya que acoplado a este se encuentra un sistema de sensor encoder que nos permite tener la retroalimentación necesaria, este bloque cuenta con dos borneras de entrada una de las cuales se utiliza como tierra y la otra debe ir conectada a un pin del controlador usado, tiene un led indicador que muestra que el motor está conectado, el motor a utilizar debe estar limitado un voltaje de alimentación de 12 voltios para evitar que se provoque daños en el circuito.

Figura 40. Circuito de control de velocidad



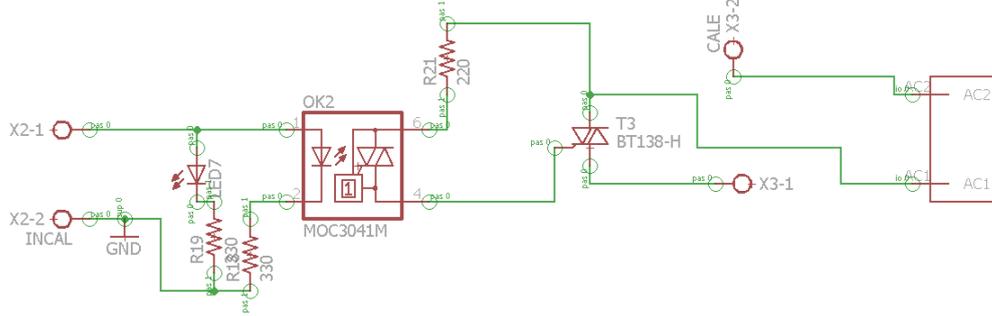
Fuente: Autores

**3.2.3 Control de temperatura mediante sensor LM35, bombillo halógeno y ventilador.** Este bloque se ha diseñado para realizar el control de encendido y apagado de un bombillo halógeno que funciona con 110 voltios de corriente alterna, posee dos borneras, la primera que controla el accionamiento del bombillo y la segunda donde se conecta físicamente el bombillo, al igual forma que en los boques anteriores debe conectarse un pin de la bornera a tierra del controlador y el otro pin a una salida digital del mismo controlador; debido a que el bombillo funciona con voltaje alterno se ha establecido el uso de un adaptador ubicado en un extremo del módulo totalmente aislado para que no cause daños a los circuitos que funcionan con otro tipo de voltaje.

Este bloque posee también un ventilador de 12V para el control de temperatura del bombillo halógeno y un sensor de temperatura LM35 con dos borneras de salida, una debe conectarse a tierra del sistema de control a usar y la otra debe conectarse a una entrada analógica.

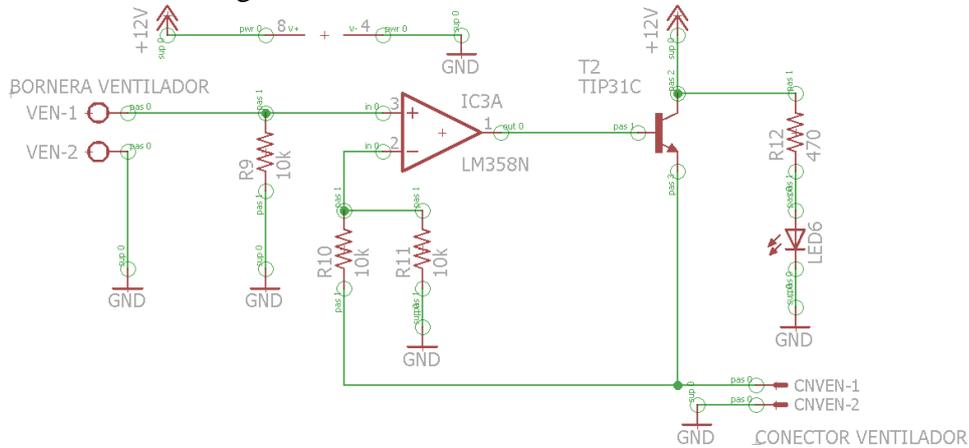
Al combinar el sensor LM35 el cual es calentado por el bombillo halógeno y usando el ventilador como perturbación de la temperatura se puede realizar una aplicación de control PID de temperatura.

Figura 41. Circuito de control de accionamiento de bombillo halógeno



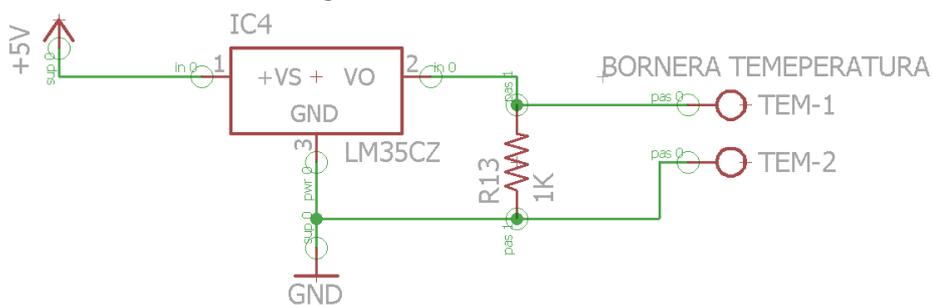
Fuente: Autores

Figura 42. Circuito de control de ventilador



Fuente: Autores

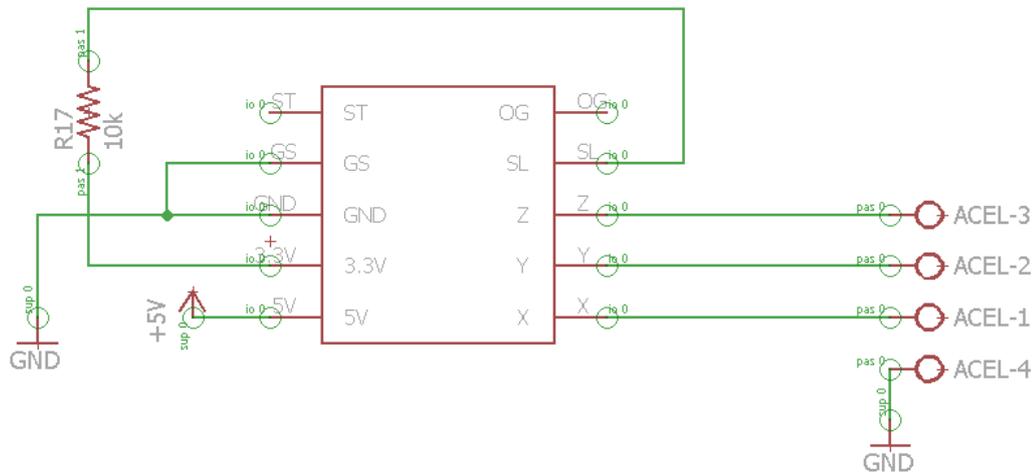
Figura 43. Circuito de control sensor LM35



Fuente: Autores

**3.2.4** *Monitoreo de posición espacial del módulo de entrenamiento en sus tres ejes.*  
 Este bloque se ha diseñado para monitorear la posición del módulo partiendo de un punto centrado en el espacio, posee una bornera con 4 pines, el primer pin debe conectarse a tierra del controlador, mientras que los 3 pines restantes proporcionan una salida por cada eje (x, y, z); estos pines se deben conectar a entradas analógicas del controlador.

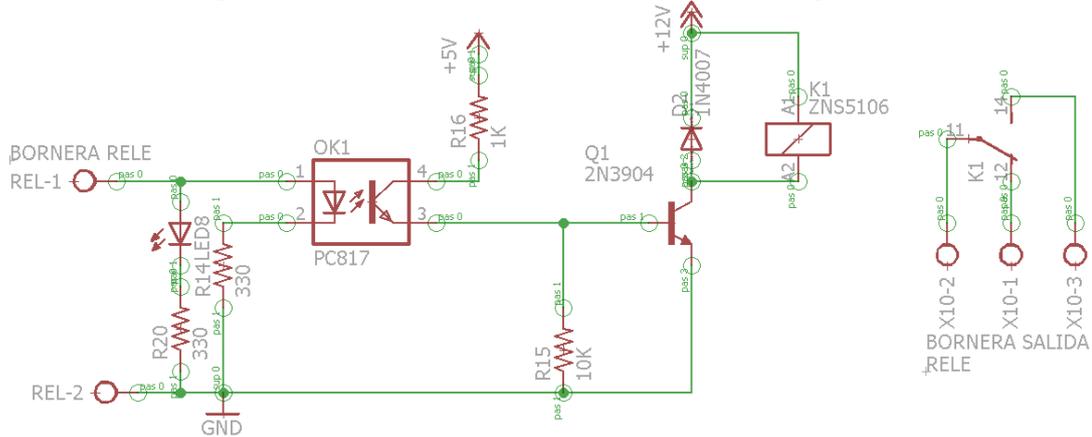
Figura 44. Circuito de sensor acelerómetro



Fuente: Autores

**3.2.5 Control de accionamiento por relé.** Este bloque permite realizar el encendido y apagado de un relevador; mediante la conmutación de los contactos internos propios del mismo, posee una bornera de entrada en la cual un pin debe estar conectado a tierra del controlador y el pin restante debe conectarse a una salida digital del controlador a usar, tiene una bornera de salida en donde están ubicados los contactos del relevador y en donde se puede conectar cualquier carga.

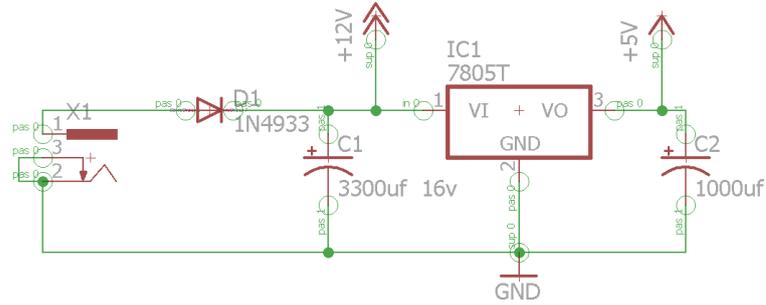
Figura 45. Circuito de control de accionamiento por relé



Fuente: Autores

El modulo posee una fuente de alimentación con una protección de polaridad, de manera que si el usuario conecta los pines de alimentación de forma incorrecta el modulo no sufrirá daño.

Figura 46. Circuito de protección del módulo

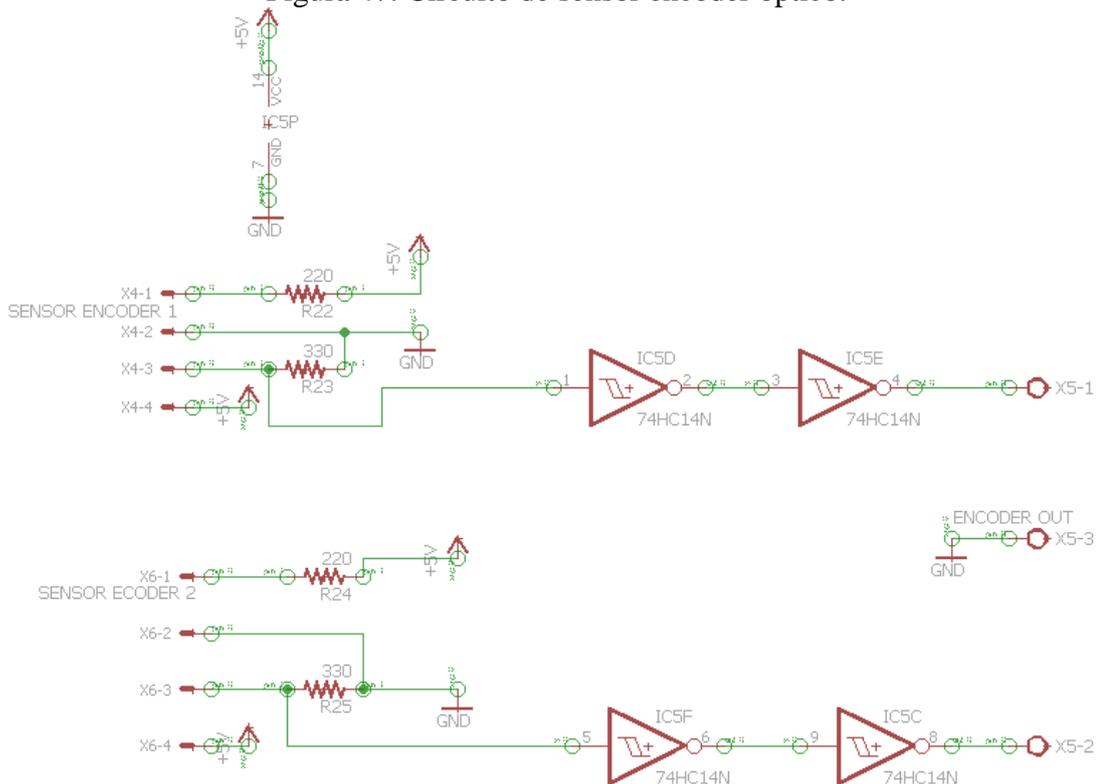


Fuente: Autores

El módulo requiere de un adaptador de voltaje y corriente de 12V y 1A para su correcto funcionamiento.

El sensor encoder usado para el control de velocidad del motor posee la siguiente conexión:

Figura 47. Circuito de sensor encoder óptico.



Fuente: Autores

Esta conexión posee digitalizador de señales que proporciona una señal sin ruido.

Una vez realizado todos los esquemas se procedió a realizar el diseño final de la placa del módulo de entrenamiento, teniendo en cuenta las dimensiones necesarias.

### 3.3 Ensamblaje del módulo de entrenamiento

Después de diseñados y elaborados de los circuitos de cada uno de los bloques o secciones de control que constituyen la placa electrónica del módulo de entrenamiento, se procedió a la elaboración física de la placa electrónica y al ensamble de todos los elementos y dispositivos que componen en su totalidad la estructura del módulo de entrenamiento para llevar a cabo el control y monitoreo de posición, temperatura y velocidad, variables presentes en un proceso o sistema de producción industrial real, mediante el software de programación de interfaz gráfica LabVIEW y la tarjeta de adquisición y procesamiento de señales. DAQ NI USB-6009. Dentro del proceso para la elaboración de la placa electrónica y ensamble de todos los elementos y dispositivos que componen en su totalidad la estructura del módulo de entrenamiento para su correcto funcionamiento se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

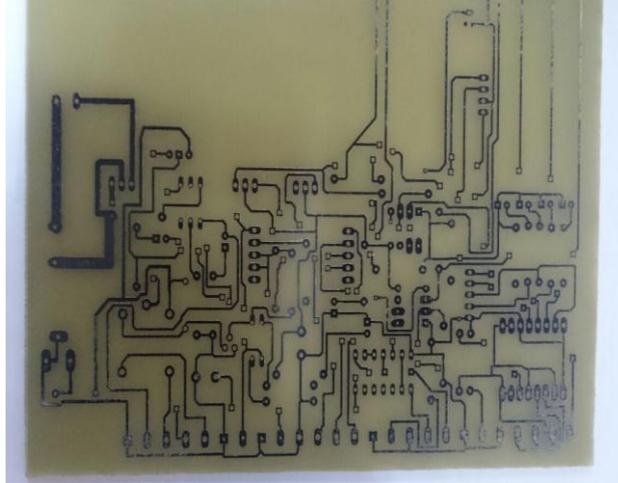
Tabla 3. Equipos y materiales

Elementos y dispositivos	Equipos y materiales
2 Condensadores Encapsulados	1 Funda de Acido Férrico.
Circuitos Integrados	Cables de Conexión.
1 DAQ Multifunción NI USB-6009.	1 Caja de Acrílico
Diodo Rectificador	1 Cautín.
2 Encoder óptico de Conteo LM393 (rueda).	1 Conector 110/220V AC Lámpara halógena.
1 Lámpara Halógena.	1 Conector 12V DC Placa Electrónica.
LEDs.	3 Conectores Atornillables de 2 Entradas.
1 MOC3041.	7 Conectores Atornillables de 3 Entradas.
TRIACs	1 Computadora.
1 Motor DC 12V.	1 Destornillador Plano.
1 Motor Paso-Paso.	1 Hoja de Papel Couche.
Resistencias	1 Impresora.
1 Relé 12V.	1 Placa de Cobre de Fibra de Vidrio
1 Sensor Acelerómetro de 3 Ejes MMA 7361.	1 Plancha.
1 Sensor de Temperatura LM35.	1 Regleta de Pines.
1 Servomotor Dynamixel AX12.	1 Rollo de Estaño.
1 USB2Dynamixel.	1 Taladro de Mano
1 Ventilador 12V.	

Fuente: Autores

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de todo el circuito de la placa electrónica utilizando una protoboard, se imprimió tanto la máscara de componentes como el circuito de la placa sobre papel couche para que posteriormente utilizando una plancha se remarque sobre la placa de fibra de vidrio.

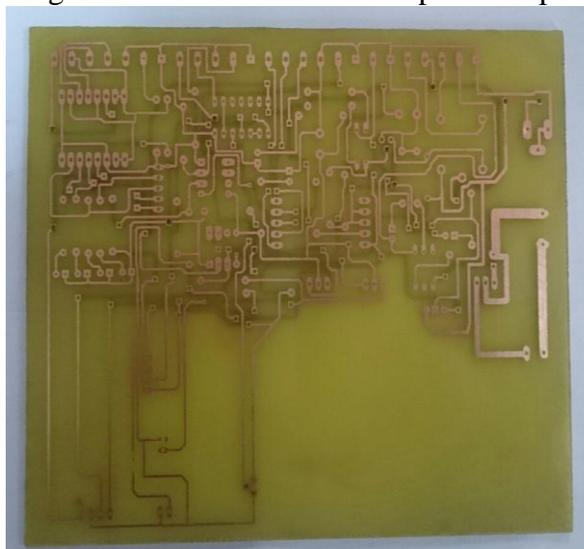
Figura 48. Placa de circuito impreso remarcada



Fuente: Autores

Luego de todo lo detallado anteriormente se sumergió la placa de fibra de vidrio ya remarcada con la máscara de componentes y el circuito electrónico dentro de una solución de ácido férrico de modo que sobre la fibra de vidrio únicamente queden las pistas de cobre por donde circula la corriente, dejando la placa electrónica de modulo lista como se muestra en la figura.

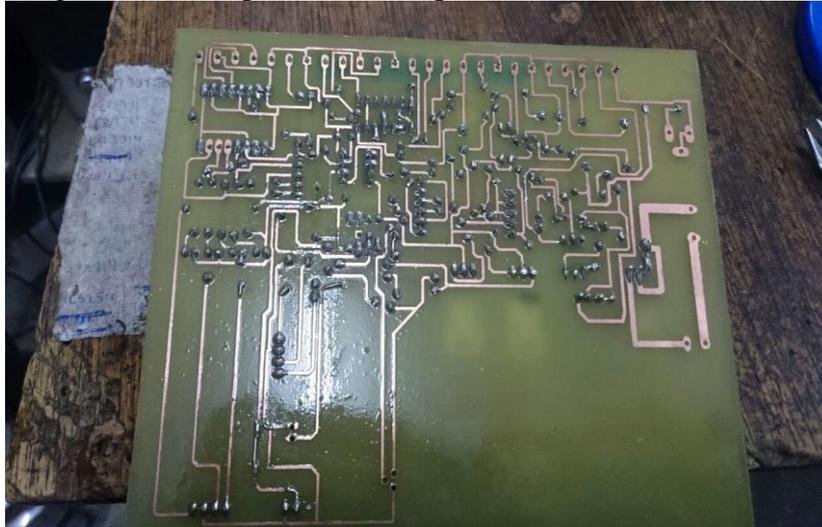
Figura 49. Placa de circuito impreso limpia



Fuente: Autores

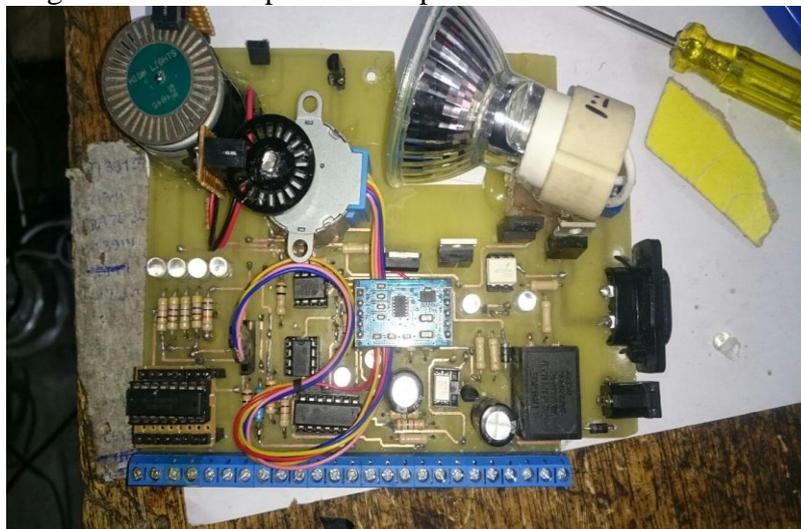
Una vez lista la placa de circuito impreso se perforaron todos los PADS utilizando un taladro de mano y una broca adecuada al diámetro de cada PAD, para luego realizar el montaje y ensamblado de cada uno de los elementos y dispositivos que forman la placa electrónica del módulo de entrenamiento.

Figura 50. Vista posterior de la placa electrónica ensamblada



Fuente: Autores

Figura 51. Vista superior de la placa electrónica ensamblada



Fuente: Autores

Luego que todos los elementos se han ensamblado y la placa esta lista se realizó el corte de la caja de acrílico y posteriormente se procedió a montar la placa al interior de caja, quedando de esta manera el módulo de entrenamiento listo para realizar las pruebas finales de seguridad y funcionamiento respectivamente.

Figura 52. Placa electrónica montada al interior de la caja de acrílico



Fuente: Autores

Figura 53. Módulo de entrenamiento de control terminado.



Fuente: Autores

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y PUEBAS DE SEGURIDAD Y FUNCIONAMIENTO DEL MODULO.

En este capítulo se describe detalladamente el desarrollo de las pruebas de seguridad y funcionamiento realizadas, una vez que se ha probado el correcto funcionamiento de cada uno de los circuitos electrónicos de los bloques de control y el módulo de entrenamiento ha sido ensamblado en su totalidad.

#### 4.1 Pruebas de seguridad y funcionamiento

El módulo de entrenamiento fue diseñado para ayudar a fortalecer el análisis y estudio práctico dentro del laboratorio de control y manipulación automática al realizar varias prácticas sobre adquisición y procesamiento de datos en un proceso o sistema de producción real dentro de una planta representada por el módulo de entrenamiento de control. El módulo se conecta a una DAQ Multifunción NI USB-6009 y mediante este a un programa de control y monitoreo desarrollado mediante el software LabVIEW con la ayuda de un computador y en el cual se puede visualizar de mejor forma el control de los diferentes parámetros.

- Antes de conectar el módulo a la fuente de alimentación debe asegurarse que el tipo de corriente sea la adecuada, para evitar se produzca algún tipo de daño en los elementos y circuitos que componen la placa al momento de energizar el módulo, ya que la placa está diseñada para soportar un voltaje máximo de 12V DC durante su funcionamiento.
- Se requiere de un adaptador de voltaje y corriente de 12V – 1A para su funcionamiento, cuando se energiza el módulo simultáneamente se enciende un grupo de LEDs indicando que el módulo está conectado a una fuente de alimentación de 12V DC y listo para ser utilizado.

- El bombillo halógeno se enciende con un voltaje alterno de 120V por lo que requiere de un adaptador que está ubicado a un extremo del módulo en donde se realiza la conexión directa a una fuente de alimentación de 110/220V AC y cuyo funcionamiento está totalmente del resto del circuito de la placa para evitar daños por corto circuito.
- El modulo puede mantenerse energizado y en funcionamiento por varias horas, pero el bombillo halógeno no debe permanecer encendido mas allá de un tiempo máximo de 25 min para evitar daños en la placa causados por sobrecalentamiento.

#### **4.2 Prueba de funcionamiento de aplicación de control PID de temperatura a 60°C**

Para llevar a cabo la prueba de funcionamiento del módulo y observar los resultados y beneficios del módulo de entrenamiento en el área de control y manipulación automática, se siguieron todos los pasos y recomendaciones detalladas de forma clara y específica en la respectiva guía de prácticas, las misma que se encuentran adjuntas en anexos.

1. Conectar el Modulo a la tarjeta DAQ NI USB-6009 de la siguiente manera:
  - Confirmar que tanto el modulo como el cable de alimentación del bombillo halógeno no estén conectado a la fuente de energía.
  - Conectar una salida analógica de la tarjeta DAQ NI USB-6009 (AO.0 – AO.1) a la entrada de control del bombillo halógeno en el módulo llamada HALÓGENO AC.
  - Conectar una segunda salida analógica de la tarjeta DAQ NI USB-6009 (AO.0 – AO.1) a la entrada de control del ventilador en el módulo llamada VENTILADOR VENT.
  - Conectar la salida del sensor de temperatura SENS. TEMP a una entrada analógica de la tarjeta DAQ NI USB-6009 (AI.1 – AI.5).

- Conectar una referencia GND del módulo a una referencia GND de la tarjeta DAQ NI USB-6009. Todos los terminales GND del módulo son comunes de modo que están internamente conectadas, al igual que todos los terminales GND de una tarjeta DAQ NI USB-6009.
- Conectar el modulo y el cable de alimentación del bombillo halógeno a la fuente de energía.

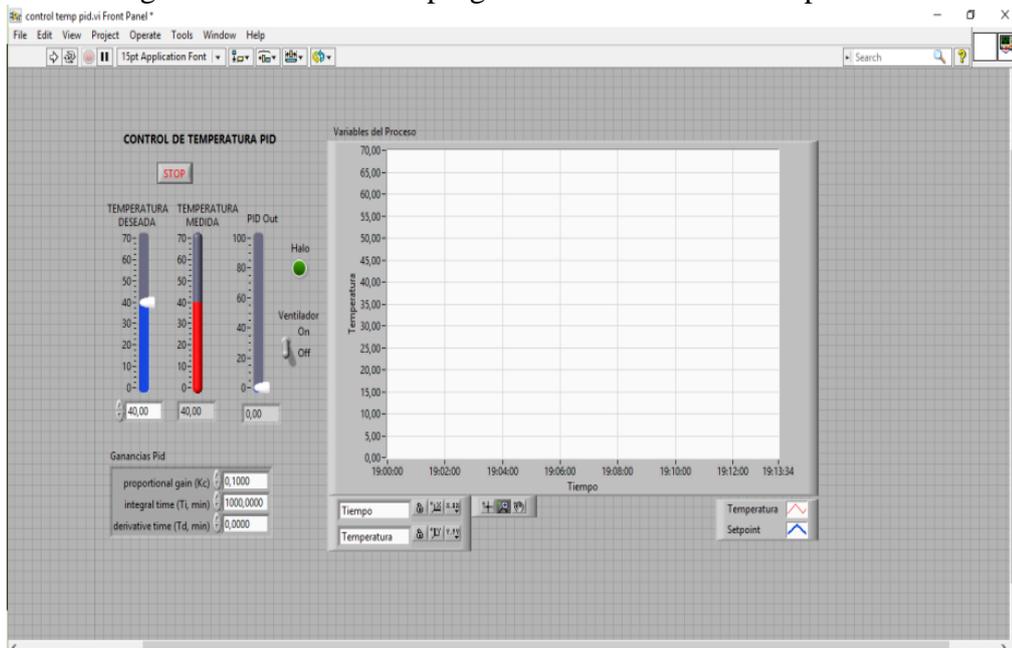
Figura 54. Diagrama de conexión para control PID de temperatura.



Fuente: Autores

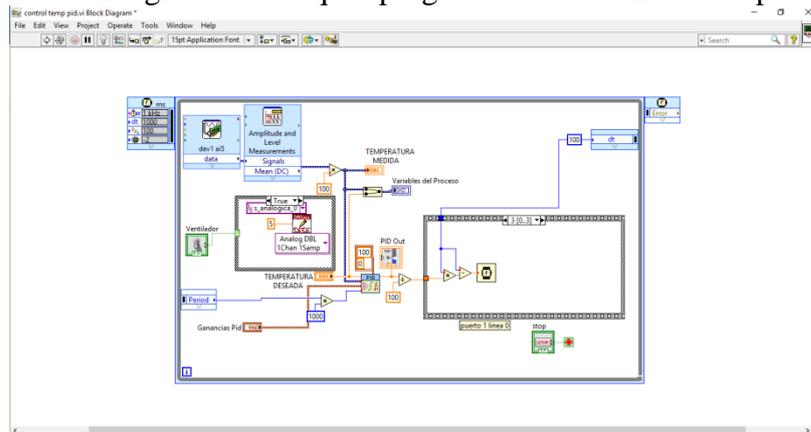
2. Abrir el programa control temperatura PID.vi.

Figura 55. Panel frontal programa control PID de temperatura.



Fuente: Autores

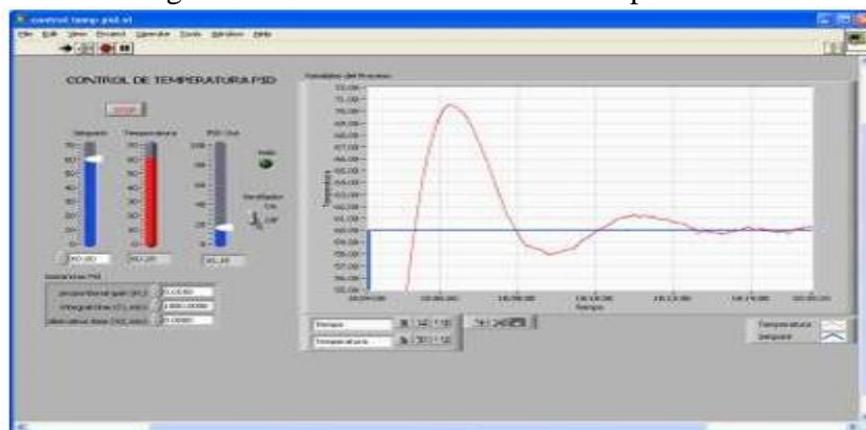
Figura 56. Diagrama de bloques programa control PID de temperatura.



Fuente: Autores

- El panel frontal dispone de un indicador de temperatura tipo termómetro y un control tipo Slide para establecer el valor de temperatura deseado setpoint, además de un gráfico que muestra tanto el valor de temperatura como el valor de setpoint. También incluye un control boleano para el encendido o apagado del ventilador y un indicador boleano que indica el estado del bombillo halógeno.
- Adicionalmente el programa tiene un control que permite ingresar los valores de ganancias PID del sistema de control, y de un indicador tipo slide que muestra la salida del controlador PID Out.

Figura 57. Grafica control PID de temperatura.



Fuente: Autores.

3. Colocar el valor del setpoint a 60°C
4. Ingresar los siguientes valores de Ganancias PID.

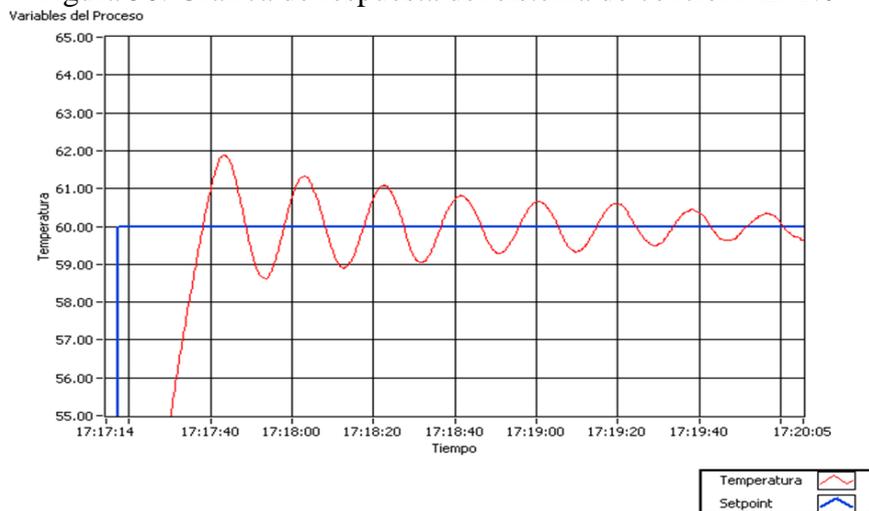
Tabla 4. Tabla Valores control PID con ganancia proporcional 1.0

Parámetro	Valor
<b><i>Kc</i></b>	1.0
<b><i>Ti</i></b>	1000.00
<b><i>Td</i></b>	0

Fuente: Autores

5. Correr el programa y observar el funcionamiento del programa.
6. En un sistema de control PID se aplica una ganancia al error, consistente en la diferencia entre el valor deseado (setpoint) y el valor de la variable (valor de temperatura). Se puede observar la salida del PID (PID Out) como un valor entre 0% y 100%, que regula el tiempo del pulso alto del PWM, cuya frecuencia es 100ms.
7. Como se puede observar, con estos valores de parámetros PID el sistema es estable, pero oscila considerablemente, tendiendo a estabilizarse en el valor de setpoint.

Figura 58. Grafica de respuesta del sistema de control PID 1.0



Fuente: Autores

8. Para observar el comportamiento al usar otros valores de ganancias PID se debe reducir la temperatura a un valor cercano que la temperatura ambiente.
  - Colocar el setpoint a 20°C y encender el ventilador hasta que la temperatura baje al menos a unos 40°C.

- Una vez que la temperatura se acerque a estos valores, apagar el ventilador. Es posible que la temperatura tienda a subir ligeramente por el calentamiento del bombillo halógeno y del módulo en general.
9. Borrar la gráfica anterior haciendo click con el botón secundario del ratón sobre la gráfica **Variables del Proceso** y seleccionando en el menú desplegable la opción Clear Chart.
  10. Cambiar los valores de ganancias PID a los siguientes:

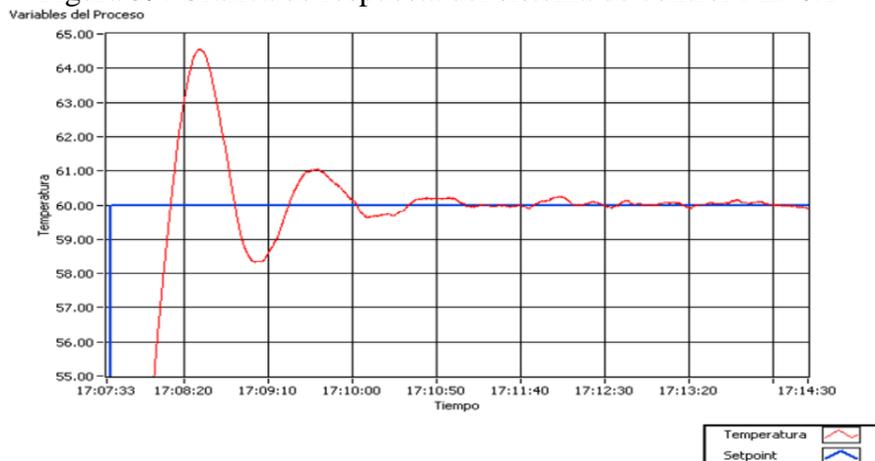
Tabla 5. Tabla Valores control PID con ganancia proporcional 0.1

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Kc</i>	<i>0.1</i>
<i>Ti</i>	<i>1000.00</i>
<i>Td</i>	<i>0</i>

Fuente: Autores

11. Cambiar el Setpoint nuevamente a 60°C.
12. Observar la respuesta del sistema.

Figura 59. Grafica de respuesta del sistema de control PID 0.1



Fuente: Autores

13. Como se puede apreciar, la reducción de la ganancia proporcional produce una respuesta más amortiguada, aunque el tiempo de respuesta se incrementa.
14. Cambiar los valores de ganancias PID a los siguientes:

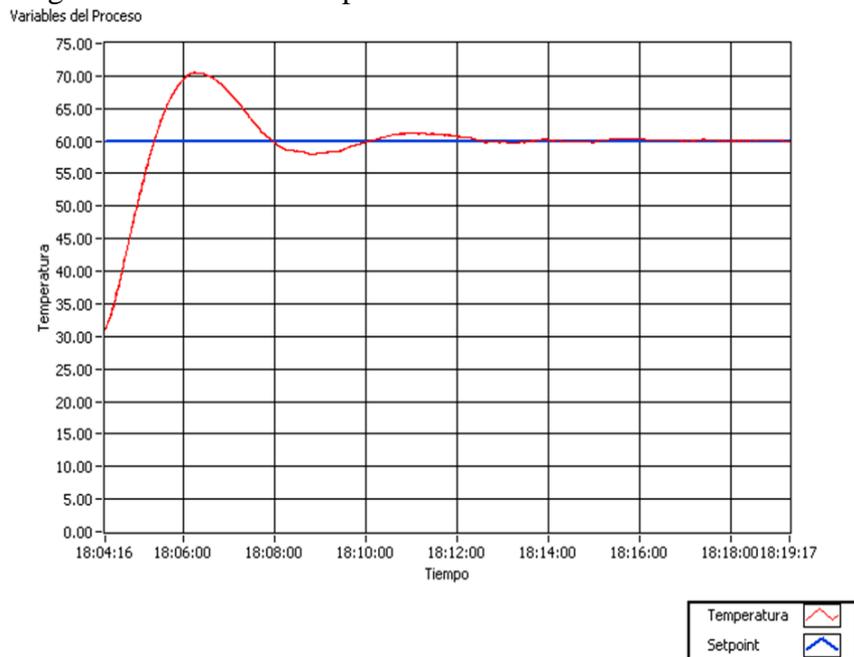
Tabla 6. Tabla Valores control PID con ganancia proporcional 0.01

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<b><i>Kc</i></b>	<i>0.01</i>
<b><i>Ti</i></b>	<i>1000.00</i>
<b><i>Td</i></b>	<i>0</i>

Fuente: Autores

15. Observar la respuesta del sistema.

Figura 60. Grafica de respuesta del sistema de control PID 0.01



Fuente: Autores

16. Como se puede apreciar, la nueva reducción de la ganancia proporcional produce una respuesta aún más amortiguada que en el caso anterior.

Los gráficos mostrados pueden diferir de los obtenidos experimentalmente en las prácticas, ya que depende también de las variaciones de la temperatura ambiental y corrientes de aire que ingresen por las ranuras del ventilador al momento de realizar las pruebas experimentales.

De esta manera se han realizado la prueba de funcionamiento del módulo de entrenamiento de control mediante el desarrollado una práctica de control PID de temperatura y se puede observar que contribuye con el fortalecimiento del análisis y estudio practico dentro del laboratorio de control y manipulación automática.

## **CAPÍTULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

#### **5.1 Conclusiones**

El módulo de entrenamiento de control constituye una gran herramienta para un mejor estudio práctico del control y manipulación automática, en la formación profesional de nuevos ingenieros de la facultad de mecánica, más competitivos y mejor preparados para enfrentar los problemas que se puedan presentar dentro del campo laboral cumpliendo así con el objetivo principal del proyecto.

Tanto los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas estudiadas durante la carrera, como los investigados al realizar el estudio bibliográfico, fueron la base fundamental para el éxito a lo largo del desarrollo del proyecto.

El software LabVIEW es una gran herramienta tanto a nivel académico como a nivel profesional de ingeniería dentro del área de control y manipulación automática ya que posee lenguaje de programación gráfica, que nos permite desarrollar instrumentos virtuales con diferentes aplicaciones y dar una solución que satisfaga determinados requerimientos como el caso específico de adquisición y procesamiento de datos.

La guía de prácticas y guía de mantenimiento y seguridad se desarrollaron de forma satisfactoria y están orientadas a mejorar el estudio práctico de los estudiantes y asegurar su conservación y correcto funcionamiento durante el desarrollo de cada una de las prácticas.

El dispositivo NI USB-6009 es un instrumento académico muy útil dentro del laboratorio de control y manipulación automática, al momento de realizar el estudio práctico sobre la adquisición y procesamiento de datos de una planta real, representada por el módulo de entrenamiento de control.

## **5.2 Recomendaciones**

El usuario debe tener los conocimientos suficientes sobre la materia, así como del funcionamiento de los equipos y dispositivos antes de proceder a realizar cualquier conexión entre el módulo de entrenamiento de control y la DAQ NI USB-6009 para evitar accidentes y daños serios en los equipos.

El estudiante o usuario debe tomar una actitud seria y responsable para seguir cada uno de los pasos y recomendaciones especificadas en la guía de prácticas y guía de mantenimiento y seguridad del módulo de entrenamiento de control para asegurar un adecuado análisis y estudio practico de manera que las actividades se desarrollen con total normalidad y los resultados sean los más satisfactorios.

Aplicar de manera correcta los planes de mantenimiento para que los estudiantes puedan mantener los equipos en manera óptimas los equipos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASI FUNCIONA.** *Asi funciona los motores de corriente continua.* [En línea]. Madrid: GARCÍA ÁLVAREZ, José Antonio. 2016. [Consulta: 6 marzo 2016]. Disponible en: [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_motor\\_cd/af\\_motor\\_cd\\_6.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_motor_cd/af_motor_cd_6.htm)
- AMÉSTEGUI, Mauricio.** *Apuntes de control PID.*[En línea]. La Paz-Bolivia: Universidad Mayor de San Andres, 2001. [Consulta: abril 2016]. Disponible en: <https://www.info-transistor.info/biblioteca/Control%20Pid.pdf>
- BOLTON, William.** *Ingeniería de control.* 2ªed. México, DF: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V., 2005. pp. 125-144, 182-224
- CREUS, Antonio.** *Instrumentación Industrial.* 6ªed. Mexico-DF: Alfa Omega Editor, 2010. pp. 481-587,
- CRUZ BARRIENTOS, Antonio.** *Fundamentos de robótica.* Madrid : McGraw-Hill, 2007.
- HETPRO-STORE.** *Sensores.* [En línea]. Guadalajara-Jalisco-Mexico: 2016. [Consulta: abril 2016]. Disponible en: <https://hetpro-store.com>
- TEXAS INSTRUMENTS.** *Acelerómetro.* [En línea]. Texas: 2016. [Consulta: abril 2016]. Disponible en: <http://www.ti.com/>
- INVENTABLE.EU.** *Introducción a los relés.* [En línea]. 2015. [Consulta: marzo 2016]. Disponible en: <http://www.inventable.eu/introduccion-a-los-reles/>
- LEONARDO J., Marin; ALFARO, Victor M.** *Sintonización de controladores por ubicación de polos y ceros.* San Jose, Costa Rica : IEEE CONEXPAN XXVI, 2007.
- NATIONAL INSTRUMENTS.** *LabVIEW* [En línea]. Austin Texas: 2016. [Consulta: 25 marzo 2016]. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/esa/>
- NATIONAL INSTRUMENTS.** *DAQ NI usb-6009* [En línea]. Austin Texas: 2016. [Consulta: 25 marzo 2016]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987/>
- OGATA, Katsuhiko.** *Ingeniería de control moderna.* 5ªed. Madrid- España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. pp. 15-16, 269-289, 567-641

- GUACHAMÍN C., Vicente Patricio.** *Contrucción de un módulo de control de velocidad electrónico PID para un motor de corriente continua.* Quito: ESPN, 2012.
- FERNÁNDEZ, José.** *Regulador PID.* Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2012.
- BARANIUK, Richard.** *Señales Y Sistemmas.* HUSTON TEXAS: CRATIVE COMMONS, 2006.
- ROBOTIS.INC.** *USB2Dynamixel.* [En línea]. USA: 2015. Disponible en: [http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl\\_manual.htm](http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.htm)
- DORF, Richard y BISHOP, Robert.** *Sistemas de control moderno.* 10ªed Madrid: PEARSON EDUCATION, 2005.
- ROCHA N., Jose Manuel.** Lugar geometrico de las raices. Elizabeth Lara . *Ingenieria de Control.*
- HERNÁNDEZ, Ricardo.** *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulaciones con MATLAB.* Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, 2010.
- SPARTACUS, Gomáriz; et al.** *Teoria de control diseño electrónico.* 2ªed. Barcelona-España: UPC, 2000. pp. 15-18, 20-22, 30-31, 84-110, 131-186
- TOBAR M., José Alberto.** *Aplicaciones ED Mecatónica.* [En línea]. Disponible en: <http://myslide.es/documents/aplicaciones-ed-mecatronica.html>
- TORRES H., José María.** *Comunicaciones Industriales.* Linares: s.n., 2011.
- VIADANA, Rina Navarro.** *Ingeniería de control analógica y digital.* México, DF : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES,S.A.DE C.V., 2004.