



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**“SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y CERRADO DE
VOLTAJE PARA DETERMINAR EL ERROR EN ESTADO ESTABLE A
DIFERENTES PULSOS DE ENTRADA EN EL LABORATORIO DE
CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA FICM”**

AUTOR: Luis Fabián Caiza Lema

TUTOR: Ing. Mauricio Carrillo

AMBATO – ECUADOR

2015

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de TUTOR del trabajo de Investigación sobre el tema: “**SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y CERRADO DE VOLTAJE PARA DETERMINAR EL ERROR EN ESTADO ESTABLE A DIFERENTES PULSOS DE ENTRADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA FICM**”, desarrollado por el Señor Luis Fabián Caiza Lema, egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Certifico:

- La presente Tesis es original de su autor.
- Ha sido revisada en cada uno de sus capítulos.
- Esta concluido y puede continuar con el trámite correspondiente.

Ambato, Junio de 2015

.....

Ing. Mauricio Carrillo

TUTOR

AUTORIA DE LA TESIS

Los criterios emitidos en el trabajo de investigación: **“SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y CERRADO DE VOLTAJE PARA DETERMINAR EL ERROR EN ESTADO ESTABLE A DIFERENTES PULSOS DE ENTRADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA FICM”**, como los contenidos, ideas, análisis, conclusiones y propuesta son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Ambato, Junio de 2015

.....

Luis Fabián Caiza Lema

180464350-8

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación está dedicado en primer lugar a Dios por darme la fe y fuerza necesaria para luchar día a día con perseverancia.

A mis padres Luis Leonardo Caiza y Alba Lucia Lema por el inmenso sacrificio que realizan cada día para brindarme un mejor porvenir, así como sus palabras y apoyo incondicional son el motivo y el pilar fundamental para seguir forjando las metas más difíciles e impensables.

A mi hermana Verónica quien me apoyo en cada una de las etapas de mi vida.

A mis sobrinos Leonardo y Sebastián quienes llenan de alegría cada uno de mis días y que son la inspiración para seguir hacia delante.

A mi primo Ángel Caiza y a su esposa Sandra Amancha quienes me brindaron su apoyo incondicional.

A mi prima Anita Caiza quien ha sido un soporte fundamental en mi formación académica.

A mi querida amiga Mary Teresa Balseca quien me guio en mi formación personal y espiritual y me enseñó que la mejor forma de vivir es mejor dar que recibir.

AGRADECIMIENTO

De manera muy especial a mi tutor el Ing. Mauricio Carrillo quien más que un docente fue un amigo y con su incomparable ayuda, orientación y colaboración supo guiarme para el desarrollo y culminación del presente proyecto de investigación.

A mis profesores quienes supieron inculcarme el valor del sacrificio.

A mis amigos con quienes compartimos momentos agradables y todas las personas que de una u otra manera me ayudaron a la elaboración de este proyecto de investigación.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato por ser el ente donde consolidé mis sueños.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PÁGINAS PRELIMINARES

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	I
AUTORIA DE LA TESIS	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN EJECUTIVO	XIV

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 TEMA:	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.2.1 CONTEXTUALIZACIÓN.	1
1.2.2 ANÁLISIS CRÍTICO.	2
1.2.3 PROGNOSIS.	3
1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.2.5 PREGUNTAS DIRECTRICES.	3
1.2.6 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.2.6.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO.	3
1.2.6.2 DELIMITACIÓN ESPECIAL.	4
1.2.6.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL.	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.	4
1.4 OBJETIVOS.	5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	6
2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA.....	7
2.3 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES.	7

2.4 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
2.4.1 SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN.....	8
2.4.1.1 OBJETIVOS DE LA AUTOMATIZACIÓN.	8
2.4.1.2 PARTES DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.....	8
2.4.1.3 APLICACIONES.....	9
2.4.1.4 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	9
2.4.2 SISTEMAS DE CONTROL.....	10
2.4.2.1 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	11
2.4.2.2 VARIABLES DEL SISTEMA DE CONTROL.....	11
2.4.2.3 TIPOS DE CONTROL.....	15
2.4.2.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA.....	16
2.4.2.5 POLOS Y CEROS.....	18
2.4.2.6 ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	21
2.4.2.7 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA.....	22
2.4.2.8 ACCION BÁSICA DE CONTROL.....	26
2.4.2.9 PARÁMETROS DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	36
2.4.2.10 AMPLIFICADORES OPERACIONALES.....	38
2.5 HIPÓTESIS.....	42
2.6 SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES.....	42
2.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	42
2.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE.....	42
2.6.3 TÉRMINO DE RELACIÓN.....	42

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE.....	43
3.2 MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.2.1 BIBLIOGRÁFICA.....	43
3.2.2 EXPERIMENTAL.....	43
3.3 NIVELES DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.3.1 ASOCIACIÓN DE VARIABLES.....	43
3.3.2 EXPLORATORIO.....	44
3.3.3 DESCRIPTIVO.....	44
3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	44

3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.	45
3.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.	45
3.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE.	46
3.6 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.	47
3.6.1 OBSERVACIÓN.	47
3.6.2 DOCUMENTAL.	47
3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.	47

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	48
4.1.1 DINÁMICA DEL SISTEMA DE CONTROL.	48
4.1.1.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR.	53
4.1.1.2 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.	62
4.1.1.3 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR P, PI, PD Y PID. ...	66
4.1.1.4 PROCEDIMIENTO SISTEMA DE CONTROL.	76
4.2 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.	80

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.	86
5.2 RECOMENDACIONES.	87

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 DATOS INFORMATIVOS.	88
6.1.1 TEMA.	88
6.1.2 INSTITUCIÓN EJECUTORA.	88
6.1.3 BENEFICIARIOS.	88
6.1.4 UBICACIÓN.	88
6.1.5 EQUIPO TÉCNICO RESPONSABLE.	88
6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA.	88
6.3 JUSTIFICACIÓN.	89
6.4 OBJETIVOS.	89
6.4.1 OBJETIVO GENERAL.	89

6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	89
6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD.	90
6.5.1 EQUIPOS REQUERIDOS.	90
6.6 FUNDAMENTACIÓN.	90
6.6.1 ELEMENTOS DEL MÓDULO DIDÁCTICO.....	90
6.6.1.1 VOLTÍMETRO.....	90
6.6.1.2 ARDUINO UNO.....	91
6.6.1.3 INTERFAZ GRÁFICA.....	92
6.6.1.4 DIAGRAMA DE FLUJO.	92
6.6.1.5 FUENTE DE PODER.	95
6.6.1.6 CONTOLADOR PID.....	97
6.6.1.7 VOLTAJE DE COMPENSACIÓN	100
6.6.1.8 ACONDICIONADORES DE SEÑAL	102
6.6.1.9 SELECTOR DE POSICIONES.	105
6.6.1.10 ETAPA DE POTENCIA.....	107
6.7 METODOLOGÍA.	108
6.7.1 TABLERO.	108
6.7.2 SEÑALIZACIÓN DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	110
6.7.3 UBICACIÓN DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS.	110
6.7.4 CABLEADO Y SOLDADO.....	111
6.7.5 BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO.	111
6.7.5.1 LAZO ABIERTO.....	112
6.7.5.2 LAZO CERRADO.....	112
6.8 ADMINISTRACIÓN.....	117
6.8.1 COSTOS DIRECTOS.....	117
6.8.2 COSTOS INDIRECTOS.....	119
6.9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
6.9.1 CONCLUSIONES.	120
6.9.2 RECOMENDACIONES.....	120
6.10 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN.....	121
7. BIBLIOGRAFÍA	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de bloque simple de una sola entrada y salida.	10
Figura 2.2 Diagrama de bloques con operaciones matemáticas.	10
Figura 2.3 Sistema de control.....	11
Figura 2.4 Oscilación atenuada.	12
Figura 2.5 Esquema general de un sistema de control.	12
Figura 2.6 Diagrama de bloques a lazo abierto.....	13
Figura 2.7 Diagrama de bloques a lazo abierto con transductor y actuador.	13
Figura 2.8 Diagrama de bloques a lazo cerrado.	14
Figura 2.9 Diagrama de bloques a lazo cerrado con actuador y realimentación...	15
Figura 2.10 Topología típica de un sistema de control digital.	16
Figura 2.11 Plano “s” compuesto por un eje real σ y un eje imaginario $j\omega$	16
Figura 2.12 Función de transferencia de un sistema.	17
Figura 2.13 Adición de polos en el sistema.	20
Figura 2.14 Adición de ceros en el sistema.....	20
Figura 2.15 Estabilidad de un sistema.....	21
Figura 2.16 Región recomendada para la ubicación de polos.....	22
Figura 2.17 Sistema de primer orden.	23
Figura 2.18 Función escalón unitario.....	24
Figura 2.19 Respuesta de un sistema a una entrada en escalón unitario.....	24
Figura 2.20 Función compuesta por funciones escalón unitario.....	25
Figura 2.21 Función rampa unitaria.	25
Figura 2.22 Control de dos posiciones.....	26
Figura 2.23 Brecha diferencial.....	26
Figura 2.24 Simbología de los distintos tipos de controladores.	28
Figura 2.25 Diagrama de bloques control Proporcional.	28
Figura 2.26 Señal de entrada en escalón y la respuesta en forma teórica y real. ..	29
Figura 2.27 Control Proporcional.	29
Figura 2.28 Diagrama de bloques control Proporcional-Integrativo.	30
Figura 2.29 Diagrama de bloques control Proporcional-Derivativo.....	31
Figura 2.30 Diagrama control Proporcional-Derivativo.	32
Figura 2.31 Diagrama de bloques control Proporcional-Integrativo-Derivativo. .	33
Figura 2.32 Señal control PID.....	34
Figura 2.33 Control PID con derivada a la salida.	34

Figura 2.34 Forma interactiva control PID.	34
Figura 2.35 Forma paralela control PID.	35
Figura 2.36 Respuesta al escalón de un sistema desconocido.	35
Figura 2.37 Sistema en estado estable.....	36
Figura 2.38 Sistema en estado inestable.	37
Figura 2.39 Respuesta según la rapidez del sistema.	37
Figura 2.40 Régimen transitorio y de estado estable para un sistema estable.	38
Figura 2.41 Simbología de un operacional.	39
Figura 2.42 Circuito equivalente de un amplificador operacional.	40
Figura 2.43 Alineación por saturación.	40
Figura 2.44 Modulación en un comparador realimentado.	41
Figura 4.1 Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo abierto.	48
Figura 4.2 Caso práctico de un sistema de control a lazo abierto.	48
Figura 4.3 Montaje de un sistema de control a lazo abierto.....	49
Figura 4.4 Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo cerrado.	49
Figura 4.5 Caso práctico de un sistema de control a lazo cerrado.	50
Figura 4.6 Montaje del sistema de control a lazo cerrado.....	50
Figura 4.7 Linealidad de un motor de corriente continua.	51
Figura 4.8 Curva de arranque y parada de un motor DC.	52
Figura 4.9 Señal tipo rampa aplicada a un motor DC.	52
Figura 4.10 Montaje inversor.....	54
Figura 4.11 Montaje no inversor.	54
Figura 4.12 Esquema del circuito de un amplificador operacional restador.....	55
Figura 4.13 Esquema del circuito proporcional del controlador.....	56
Figura 4.14 Esquema del circuito integral del controlador.	57
Figura 4.15 Esquema del circuito derivativo del controlador.	58
Figura 4.16 Esquema del circuito sumador del controlador.	59
Figura 4.17 Esquema simplificado del controlador.	61
Figura 4.18 Motor de corriente continua modelo Mabuchi.	62
Figura 4.19 Circuito equivalente del motor de corriente continua.....	63
Figura 4.20 Respuesta del motor DC a una entrada escalón a lazo abierto.	65
Figura 4.21 Ubicación de polos y ceros en el plano cartesiano 's'.....	66
Figura 4.22 Ubicación de polos en el plano cartesiano 's' a lazo cerrado.	68
Figura 4.23 Sintonización del control Proporcional.	68

Figura 4.24 Parámetros del control Proporcional.	69
Figura 4.25 Asignación de un polo y un cero al sistema para un control PI.	69
Figura 4.26 Sintonización del control PI.	70
Figura 4.27 Función de transferencia del control PI a lazo cerrado.	70
Figura 4.28 Parámetros del controlador PI.	71
Figura 4.29 Asignación de un polo y un cero al sistema para un control PD.	71
Figura 4.30 Sintonización del controlador PD.	72
Figura 4.31 Función de transferencia del control PD a lazo cerrado.	72
Figura 4.32 Parámetros del controlador PD.	73
Figura 4.33 Asignación de polos y ceros al sistema para un control PID.	74
Figura 4.34 Sintonización del controlador PID.	74
Figura 4.35 Función de transferencia del control PID a lazo cerrado.	74
Figura 4.36 Parámetros del controlador PID.	76
Figura 4.37 Ni DAQ 6008.	76
Figura 4.38 Esquema amplificador electrónico lineal.	77
Figura 4.39 Etapa de potencia.	78
Figura 4.40 Encoder de barrera modelo Hc-020K.	78
Figura 4.41 Lectura sensor de barrera en NI DAQ 6008.	79
Figura 4.42 Voltaje de compensación.	80
Figura 6.1 Voltímetro digital.	90
Figura 6.2 Arduino Uno.	91
Figura 6.3 Diagrama esquemático de arduino, LCD y encoder.	92
Figura 6.4 Interfaz gráfica del sistema de control a lazo abierto y a lazo cerrado.	92
Figura 6.5 Diagrama de flujo.	93
Figura 6.6 Diagrama de flujo.	94
Figura 6.7 Diseño esquemático fuente de poder asimétrica.	95
Figura 6.8 Ruteo circuito impreso fuente de poder asimétrica.	96
Figura 6.9 Fabricación fuente de poder asimétrica.	96
Figura 6.10 Fuente de poder asimétrica de $\pm 15V$ con filtración de ruido.	97
Figura 6.11 Seguidor de tensión.	98
Figura 6.12 Diseño esquemático controlador PID y variantes.	99
Figura 6.13 Ruteo circuito impreso controlador PID y variantes.	99
Figura 6.14 Fabricación controlador PID y variantes.	100
Figura 6.15 Controlador PID y variantes.	100

Figura 6.16 Diseño esquemático voltaje de compensación.	100
Figura 6.17 Ruteo circuito impreso voltaje de compensación.	101
Figura 6.18 Fabricación del voltaje de compensación.	101
Figura 6.19 Voltaje de compensación del controlador.	101
Figura 6.20 Diseño esquemático acondicionador de 0V-12V a 0V-5V.	102
Figura 6.21 Ruteo circuito impreso acondicionador de 0V-12V a 0V-5V.	102
Figura 6.22 Fabricación acondicionador de 0V-12V a 0V-5V.	103
Figura 6.23 Diseño esquemático acondicionador de 0V-5V a 0V-12V.	103
Figura 6.24 Ruteo circuito impreso acondicionador de 0V-5V a 0V-12V.	104
Figura 6.25 Fabricación acondicionador de 0V-5V a 0V-12V.	104
Figura 6.26 Acondicionadores de señal de voltaje.	105
Figura 6.27 Diseño esquemático selector de posiciones para lazo cerrado.	105
Figura 6.28 Ruteo circuito impreso selector de posiciones para lazo cerrado. ...	106
Figura 6.29 Fabricación selector de posiciones para lazo cerrado.	106
Figura 6.30 Selector de posiciones para lazo cerrado.	107
Figura 6.31 Ruteo circuito impreso etapa de potencia.	107
Figura 6.32 Fabricación etapa de potencia.	108
Figura 6.33 Etapa de potencia del motor de corriente continua.	108
Figura 6.34 Plancha de 2mm en acero negro.	109
Figura 6.35 Tubo de 25mm x 25mm x 1.5 en acero negro.	109
Figura 6.36 Perforación para los elementos electrónicos.	109
Figura 6.37 Señalización del circuito electrónico.	110
Figura 6.38 Ubicación de los elementos electrónicos.	110
Figura 6.39 Cableado y soldado de los elementos electrónicos.	111
Figura 6.40 Banco de pruebas didáctico de lazo abierto y cerrado.	111
Figura 6.41 Control a lazo abierto de voltaje para un motor DC.	112
Figura 6.42 Control Proporcional para un motor DC.	113
Figura 6.43 Control Proporcional-Integral para un motor DC.	114
Figura 6.44 Control Proporcional-Derivativo para un motor DC.	115
Figura 6.45 Control Proporcional-Integral-Derivativo para un motor DC.	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Diagrama de polos y ceros de funciones $G(s)$	19
Tabla 2.2 Acciones básicas y combinadas de una acción de control.	27
Tabla 3.1 Operacionalización de la variable independiente.....	45
Tabla 3.2 Operacionalización de la variable dependiente.....	46
Tabla 4.1 Parámetros motor modelo C2162-60006.	64
Tabla 4.2 Error en estado estable a lazo abierto.....	81
Tabla 4.3 Error en estado estable control Proporcional.	82
Tabla 4.4 Error en estado estable control Proporcional-Integral.	83
Tabla 4.5 Error en estado estable control Proporcional-Derivativo.....	83
Tabla 4.6 Error en estado estable control Proporcional-Integral-Derivativo.	84
Tabla 6.1 Características Arduino Uno.	91
Tabla 6.2 Resultados del sistema de control a lazo cerrado.....	117
Tabla 6.3 Costos directos.	118
Tabla 6.4 Costos indirectos.	119
Tabla 6.5 Costo total.	119

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto de investigación “Sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje para determinar el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de control y automatización de la FICM”, se enfoca al estudio de los elementos que conforman los sistemas de control a lazo abierto y a lazo cerrado de voltaje, calibración y adquisición de datos basado en electrónica analógica.

Para sistemas de control a lazo abierto la señal de salida es independiente de la señal de entrada, es decir la señal de salida no influye sobre la señal de entrada, por consiguiente este tipo de sistema depende de la calibración que proporcione el usuario. En los sistemas de control a lazo cerrado la señal de salida es dependiente de la señal de entrada debido a que el sistema es retroalimentado, por ende un sistema totalmente autónomo. Para este proyecto de investigación se consideró los controladores más utilizados a nivel industrial como son control Proporcional (P), control Proporcional-Integral (PI), control Proporcional-Derivativo (PD) y control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), cada uno de ellos con una función y sintonización específica acorde al modelo matemático de planta, además se incluyó elementos electrónicos de precisión para tender el error al mínimo al momento de realizar pruebas de funcionamiento y visualizadores de voltaje para apreciar la compensación del controlador.

Los ensayos experimentales de control a lazo abierto y a lazo cerrado de voltaje se encuentran tabulados y representados gráficamente por medio del software Labview en tiempo real, el cual permite visualizar el error en estado estable.

SUMMARY

The research project "Control systems open-loop and closed-loop voltage to determine the steady-state error to different input pulses in the control laboratory and automation of the FICM", focuses on the study of the elements of the control systems to open-loop and closed loop-voltage, calibration and data acquisition based on analog electronics.

Control systems for open-loop output signal is independent of the input signal that is the output signal has no effect on the input signal, therefore this type of system depends on the calibration to provide the user. Control systems in closed-loop output signal is dependent on the input signal because the system is fed back, thus a completely autonomous system. For this research project is considered the most widely used industrially such as Proportional control (P), Proportional-Integral control (PI), proportional-derivative control (PD) and Proportional-Integral-Derivative Control control (PID), each one of them with a specific function and tuning according to the mathematical model of plant, precision electronics also included for laying the error to a minimum at the time of performance tests and viewers to appreciate the compensation voltage controller.

Experimental tests of open-loop and closed-loop voltage are tabulated and plotted by the Labview software in real time, which displays the error in steady state.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 TEMA:

“SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y CERRADO DE VOLTAJE PARA DETERMINAR EL ERROR EN ESTADO ESTABLE A DIFERENTES PULSOS DE ENTRADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA FICM”

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.2.1 CONTEXTUALIZACIÓN.

Actualmente a nivel mundial, los sistemas de control son la base fundamental de un sin número de procesos que están conformados por diversos componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que pueden regular o dirigir sus propios procesos o subprocesos con el fin de lograr una actividad establecida, es decir sin intervención de agentes externos incluido el factor humano, corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento (Ortega, 2015), debido a un ente que recopila acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida.

Países como Canadá y Estados Unidos, utilizan sistemas de control para el desarrollo, optimización y repotenciación de los diversos procesos industriales como son en las industrias: Automotriz, Aeronáutica, Alimenticia, Espacial, Electrodoméstica entre otros, ya que actualmente cualquier mecanismo, sistema o planta industrial presenta una parte actuadora, que corresponde al sistema físico que realiza la acción y otra parte la de mando o control, que genera las ordenes necesarias para que esa acción se lleve o no a cabo ayudado de un circuito eléctrico, electrónico o más modernamente por un ordenador (Ortega, 2015).

En los últimos años se ha destacado un creciente avance tecnológico dentro de la industria nacional ecuatoriana debido al cambio de la matriz productiva, especialmente en sistemas de control automatizado para una infinidad de procesos establecidos, la cual juega un gran papel, donde los defectos en el producto terminado debido a la mano de obra sean mínimos o inexistentes, aumentando la producción pero al mismo tiempo mejorando la calidad del producto final, generando así la competitividad en el mercado, gracias a la combinación tanto de producción en serie y de montaje, la cual ayuda de manera directa a la reducción de costos de producción. Además en los hogares los sistemas de control mejora la calidad de vida por citar algunos ejemplos desde una lavadora, un horno hasta un control inteligente de un sistema de aire acondicionado de un edificio, por tal motivo se ha tomado la iniciativa de realizar esta investigación puesto que la incursión en un sistema de control automático sirva como un herramienta práctica de laboratorio para los alumnos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1.2.2 ANÁLISIS CRÍTICO.

Un sistema de control es indispensable en la gran variedad de procesos industriales hoy en día, puesto que simplifica al mínimo una gran variedad de reprocesos, producto de errores del operador u operadores, y al mismo tiempo ayuda a una mejor coordinación tanto de funcionamiento de dispositivos, máquinas y mecanismos, forjando así un producto final de mejor calidad con menos costos de producción y en un menor tiempo.

Por consiguiente este tipo de investigación ofrece grandes expectativas ya que en la actualidad el estudiante debe actualizarse con nuevas tecnologías que conlleven a la optimización de recursos, puesto que el campo laboral implica competitividad, de ahí en conocer su comportamiento a través de dispositivos electrónicos adecuados y familiarizarse con el desempeño de los mismo, además en las industrias un sistema de control automático está íntimamente relacionado con procesos de producción, por lo que nos motiva a realizar este sistema de control ya que los resultados obtenidos serán aprovechados por los estudiantes de la facultad de Ingeniería Mecánica para un mejor desarrollo y consolidación de conocimientos.

1.2.3 PROGNOSIS.

Sin el presente trabajo de investigación los estudiantes no podrán establecer los diferentes parámetros que hay que tomar en cuenta al momento de realizar un sistema de control acorde a una formación entre la teoría y la práctica de control industrial, por lo que al realizar el estudio de sistemas de control a lazo abierto y a lazo cerrado de voltaje para determinar el error en estado estable se mejorará el aprendizaje de sistemas de control y se optimizará los recursos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato debido a que todos los estudiantes dentro del laboratorio podrán realizar pruebas de control industrial.

1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Los sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje determinarán el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de Control y Automatización de la FICM?

1.2.5 PREGUNTAS DIRECTRICES.

¿Cuáles son los elementos constitutivos que deben contener los sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje?

¿Qué tipos de instrumentos de medición se deben aplicar para generar los datos correspondientes en cada proceso?

1.2.6 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

1.2.6.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO.

La investigación a realizarse estará enmarcado dentro del campo de Ingeniería Mecánica, basado en las materias de Electrónica Industrial y Sistemas de Medición y Control Industrial I y II.

1.2.6.2 DELIMITACIÓN ESPECIAL.

La presente investigación se realizará en el laboratorio de Control y Automatización Industrial de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1.2.6.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL.

La investigación se efectuará durante el periodo establecido de Octubre de 2014 – Marzo de 2015.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

A nivel mundial especialmente en el sector industrial la tecnología a través de sistemas de control automáticos ha crecido inmensurablemente (Ogata, 2010), razón por la cual se ve la necesidad de implementar un módulo de sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje, el cual nos permitirá comprender el comportamiento de la señal tanto de entrada como sus variables de salida, conforme la señal se vaya transmitiendo al controlador, actuador, planta y la retroalimentación (en caso de lazo cerrado) en un proceso establecido, mejorando de forma didáctica el control industrial, promoviendo así el manejo y funcionamiento adecuado de instrumentos de control industrial reales que benefician de manera directa a la FICM.

Este proyecto es de gran importancia puesto que se fundamenta en la necesidad de adquirir conocimientos, así como identificar claramente los cambios en el pulso en todas sus etapas, por otro punto, generando innovación en la carrera de ingeniería mecánica de la FICM, teniendo como propósito final la adquisición de conocimientos por parte de los estudiantes.

Es por este hecho que se ha tomado la iniciativa de realizar este módulo didáctico, ya que es una investigación factible de realizarlo, puesto que se cuenta en el mercado con todos sus componentes. Lo que a su vez impulsará el desarrollo de procedimientos en cuanto a métodos de sistemas de control de lazo abierto y cerrado

de voltaje automáticos, así como criterios de diseño que aportarán directamente al sector industrial impulsando así el cambiando de la matriz productiva del Ecuador.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 OBJETIVO GENERAL.

Estudiar los sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje para determinar el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de Control y Automatización de la FICM.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Determinar los elementos constitutivos que deben contener los sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje.

Establecer los instrumentos de medición que se deben aplicar para generar los datos correspondientes en cada proceso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.

En la Carrera de Ingeniería en Macatrónica de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica del Norte de Ibarra-Ecuador en Abril del 2013 el Sr. Luis Gabriel Rosero Rosero realizó un “SISTEMA DE CONTROL DE PESO PARA LLENADO DE SACOS DE HARINA DE 50 KG”, en la que se estudió el tipo de sistema de control automático ideal (sistema de lazo cerrado) para un proceso de llenado y pesado de sacos de harina en una forma rápida y precisa con una interfaz gráfica HMI, disminuyendo al mínimo los errores derivados por anteriores procesos manuales, proyectando así un aumento en la producción diaria con mejor calidad en menor tiempo.

En el estudio “CONTROL EN LAZO CERRADO PARA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES FUENTE DE TENSIÓN” por Pedro Luis Roncero Sánchez, Aurelio García Cerrada, Vicente Feliu Batlle y Pablo García González, se analizó el diseño, modelo y la aplicación de una estructura de controles selectivos para inversiones fuente tensión. Los controles selectivos son aprovechados para minimizar o eliminar el contenido de armónicos de baja frecuencia en la tensión de salida de un inversor mediante técnicas de lazo cerrado, además se investigó y analizo detalladamente la estabilidad del mismo. Sin embargo parte de este estudio se lo realizó mediante la respuesta en frecuencia del lazo abierto utilizando el margen de fase y la pulsación de cruce de ganancia como especificaciones de diseño.

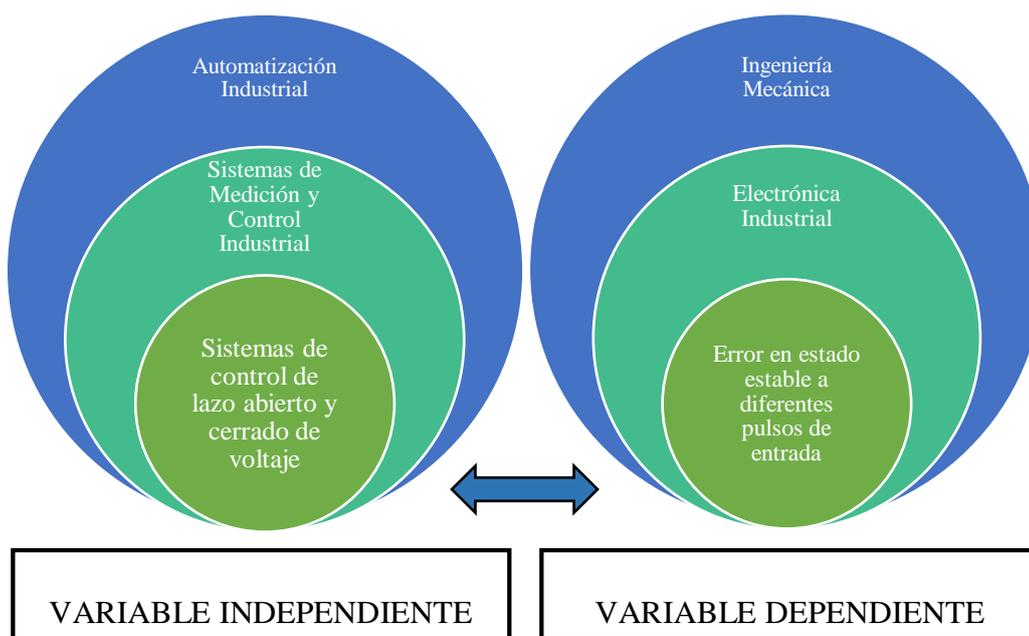
En el Departamento de Ingeniería Electrónica Eléctrica y Automática de la Universitat Rovira I Virgili de Barcelona-España en Junio de 2003 el Sr. Jordi Colomer Campos realizó un “SISTEMA PARA EL CONTROL EN LAZO

CERRADO DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO DE UNA AGRUPACIÓN INTEGRADA DE MICROSENSORES DE GASES”, en la que se realizó un lazo de control que regula la temperatura de los sensores de gases de tecnología micro-hotplate y nariz electrónica, cuyo sistema fue controlado por un ordenador inspeccionando así las perturbaciones generadas a las variaciones de la temperatura de trabajo en la capa activa de los sensores.

2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA.

La presente investigación está ubicada en el paradigma crítico propositivo; crítico puesto que el estudio parte de un problema real al no disponer de un módulo para sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje. Propositivo porque tiene como única finalidad incursionar en nuevas tecnologías que ayudarán a dar solución del mismo.

2.3 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES.



2.4 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.4.1 SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN.

Hoy en día los sistemas de automatización están conformados por una serie de componentes físicos relacionados o conectados entre sí, generando y regulando procesos específicos como es la actuación de sistemas mecánicos, plantas industriales entre otros por sí mismo a través de un ordenador haciéndole automático, provocando una disminución de errores de procesos por agentes externos incluido el factor humano (Ortega, 2015).

2.4.1.1 OBJETIVOS DE LA AUTOMATIZACIÓN.

- Mejorar la producción de la industria con una mejor calidad, consiguiendo así una reducción de costos de producción.
- Optimizar las condiciones de trabajo del operario, suprimiendo trabajos de gran esfuerzo físico, difíciles de controlar manualmente y al mismo tiempo incrementando la seguridad industrial.
- Simplificar el mantenimiento de forma que el operario no requiera grandes conocimientos para la manipulación del proceso productivo.

2.4.1.2 PARTES DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.

Los sistemas de automatización constan de dos partes principales:

- Parte de mando.
- Parte operativa.

PARTE DE MANDO.

Por lo general es un autómatas programable es decir capaz de realizar determinadas operaciones de manera automática (tecnología programable), en un sistema de fabricación automatizado el autómatas programable está en el centro del sistema, con la cual este debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes del sistema automatizado (Maser Automatismos, 2014).

PARTE OPERATIVA.

Es la parte que actúa de forma directa sobre el sistema, es decir son los elementos que hacen que el sistema se mueva como por ejemplo compresores, electroválvulas, válvulas, sensores, actuadores y que realice la operación deseada (Maser Automatismos, 2014).

2.4.1.3 APLICACIONES.

Actualmente los sistemas automáticos tienen un rol de suma importancia en una gran infinidad de áreas de producción de la industria en general y como única finalidad o propósito es mejorar la calidad del producto final que está directamente relacionado con la calidad de vida de las personas. En los procesos industriales un sistema de automatización aumenta la producción y va a la par con la calidad del producto puesto que existe una combinación entre procesos en serie y cadenas de montaje.

En los hogares, mejora la calidad de vida de las personas, entre los que podemos citar algunos ejemplos como es el caso de lavadoras, microondas, televisiones y hasta el control inteligente de un sistema de aire acondicionado y calefacción para una residencial.

La automatización también está presente en avances tecnológicos como en la automoción puesto que desde la fabricación de componente hasta el ensamblaje del mismo cuenta con este sistema, por citar ejemplos: frenos de alta precisión con variación de pulsos, limpia parabrisas inteligentes entre otros.

2.4.1.4 DIAGRAMA DE BLOQUES.

Un proceso o sistema de control es un conjunto de elementos interrelacionados capaces de realizar una operación dada o de satisfacer una función deseada (Ortega, 2015).

Generalmente en los sistemas de control la forma más usual de representarlo es a través de diagramas de bloque para cada elemento (por medio de un rectángulo),

ayudando a tener una entrada y salida más simplificada de las relaciones con una mejor expresión visual, como se puede observar en la figura 2.1.



Figura 2.1 Diagrama de bloque simple de una sola entrada y salida.
Fuente: (Ortega, 2015)

Las flechas que indican el sentido de flujo de la información es la interacción que existe entre los bloques. Además en los diagramas de bloques también se puede realizar operaciones matemáticas como son: suma, resta, multiplicación y división que se encuentran representadas por un pequeño círculo y con sus respectivos signos, como se puede observar en la figura 2.2.

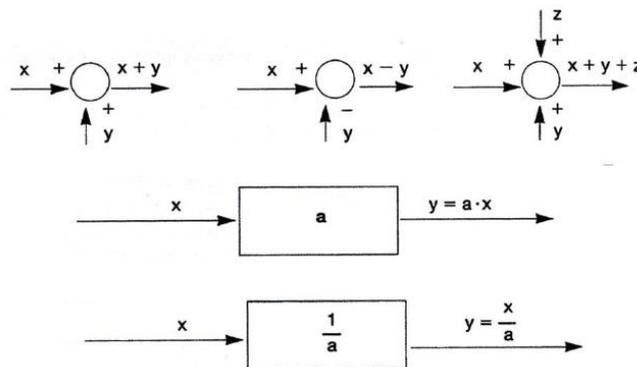


Figura 2.2 Diagrama de bloques con operaciones matemáticas.
Fuente: (Ortega, 2015)

2.4.2 SISTEMAS DE CONTROL.

Un sistema de control puede definirse conceptualmente como un ente que recibe acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida (Giraldo B. & Tabares G., 1997).

Las variables de entrada se dividen en dos grupos que son:

- Variables de control.- Son variables que se pueden manipular.
- Perturbaciones.- Son aquellas que no es posible ejecutar ninguna clase de control.

En la figura 2.3 se presenta un sistema de control que está integrado por acciones externas o variables de entrada y que por medio de un proceso se obtienen variables de salida.

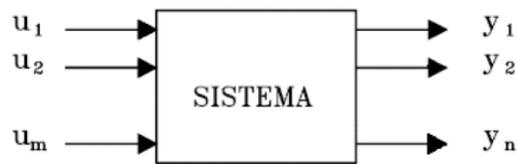


Figura 2.3 Sistema de control.

Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

2.4.2.1 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE CONTROL.

Un sistema de control tiene como única finalidad cumplir un determinado proceso con las siguientes características:

- Estabilidad ante perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido (evitando comportamientos bruscos e irreales) (Rosero, 2013).
- Los errores deben ser reducidos al mínimo tolerable.

2.4.2.2 VARIABLES DEL SISTEMA DE CONTROL.

Las variables del sistema son todas las magnitudes que se encuentran sometidas a un monitoreo y a un control establecido, las cuales definen el comportamiento de un sistema como es el caso de la velocidad, velocidad angular, presión, voltaje, amperaje, temperatura, posición entre otros, que está conformado de la siguiente manera:

- Señal de Entrada.- Es la señal de entrada que genera una excitación la cual es aplicada a un sistema de control con el fin de estimular una respuesta.
- Perturbaciones.- Son las interferencias o señales no deseadas que influyen de forma directa sobre el control del sistema.
- Controlador.- Es el encargado de controlar la salida en función de una señal de activación.

- Actuador.- Es un elemento que actúa conforme recibe la señal del controlador y transforma a una señal adecuada según la variable de salida.
- Planta.- Sistema sobre el que pretendemos controlar y dar un uso preestablecido.
- Sensores.- Permite determinar los valores de las variables medidas del sistema.
- Señal de Salida.- Es la respuesta o señal de salida generada o proporcionada por el sistema de control.

En un lazo de control estable, se generan oscilaciones de la variable controlada después de la interferencia, pero su amplitud se reduce con el tiempo hasta que desaparece completamente (Siemens, 2012), este tipo de cambio se denomina oscilación atenuada que se la consigue en un estado en reposo como se puede apreciar en la figura 2.4.

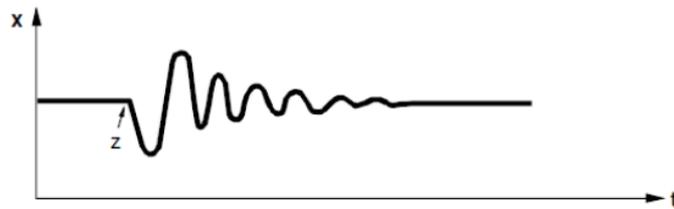


Figura 2.4 Oscilación atenuada.

Fuente: (Siemens, 2012)

En la figura 2.5 se puede apreciar un esquema general de un sistema de control con sus respectivas variables.

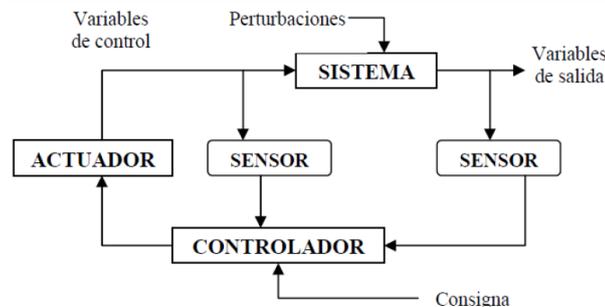


Figura 2.5 Esquema general de un sistema de control.

Fuente: (Rosero, 2013)

Los tipos de sistemas de control o sistemas de regulación se pueden clasificar en:

- Sistemas de lazo abierto
- Sistemas de lazo cerrado

SISTEMAS DE LAZO ABIERTO.

En un sistema de lazo abierto la acción de control es independiente de la señal de salida, es decir la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. Así mismo la exactitud de estos sistemas depende de su calibración, de manera que al calibrar se establece una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada (Ortega, 2015).

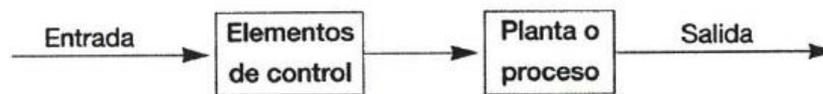


Figura 2.6 Diagrama de bloques a lazo abierto.
Fuente: (Ortega, 2015)

Sin embargo el sistema se controla de una mejor manera por medio de un transductor (tiene como función principal transformar, modificar o adaptar una magnitud física de entrada en otra que sea capaz de interpretar el sistema) y un actuador (modifica la entrada del sistema entregada por el transductor), como se puede observar en la figura 2.7.

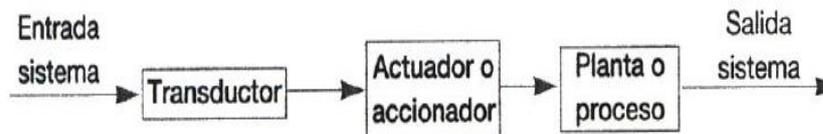


Figura 2.7 Diagrama de bloques a lazo abierto con transductor y actuador.
Fuente: (Ortega, 2015)

Los sistemas de lazo abierto están directamente relacionados con la variable tiempo y su señal de salida no depende de la señal de entrada. Uno de sus principales inconvenientes es que estos sistemas son sumamente perceptivos a las perturbaciones, es decir señales no deseadas que influyen de forma adversa en el funcionamiento del sistema, por consiguiente en un sistema en lazo abierto no se obtienen siempre la variable de salida deseada.

SISTEMAS DE LAZO CERRADO.

En un sistema de lazo cerrado la acción de control depende de la señal de salida, es decir un sistema que utiliza la relación entre la señal de entrada con la señal de salida, tomando esto en cuenta la señal de salida influye en la entrada por tal razón la señal de entrada es modificada en cada instante en función de la salida, todo esto gracias a la realimentación o retroalimentación, o también denominada “feedback”, propiedad con la cual se compara la señal de salida con la señal de entrada del sistema de modo que la acción de control se constituya como una función de ambas. Algunos autores también lo denominan realimentación transductor de señal de salida, puesto que mide en cada instante el valor de la señal de salida y proporciona un valor proporcional a dicha señal (Ortega, 2015).

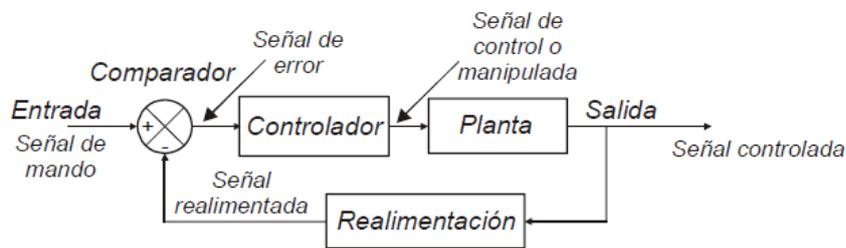


Figura 2.8 Diagrama de bloques a lazo cerrado.

Fuente: (Ortega, 2015)

En la figura 2.8 se puede notar que se utiliza un Comparador la cual está formado por todos los elementos de control, un bloque de Planta que se la denomina proceso y una realimentación que sirve de puente entra la señal de salida con la señal de entrada en la cual ambas son comparadas, y la diferencia que existe entre la entrada (señal de referencia) y la salida (señal realimentada) se establece como señal de error, dicha señal actúa directamente en los elementos de control con el propósito de reducir al mínimo o con una tendencia a cero y por ende llevar la señal de salida a un valor preestablecido.

Cabe mencionar que la señal que entrega el controlador se la denomina señal de control o manipulada y la entregada por la salida se la denomina señal controlada (Ortega, 2015), como se puede visualizar en la figura 2.9.



Figura 2.9 Diagrama de bloques a lazo cerrado con actuador y realimentación.
Fuente: (Ortega, 2015)

En la figura 2.9 se puede observar que la realimentación se la realiza con un captador y en el comparador o detector de error, la señal de referencia o señal de entrada (salida del transductor) se compara con la señal de salida medida por el captador, generando una señal de error.

En los sistemas de lazo cerrado la principal ventaja es que estos sistemas son menos perceptibles a las perturbaciones debido a que utilizan una realimentación, la cual registra todas las variaciones o modificaciones que afecta la salida como una señal de error, por consiguiente las perturbaciones son compensadas.

2.4.2.3 TIPOS DE CONTROL.

CONTROL ADAPTIVO.

Este tipo de control es utilizado para examinar o identificar la planta para ajustar los parámetros del controlador a valores óptimos. Es decir el control se adecúa a cambios de la planta o cambios externos que afectan el mismo (Giraldo B. & Tabares G., 1997).

CONTROL ÓPTIMO.

Control utilizado con el fin de minimizar o maximizarlas variables como por ejemplo tiempo, energía, combustible, presión, velocidad, entre otros.

CONTROL DIGITAL.

En este tipo de control un microprocesador o microcontrolador cumple la función de un controlador (computador digital), en la figura 2.10 se puede apreciar la topología típica de este control digital.

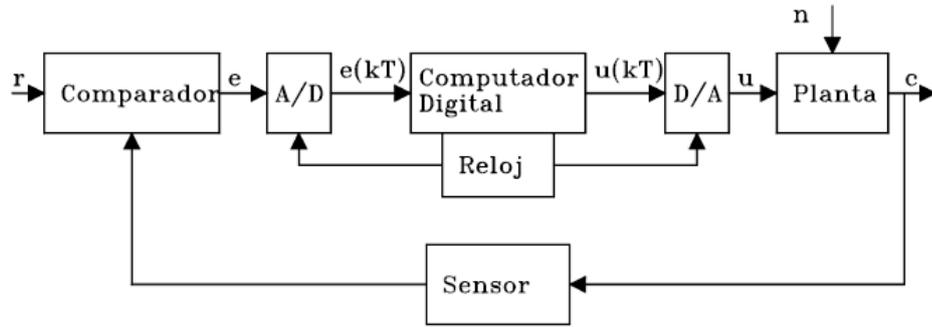


Figura 2.10 Topología típica de un sistema de control digital.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

2.4.2.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA.

Para tener una idea clara de la función de transferencia el primer paso es entender la transformada de Laplace y según (Hernández, 2010) la transformada de Laplace convierte una función $g(t)$ del dominio tiempo, definida para tiempo mayores o iguales a cero, en una función $G(s)$ propia del dominio "s", en la cual la transformada de Laplace de $L\{g(t)\}$ es $G(s)$.

De esta forma, se dice que $G(s)$ es la transformada de Laplace de la función $g(t)$. El factor "s" es un número complejo: $s = \sigma + j\omega$, por lo cual toda la función $G(s)$ puede representarse en el plano cartesiano "s" según se muestra en la figura 2.11.

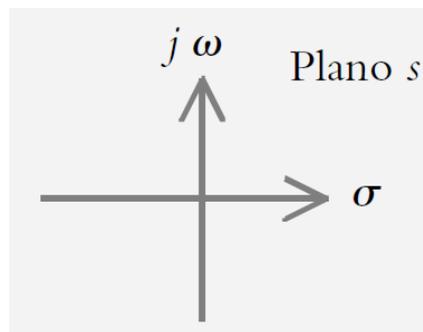


Figura 2.11 Plano "s" compuesto por un eje real σ y un eje imaginario $j\omega$.
Fuente: (Hernández, 2010)

Para establecer una determinada respuesta de un sistema en función del tiempo, se emplean señales preestablecidas a la entrada del sistema que generalmente es en forma de escalón, y se valoran las señales de salida del sistema, cuya respuesta obtenida se denomina respuesta transitoria.

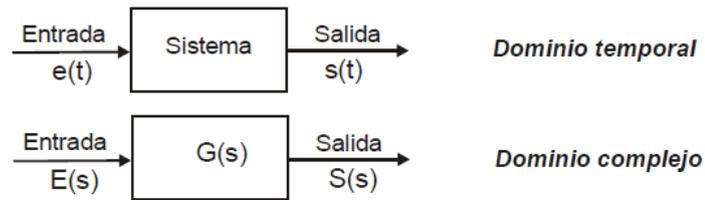


Figura 2.12 Función de transferencia de un sistema.
Fuente: (Ortega, 2015)

Por consiguiente la función de transferencia $[G(s)]$ es el cociente entre las transformadas de Laplace de las señales de salida y la señal de entrada.

Las características de la función de transferencia depende únicamente de las propiedades físicas de los componentes del sistema, no de la señal de entrada aplicada, viene dada como el cociente de dos polinomios en la variable compleja "s" de Laplace, el numerado $N(s)$ y el denominador $D(s)$ (Ortega, 2015), como se presenta en la ecuación 2.1.

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.1)$$

La transformada de Laplace convierte una ecuación diferencial lineal (variable tiempo "t") de orden "n" en una ecuación algebraica de grado equivalente al orden de la ecuación diferencial (variable compleja "s").

La función de transferencia ayuda a conocer los siguientes parámetros:

- Respuesta del sistema ante una señal de entrada determinada.
- Estabilidad del sistema (limites determinados).
- Para que un sistema permanezca constante, conocer los valores que se debe aplicar.

La función de transferencia es muy útil ya que una vez calculada la transformada de Laplace de la entrada, se conoce de forma inmediata la transformada de Laplace de la salida con la cual permite obtener la respuesta temporal, respuesta estática y la respuesta en frecuencia. Calculando la transformada inversa se obtiene la respuesta en el tiempo del sistema ante esa entrada determinada.

El análisis de distintas descomposiciones de la respuesta temporal permite adquirir útiles ideas cualitativas, y definir varios importantes conceptos: efectos de las condiciones iniciales, respuestas libre y forzada, regímenes permanentes y transitorios. También permite definir el concepto central de estabilidad, y establecer un primer criterio para la investigación (Fernández, 2012).

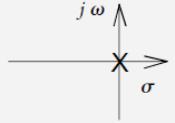
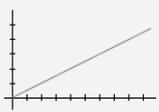
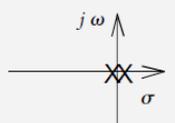
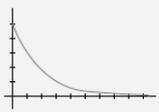
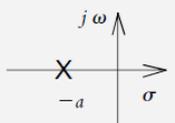
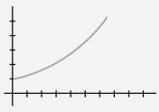
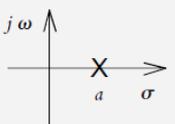
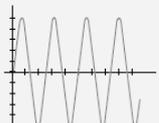
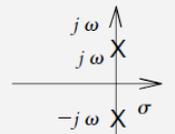
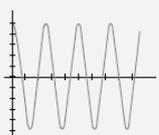
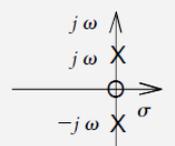
2.4.2.5 POLOS Y CEROS.

De la función de transferencia el denominador " $D(s)$ " se le denomina como función característica, pues determina, a través de los valores de sus coeficientes, las características físicas de los elementos que componen el sistema. La función característica igualada a cero se conoce como ecuación característica del sistema.

Las raíces de la ecuación característica se denominan "*Polos*" del sistema y se representan por un símbolo a manera de "*cruz*" en el plano " s ". Las raíces del numerador " $N(s)$ " reciben el nombre de "*Ceros*" del sistema, los cuales se representan por círculos en el plano " s ".

Se puede demostrar que para que un sistema sea físicamente realizable, el número de polos debe ser mayor, o al menos igual, que el número de ceros. Si fuese lo contrario, esto implicaría que el sistema responde antes de que se produzca el estímulo, lo cual es físicamente imposible (Ortega, 2015), a continuación se presenta la tabla 2.1, en la cual se expone el diagrama de polos y ceros de funciones $G(s)$.

Tabla 2.1 Diagrama de polos y ceros de funciones $G(s)$.

$g(t)$	Gráfica en tiempo	$G(s)$	Gráfica en el plano s
1. A		$\frac{A}{s}$	
2. At		$\frac{A}{s^2}$	
3. Ae^{-at}		$\frac{A}{s+a}$	
4. Ae^{at}		$\frac{A}{s-a}$	
5. $A \sin \omega t$		$A \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	
6. $A \cos \omega t$		$A \frac{s}{s^2 + \omega^2}$	

Fuente: (Hernández, 2010)

MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE POLOS Y CEROS.

a) Efecto en la adición de Polos.

El incremento en el número de polos en un sistema ocasiona que el lugar geométrico de las raíces se desplace hacia la derecha del eje $j\omega$, lo que reduce la estabilidad relativa, o en algunos casos, lo hace inestable como se presenta en la figura 2.13.

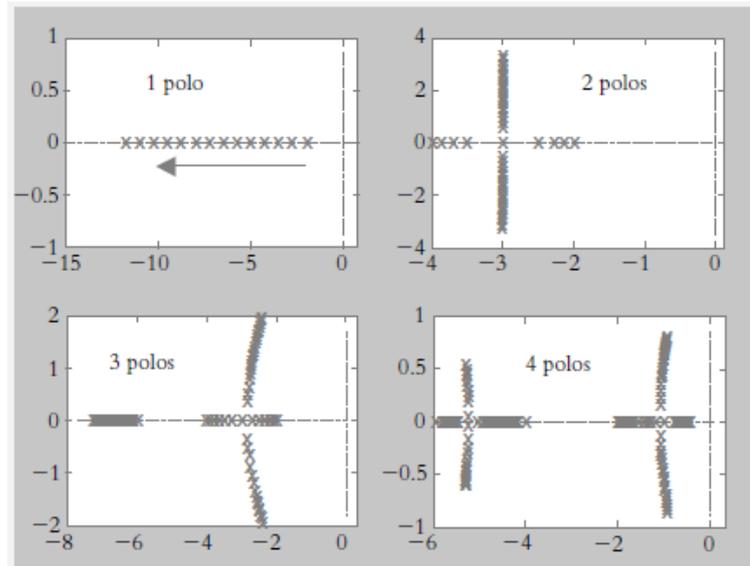


Figura 2.13 Adición de polos en el sistema.

Fuente: (Hernández, 2010)

b) Efecto en la adición de Ceros.

Incorporar ceros en un sistema produce que el lugar geométrico de raíces se desplace hacia el semiplano izquierdo, lo que hace estable o más estable al sistema, como se presenta en la figura 2.14.

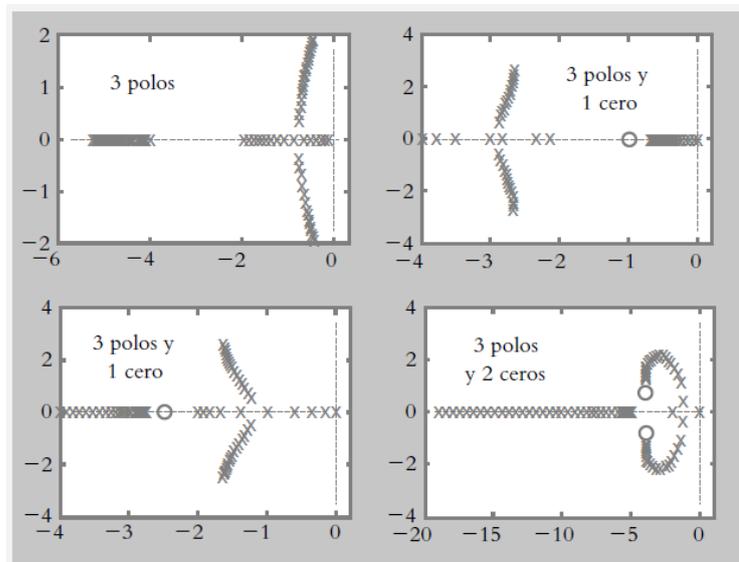


Figura 2.14 Adición de ceros en el sistema.

Fuente: (Hernández, 2010)

En términos generales, el diseño de los controladores se enfoca en la adición de ceros para mejorar la respuesta transitoria, así como la colocación de un polo en el origen para corregir el comportamiento de estado estable del sistema.

2.4.2.6 ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE CONTROL.

La estabilidad de un sistema es cuando permanece en reposo a no ser que se excite por una fuente externa, en cuyo caso alcanzará de nuevo el reposo una vez que desaparezcan todas las excitaciones, para que un sistema sea estable, las raíces de la ecuación característica deben estar situados en el lado izquierdo del semiplano complejo de Laplace (Ortega, 2015), presenta en la figura 2.15.

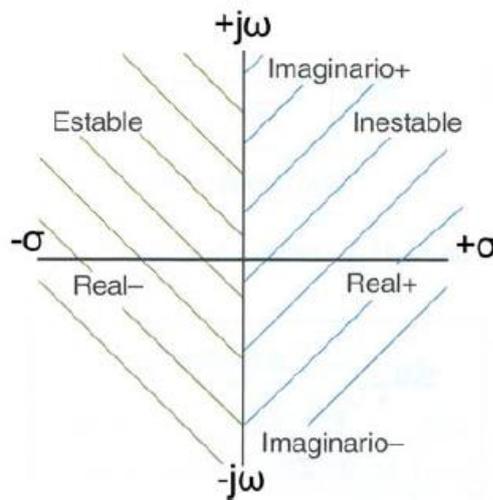


Figura 2.15 Estabilidad de un sistema.
Fuente: (Ortega, 2015)

Donde los polos situados en el origen o sobre el eje imaginario dan lugar a respuestas continuas o constantes que se consideran inestables. Los polos en la parte derecha del plano complejo dan lugar a respuestas que crecen con el tiempo y por lo tanto son inestables (Ortega, 2015).

El concepto de estabilidad se puede visualizar más fácilmente en el dominio "s", ya que un sistema siempre será estable si todos sus polos están a la izquierda del eje $j\omega$, o bien, si existe un polo simple en el origen; cualquier otra combinación de polos hará que el sistema se considere inestable (Hernández, 2010), cabe mencionar

que son los polos los que determinan la estabilidad de los sistemas, es decir, si hay ceros en $j\omega$ o a la derecha del plano "s", el sistema seguirá estable.

Un sistema es inestable si tiene cuando menos un polo a la derecha del eje $j\omega$, polos complejos repetidos dos o más veces en el eje $j\omega$, o dos o más polos en el origen.

También hay que tener muy en cuenta que al polo más cercano al eje $j\omega$, se le denomina polo dominante, ya que es el elemento que ejerce mayor efecto sobre el sistema, puesto que, la posición del polo dominante es un indicativo de la velocidad de respuesta del sistema; esto es, cuanto más cerca esté el polo dominante del eje $j\omega$, más lento será el sistema, y cuanto más alejado hacia la izquierda del eje $j\omega$ se encuentre el polo dominante, más rápido será el sistema.

Para garantizar una respuesta transitoria rápida y bien amortiguada, los deben quedar en una zona como la presentada en la figura 2.16.

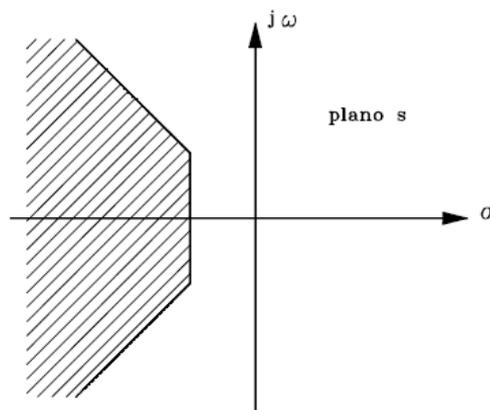


Figura 2.16 Región recomendada para la ubicación de polos.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

2.4.2.7 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA.

El régimen normal de funcionamiento de un sistema no se produce inmediatamente después de aplicarle una entrada determinada, pues en el cambio ocurren una serie de fenómenos transitorios. Por lo tanto, en la respuesta de un sistema a lo largo del tiempo se pueden distinguir:

- Respuesta transitoria.
- Respuesta permanente.

Una respuesta permanente es la que ofrece un sistema en el momento en que sus variables se han estabilizado y presentan un valor normal de funcionamiento. Una respuesta transitoria es la que se produce en un sistema hasta llegar la respuesta permanente y que, por lo tanto, presenta sus variables sin estabilizar. Esta parte de la repuesta tiende a anularse a medida que transcurre el tiempo. La respuesta transitoria no debe ser ni brusca ni muy lenta. La respuesta transitoria da una idea de estabilidad y rapidez del sistema, mientras que la respuesta permanente da una idea de la precisión del sistema (Ortega, 2015).

FORMAS DE ONDA.

Las formas de onda se generan al introducir fuentes cuyas características dependen del tiempo con la cual se ve en la necesidad de recurrir a circuitos electrónicos, ya sea para variar la amplitud, fase de una señal o su frecuencia con respecto al tiempo, para definir una señal variable en el tiempo se puede utilizar una expresión matemática, una gráfica que represente dicha variación o definir valores límite entre los que puede encontrarse la señal, estableciendo así información estadística sobre la misma (Giménez, 2011).

Hay una infinidad de formas de onda para la variación de voltaje o corriente que pueden ser representados, pero las más frecuentes son las siguientes:

a) Respuesta escalón unitario.

Existen varias entradas que se puede utilizar para el estudio de la respuesta de los sistemas en Regulación Automática de Control. De todas ellas la más sencilla y representativa es la función escalón unitario. Un sistema de primer orden se presenta en la figura 2.17.

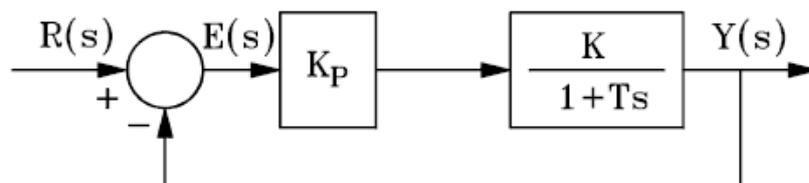


Figura 2.17 Sistema de primer orden.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

La función escalón unitario es $r(t) = u(t)$, donde $u(t) = K$ y es la señal de escalón unitario y se representa en la figura 2.18.

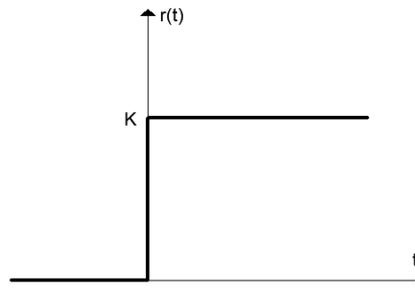


Figura 2.18 Función escalón unitario.
Fuente: Autor

El valor de la respuesta de un sistema frente a un escalón unitario en el dominio del tiempo se obtiene hallando la transformada inversa de Laplace de la función de transferencia del Sistema. En la figura 2.19 se presenta una entrada escalón unitario " $y(t)$ " y la respuesta de un sistema de primer orden.

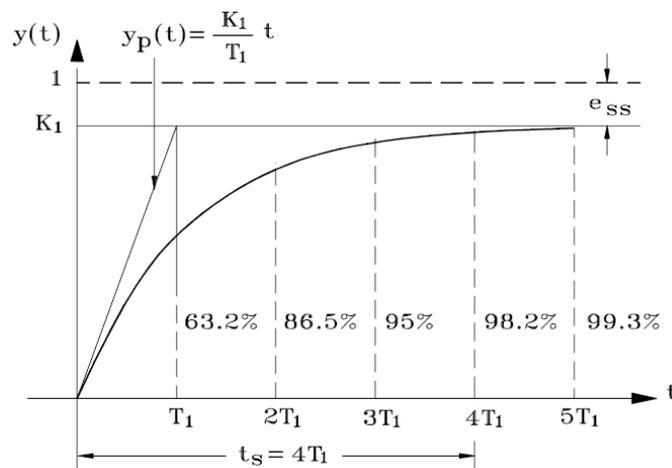


Figura 2.19 Respuesta de un sistema a una entrada en escalón unitario.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

Según (Giraldo B. & Tabares G., 1997) la constante de tiempo " T_1 " es aquel valor de tiempo para el cual la respuesta ha alcanzado el 63.2% de su valor final " K_1 ". A menor valor de la constante de tiempo, más rápida es la respuesta del sistema y cuando " T_1 " es pequeña el polo $p = -\frac{1}{T_1}$ se aleja del eje imaginario haciéndose más negativo. Para $t = 4T_1$ la respuesta está a menos del 2% del valor final " K_1 ".

Por eso se acostumbra a suponer que después de cuatro constantes de tiempo, el sistema ha alcanzado el estado estacionario, y se define el tiempo de solución " t_s " igual a $t_s = 4T_1$. También se puede expresar funciones compuestas de la Función Escalón Unitario como se puede observar en la figura 2.20.

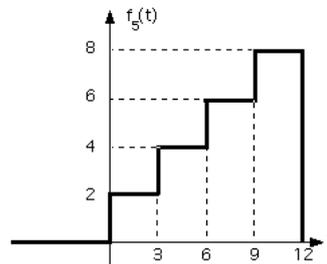


Figura 2.20 Función compuesta por funciones escalón unitario.
Fuente: (Giménez, 2011)

b) Respuesta rampa unitaria.

Función representada mediante el símbolo $r(t)$, cuyo valor es igual a t , cuando el tiempo es mayor a cero, caso contrario, es igual a cero, como se puede observar en la figura 2.21.

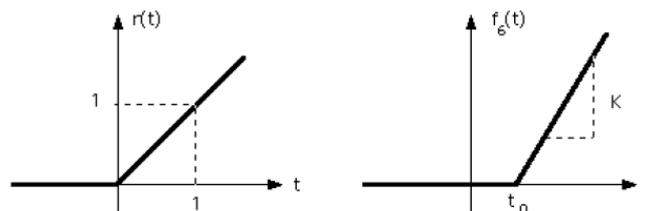


Figura 2.21 Función rampa unitaria.
Fuente: (Giménez, 2011)

ORDEN DE SISTEMAS.

Se denomina orden de un sistema correspondiente a su función de transferencia y según esto se tiene:

- Sistemas de orden cero: Su función de transferencia no tiene ningún polo.
- Sistemas de primer orden: Su función de transferencia tiene un polo.
- Sistemas de segundo orden: Su función de transferencia tiene dos polos.
- Sistemas de orden superior: Su función de transferencia tiene más de dos polos.

2.4.2.8 ACCION BÁSICA DE CONTROL.

CONTROL DE DOS POSICIONES (ON/OFF).

En un control de dos posiciones, el controlador tiene solamente dos posiciones establecidas o fijas, generalmente son utilizados en dispositivos eléctricos, y que habitualmente existe una válvula accionada por un solenoide eléctrico (Rosero, 2013).

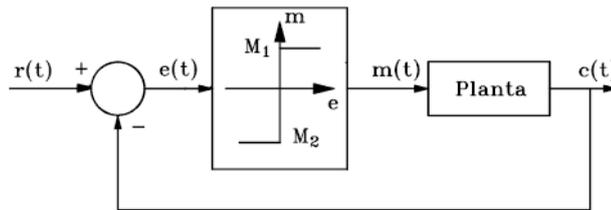


Figura 2.22 Control de dos posiciones.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

Donde:

- ❖ $r(t)$ = Señal de Referencia.
- ❖ $e(t)$ = Señal de Error.
- ❖ $m(t)$ = Salida del Controlador.
- ❖ $c(t)$ = Señal de Salida.

El rango en que $e(t)$ se debe desplazar antes de que se produce la conmutación se llama brecha diferencial o histéresis como se presenta en la figura 2.23, esta brecha diferencial hace que la salida del control $m(t)$ mantenga su valor hasta que la señal de error actuante haya pasado del valor cero, además la brecha diferencial evita la acción excesivamente frecuente del control on/off (Rosero, 2013).

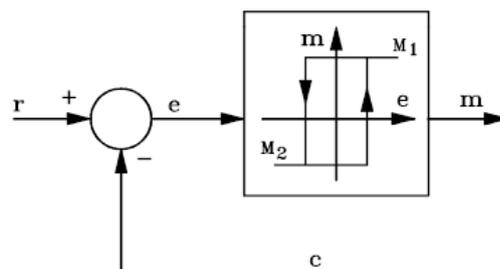


Figura 2.23 Brecha diferencial.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

CONTROLADORES.

Años atrás el control era de forma manual con la ayuda de un operario quien realizaba los cambios adecuados del sistema según ciertos requerimientos establecidos, en la actualidad los sistemas de control son la base fundamental para una infinidad de sistema de control y si bien existes muchos tipos de control en la actualidad el sistema de control proporcional, derivativo e integral (PID) es el de mayor ejecución en la industria de procesos autónomos con un alcance de 95% ya sea con sus variantes P, I, PI, PD y PID (Ogata, 2010).

Este tipo de control consiste en obtener la acción de control como la suma de tres términos: término proporcional, término derivativo y término integral (Fernández, 2012). Para que un sistema de control PID o sus variantes, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Generar un ajuste adecuado de los parámetros del controlador.
- Selección adecuada de los actuadores.
- Selección adecuada de los sensores.
- Tomar en cuenta agentes externos como perturbaciones y ruido.

La acción de control es la forma en que el regulador genera la señal de control ya sea en forma básica o combinada, presentado en la tabla 4.2.

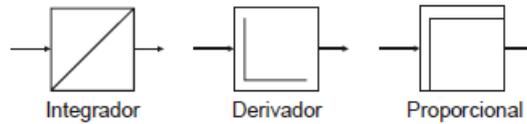
Tabla 2.2 Acciones básicas y combinadas de una acción de control.

Acciones Básicas	Combinación de acciones básicas
Proporcional (P)	Proporcional - Integrador (PI)
Derivador (D)	Proporcional - Derivador (PD)
Integrador (I)	Proporcional – Integrador - Derivador (PID)

Fuente: (Ortega, 2015)

La simbología de las acciones básicas y combinadas de una acción de control se presenta en la figura 2.24.

Controladores de acciones Básicas



Combinación de controladores básicos

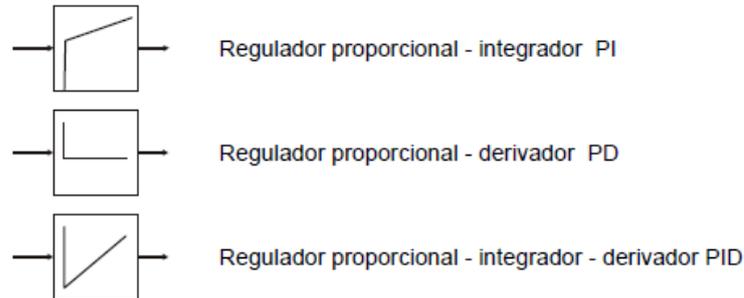


Figura 2.24 Simbología de los distintos tipos de controladores.

Fuente: (Ortega, 2015)

a) Control Proporcional (P).

En un control de acción proporcional la señal de control $m(t)$ es proporcional o ajustado a la señal de error $e(t)$, expuesto en la figura 2.25.

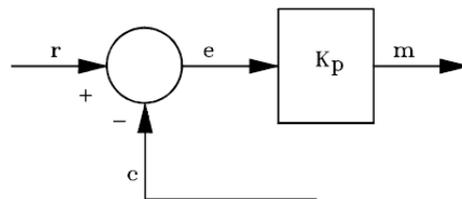


Figura 2.25 Diagrama de bloques control Proporcional.

Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

Donde:

- ❖ K_p = Control de Acción Proporcional.
- ❖ r = Señal de entrada o de referencia.
- ❖ e = Error.
- ❖ c = Señal a comparar.
- ❖ m = Señal de control.

En teoría en un sistema de acción proporcional, si la señal de error es cero, la señal de salida del controlador también tendrá un valor a cero, visto de esta forma su

respuesta es instantánea, con la cual la variación del tiempo no interviene en el sistema de control, pero en la realidad no se efectúa de esa manera, pues si la variación de la señal de entrada es demasiado rápido, el controlador no puede seguir la variación de la señal por ende seguirá una trayectoria exponencial hasta lograr la salida esperada, como se puede observar en la figura 2.26.

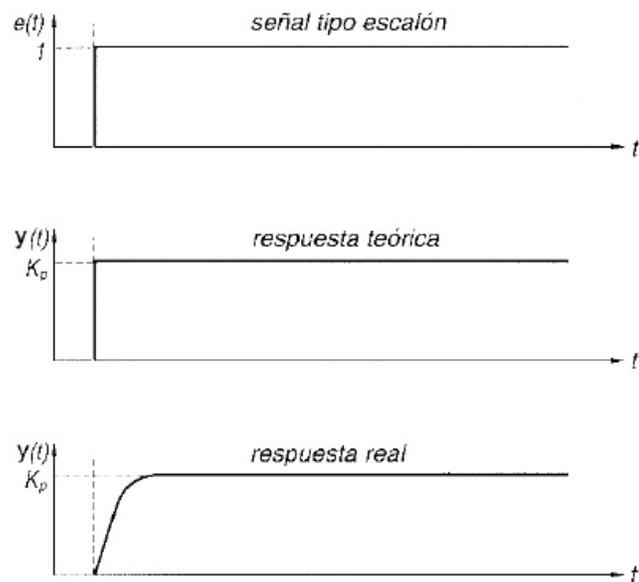


Figura 2.26 Señal de entrada en escalón y la respuesta en forma teórica y real.
Fuente: (Ortega, 2015)

En el control proporcional de una planta cuya función de transferencia no posee un integrador, hay un error en estado de régimen o corrimiento en la respuesta a una entrada escalón, ya que una señal de control no nula requiere una señal de error actuante (Giraldo B. & Tabares G., 1997), como se presenta en la figura 2.27.

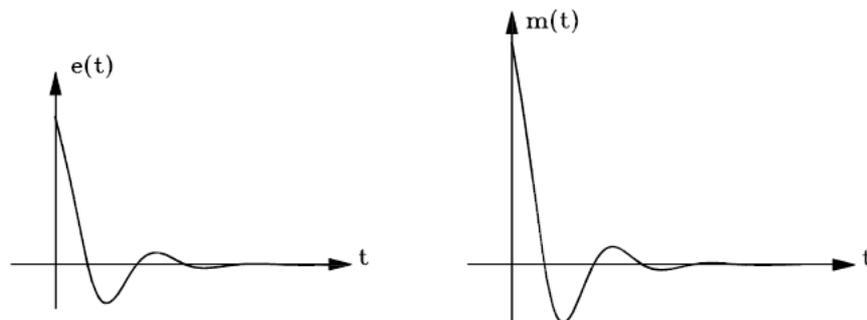


Figura 2.27 Control Proporcional.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

La ganancia proporcional es la razón entre el cambio en la salida (variable regulada) y el cambio en la entrada (señal de error). Si la ganancia proporcional es demasiado elevada el controlador provoca grandes cambios en el elemento actuador frente a ligeras desviaciones de la variable regulada. Si la ganancia proporcional es demasiado pequeña, la respuesta del controlador será demasiado débil y produciría una regulación no satisfactoria (Ortega, 2015).

Las principales características de un sistema de control proporcional es que es simple y fácil de efectuar, reduce el error pero no lo elimina puesto que la señal de control es proporcional al error de control cuando estos son pequeños.

Una propiedad importante del regulador " K_p " es que como resultado de la rígida relación entre la señal de error del sistema y la variable regulada siempre queda alguna señal de error del sistema, entonces el controlador " K_p " no puede compensar esta señal de error remanente (permanente) del sistema (Ortega, 2015).

b) Control Proporcional - Integral (PI).

Este tipo de controlador es utilizado en una gran gama de procesos por ser complemento una de otro, puesto que la acción proporcional es la primero en actuar de forma instantánea, mientras que la acción integral es realizada en un intervalo de tiempo y gracias a este segundo control de acción se elimina la desviación remanente de la acción proporcional.

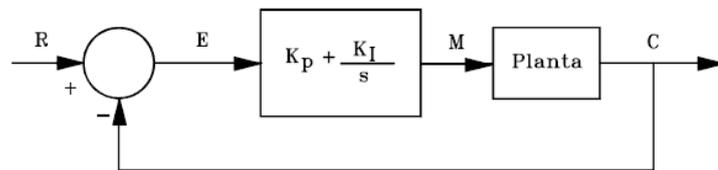


Figura 2.28 Diagrama de bloques control Proporcional-Integrativo.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

Donde:

- ❖ R = Señal de entrada o de referencia.
- ❖ E = Error.
- ❖ K_p = Ganancia Proporcional.

- ❖ $\frac{K_I}{s} = \text{Acción de Reposición.}$
- ❖ $M = \text{Señal de control.}$
- ❖ $c = \text{Señal de salida.}$

Por consiguiente se puede decir que la ganancia proporcional (K_p) ayuda a corregir más rápidamente el error, mientras que la acción de reposición ($\frac{K_I}{s}$) elimina totalmente el error, con este tipo de sistema de control se mejora las condiciones de estabilidad ya que mejora el amortiguamiento, y reduce el sobrepaso máximo, mejora el margen de ganancia, incrementa el tiempo de levantamiento de la señal y filtra el ruido a alta frecuencia con respecto a un control integral puro.

El error en estado estable se mejora con un orden, es decir, si el error en estado estable a una entrada dada es constante, el control PI lo reduce a cero. Este tipo de controlador se utiliza generalmente cuando se desea mejorar el error en estado estacionario. Los sistemas se hacen normalmente más oscilatorios, si no se ajusta correctamente se puede hacer inestable (Fernández, 2012).

c) Control Proporcional - Derivativo (PD).

Este sistema de control anticipa el efecto de la acción proporcional para estabilizar más rápidamente la variable controlada después de cualquier perturbación, (Rosero, 2013).

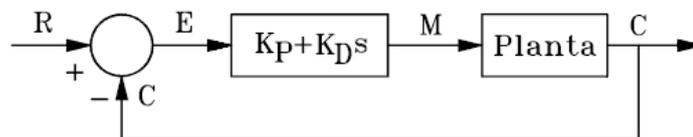


Figura 2.29 Diagrama de bloques control Proporcional-Derivativo.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

Donde:

- ❖ $R = \text{Señal de entrada o de referencia.}$
- ❖ $E = \text{Error.}$
- ❖ $K_p = \text{Ganancia Proporcional.}$
- ❖ $K_D s = \text{Acción de Crecimiento por Unidad de Tiempo.}$

- ❖ $M = \text{Señal de control.}$
- ❖ $C = \text{Señal de salida.}$

La magnitud de señal de salida de este tipo de acción, también llamada control de velocidad, es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. La constante es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional (Fernández, 2012).

En este tipo de controladores, debemos tener en cuenta que la derivada de una constante es cero y, por tanto, en estos casos, el control derivativo no ejerce ningún efecto, siendo únicamente útil en los casos en los que la señal de error varía en el tiempo de forma continua. Por tanto, el análisis de este controlador ante una señal de error de tipo escalón no tiene sentido y, por ello, se ha representado en la figura 2.30 la salida del controlador en función de una señal de entrada en forma de rampa unitaria.

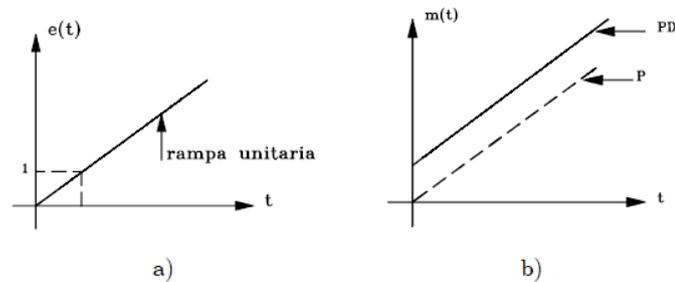


Figura 2.30 Diagrama control Proporcional-Derivativo.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

En la figura 2.30, en el literal (b) la señal de control $m(t)$ crece más rápidamente a mayor pendiente de la señal de error $e(t)$ que la del literal (a).

Como se observa en la figura 2.30 la respuesta del controlador se anticipa a la propia señal de error, de ahí que al tiempo " T_d " se le denomine tiempo de anticipación o adelanto. Por lo general se utiliza para sistemas que deben proceder de forma inmediata, puesto que la salida está en un continuo cambio.

Cabe mencionar que si bien este tipo de controlador es estabilizante, su desventaja es que tiende a amplificar las señales de ruido en altas frecuencias y no es efectivo para sistemas inicialmente estables o ligeramente amortiguados y un exceso en el

dimensionado del control derivativo del controlador PD puede ser causa de inestabilidad en el sistema haciendo que la salida, ante variaciones bruscas no sea válida.

d) Control Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID).

El PID aprovecha todas las características tanto del proporcional, integral y derivativo, de forma que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral, y si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa, la ventaja es que cuenta con una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error en caso de perturbaciones (Ortega, 2015).

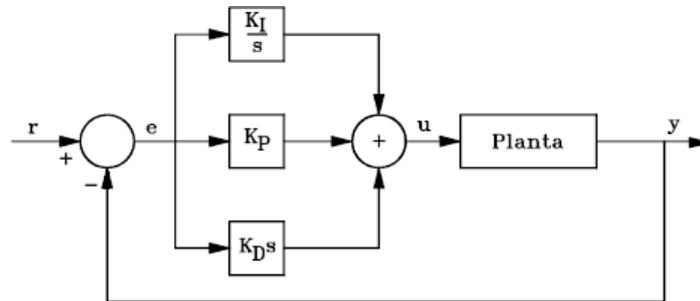


Figura 2.31 Diagrama de bloques control Proporcional-Integrativo-Derivativo.

Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

El sistema funciona de la siguiente manera, " K_p " aumenta la rapidez de respuesta y solo actúa en el transitorio, ya que al final, el término $\frac{K_I}{s}$ elimina el error, ganando completo control de la planta y el término " $K_D s$ " actúa para ayudar a la estabilidad (Giraldo B. & Tabares G., 1997). En un sistema de control PID cuando el error $e(t)$ (figura 2.32 literal a) crece linealmente con el tiempo la señal de control $m(t)$ (figura 2.32 literal b) varía.

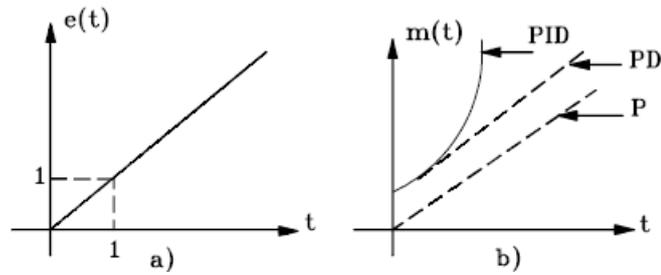


Figura 2.32 Señal control PID.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

La estructura que se presenta en la figura 2.33 es muy utilizada, puesto que en lugar de derivar el error se deriva la salida, para impedir que la planta actúe a cambios inesperados o bruscos de la señal de referencia.

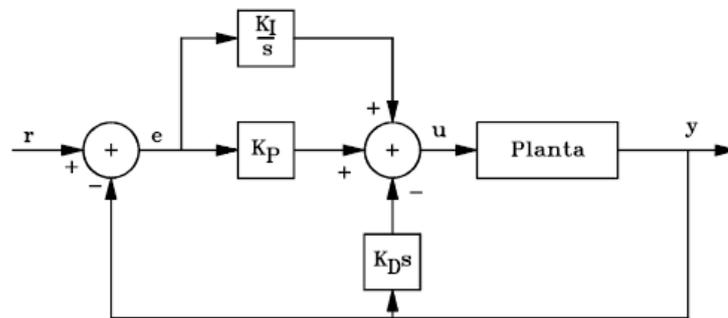


Figura 2.33 Control PID con derivada a la salida.
Fuente: (Giraldo B. & Tabares G., 1997)

En la actualidad existe el controlador interactivo o serie, en el cual el tiempo derivativo influye sobre la parte integral, y el no interactivo; como se puede observar en la figura 2.34.

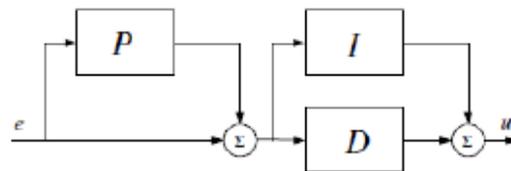


Figura 2.34 Forma interactiva control PID.
Fuente: (Fernández, 2012)

La forma no interactiva o en paralelo posee una ganancia independiente para la acción proporcional, integrativa y derivativa, como se puede observar en la figura 2.35.

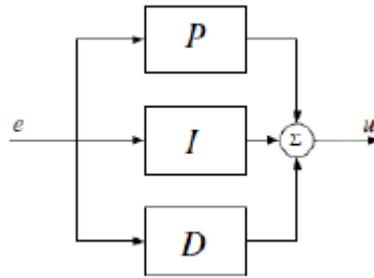


Figura 2.35 Forma paralela control PID.
Fuente: (Fernández, 2012)

Su principal inconveniente es que el bucle de regulación es más sensible a oscilaciones por ende los ajustes tienen una mayor complejidad.

RÉGIMEN TRANSITORIO.

Para diseñar sistemas de control, es necesario identificar determinados parámetros de comportamiento en régimen transitorio, así como especificar ciertas condiciones que el sistema debe satisfacer. Una de las señales de prueba más comunes para este tipo de análisis es la entrada escalón unitario (Hernández, 2010). La respuesta al escalón de un sistema subamortiguado de segundo orden se toma como referencia y cuyo comportamiento se representa en la figura 2.36

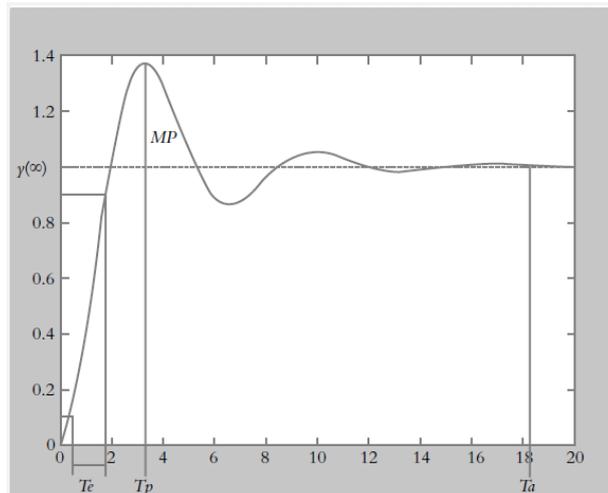


Figura 2.36 Respuesta al escalón de un sistema desconocido.
Fuente: (Hernández, 2010)

Con respecto a la gráfica 2.36, se definen los siguientes parámetros:

- *Máximo pico de sobreimpulso MP.*- Es la máxima sobre desviación de la respuesta del sistema con respecto a su valor final $\gamma(\infty)$ (respuesta en estado estable).
- *Tiempo pico T_p .*- Es el tiempo que requiere el sistema para alcanzar su máximo pico de sobreimpulso.
- *Tiempo de asentamiento T_a .*- Tiempo que necesita el sistema para que alcance su valor final práctico; esto es, el tiempo para que transcurran cuatro constantes de tiempo.
- *Tiempo de elevación T_e .*- Tiempo requerido por el sistema para que su respuesta pase del 10% al 90% de su valor final.

2.4.2.9 PARÁMETROS DE UN SISTEMA DE CONTROL.

Los parámetros que debe cumplir cualquier sistema de control establecido se lo especifica a continuación.

ESTABILIDAD.

Si en un tiempo (t) transcurrido su señal o valor de salida permanece constante se denomina un sistema estable, este tiempo se lo llama tiempo de establecimiento y a su señal o valor de salida se lo denomina valor en estado estable, este valor depende del margen de error que se maneje por parte del fabricante o programador, como se puede observar en la figura 2.37, con una señal tipo escalón.

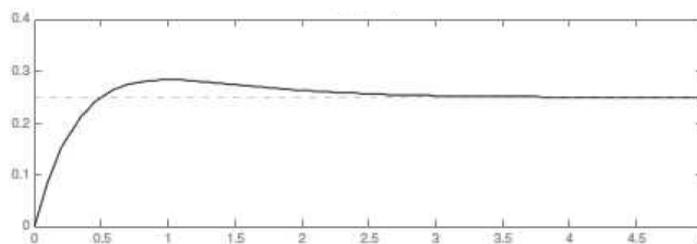


Figura 2.37 Sistema en estado estable.

Fuente: (Fernández, 2012)

Por otra parte existen sistemas en estado inestable cuando su señal o valor de salida no permanece constante después de un tiempo "t" establecido, es decir se mantiene

oscilando con valores fuera de un margen establecido como se puede observar en la figura 2.38, con una señal tipo escalón.

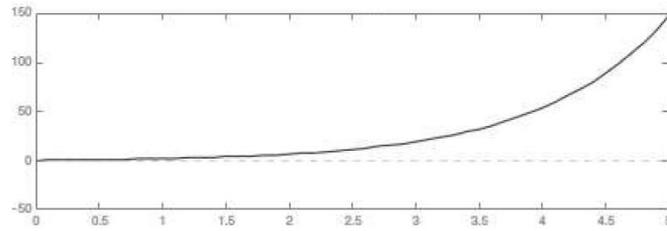


Figura 2.38 Sistema en estado inestable.

Fuente: (Fernández, 2012)

EXACTITUD.

La exactitud del sistema se logra a través de la relación que existe entre la señal o valor de referencia y el valor real obtenido del sistema (valor en estado estable), la diferencia que existen entre el valor de entrada con la de su salida se lo denomina error de referencia.

VELOCIDAD DE RESPUESTA.

Es la rapidez con la que el sistema llega a su valor en estado estacionario o estado estable, en la figura 2.39 se observa los tipos de respuesta en función de la velocidad y con una señal de entrada tipo escalón.

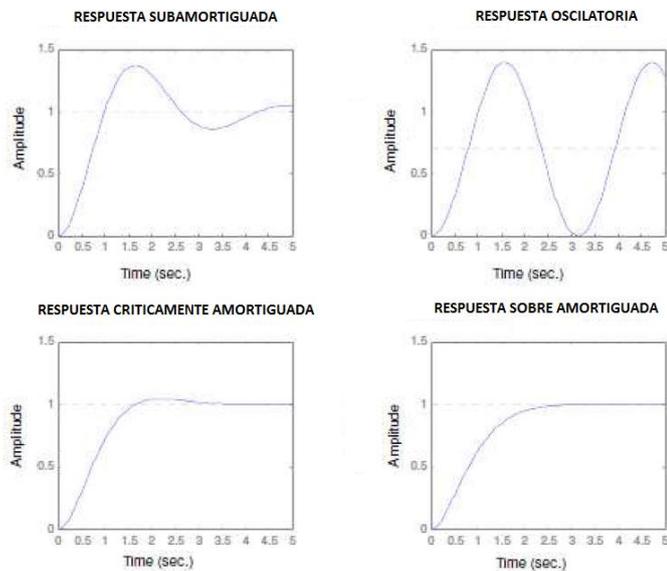


Figura 2.39 Respuesta según la rapidez del sistema.

Fuente: (Fernández, 2012)

SENSIBILIDAD Y ERROR.

Este concepto explica la dependencia de unas variables con respecto a otras, puesto que en un sistema habrá algunas variables manipuladas, otras controladas y otras perturbadoras, es inevitable que la acción de una repercuta sobre las otras, por ello la necesidad de conocer e identificar cada variable a fin de conocer su naturaleza (Fernández, 2012).

Cuando el sistema es estable, su comportamiento se describe en el régimen transitorio, esto es, antes de que alcance su valor final. En la figura 2.40 se presenta los regímenes de un sistema estable: transitorio (natural) y de estado estable (forzado).

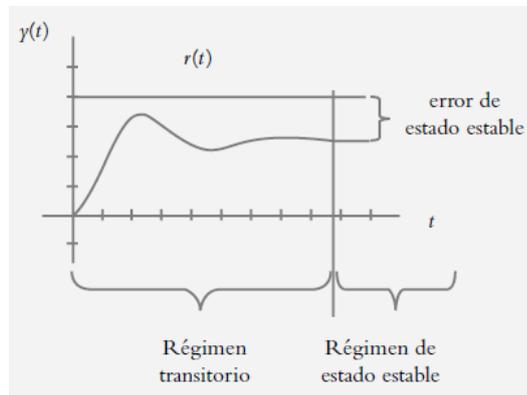


Figura 2.40 Régimen transitorio y de estado estable para un sistema estable.

Fuente: (Hernández, 2010)

Independiente de las características del comportamiento transitorio de un sistema como son el máximo pico de sobreimpulso, tiempo de asentamiento, entre otros, hay un segundo parámetro de análisis, lo cual nos lleva a definir el error que presenta la respuesta de un sistema para diferentes tipos de entradas de referencia, este último indica el grado de desviación en la respuesta del sistema para diversas clases de entradas.

2.4.2.10 AMPLIFICADORES OPERACIONALES.

Los amplificadores operacionales son aquellos que constan de un amplificador con realimentación en forma de una pastilla de circuito integrado. Tienen un sin número de aplicaciones hoy en día entre los que se encuentran los sistemas electrónicos de

control industrial, médicos, nucleares entre otros. A continuación en la figura 2.41 se muestra un esquema interno de un amplificador operacional LM741 y según (Hernández, 2010) este tipo de amplificador operacional es ideal para un sistema de control PID analógico.



Figura 2.41 Simbología de un operacional.
Fuente: (Sanchez, 2014)

Para la alimentación se lo realiza a través de los terminales 4 y 7 con voltajes que no sobrepasen los $\pm 15V$, voltaje de entrada máxima de $\pm 12V$ según la hoja de datos del fabricante; los terminales 1, 5 y 8 no serán utilizados.

El integrado LM741 según (Texas Instruments, 2014) tiene como valores típicos una impedancia de entrada de $2M\Omega$, impedancia de salida de 75 Ohm y si se realimenta negativamente su comportamiento es muy cercano al ideal, además presenta las siguientes características:

- *Ganancia de tensión infinita.*- Es decir la tensión de entrada es nula ya que cualquier señal de salida que se genere será el resultado de una señal de entrada infinitamente pequeña.
- *Resistencia de entrada infinita.*- Es decir no existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada 2 y 3, esto se aplica para el amplificador operación ideal y resulta muy útil, además que tiene mucha exactitud al comportamiento real de los circuitos.

En la figura 2.42 se representa el circuito equivalente de un amplificador operación, en la cual se puede apreciar las particularidades más importantes del mismo.

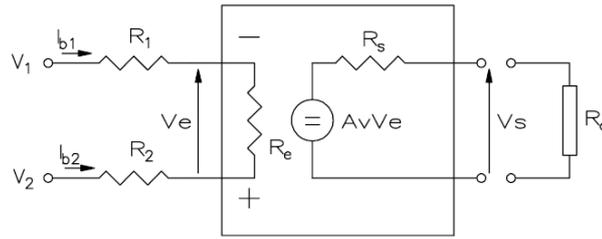


Figura 2.42 Circuito equivalente de un amplificador operacional.
Fuente: (Sanchez, 2014)

Donde:

- ❖ $R_e = \text{Impedancia de entrada.}$
- ❖ $R_s = \text{Impedancia de salida.}$

La ganancia en tensión en cualquier circuito se define como la relación entre las tensiones de salida y entrada.

La impedancia de entrada es $R_e \approx \infty$ por lo que no actúa como una carga es decir no consume corriente y $V_1 - V_2 = V_e$. La impedancia de salida es $R_s \approx \infty$ por lo que la tensión V_s es independiente de la existencia de carga y $V_s = A_v V_e$.

Cabe mencionar que la mayoría de sistemas lineales lo son únicamente en rangos restringidos de operación, así por ejemplo, la señal de salida de un amplificador se puede saturar para niveles elevados de la señal de entrada. A esta no linealidad se le conoce como alineación por saturación como se presenta en la figura 2.43.

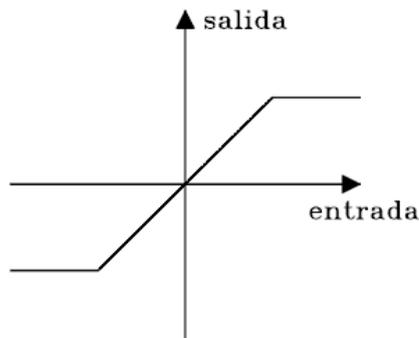


Figura 2.43 Alineación por saturación.
Fuente: (Sanchez, 2014)

Además la tensión de salida de cualquier amplificador no debe exceder del voltaje de polarización para evitar la saturación de los amplificadores lo cual puede causar

errores en la solución de una ecuación diferencial o en la generación de una función de transferencia (Giraldo B. & Tabares G., 1997).

COMPARADOR REALIMENTADO.

En los sistemas de control de lazo abierto los comparadores presentan problemas puesto que variaciones pequeñas como señal de ruido o perturbaciones en su entrada genera cambios en su salida generando una falsa información. Por consiguiente con los comparadores realimentados se consigue fijar un intervalo de valores para no considerar señales ajenas a la señal de entrada, dicho fenómeno se lo denomina bistéresis, como se puede apreciar en la figura 2.44.

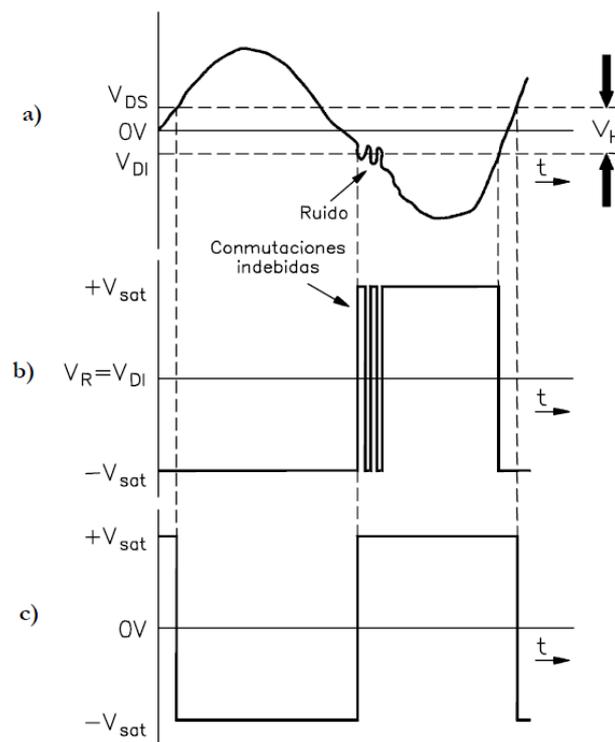


Figura 2.44 Modulación en un comparador realimentado.

Fuente: (Sanchez, 2014)

En la figura 2.44, literal (a); se puede apreciar la señal de entrada expuesta a agentes externos, en este caso el ruido la cual afecta a la señal. En el literal (b), se puede apreciar la señal de salida sin realimentación y las variaciones que presenta; y en el literal (c), se puede apreciar la misma señal de salida con una realimentación con la cual se genera una mejor estabilidad.

2.5 HIPÓTESIS.

El estudio de sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje permitirá obtener el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de Control y Automatización de la FICM.

2.6 SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES.

2.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.

Sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje.

2.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE.

Error en estado estable a diferentes pulsos de entrada.

2.6.3 TÉRMINO DE RELACIÓN.

Determinar.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE.

La presente investigación tendrá un enfoque cuantitativo, ya que se manejan datos numéricos, necesarios para evaluar los distintos elementos que se deben tomar en cuenta para verificar el sistema de control de lazo abierto y cerrado de voltaje procediendo a establecer el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada muy necesarios para poder comparar y evaluar los resultados.

3.2 MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.

3.2.1 BIBLIOGRÁFICA.

La investigación del presente trabajo es bibliográfica debido a que se va recurrir a revistas técnicas, libros, artículos, catálogos, documentos e Internet para la obtención de cuestiones determinadas de nuestra investigación de manera efectiva.

3.2.2 EXPERIMENTAL.

Esta investigación es experimental porque se adquirirá información por medio de pruebas, así como de técnicas de sistemas de control, con el fin de describir y analizar lo que ocurriría en un sistema de control de lazo abierto y cerrado de voltaje, permitiendo obtener los mejores resultados y características del mismo.

3.3 NIVELES DE LA INVESTIGACIÓN.

3.3.1 ASOCIACIÓN DE VARIABLES.

En esta investigación fue trascendente la asociación de variables porque se va a interpretar los datos de las variables expuestas anteriormente.

3.3.2 EXPLORATORIO.

La investigación del presente trabajo ha sido un caso poco analizado en nuestro medio, por lo que en este estudio se explorará criterios claros y precisos con mucha certeza y determinación, con la cual el estudio a ejecutarse permitirá la realización de nuevos proyectos a futuro.

3.3.3 DESCRIPTIVO.

La presente investigación tiene la modalidad de estudio descriptivo pues trata de describir las variaciones o cambios en los pulsos durante el sistema de control de lazo abierto y cerrado de voltaje, y así establecer las ventajas que acarrea dicho control.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA.

Para este proyecto de investigación no se necesita una muestra, porque la población son los datos de medición en el sistema de lazo abierto y cerrado de voltaje.

3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

3.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.

Sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje.

Tabla 3.1 Operacionalización de la variable independiente

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Los sistemas de control son entes que reciben ciertas acciones externas o variables de entrada y cuyo fin es obtener varias respuestas de salida deseadas. En un sistema de control de lazo abierto las respuestas de salida no afectan la acción de control, en cambio en un sistema de control de lazo cerrado las respuestas de salida afectan la acción de control es decir la salida se realimenta para compararla con la entrada.	Control Industrial.	<p>¿Cuáles son los dispositivos que conforman los sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje?</p> <p>¿Qué forma de control se empleará para los sistemas de control de lazo abierto y cerrado?</p> <p>¿Cómo se evaluará la señal de referencia con la de salida para que pueda actuar y controlar el proceso en un sistema de lazo cerrado?</p>	<p>-Controlador. -Actuador. -Planta. -Retroalimentación.</p> <p>- Proporcional. - Integral. - Derivativo. - Proporcional integra. - Proporcional integra derivativo.</p> <p>- Voltaje. - Amperaje. - Revoluciones de un motor DC.</p>	<p>- Bibliográfica. - Investigación. - Libros. - Catálogos.</p> <p>- Fichas técnicas - Manuales. - Observación.</p> <p>- Multímetro. - Amperímetro. - Encoder.</p>

Fuente: Autor

3.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE.

Error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de control y automatización de la FICM.

Tabla 3.2 Operacionalización de la variable dependiente

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
El error en estado estable es la parte de la respuesta total que permanece después que el estado transitorio ha desaparecido conservando el error en el mínimo posible o por debajo de un error tolerable dependiendo de su aplicación, por tal razón la respuesta de salida en estado estable frecuentemente no coincide con la referencia o pulsos de entrada.	-Señal de entrada.	¿Qué tipo de señal de entrada se debe aplicar?	- Señal Digital. - Señal Analógica.	- Osciloscopio.
		¿Qué tipo de señal se genera con respecto al tiempo?	- Función Pulso. - Función Escalón. - Función Rampa. - Función Sinusoidal.	- Osciloscopio.
	- Señal de salida.	¿Cómo se evaluará la magnitud o condición de la variable de salida en un sistema de control de lazo abierto y cerrado?	- Sensores. - Microcontroladores. - Tarjetas electrónicas.	- Bibliográfica. - Fichas técnicas. - Catálogos.

Fuente: Autor

3.6 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.

Para el plan de recolección de la información del presente trabajo de investigación se utilizarán técnicas tales como:

3.6.1 OBSERVACIÓN.

La observación directa es muy necesaria para observar, analizar y describir hechos de significación especial utilizando un cuaderno de notas con una metodología estructurada.

3.6.2 DOCUMENTAL.

Ineludible para la recolección de información de revistas, artículos técnicos, libros y tabulación de resultados obtenidos mediante instrumentos de medición para establecer el error en estado estable en un sistema de lazo abierto y cerrado de voltaje.

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.

Para el procesamiento y análisis de la información del presente trabajo de investigación se seguirán los siguientes parámetros:

- Selección y revisión de la información más importante y puntual como son notas técnicas, bibliográficas y normativas.
- Valorar los diferentes parámetros que actúan en un sistema de control de lazo abierto y cerrado de voltaje.
- Analizar el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en un sistema de lazo abierto y cerrado de voltaje.
- Elaboración de tablas de datos que permitan identificar los diferentes factores que intervienen en el sistema de lazo abierto y cerrado de voltaje.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1.1 DINÁMICA DEL SISTEMA DE CONTROL.

Los sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje abarcan diferentes componentes indispensables para lograr su correcto funcionamiento puesto que cumplen con una función específica, para el caso de un sistema de control a lazo abierto el diagrama de bloques se presenta en la figura 4.1.

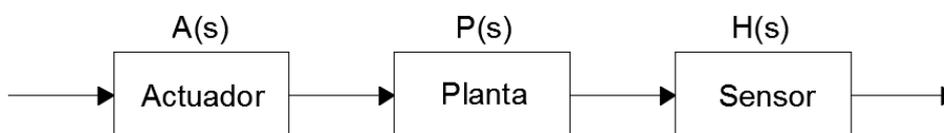


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo abierto.

Fuente: Autor

La función de transferencia se define por la ecuación 4.1, especificando que este tipo de sistema de control no posee una retroalimentación y por ende no hay una comparación con la señal de referencia.

$$G(s) = A(s)P(s)H(s) \quad (4.1)$$

Un caso práctico de un sistema de control a lazo abierto se presenta en la figura 4.2.



Figura 4.2 Caso práctico de un sistema de control a lazo abierto.

Fuente: Autor

El montaje de un sistema de control a lazo abierto se lo realiza de la siguiente manera: actuador conforma la etapa de potencia, planta el motor, mientras que; el

sensor lo conforma el encoder y el transductor (convertor de frecuencia a voltaje), presentado en la figura 4.3.

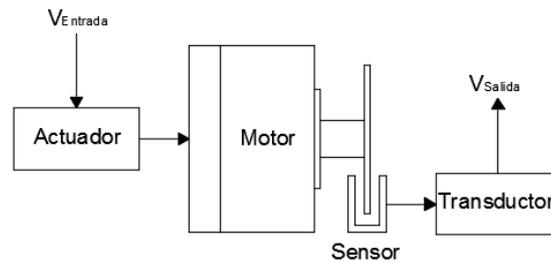


Figura 4.3 Montaje de un sistema de control a lazo abierto.
Fuente: Autor

En los sistemas de control a lazo abierto la estabilidad del mismo no es un problema importante y es más fácil de lograr. Las técnicas a lazo abierto son aplicables cuando se conoce con anticipación las entradas y no existen perturbaciones. Se usan componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado (Fernández, 2012).

Para un sistema de control a lazo cerrado el diagrama de bloques se presenta en la figura 4.4.

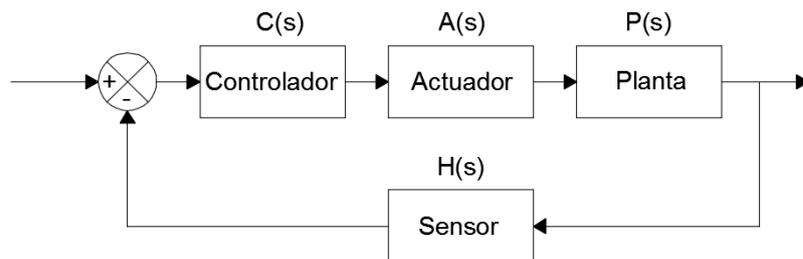


Figura 4.4 Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo cerrado.
Fuente: Autor

En la cual $C(s)$ es la función de transferencia del sistema de control, $A(s)$ es la función de transferencia del actuador, $P(s)$ es la función de transferencia de la planta y $H(s)$ la función de transferencia del sensor. La función de transferencia en lazo cerrado $G(s)$ expresa la relación global entre la señal de salida y la señal de referencia con una perturbación nula como se expone en la ecuación 4.2.

$$G(s) = \frac{C(s)A(s)P(s)}{C(s)A(s)P(s)H(s)+1} \quad (4.2)$$

Un caso práctico de un sistema de control a lazo cerrado el diagrama de bloques se presenta en la figura 4.5.

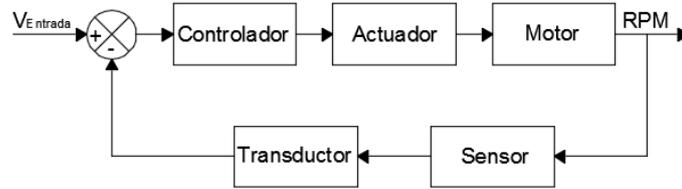


Figura 4.5 Caso práctico de un sistema de control a lazo cerrado.
Fuente: Autor

Finalmente para el montaje de un sistema de control a lazo cerrado se lo realiza en el mismo sistema a lazo abierto, con la implementación del restador entre la medición entregada por el sensor y el punto de referencia o señal de entrada; y el controlador, el cual recibe la señal como variable de entrada y la adecúa para controlar la planta o proceso establecido, presentado en la figura 4.6.

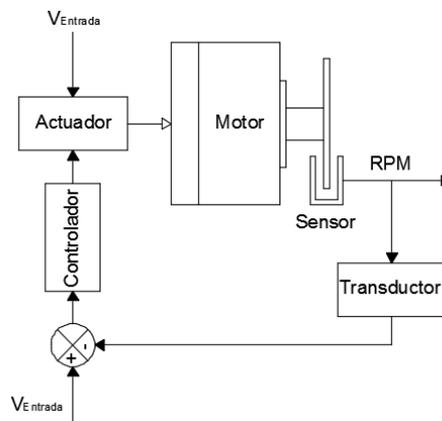


Figura 4.6 Montaje del sistema de control a lazo cerrado.
Fuente: Autor

Con lo que se puede percibir que un sistema de control a lazo cerrado presenta una mayor cantidad de elementos que lo conforman que un sistema a lazo abierto, por consiguiente estos sistemas son más precisos pero más costosos.

Antes de iniciar con el diseño de un controlador PID es necesario conocer la linealidad del sistema ya que si no lo fuera, no es posible aplicar un control PID o sus variantes al sistema, por consiguiente en la figura 4.7 se presenta la relación de voltaje versus velocidad angular por medio del programa Labview.

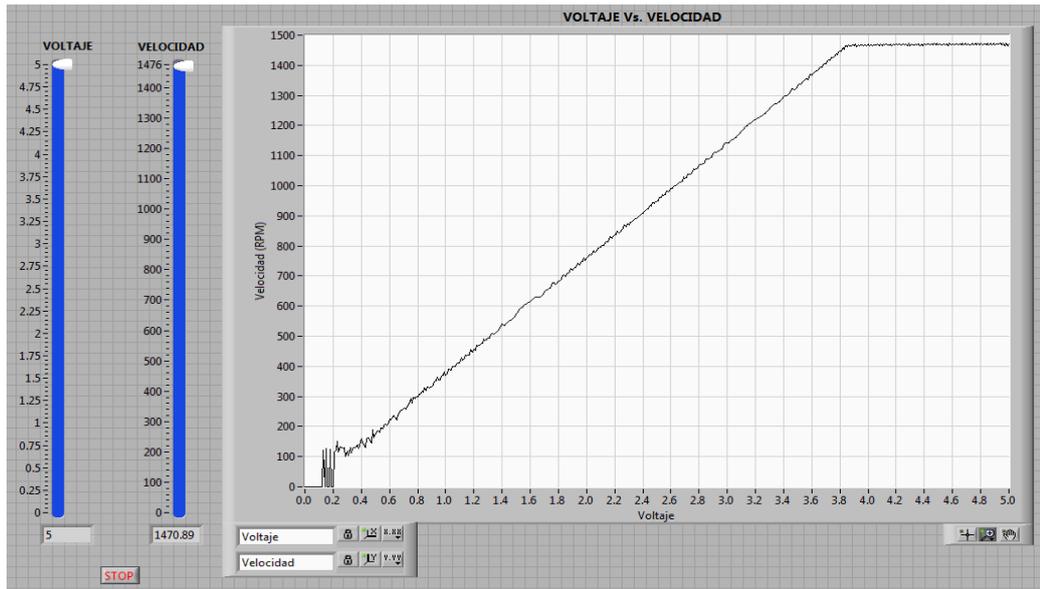


Figura 4.7 Linealidad de un motor de corriente continua.

Fuente: Autor

De la figura 4.7 se puede deducir lo siguiente:

- El sistema de 0 V a aproximadamente 0.2 V el voltaje no es suficiente para vencer el rozamiento e inercia del motor de modo que el motor no rota y la velocidad es 0.
- Por sobre los 0.25 V aproximadamente, el rotor empieza a girar repentinamente presentando una discontinuidad. Es posible que existan pequeños pulsos de velocidad debido a que el rotor presenta un ligero movimiento antes de arrancar definitivamente.
- A partir de 0.4 V la velocidad presenta un comportamiento lineal con respecto al voltaje. Por lo tanto se puede utilizar un controlador tipo PID o sus variantes en el rango lineal del motor; esto es, desde 0.4V hasta 3.8V.

Cabe recalcar que se implementó un amplificador electrónico lineal que permite ampliar el voltaje de control de un máximo de 5V a un máximo de 12V, además de entregar la corriente necesaria para el funcionamiento del Motor DC.

Para observar la curva de arranque y parada del motor puede aplicarse sucesivamente valores de 0V y luego 5V al voltaje, y notar en la *Gráfica Señal* la forma en que la velocidad responde a esta señal de estímulo tipo escalón, típica de

un motor DC, como se presenta en la figura 4.8 y una señal de estímulo tipo rampa se presenta en la figura 4.9.

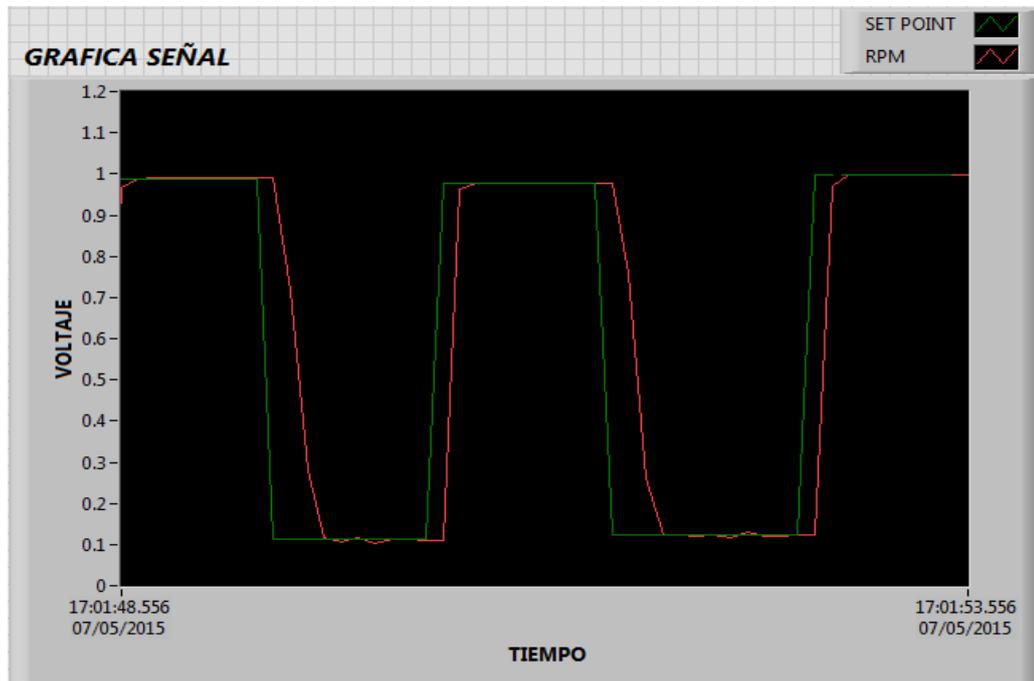


Figura 4.8 Curva de arranque y parada de un motor DC.
Fuente: Autor

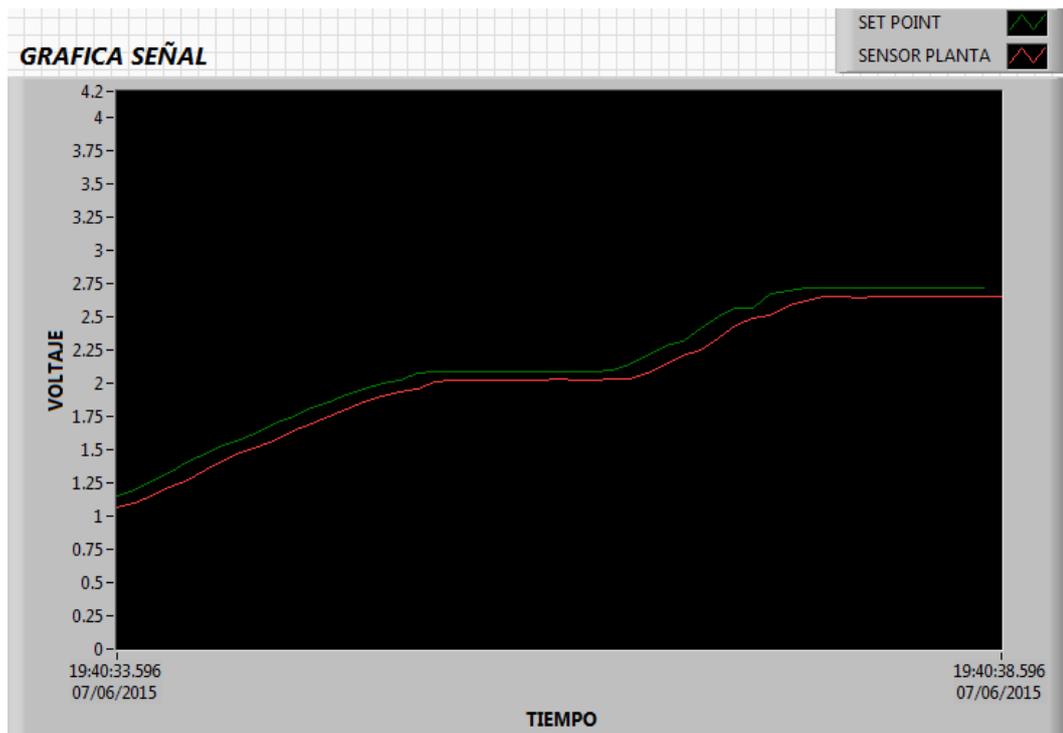


Figura 4.9 Señal tipo rampa aplicada a un motor DC.
Fuente: Autor

4.1.1.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR.

Existen diversas configuraciones para el sistema de control, pero para la investigación se eligió una acorde a la enseñanza de la teoría de control puesto que tiene fines educativos. La función de transferencia que describe la configuración del sistema según (Giraldo B. & Tabares G., 1997) es la siguiente.

$$C_{PID}(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (4.3)$$

En los sistemas de controlador PID reales, en lugar del término derivativo " $K_d s$ " se emplea la ecuación 4.4 según (Sánchez P., 2009).

$$\frac{K_d s}{\tau_D s + 1} \quad (4.4)$$

Donde:

$$\diamond \tau_D = \text{Constante de tiempo derivativa.}$$

Según (Sánchez P., 2009) la constante τ_D normalmente se elige en el rango de $0.1 \leq \tau_D \leq 0.2$, por lo general cuanto más pequeño es τ_D se tiene una mejor aproximación entre el término “*derivativo filtrado*” de la ecuación 4.4 y el “*derivativo*” $K_d s$.

Con la inclusión de un polo evitamos utilizar acciones de control grandes en respuesta a errores de control de alta frecuencia, tales como errores inducidos por cambios de la señal de referencia o mediciones de ruido. El argumento clásico por el cual se elige $\tau_D \neq 0$, es además de asegurar un controlador propio, para atenuar ruido de alta frecuencia (Sánchez P., 2009), por consiguiente la función de transferencia del sistema para un control PID se representa en la ecuación 4.5.

$$C_{PID}(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\tau_D s + 1} \right) \quad (4.5)$$

Para el desarrollo de controladores PID se debe establecer la configuración de los amplificadores operacionales, el cual se presenta a continuación:

CONFIGURACIÓN INVERSORA.

La configuración inversora se presenta en la figura 4.10, en la cual la entrada $V(+)$ está conectada a masa y la señal V_e se aplica a la entrada $V(-)$ a través de R_1 , con realimentación desde la salida a través de R_2 , además se debe considerar que el montaje R_3 es igual al paralelo de R_1 y R_2 .

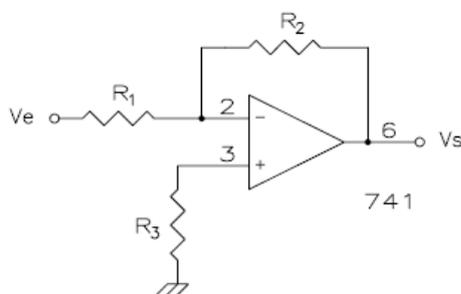


Figura 4.10 Montaje inversor.

Fuente: (Sanchez, 2014)

La ganancia del amplificador operacional para la configuración inversora se presenta en la ecuación 4.6.

$$\frac{V_e - V_2}{R_1} + \frac{V_s - V_2}{R_2} = 0 \quad (4.6)$$

CONFIGURACIÓN NO INVERSORA.

En este circuito la tensión V_e se aplica a la entrada $V(+)$ a través de R_3 , y una fracción de la señal de salida V_s se aplica a la entrada $V(-)$, así mismo al igual que en la configuración inversora el montaje R_3 es igual al paralelo de R_1 y R_2 , para el análisis se debe tener claro que en el circuito de entrada inversora lo que existe es un circuito serie de dos resistencias alimentadas a la tensión V_s , ya que no se desvía ninguna corriente por el operacional (Sanchez, 2014), presentado en la figura 4.11.

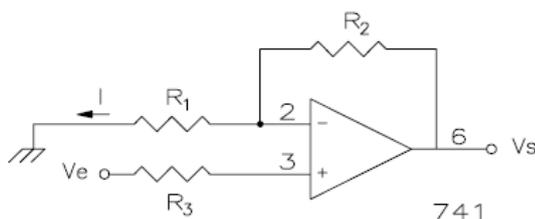


Figura 4.11 Montaje no inversor.

Fuente: (Sanchez, 2014)

La ganancia del amplificador operacional para la configuración no inversora se presenta en la ecuación 4.7.

$$A_v = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.7)$$

Establecida la configuración de los amplificadores operacionales se realiza el diseño del controlador.

RESTADOR.

El primer paso para el diseño circuital de controladores es analizar el amplificador operacional “restador”, considerándose el amplificador operacional LM741; esta configuración también es conocido como amplificador diferenciador y se presenta en la figura 4.12.

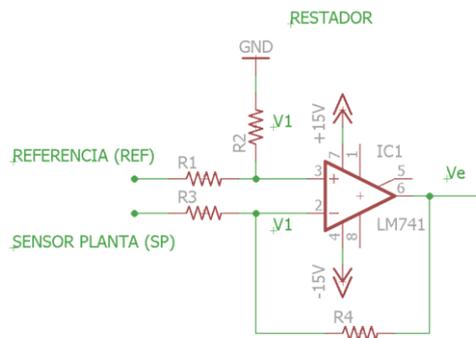


Figura 4.12 Esquema del circuito de un amplificador operacional restador.

Fuente: Autor

El amplificador operacional está constituido de la señal del sensor de planta "SP" y la señal de referencia o setpoint "REF", su función principal es realizar la resta entre "REF" y "SP"; como resultado se obtiene el error entre las dos señales y se representa con "Ve" y este valor será la señal de entrada al controlador con la cual se pretende corregir el error generado entre las señales.

Resolviendo el sistema presentado en la figura 4.12, en el pin 3 del LM741 se obtiene el divisor de tensión expresado por la ecuación 4.8.

$$V_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{REF} \quad (4.8)$$

Aplicando la ecuación 4.6 en el esquema de la figura 4.12 se obtiene:

$$\frac{V_{sp}}{R_3} = V_1 \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{V_e}{R_4} \quad (4.9)$$

Reemplazando la ecuación 4.8 en la ecuación 4.9 se obtiene la ecuación 4.10 que es el error entre las dos señales.

$$V_e = V_{REF} \left(\frac{R_2(R_3+R_4)}{R_3(R_1+R_2)} \right) - V_{sp} \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4.10)$$

Para el amplificador operacional "restador", se introdujo resistencias del mismo valor ya que según (Junior, 1991) en su libro Amplificadores operacionales y filtros activos, los valores de las resistencias " R_1, R_2, R_3, R_4 " son de $10K\Omega$ puesto que tiene como única finalidad de que solo se realice la resta entre V_{REF} y V_{SP} y no influya ninguna ganancia.

ACCIÓN PROPORCIONAL (P).

Para este tipo de configuración se debe realizar la configuración de un amplificador inversor presentado en la figura 4.13, la cual está conformado por una resistencia fija " R_5 " y una resistencia variable " R_p ".

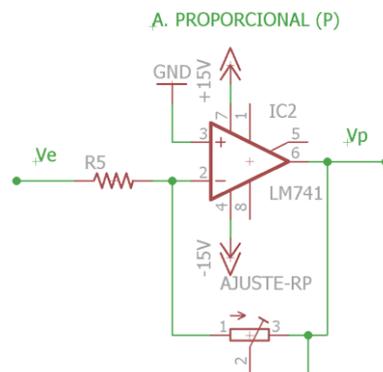


Figura 4.13 Esquema del circuito proporcional del controlador.

Fuente: Autor

Aplicando la ecuación 4.6 se obtiene la ecuación 4.11 que es la señal de salida de la acción proporcional.

$$V_p = -V_e \left(\frac{R_p}{R_5} \right) \quad (4.11)$$

Para la "Acción Proporcional" se introdujo una resistencia fija y un Ajuste "Rp" (Potenciómetro) y según (Junior, 1991) el valor de la resistencia "R₅" es igual 10KΩ. El potenciómetro "Rp" tiene como finalidad realizar la calibración pertinente para obtener la ganancia adecuada para un proceso preestablecido.

ACCIÓN INTEGRAL (I).

Para este tipo de amplificador la configuración es la de un integrador ideal el cual posee un capacitor "C1" y una resistencia variable "Ri", como se presenta en la figura 4.14.

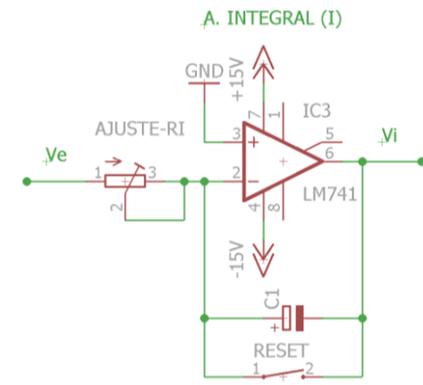


Figura 4.14 Esquema del circuito integral del controlador.

Fuente: Autor

Para obtener la ecuación que constituye el integrador se utiliza impedancias, y así poder tomar la configuración como la de un inversor, permitiendo hacer los cálculos con mayor facilidad, la impedancia equivalente para los capacitores y resistencias se expresa en las ecuaciones 4.12 y 4.13 respectivamente.

$$R_C = \frac{1}{C1s} \quad (4.12)$$

$$R_R = Ri \quad (4.13)$$

Aplicando la ecuación 4.6 en el esquema de la figura 4.14 se obtiene:

$$V_i = -V_e \left(\frac{R_C}{R_R} \right) \quad (4.14)$$

Reemplazando las ecuaciones 4.12 y 4.13 en la ecuación 4.14 se obtiene la ecuación 4.15 que es la señal de salida de la acción integral.

$$V_i = -V_e \left(\frac{1}{R_i C_1 s} \right) \quad (4.15)$$

Para la "Acción Integral" se introdujo un Ajuste "Ri" (Potenciómetro) y un Capacitor Electrolítico "C1"; y según (Junior, 1991), el valor para este capacitor es de 10uf, puesto que la configuración es la de un integrador ideal.

ACCIÓN DERIVATIVA (D).

Para este tipo de configuración se trabajó con impedancias y así poder tomar la configuración como la de un inversor permitiendo hacer los cálculos con mayor facilidad como se presenta en la figura 4.15, la cual posee un capacitor "C2" y dos resistencias variables "Rd1" y "Rd2".

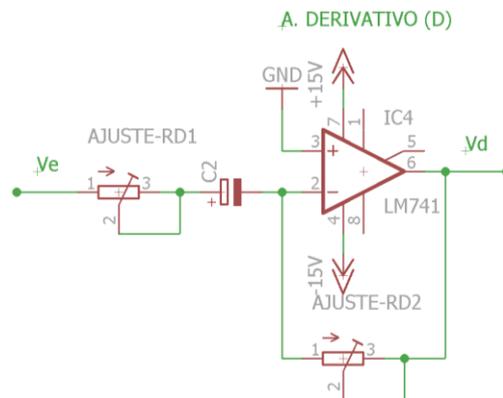


Figura 4.15 Esquema del circuito derivativo del controlador.

Fuente: Autor

Se observa que a diferencia de un derivador común, este contiene una resistencia extra variable "Rd₁", la cual está en serie con el capacitor "C₂", dicha resistencia variable se introduce para obtener el polo que se adiciona en la parte derivativa del controlador. La suma de las impedancia entre "Rd₁" y "C₂" se expresa en la ecuación 4.16, y para "Rd₂" se expresa la ecuación 4.17.

$$R_{Rd1C2} = R_{d1} + \frac{1}{C_2 s} \quad (4.16)$$

$$R_{Rd2} = R_{d2} \quad (4.17)$$

Aplicando la ecuación 4.6 en el esquema de la figura 4.15 se obtiene:

$$V_d = -V_e \left(\frac{R_{Rd2}}{R_{Rd1}C2s} \right) \quad (4.18)$$

Reemplazando las ecuaciones 4.16 y 4.17 en la ecuación 4.18 se obtiene la ecuación 4.19 que es la señal de salida de la acción derivativa.

$$V_d = -V_e \left(\frac{Rd2C2s}{Rd1C2s+1} \right) \quad (4.19)$$

Para la "Acción Derivativa" se introdujo dos potenciómetros y un capacitor establecidos de la siguiente manera: "Ajuste Rd1" (Potenciómetro), "Ajuste Rd2" (Potenciómetro) y un Capacitor Electrolítico "C2"; y según (Junior, 1991), el valor del capacitor electrolítico es de $10\mu f$, puesto que la configuración es la de un derivador ideal.

SUMADOR.

Para este circuito se utilizó la configuración que se presenta en la figura 4.16, la cual tiene como función principal la suma de las tres acciones de control como son acción proporcional, acción integrador y acción derivativo, pues todo sistema susceptible de ser automatizado requiere de un sumador algebraico.

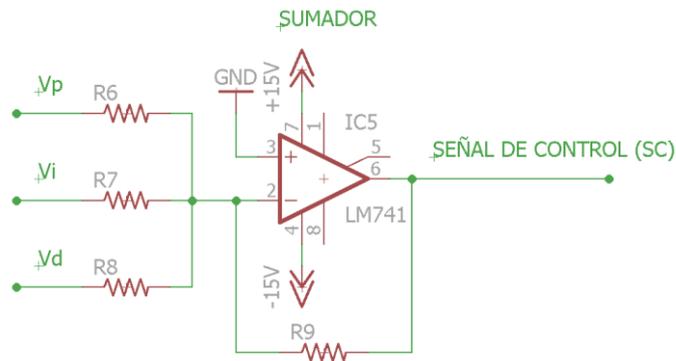


Figura 4.16 Esquema del circuito sumador del controlador.

Fuente: Autor

Aplicando la ecuación 4.6 en el esquema de la figura 4.16 se obtiene:

$$V_{sc} = - \left(\frac{V_p}{R_6} + \frac{V_i}{R_7} + \frac{V_d}{R_8} \right) R_9 \quad (4.20)$$

La señal de control "SC" es la suma de cada una de las partes del controlador y la cual será la señal del controlador. Sustituyendo las ecuaciones 4.11, 4.15 y 4.19 en la ecuación 4.20 se tiene la función de transferencia del sistema de control PID.

$$C_{PID}(S) = \frac{V_{sc}}{V_e} = \left(\frac{RpR_9}{R_5R_6} \right) + \left(\frac{R_9}{RiC_1sR_7} \right) + \left(\frac{Rd_2C_2sR_9}{(Rd_1C_2s+1)R_8} \right) \quad (4.21)$$

Para el "Sumador" se introdujo cuatro resistencias del mismo valor ya que según (Junior, 1991) los valores de las resistencias "R₆, R₇, R₈, R₉" es de 10KΩ puesto que tiene como única finalidad no anexar ninguna ganancia en dicha operación y solo realizar la suma algebraica de los voltajes, por consiguiente la ecuación 4.21 quedará de la siguiente manera.

$$C_{PID}(S) = \frac{V_{sc}}{V_e} = \left(\frac{Rp}{R_5} \right) + \left(\frac{1}{RiC_1s} \right) + \left(\frac{Rd_2C_2s}{Rd_1C_2s+1} \right) \quad (4.22)$$

Resolviendo la ecuación 4.22 se obtiene:

$$C_{PID}(S) = \frac{V_{sc}}{V_e} = \frac{\left(\frac{Rp}{R_5} + \frac{Rd_2}{Rd_1} \right) s^2 + \left(\frac{Rp}{R_5Rd_1C_2} + \frac{1}{RiC_1} \right) s + \frac{1}{RiRd_1C_1C_2}}{s \left(s + \frac{1}{Rd_1C_2} \right)} \quad (4.23)$$

Igualando la ecuación 4.23 con la ecuación 4.5 se obtiene:

$$K_p = \frac{Rp}{R_5} \quad (4.24)$$

$$K_i = \frac{1}{RiC_1} \quad (4.25)$$

$$K_d s = Rd_2 C_2 \quad (4.26)$$

$$\tau_D = Rd_1 C_2 \quad (4.27)$$

Donde:

- ❖ $K_p =$ Ganancia Proporcional.
- ❖ $K_i =$ Ganancia Integral.
- ❖ $K_d =$ Ganancia Derivativa.
- ❖ $\tau_D =$ Constante de tiempo derivativa.

A continuación se presenta en la figura 4.17 el esquema del controlador a utilizar para este proyecto de investigación, en el cual se introdujo un *reset* en la acción integral para eliminar el resultado de cargas anteriores producto de la carga del condensador electrolítico.

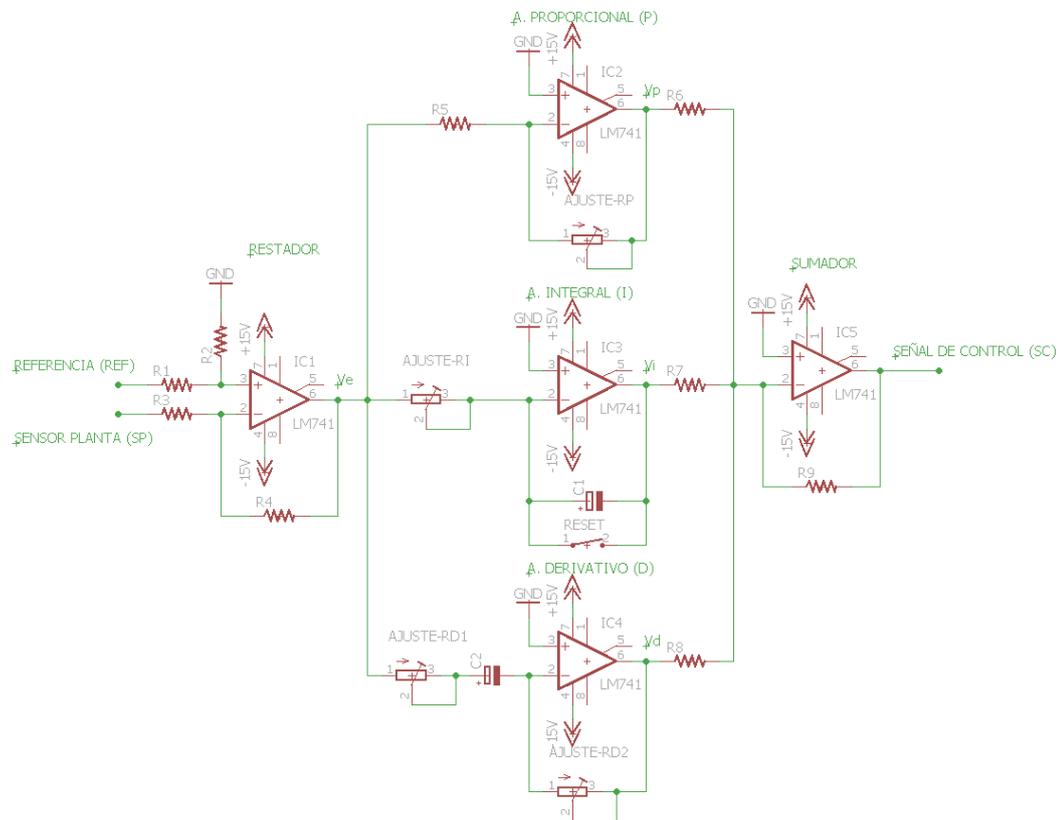


Figura 4.17 Esquema simplificado del controlador.

Fuente: Autor

El esquema seleccionado tiene la ventaja de que cada parámetro del controlador es independiente, lo cual permite entender su funcionamiento. La implementación no resulta óptima en cuanto a la cantidad de amplificadores operacionales utilizados pero son mayores las ventajas que ofrece para fines educativos ya que cuenta con resistencias variables (potenciómetros) en cada una de las tres partes que conforman el sistema de control, con la cual se ofrece un controlador con parámetros variables.

Finalmente se realizó la configuración con la cual el usuario pueda elegir el tipo de control del sistema:

- Control Proporcional (P).

- Control Proporcional-Integral (PI).
- Control Proporcional-Derivativo (PD).
- Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Hay que tener en cuenta que no se puede realizar un control solo Integral debido a que es aplicable solo para plantas muy estables, por consiguiente si se lo aplicara a una planta con perturbaciones o ruido puede desestabilizar todo el sistema. De igual manera para un control solo Derivativo ya que este anticipa la acción de control pero debe estar acompañado de otro controlador.

4.1.1.2 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

Para este proyecto de investigación se utilizó un motor de corriente continua marca *Mabuchi* modelo *C2162 – 60006/DN505728*, y se presenta en la figura 4.18, las especificaciones técnicas del motor de corriente continua se presentan en el anexo A1.



Figura 4.18 Motor de corriente continua modelo Mabuchi.
Fuente: Autor

Características:

- Larga vida de trabajo.
- Motor ideal para varias aplicaciones.
- Peso: 224 gramos.

CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO DE UN MOTOR DC.

Para la realización del modelo matemático de un motor de corriente continua se hace referencia al circuito equivalente de la figura 4.19, en la cual el control del

motor de corriente continua se aplica en las terminales de la armadura en forma de voltaje " e_a ".

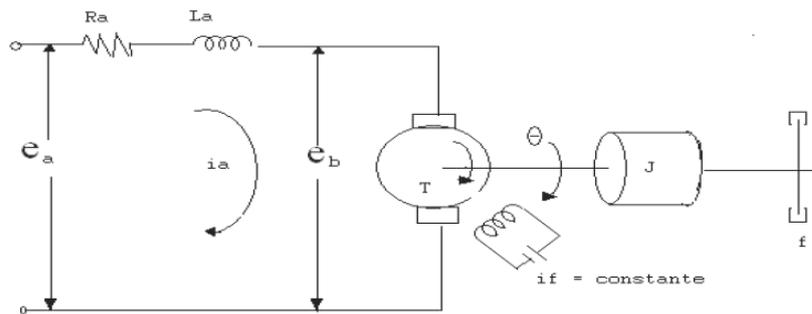


Figura 4.19 Circuito equivalente del motor de corriente continua.
Fuente: (Meneses, 2006)

Donde:

- ❖ R_a = Resistencia de armadura.
- ❖ L_a = Inductancia de armadura.
- ❖ i_a = Corriente de armadura.
- ❖ i_f = Corriente de campo.
- ❖ e_a = Tensión aplicada a la armadura.
- ❖ e_b = Fuerza contra – electromatriz.
- ❖ θ_m = Desplazamiento angular del eje del motor.
- ❖ T_m = Par desarrollado por el motor.
- ❖ J_m = Momento de inercia equivalente del motor y carga con referencia al eje del motor.
- ❖ f_m = Coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor y carga – referido al eje del motor.

MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DC.

Para realizar el análisis lineal de motor de corriente continua, se supone que el par desarrollado por el motor es proporcional al flujo entre la corriente de la armadura y el material que lo conforma por lo general láminas de acero, por consiguiente se presenta la ecuación 4.28, la cual es la función de transferencia del motor de corriente continua con respecto al voltaje de armadura.

$$M(s) = \frac{K}{JL_a s^2 + JR_a s + fL_a s + fR_a + K^2} \quad (4.28)$$

Donde:

- ❖ $K =$ Constante mecánica del motor.
- ❖ $J =$ Momento de inercia equivalente del motor y carga con referencia al eje del motor.
- ❖ $L_a =$ Inductancia de armadura.
- ❖ $R_a =$ Resistencia de armadura.
- ❖ $f =$ Coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor y carga referido al eje del motor.

En base al anexo A1 se elabora la tabla 4.1 con los parámetros del motor de corriente continua para poder aplicar la ecuación 4.28.

Tabla 4.1 Parámetros motor modelo C2162-60006.

NOMBRE	PARÁMETRO	UNIDADES
Resistencia de armadura (Ra)	= 8,20	Ω
Inductancia de armadura (La)	= 0,0696	H
Constante mecánica del motor (K)	= 0,048	N-m/Amp
Inercia del motor (J)	= 4,5e-5	Kg-m ²

Fuente: Autor

El coeficiente de fricción no se encuentra en la hoja de datos del fabricante por consiguiente, según (Gil G. & Rincón G., 2014) la ecuación de este parámetro es:

$$f = \frac{KI}{w} \quad (4.29)$$

Donde:

- ❖ $K =$ Constante mecánica del motor.
- ❖ $I =$ Intensidad.
- ❖ $W =$ Velocidad angular.

En base al anexo A1 y la ecuación 4.29 se realiza el cálculo pertinente:

$$f = 7.05142 \times 10^{-4} N - m * sec/rad \quad (4.30)$$

Por consiguiente reemplazando los valores de la tabla 4.1 y la ecuación 4.30 en la ecuación 4.28, se obtiene el modelo matemático del motor.

$$M(s) = \frac{0.048}{3.132 \times 10^{-6} s^2 + 0.0003695s + 0.002362} \quad (4.31)$$

Realizando el análisis de la función de transferencia del motor en lazo abierto, se obtiene la respuesta a una entrada escalón unitario y se presenta en la figura 4.20.

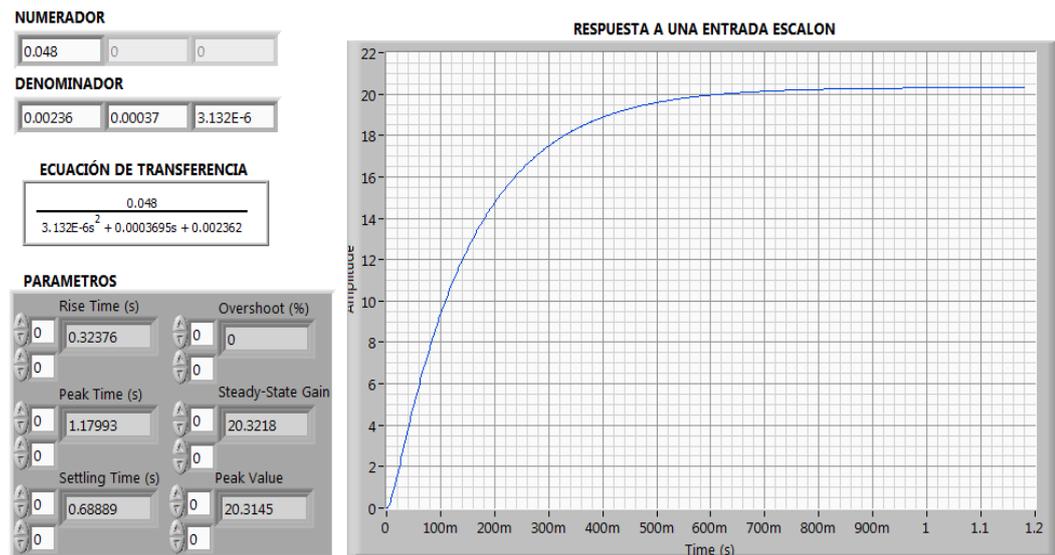


Figura 4.20 Respuesta del motor DC a una entrada escalón a lazo abierto.

Fuente: Autor

De la figura 4.20 se obtuvo los datos de la planta en lazo abierto:

- Tiempo de elevación de 0.323 *segundos*.
- Sobrepaso (overshoot) de 0%.
- Tiempo de asentamiento $t_s = 0.688$ *segundos*.

En la figura 4.21 se presenta el lugar geométrico de las raíces de la planta a controlar.

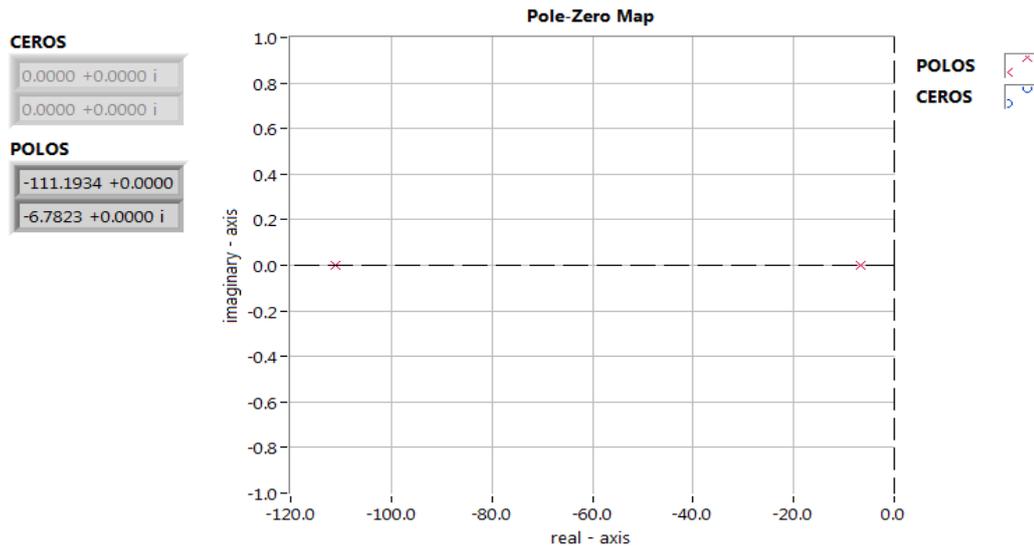


Figura 4.21 Ubicación de polos y ceros en el plano cartesiano 's'.
Fuente: Autor

De la figura 4.21 se obtienen los siguientes parámetros:

- *Cero = No contiene ceros el sistema.*
- *Polo 1 = -111.1908*
- *Polo 2 = -6.7820*

Por consiguiente el sistema es estable, puesto que tiene parámetros mecánicos, además que los polos están ubicados a lado izquierdo del plano cartesiano "s".

4.1.1.3 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR P, PI, PD Y PID.

Un motor siempre trabaja en vacío a cierta velocidad nominal, pero si se le aplica o se acopla una carga al mismo motor esta velocidad cae. El controlador PID pretende corregir esto y permitir que una vez que se acople una carga al motor la velocidad del mismo no caiga. Por ende se sintoniza el controlador de tal manera que, una vez caída la velocidad del motor entra en operación y elimina el error que genera la pérdida de energía en la máquina haciendo que la velocidad se mantenga estable.

La acción correctora se logra a través de la acción proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), ya sea operando P, PI, PD o PID presentados en los diferentes circuitos de la etapa de control descritos en el capítulo II.

Cuando el motor ha perdido velocidad por acción de una carga, a través del encoder de barrera, envía una señal de tensión la cual llega directamente a un circuito restador. Esta señal es comparada entre el voltaje de referencia (setpoint) y el voltaje de salida de la planta y se genera un voltaje de error, el cual es el error que pretende corregir el controlador. Cuando se genera este valor erróneo, se ingresa a la entrada del controlador dicha tensión; esto hace que las acciones de control trabajen y la salida del circuito entregue una señal de tensión correctora.

El valor de la señal depende de cada una de las ganancias del controlador las cuales se calculan aplicando los métodos de sintonización que se describen a continuación.

Para este proyecto de investigación los datos de diseño para el controlador se presentan a continuación:

- Tiempo de elevación ≤ 0.1 segundos.
- *Sobreimpulso (overshoot)* $\leq 10\%$, puesto que, según (Hernández, 2010), el máximo pico de sobreimpulso (overshoot), no debe exceder del 10%, ya que incrementos de estos porcentaje suponen sistemas con escaso amortiguamiento que producen oscilaciones excesivas en la respuesta del sistema, lo cual afecta directamente a la planta.
- Tiempo de asentamiento ≤ 0.1 segundos.
- Error en estado estacionario $\leq 5\%$.

SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PROPORCIONAL (P).

Para el diseño de este tipo de controlador llamado también ajustador de ganancia, solo se tuvo en cuenta un sobrepaso de 5%, puesto que este controlador solo actúa en la ganancia de la planta, ya que no tiene control sobre polos y ceros del sistema, como se presenta en la figura 4.22.

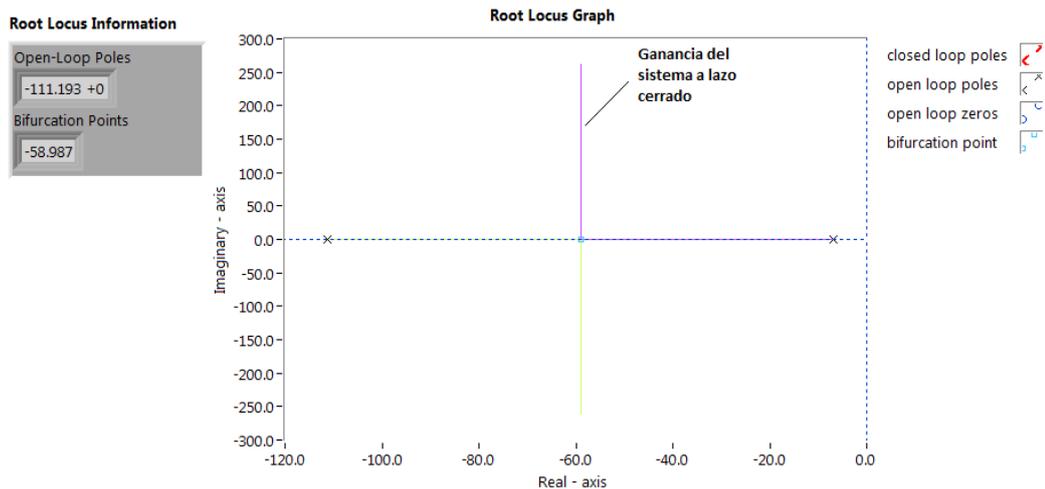


Figura 4.22 Ubicación de polos en el plano cartesiano ‘s’ a lazo cerrado.

Fuente: Autor

Una vez realizado el ajuste de ganancia del sistema hasta un sobreimpulso de 5%, se presenta en la figura 4.23 la especificación de diseño requerido.

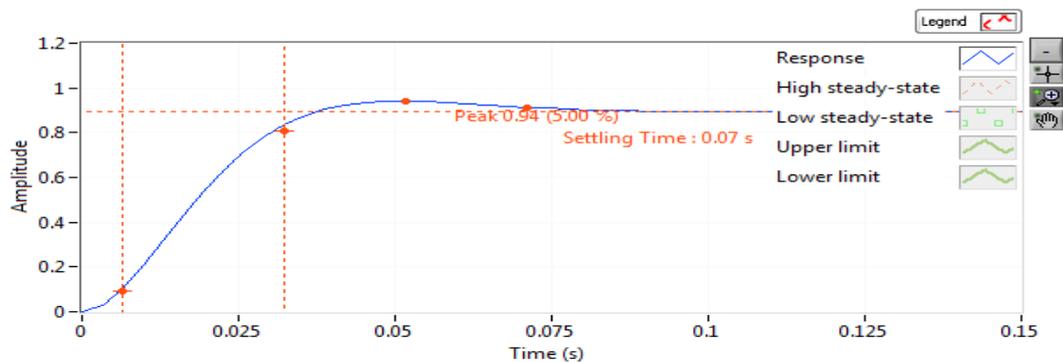


Figura 4.23 Sintonización del control Proporcional.

Fuente: Autor

De la figura 4.23 se obtiene la compensación del sistema, la cual es de 0.4279, es decir, la ganancia proporcional del sistema a lazo cerrado ante una entrada escalón unitario.

$$K_p = 0.4279 \quad (4.32)$$

Con la ganancia proporcional del sistema se procedió a obtener el valor de la resistencia R_p del controlador.

$$R_p = 4.279 \text{ K}\Omega \quad (4.33)$$

En este controlador se notó que el tiempo de levantamiento es menor que 0.1 *segundos* y que ha disminuido el error en estado estacionario a 5.5%, como se presenta en la figura 4.24, pero debe diseñarse el controlador de una manera más sofisticada para satisfacer todas las especificaciones, particularmente el requerimiento del error en estado estacionario.

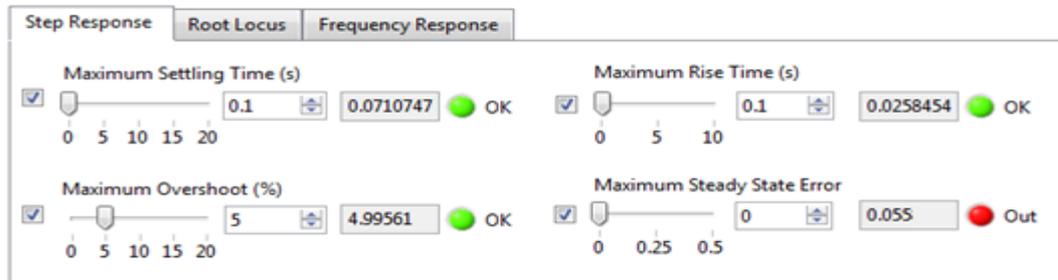


Figura 4.24 Parámetros del control Proporcional.

Fuente: Autor

SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI).

Para el diseño de este tipo de controlador, según (Hernández, 2010), para un control *PI* es necesario añadir un *cero*, cuya posición es ajustable sobre el eje real a la izquierda del origen, y un *polo* en el origen, como se presenta en la figura 4.25.

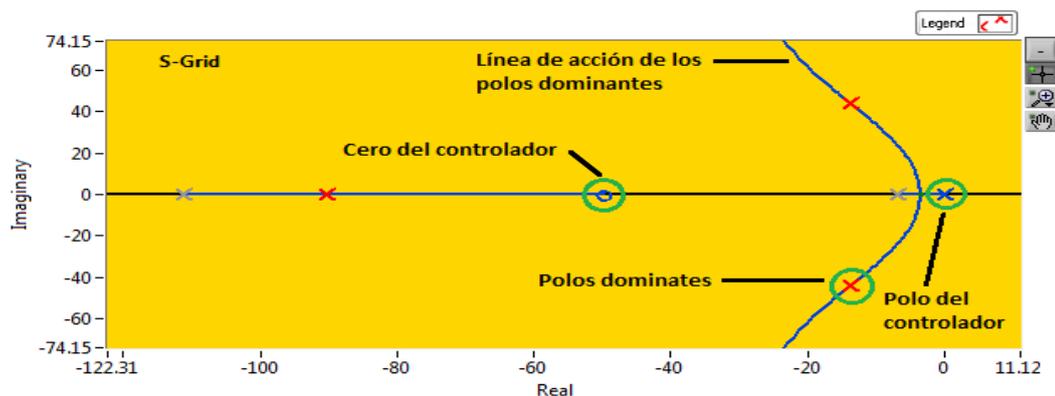


Figura 4.25 Asignación de un polo y un cero al sistema para un control PI.

Fuente: Autor

Realizando la sintonización pertinente en el sistema a lazo cerrado se obtiene la respuesta a una entrada escalón unitario, como se presenta en la figura 4.26.

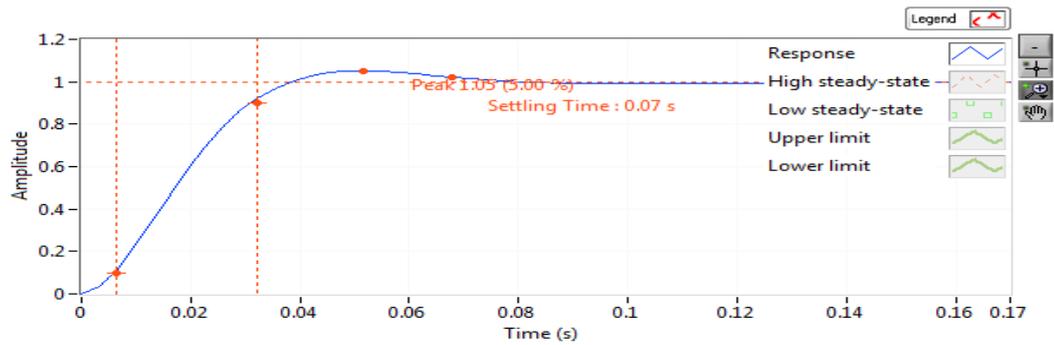


Figura 4.26 Sintonización del control PI.
Fuente: Autor

Acorde a la figura 4.26 se presenta en la figura 4.27 el compensador del controlador.

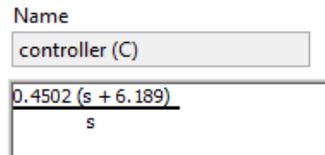


Figura 4.27 Función de transferencia del control PI a lazo cerrado.
Fuente: Autor

Adecuando la ecuación de transferencia del control PI del sistema expuesto en la figura 4.27 se obtiene la ecuación 4.34.

$$C_{PI}(s) = \frac{0.4502 + 2.786s}{s} \quad (4.34)$$

Acorde a la ecuación 4.34, se procedió a obtener los diferentes parámetros partiendo de la ecuación 4.35.

$$C_{PI}(s) = \frac{R_p}{R_5} + \frac{1}{R_i C_1 s} \quad (4.35)$$

Para la acción proporcional se tiene la siguiente relación sabiendo que $R_5 = 10K\Omega$.

$$\frac{R_p}{R_5} = 0.4502$$

$$R_p = 4.502 K\Omega \quad (4.36)$$

Para la acción integral se tiene la siguiente relación sabiendo que $C_1 = 10\mu f$.

$$\frac{1}{RiC_1} = 2.786$$

$$Ri = 35.855 \text{ K}\Omega \quad (4.37)$$

En este controlador el tiempo de levantamiento es menor que 0.1 *segundos*, error en estado estacionario es igual a cero, tiempo de asentamiento es menor a 0.1 *segundos* y un sobreimpulso del 5%, como se presenta en la figura 4.28.

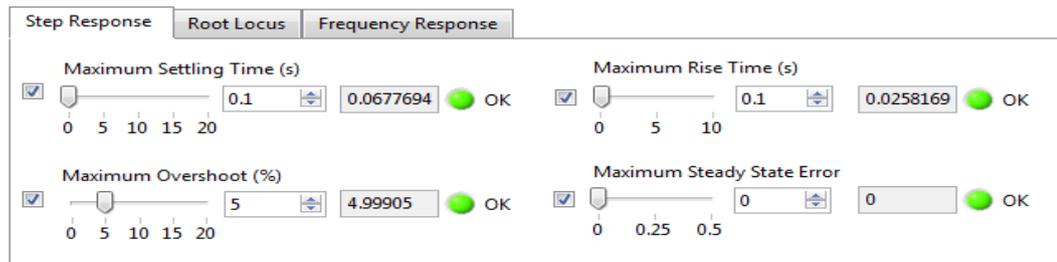


Figura 4.28 Parámetros del controlador PI.

Fuente: Autor

SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD).

Para el diseño del controlador se tomó en cuenta la ecuación 4.4 en la cual aparte de la adición de un *cero* cuya posición es ajustable en el eje real que es la forma clásica de este controlador, se incluyó un *polo* cuya posición es ajustable en el eje real, evitando así la utilización de acciones de control grandes en respuesta a errores de control de alta frecuencia, tales como errores inducidos por cambios de la señal de referencia o mediciones de ruido, además de asegurar un controlador propio, para atenuar ruido de alta frecuencia, como se presenta en la figura 4.29.

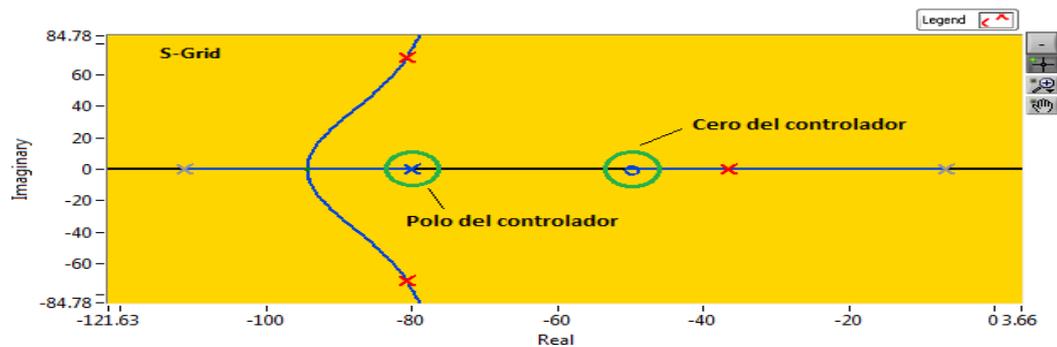


Figura 4.29 Asignación de un polo y un cero al sistema para un control PD.

Fuente: Autor

Realizando la sintonización adecuada en el controlador PD se obtiene la respuesta a una entrada escalón unitario, como se presenta en la figura 4.30.

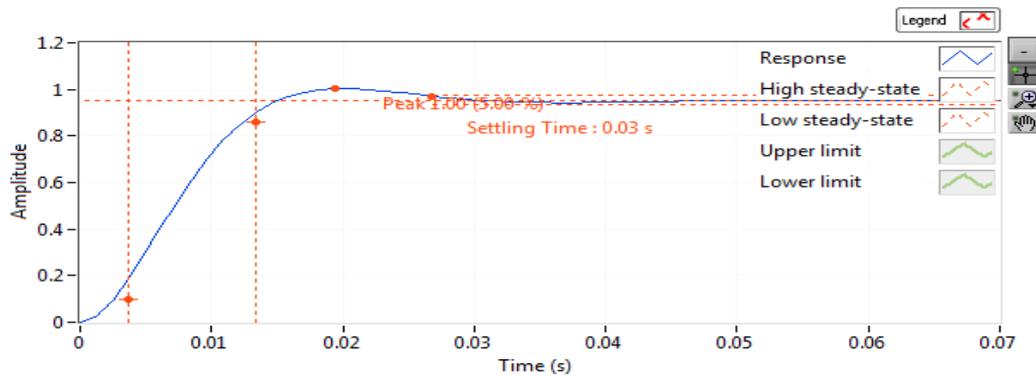


Figura 4.30 Sintonización del controlador PD.
Fuente: Autor

Acorde a la figura 4.30 se presenta en la figura 4.31 el compensador del controlador.

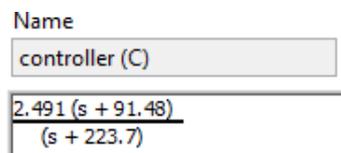


Figura 4.31 Función de transferencia del control PD a lazo cerrado.
Fuente: Autor

Adecuando la ecuación de transferencia del control *PD* del sistema expuesto en la figura 4.31 se obtiene la ecuación 4.38.

$$C_{PI}(s) = \frac{2.491+227.3}{s+223.7} \quad (4.38)$$

Acorde a la ecuación 4.38, se procedió a obtener los diferentes parámetros partiendo de la ecuación 4.39.

$$C_{PD}(s) = \frac{Rp}{R_5} + \frac{Rd_2 C_2 s}{Rd_1 C_2 s + 1} \quad (4.39)$$

Factorizando la ecuación 4.39 para obtener un modelo semejante a la ecuación 4.38 se obtiene la ecuación 4.40.

$$C_{PD}(s) = \frac{\left(\frac{Rp}{R_5} + \frac{Rd_2}{Rd_1}\right)s + \frac{Rp}{R_5 Rd_1 C_2}}{\left(s + \frac{1}{Rd_1 C_2}\right)} \quad (4.40)$$

Comparando la ecuación 4.40 con la ecuación 4.38 se realizó la siguiente relación:

$$\frac{R_p}{R_5} + \frac{R_{d_2}}{R_{d_1}} = 2.491 \quad (4.41)$$

$$\frac{R_p}{R_5 R_{d_1} C_2} = 227.3 \quad (4.42)$$

$$\frac{1}{R_{d_1} C_2} = 223.7 \quad (4.43)$$

Sabiendo que $R_5 = 10K\Omega$ y $C_2 = 10\mu f$ se realizó la resolución del sistema de ecuaciones y se obtuvieron los siguientes valores para el controlador PD.

$$R_p = 10.160K\Omega \quad (4.44)$$

$$R_{d_1} = 447.027 \Omega \quad (4.45)$$

$$R_{d_2} = 659.324 \Omega \quad (4.46)$$

En este controlador el tiempo de levantamiento es menor que 0.1 *segundos* y el error en estado estacionario es el 4.6%, con un sobreimpulso del 5% y el tiempo de asentamiento es menor a 0.1 *segundos*, como se presenta en la figura 4.32.

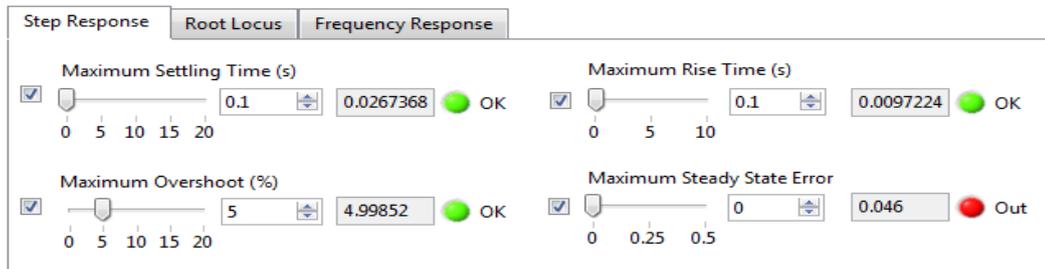


Figura 4.32 Parámetros del controlador PD.

Fuente: Autor

SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID).

Para el diseño de este tipo de controlador se tomó en cuenta la ecuación 4.23 en la cual se añadió 2 *polos*, uno de forma arbitraria en el eje real que es ajustable en el plano s y el otro en el origen, además se añadió 2 *ceros* de forma arbitraria que

pueden ser ajustados en el plano s , debido a que el controlador PID consta de 2 polos y 2 ceros, como se presenta en la figura 4.33.

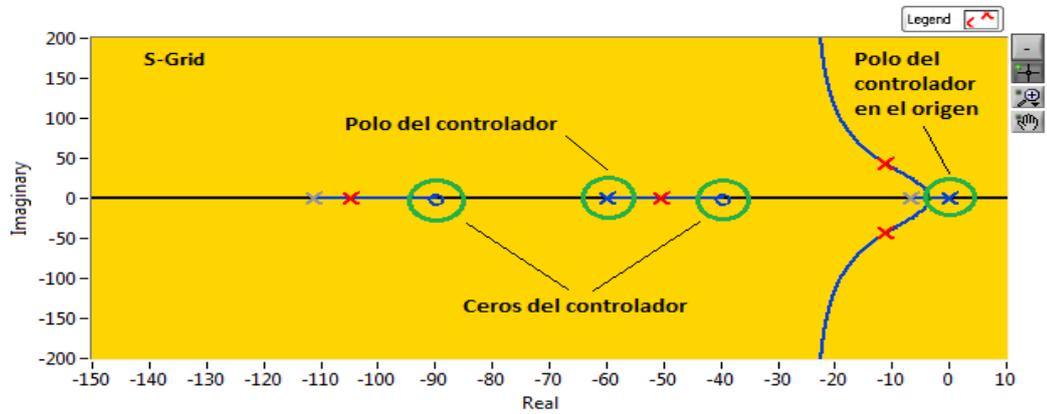


Figura 4.33 Asignación de polos y ceros al sistema para un control PID.

Fuente: Autor

Realizando la sintonización adecuada en el controlador PID se obtiene la respuesta a una entrada escalón unitario, como se presenta en la figura 4.34.

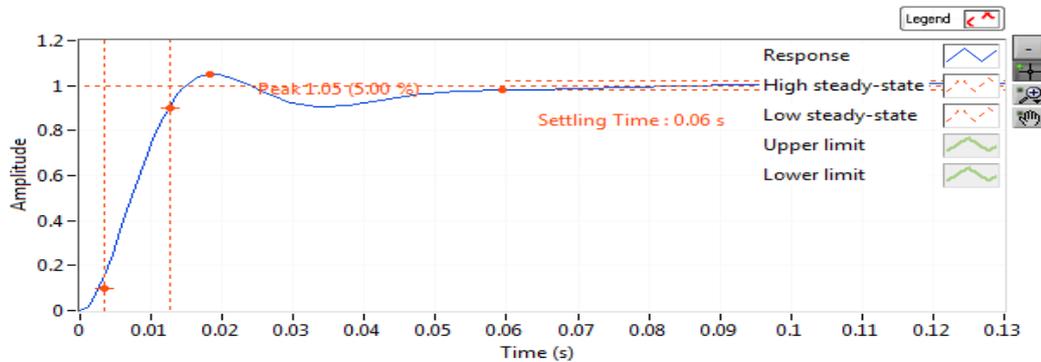


Figura 4.34 Sintonización del controlador PID.

Fuente: Autor

Acorde a la figura 4.34 se presenta la figura 4.35 que corresponde al compensador para un control PID a lazo cerrado.

Name
controller (C)
$\frac{2.1384 (s + 14.53)(s + 21.24)}{s(s + 96.15)}$

Figura 4.35 Función de transferencia del control PID a lazo cerrado.

Fuente: Autor

Adecuando la ecuación de transferencia del control *PID* del sistema expuesto en la figura 4.35 se obtiene la ecuación 4.47.

$$C_{PI}(s) = \frac{2.138s^2 + 76.48s + 659.7}{s^2 + 96.15s} \quad (4.47)$$

Con la ecuación de transferencia del control *PID* del sistema expuesto en la ecuación 4.47 se procedió a obtener sus diferentes parámetros partiendo de la ecuación 4.48.

$$C_{PID}(s) = \frac{Rp}{R_5} + \frac{1}{RiC_1s} + \frac{Rd_2C_2s}{Rd_1C_2s+1} \quad (4.48)$$

Factorizando la ecuación 4.48 para obtener un modelo semejante a la ecuación 4.47 se presenta la ecuación 4.49.

$$C_{PID}(s) = \frac{V_{sc}}{V_e} = \frac{\left(\frac{Rp}{R_5} + \frac{Rd_2}{Rd_1}\right)s^2 + \left(\frac{Rp}{R_5Rd_1C_2} + \frac{1}{RiC_1}\right)s + \frac{1}{RiRd_1C_1C_2}}{s\left(s + \frac{1}{Rd_1C_2}\right)} \quad (4.49)$$

Comparando la ecuación 4.49 con la ecuación 4.47 se realiza la siguiente relación:

$$\frac{Rp}{R_5} + \frac{Rd_2}{Rd_1} = 2.138 \quad (4.50)$$

$$\frac{Rp}{R_5Rd_1C_2} + \frac{1}{RiC_1} = 76.48 \quad (4.51)$$

$$\frac{1}{RiRd_1C_1C_2} = 659.7 \quad (4.52)$$

$$\frac{1}{Rd_1C_2} = 96.15 \quad (4.53)$$

Sabiendo que $R_5 = 10K\Omega$, $C_1 = 10\mu f$ y $C_2 = 10\mu f$ se realizó la resolución del sistema de ecuaciones y se obtuvieron los valores para el controlador *PID*.

$$Rp = 7.2406 K\Omega \quad (4.54)$$

$$Ri = 14.574 K\Omega \quad (4.55)$$

$$Rd_1 = 1.0401 K\Omega \quad (4.56)$$

$$Rd_2 = 1.4711 K\Omega \quad (4.57)$$

Es este controlador el tiempo de levantamiento es menor que 0.1 *segundos* y el error en estado estacionario es de cero, con un sobreimpulso del 5% y el tiempo de asentamiento es menor a 0.1 *segundos*, la cual se presenta en la figura 4.36.

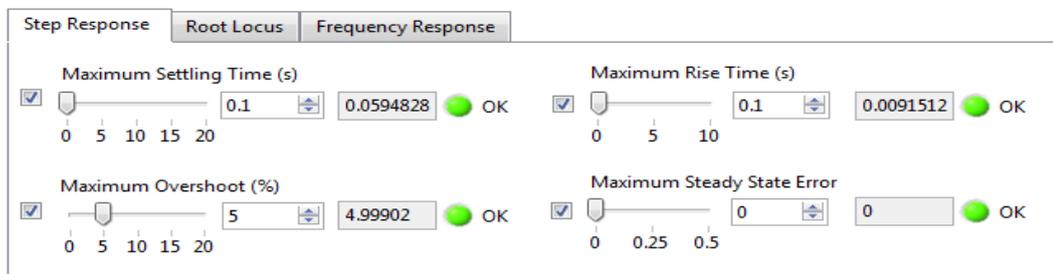


Figura 4.36 Parámetros del controlador PID.

Fuente: Autor

4.1.1.4 PROCEDIMIENTO SISTEMA DE CONTROL.

LAZO ABIERTO.

Para la realización de un control a lazo abierto de voltaje de un motor de corriente continua se procedió acorde a la figura 4.1, en la cual los elementos que constituye el sistema de control son:

a) Actuador.

Para el actuador se procedió a utilizar una tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments modelo NI DAQ 6008 que se presenta en la figura 4.37, la cual cumple la función de generar el voltaje de referencia o setpoint al sistema a lazo abierto y poder controlar el motor conjunto con una etapa de potencia.



Figura 4.37 Ni DAQ 6008.

Fuente: (National Instruments, 2006)

La tarjeta de adquisición de datos ofrece grandes ventajas a la hora de hacer mediciones de un entorno físico con una gran precisión, la misma que posees las siguientes características:

- Consta de 8 entradas analógicas (12 bits, 10 kS/s).
- Consta de 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 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 para Visual Studio .NET

La NI DAQ 6008 manda un voltaje por una de su salidas analógicas (ao0) que va desde 0V a 5V. El voltaje de control es acondicionado a través de un amplificador electrónico lineal que permite ampliar el voltaje de control de un máximo de 5V a un máximo de 12V, el esquema se presenta en la figura 4.38.

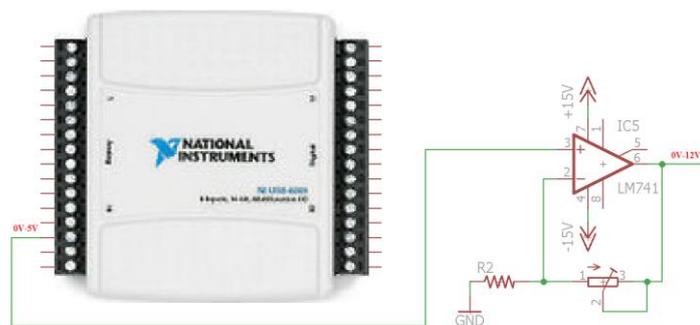


Figura 4.38 Esquema amplificador electrónico lineal.

Fuente: Autor

Además es necesario entregar la corriente necesaria para el funcionamiento del motor de corriente continua que es de 1.5 Amperios aproximadamente, por consiguiente es necesario realizar la etapa de potencia que se presenta en la figura 4.39, ya que la tarjeta de adquisición solo proporciona 200 miliamperios.

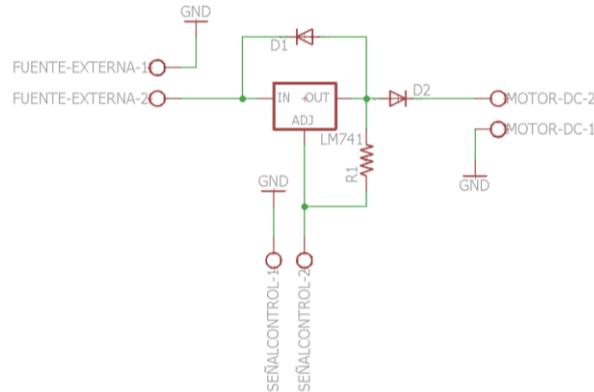


Figura 4.39 Etapa de potencia.
Fuente: Autor

Se utilizó esta configuración ya que el voltaje de control es proporcional al voltaje que pasa por el integrado LM317 pero al mismo tiempo aumenta el amperaje para poder mover el motor de corriente continua.

b) Encoder De Barrera.

El encoder modelo *Hc – 020K* consta de dos leds infrarrojos, en emisor y un receptor, con la cual cada vez que se interrumpe la señal entre el emisor y receptor se envía un pulso a su salida, el cual a través de un microcontrolador o en este caso Labview puede ser procesada la señal para su posterior visualización y comparación, el encoder de barrera se presenta en la figura 4.40.



Figura 4.40 Encoder de barrera modelo Hc-020K.
Fuente: Autor

Las características técnicas del encoder de barrera modelo *Hc – 020K* se especifica a continuación:

- Rango de trabajo de $4.5V - 5.5V$.
- Tamaño de $2cm \times 2cm$ ideal para cualquier aplicación.

- Resolución de $0.01mm$.
- Frecuencia de medición de $100KHZ$, es decir una alta definición a gran velocidad.

Establecida las características de este dispositivo se procedió a configurar para poder obtener las rpm del motor y así realizar la conversión de frecuencia a voltaje por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6008; la adquisición de la señal del encoder se lo realizó por el canal analógico *ai0*, como se presenta en la figura 4.41.

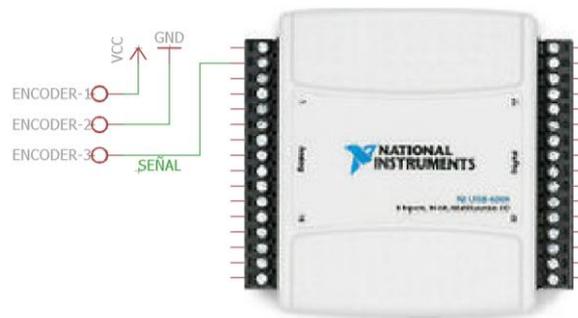


Figura 4.41 Lectura sensor de barrera en NI DAQ 6008.
Fuente: Autor

LAZO CERRADO.

Para la realización de un control a lazo cerrado de voltaje de un motor de corriente continua se procedió acorde a la figura 4.4, y los elementos que los constituyen son:

a) Restador.

Es restador también conocido como amplificador diferenciador el cual es el encargado de realizar la resta entre la señal de referencia (setpoint) y la señal planta (conversor de frecuencia a voltaje) y el resultado es inyectado al controlador para corregirlo, en la figura 4.12 se presentó el esquema de un restador utilizando amplificadores operacionales.

b) Controlador.

El controlador es el encargado de corregir el error en estado estable, con la cual la variable de salida es dependiente de la variable de entrada y por ende disminuye el

error al mínimo posible. En la figura 4.17 se presentó el diagrama esquemático de este controlador.

La señal de salida del controlador fue procesada a través de amplificadores operacionales para obtener el voltaje necesario, en el cual el voltaje del controlador PID entra a un sumador junto con el voltaje de referencia (setpoint) para establecer el voltaje a compensar a la planta (motor de corriente continua), el voltaje resultante es invertido por consiguiente este valor se convierte en positivo por medio de un amplificador operacional en configuración inversora e inyectar en la planta por medio de la etapa de potencia y poder realizar el lazo cerrado, el esquema se presenta en la figura 4.42.

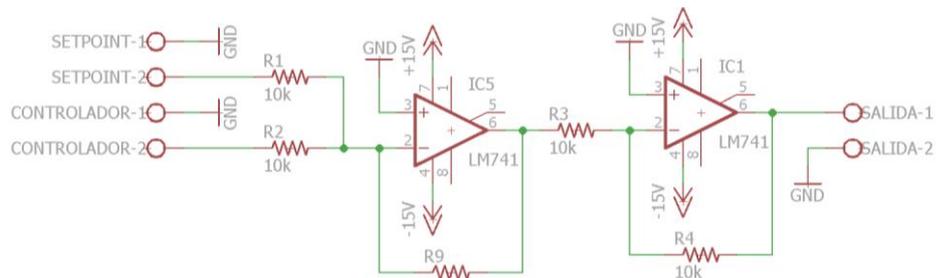


Figura 4.42 Voltaje de compensación.
Fuente: Autor

Para el actuador y el sensor se utilizó los mismos elementos electrónicos así como la conexión para el sistema de control a lazo abierto.

4.2 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

La verificación de la hipótesis se logra mediante pruebas experimentales realizadas sobre la planta (motor de corriente continua) tanto a lazo abierto como a lazo cerrado, en la cual los elementos que los constituyen fueron colocados en una protoboard para así obtener los resultados.

LAZO ABIERTO.

Montado cado uno de los elementos electrónicos en una protoboard se procedió a realizar las conexiones expuestas en los apartados anteriores, la cual se puede apreciar en el anexo B1, después se procedió a realizar las mediciones por medio

de un voltímetro para obtener el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada, a continuación en la tabla 4.2 se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 4.2 Error en estado estable a lazo abierto.

LAZO ABIERTO			
<i>SETPOINT (VOLTAJE)</i>	<i>SENSOR PLANTA (VOLTAJE)</i>	<i>ERROR ESTADO ESTABLE</i>	<i>% ERROR</i>
3.80	3.77	0.03	3.00%
3.60	3.56	0.04	4.00%
3.40	3.35	0.05	5.00%
3.20	3.14	0.06	6.00%
3.00	2.93	0.07	7.00%
2.80	2.74	0.06	6.00%
2.60	2.53	0.07	7.00%
2.40	2.32	0.08	8.00%
2.20	2.13	0.07	7.00%
2.00	1.92	0.08	8.00%
1.80	1.73	0.07	7.00%
1.60	1.54	0.06	6.00%
1.40	1.33	0.07	7.00%
1.20	1.14	0.06	6.00%
1.00	0.92	0.08	8.00%
0.80	0.72	0.08	8.00%
0.60	0.51	0.09	9.00%
0.40	0.31	0.09	9.00%

Fuente: Autor

Acorde a la tabla 4.2 se puede establecer que el error en estado estable permanece en lazo abierto debido a que la variable de salida es independiente de la variable de entrada (setpoint).

LAZO CERRADO.

Montado cada uno de los elementos electrónicos en una protoboard se procedió a realizar las conexiones expuestas en los apartados anteriores, la cual se puede apreciar en el anexo B2, después se procedió a realizar las mediciones pertinentes para establecer el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada para un control proporcional (P), control proporcional-integral (PI), control proporcional derivativo (PD) y control proporcional-integral-derivativo (PID) conforme a los resultados obtenidos en la sintonización del controlador presentado en este capítulo.

❖ CONTROL PROPORCIONAL.

A continuación en la tabla 4.3 se presenta los resultados obtenidos para este tipo de controlador ante diferentes pulsos de entrada.

Tabla 4.3 Error en estado estable control Proporcional.

LAZO CERRADO				
CONTROL PROPORCIONAL (P)				
SETPOINT (VOLTAJE)	SENSOR PLANTA (VOLTAJE)	ERROR ESTADO ESTABLE	% ERROR	% ERROR ESTADO ESTABLE IDEAL
3.80	3.756	0.044	4.40%	5.50%
3.60	3.562	0.038	3.80%	5.50%
3.40	3.358	0.042	4.20%	5.50%
3.20	3.154	0.046	4.60%	5.50%
3.00	2.960	0.040	4.00%	5.50%
2.80	2.770	0.030	3.00%	5.50%
2.60	2.550	0.050	5.00%	5.50%
2.40	2.356	0.044	4.40%	5.50%
2.20	2.164	0.036	3.60%	5.50%
2.00	1.963	0.037	3.70%	5.50%
1.80	1.758	0.042	4.20%	5.50%
1.60	1.560	0.040	4.00%	5.50%
1.40	1.360	0.040	4.00%	5.50%
1.20	1.170	0.030	3.00%	5.50%
1.00	0.952	0.048	4.80%	5.50%
0.80	0.752	0.048	4.80%	5.50%
0.60	0.553	0.047	4.70%	5.50%
0.40	0.354	0.046	4.60%	5.50%

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 4.3 se puede hacer mención al siguiente aspecto para este tipo de controlador, que el error en estado estable es menor o igual al 5% del error en estado estable obtenido de forma ideal, el valor real difiere del valor ideal por aspecto como calibración de los potenciómetros ya que en forma ideal se puede establecer parámetros con gran precisión, otro aspecto importante es la resolución del instrumento de medición ya que los mismo tiene un margen de error, además el motor contiene elementos mecánicos, por ende su comportamiento varia acorde a agentes como fricción, inercia, energización de la armadura, entre otros.

❖ **CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL.**

A continuación en la tabla 4.4 se presenta los resultados obtenidos para este tipo de controlador ante diferentes pulsos de entrada.

Tabla 4.4 Error en estado estable control Proporcional-Integral.

LAZO CERRADO				
CONTROL PROPOCIONAL-INTEGRAL (PI)				
SETPOINT (VOLTAJE)	SENSOR PLANTA (VOLTAJE)	ERROR ESTADO ESTABLE	% ERROR	% ERROR ESTADO ESTABLE IDEAL
3.80	3.795	0.005	0.50%	0.00%
3.60	3.594	0.006	0.60%	0.00%
3.40	3.397	0.003	0.30%	0.00%
3.20	3.194	0.006	0.60%	0.00%
3.00	2.995	0.005	0.50%	0.00%
2.80	2.793	0.007	0.70%	0.00%
2.60	2.595	0.005	0.50%	0.00%
2.40	2.392	0.008	0.80%	0.00%
2.20	2.194	0.006	0.60%	0.00%
2.00	1.993	0.007	0.70%	0.00%
1.80	1.794	0.006	0.60%	0.00%
1.60	1.593	0.007	0.70%	0.00%
1.40	1.394	0.006	0.60%	0.00%
1.20	1.193	0.007	0.70%	0.00%
1.00	0.992	0.008	0.80%	0.00%
0.80	0.793	0.007	0.70%	0.00%
0.60	0.593	0.007	0.70%	0.00%
0.40	0.394	0.006	0.60%	0.00%

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 4.4 se puede concluir el siguiente aspecto para este tipo de controlador, que el error en estado estable tiende a cero, mas no es cero como se obtiene de forma ideal debido a perturbaciones externas como el ruido, resistencia de los componentes electrónicos, calibración, elementos mecánicos del motor, pero sin embargo son resultados aceptables.

❖ **CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO.**

A continuación en la tabla 4.5 se presenta los resultados obtenidos para este tipo de controlador ante diferentes pulsos de entrada.

Tabla 4.5 Error en estado estable control Proporcional-Derivativo.

LAZO CERRADO				
CONTROL PROPOCIONAL-DERIVATIVO (PD)				
SETPOINT (VOLTAJE)	SENSOR PLANTA (VOLTAJE)	ERROR ESTADO ESTABLE	% ERROR	% ERROR ESTADO ESTABLE IDEAL
3.80	3.785	0.015	1.50%	4.60%
3.60	3.586	0.014	1.40%	4.60%
3.40	3.383	0.017	1.70%	4.60%
3.20	3.190	0.010	1.00%	4.60%
3.00	2.986	0.014	1.40%	4.60%
2.80	2.787	0.013	1.30%	4.60%
2.60	2.586	0.014	1.40%	4.60%
2.40	2.385	0.015	1.50%	4.60%
2.20	2.181	0.019	1.90%	4.60%
2.00	1.985	0.015	1.50%	4.60%
1.80	1.789	0.011	1.10%	4.60%
1.60	1.590	0.010	1.00%	4.60%
1.40	1.388	0.012	1.20%	4.60%
1.20	1.186	0.014	1.40%	4.60%
1.00	0.987	0.013	1.30%	4.60%
0.80	0.789	0.011	1.10%	4.60%
0.60	0.587	0.013	1.30%	4.60%
0.40	0.384	0.016	1.60%	4.60%

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 4.5 se puede concluir el siguiente aspecto para este tipo de controlador, el error en estado estable de forma real es menor o igual a 1.90% lo cual difiere del valor ideal que es de %4.6 obtenido por medio del programa Labview, este valor es justificado debido a que a través de software no se considera aspectos que interviene de forma directa en la planta como son perturbaciones externas debido el ruido, resistencia de los componentes electrónicos, calibración, elementos mecánicos del motor, además este tipo de controlador no es ideal para sistemas idealmente estables por consiguiente el error real varía considerablemente del error ideal.

❖ **CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO-INTEGRAL.**

A continuación en la tabla 4.6 se presenta los resultados obtenidos para este tipo de controlador ante diferentes pulsos de entrada.

Tabla 4.6 Error en estado estable control Proporcional-Integral-Derivativo.

LAZO CERRADO				
CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)				
SETPOINT (VOLTAJE)	SENSOR PLANTA (VOLTAJE)	ERROR ESTADO ESTABLE	% ERROR	% ERROR ESTADO ESTABLE IDEAL
3.80	3.798	0.002	0.20%	0.00%
3.60	3.593	0.007	0.70%	0.00%
3.40	3.392	0.008	0.80%	0.00%
3.20	3.198	0.002	0.20%	0.00%
3.00	2.997	0.003	0.30%	0.00%
2.80	2.791	0.009	0.90%	0.00%
2.60	2.596	0.004	0.40%	0.00%
2.40	2.392	0.008	0.80%	0.00%
2.20	2.195	0.005	0.50%	0.00%
2.00	1.993	0.007	0.70%	0.00%
1.80	1.798	0.002	0.20%	0.00%
1.60	1.594	0.006	0.60%	0.00%
1.40	1.395	0.005	0.50%	0.00%
1.20	1.194	0.006	0.60%	0.00%
1.00	0.993	0.007	0.70%	0.00%
0.80	0.791	0.009	0.90%	0.00%
0.60	0.594	0.006	0.60%	0.00%
0.40	0.392	0.008	0.80%	0.00%

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 4.6 se puede concluir el siguiente aspecto para este tipo de controlador, el error en estado estable tiende a cero, mas no es cero debido a perturbaciones externas como el ruido, resistencia de los componentes electrónicos, calibración de los parámetros, elementos mecánicos del motor lo que afecta directamente del valor obtenido por medio de Labview, ya que este valor es de forma ideal, pero sin embargo son resultados aceptables.

Finalmente hay que tener muy presente que mientras más parámetros se tenga que controlar al momento de calibrar el controlador más difícil será la sintonización del mismo, por eso es recomendable realizar un estudio del sistema o proceso a controlar y según la precisión que se deba aplicar, seleccionar el controlador más adecuado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

Una vez obtenido los resultados de forma ideal a través de simulación, así como resultados reales a través del montaje de los elementos electrónicos en una protoboard para sistemas de control a lazo abierto y cerrado de voltaje, se pueden formular las siguientes conclusiones de la investigación.

- Los elementos constitutivos para un sistema de control a lazo abierto son: Actuador (encargado de accionar el motor de corriente continua), Planta (constituye el motor de corriente continua), Sensor (encoder de barrera) y Transductor (convertidor de frecuencia a voltaje) ubicados respectivamente.
- Los instrumentos de medición para un sistema de control a lazo abierto son: Medidores de voltaje digitales ubicados en la señal de entrada (setpoint) y en la conversión de frecuencia a voltaje; y un Encoder el cual permite determinar las revoluciones por minuto de un motor de corriente continua.
- Los elementos constitutivos para un sistema de control a lazo cerrado son: Restador (realiza la resta algebraica entre la señal de entrada o setpoint y la señal de planta; y con la cual se cierra el sistema de control), Controlador (adecua la señal de salida para controlar la planta), Actuador (acciona el motor), Planta (motor de corriente continua), Sensor (Encoder de barrera) y Transductor (Convertidor de frecuencia a voltaje) ubicados respectivamente.
- Los instrumentos de medición para un sistema de control a lazo cerrado son: Medidores de voltaje digitales ubicados en la señal de entrada (setpoint), señal de salida del controlador y en la conversión de frecuencia a voltaje; y un Encoder el cual permite determinar las revoluciones por minuto de un motor de corriente continua.

- El error en estado estable en un sistema de control a lazo abierto de voltaje de un motor de corriente continua permanece en el tiempo debido a que la señal de salida es independiente de la señal de entrada.
- El error en estado estable en un sistemas de control a lazo cerrado de voltaje de un motor de corriente continua tiende al mínimo permisible acorde a cada una de las configuraciones del controlador, debido a que la señal de salida es dependiente de la señal de entrada, es decir, ayuda a tener el control total de la variable de salida con respecto a un valor de referencia.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Determinar la linealidad del sistema a controlar antes de aplicar un control PID o sus variantes.
- Al sintonizar los diferentes controladores por medio de software los parámetros obtenidos en primera instancia deben tomarse como un primer ajuste en el proceso del diseño, puesto que no se consideró agentes externos como el ruido, impedancias de los elementos electrónicos ya que se trabajó de forma ideal.
- Al sintonizar los diferentes controladores por medio de software hay que tener en cuenta que una calibración no proporcional puede generar valores de resistencias negativas lo cual indica que se debe reajustar el controlador.
- Para tener una mayor precisión al momento de medir las revoluciones por minuto del motor por medio del sensor de barrera se debe realizar un mayor número de ranuras en el encoder.
- Se recomienda incorporar una resistencia en paralelo con el capacitor electrolítico de $10\mu f$ en la parte integral del controlador para evitar que se sature el amplificador operacional debido a las bajas frecuencias que se maneja, con lo cual se garantiza un buen funcionamiento.
- Se recomienda implementar seguidores de tensión en cada etapa de controlador, es decir después del restador, a la salida del controlador PID y en el voltaje de compensación del controlador PID para un aislamiento de etapas, refuerzo de corriente y adaptación de impedancias.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 DATOS INFORMATIVOS.

6.1.1 TEMA.

Implementación de un módulo didáctico de sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado de voltaje para facilitar el proceso de aprendizaje en el laboratorio de Control y Automatización Industrial de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

6.1.2 INSTITUCIÓN EJECUTORA.

Universidad Técnica de Ambato.

6.1.3 BENEFICIARIOS.

Estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica.

6.1.4 UBICACIÓN.

Ambato-Ecuador.

6.1.5 EQUIPO TÉCNICO RESPONSABLE.

Luis Fabián Caiza Lema, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA.

El proyecto de investigación cuyo tema es sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje para determinar el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de control y automatización de la FICM, según

indagaciones en FICM no existe un módulo didáctico de control proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integral-derivativo (PID) para realizar ensayos para el desarrollo y consolidación de conocimientos entre la teoría y la práctica para sistemas de control cercanos a la realidad.

6.3 JUSTIFICACIÓN.

La finalidad de este proyecto es implementar un controlador P, PI, PD y PID analógico con un adecuado control electrónico, obteniendo así un módulo didáctico que brinda una interfaz gráfica al usuario con la cual se podrá analizar los diferentes parámetros conforme la sintonización realizada previamente acorde al proceso en estudio, brindando un mejor aumento y consolidación de conocimientos hacia los estudiantes en cuanto a sistemas de control, puesto que está ligado entre teórico y práctico.

6.4 OBJETIVOS.

6.4.1 OBJETIVO GENERAL.

Implementar un módulo didáctico de control en lazo abierto y cerrado de voltaje para facilitar el proceso de aprendizaje en el laboratorio de Control y Automatización Industrial de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar una interfaz gráfica por medio de software en tiempo real que permita visualizar el error en estado estable para sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado de voltaje.
- Realizar pruebas de funcionamiento en lazo abierto y en lazo cerrado (P, PI, PD, PID) de voltaje.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD.

El presente proyecto de investigación es totalmente factible, ya que se sustenta en los resultados obtenidos en el capítulo IV, por consiguiente se cuenta en el mercado nacional con todos los componentes que lo conforma.

6.5.1 EQUIPOS REQUERIDOS.

Para el módulo didáctico de control se requiere de una fuente de poder asimétrica de $+15/-15$ voltios, amplificadores operacionales, sensor de barrera, potenciómetros lineales, potenciómetros industriales de precisión de 10 vueltas, arduino uno, pantalla LCD de 2×16 , cables de instalación y un tarjeta de adquisición de datos.

6.6 FUNDAMENTACIÓN.

6.6.1 ELEMENTOS DEL MÓDULO DIDÁCTICO.

6.6.1.1 VOLTÍMETRO.

El voltímetro seleccionado para esta investigación es un voltímetro digital con la cual se podrá tener una visualización exacta del voltaje en sus diferentes etapas con una pantalla iluminada ideal para este proyecto, la cual se presenta en la figura 6.1.



Figura 6.1 Voltímetro digital.
Fuente: El Autor

Las características técnicas de este voltímetro son las siguientes:

- Rango: VDC 0-99.9
- Precisión: 1% (+/- 1 Dígito)
- Fuente de Alimentación: 4.5-30 VDC

6.6.1.2 ARDUINO UNO.

El Arduino Uno es una placa electrónica basada en el ATmega328 que cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 pueden utilizarse para salidas PWM), 6 entradas analógicas, con 16 MHz de velocidad, cuenta con conexión USB, un conector de alimentación. En la tabla 6.1 se presenta las características en detalle de este dispositivo.

Tabla 6.1 Características Arduino Uno.

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 – 12V
Voltaje de entrada (Límite)	6 – 20V
Pines para entrada- salida digital.	14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
Pines de entrada analógica.	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

Fuente: (Arduino, 2010)

Hoy en día arduino se ha convertido en una herramienta con grandes prestaciones pues tiene código libre para programación y con un costo relativamente bajo para su adquisición; para este proyecto de investigación se utilizó para la adquisición de los pulsos del encoder, procesarlos y visualizarlos en una pantalla LDC de 2x16.



Figura 6.2 Arduino Uno.

Fuente: Autor

A continuación es la figura 6.3 se presenta el diagrama esquemático de la conexión de arduino, encoder y pantalla LDC de 2x16 para poder visualizar las revoluciones

por minuto del motor, en el anexo B3 se presenta el código fuente para poder visualizar las RPM en la pantalla LCD de 2x16.

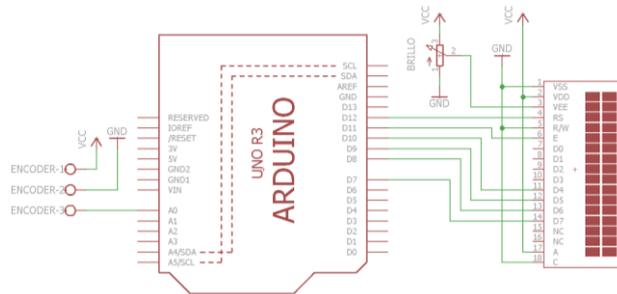


Figura 6.3 Diagrama esquemático de arduino, LCD y encoder.

Fuente: Autor

6.6.1.3 INTERFAZ GRÁFICA.

Para la interfaz gráfica en tiempo real se realizó en el software Labview de National Instruments, la cual permite visualizar el error en estado estable para sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado de voltaje.

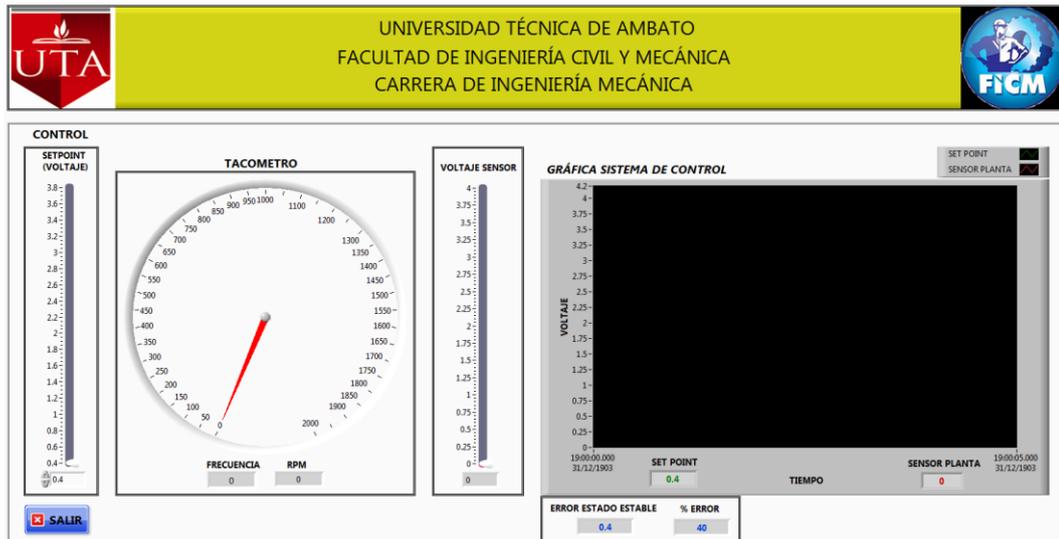


Figura 6.4 Interfaz gráfica del sistema de control a lazo abierto y a lazo cerrado.

Fuente: Autor

El código fuente de la interfaz gráfica del sistema de control se presenta en el anexo B4.

6.6.1.4 DIAGRAMA DE FLUJO.

En la figura 6.5 se presenta el diagrama de flujo del módulo didáctico.

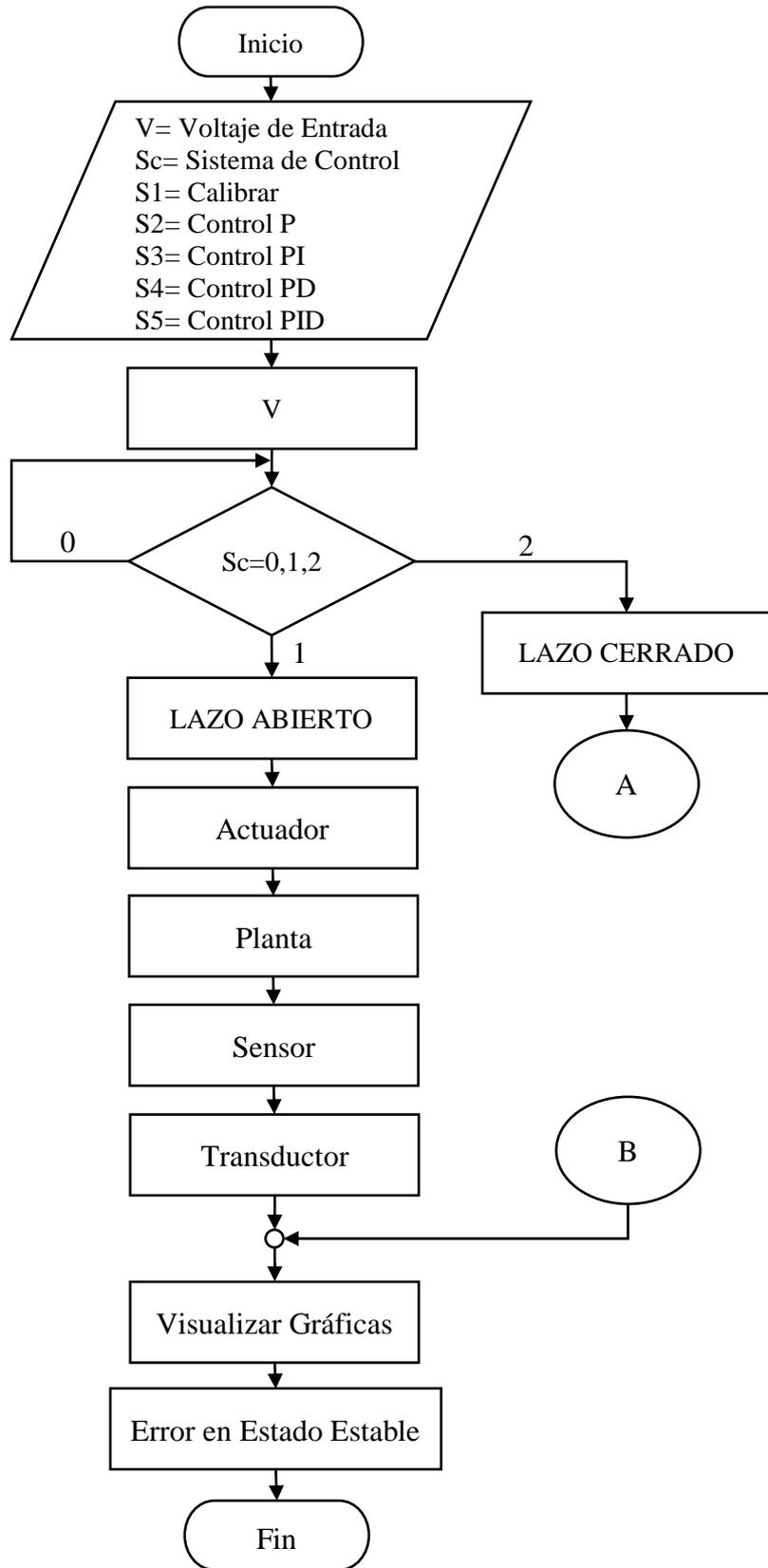


Figura 6.5 Diagrama de flujo.
Fuente: Autor

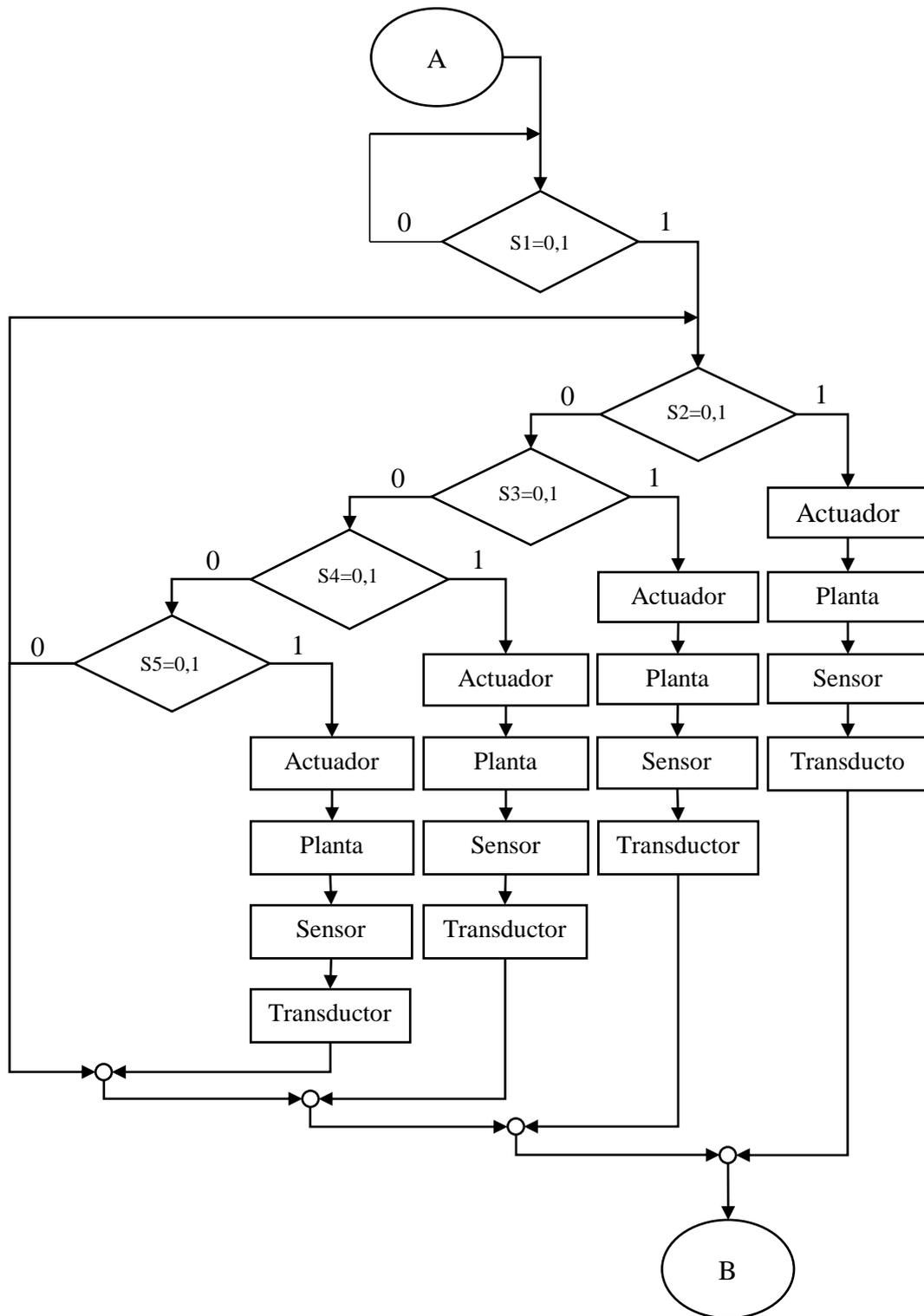


Figura 6.6 Diagrama de flujo.
Fuente: Autor

- La tercera fase está conformado por 4 capacitores electrolíticos de $2200\mu f$ y 2 capacitores poliéster de $100nf$ para filtrar la señal continua y eliminar los picos tanto para la señal positiva como negativa.
- La cuarta etapa está conformado por 2 circuitos integrados que son el *LM7815* y *LM 7915* que tienen como función generar un voltaje constante de $+15V$ y $-15V$ respectivamente y 2 diodos *1N4004* de protección.
- La quinta etapa lo conforman 2 capacitores poliéster de $100nf$, 2 capacitores electrolíticos de $100\mu f$, 2 capacitores electrolíticos de $10\mu f$ cuya función principal es reducir el rizo de la señal positiva y negativa y finalmente 2 diodos *1N4004* para evitar daños del circuito por tensiones elevadas y contra polaridad invertida.

A continuación se presenta en la figura 6.8 el diseño elaborado para la realización del circuito impreso de la fuente de poder asimétrica de ± 15 Voltios.

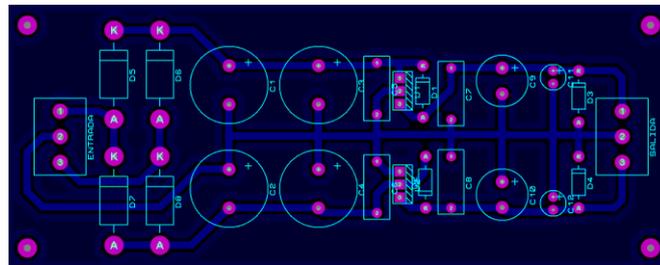


Figura 6.8 Ruteo circuito impreso fuente de poder asimétrica.
Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño de las pista se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.9.

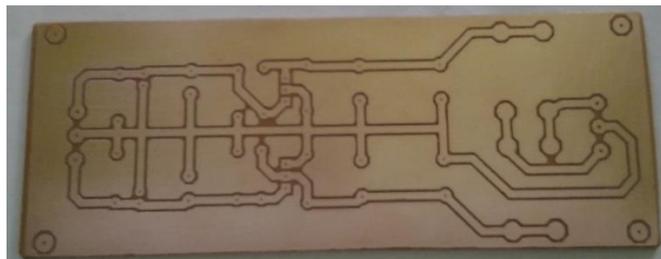


Figura 6.9 Fabricación fuente de poder asimétrica.
Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes como se presenta en la figura 6.10.



Figura 6.10 Fuente de poder asimétrica de $\pm 15V$ con filtración de ruido.
Fuente: Autor

6.6.1.6 CONTOLADOR PID

Para el diseño y construcción del controlador PID y sus variantes se tomó en cuenta los siguientes criterios acorde a las necesidades de precisión y al mismo tiempo ser un controlador estable ante la acción de agentes externos como lo es ruido.

- Se utilizaron resistencias de película de carbón pues tienen una gran durabilidad, alta estabilidad e inmunidad a influencias externas y bajo nivel de ruido, además no presenta cambios en su resistencia al momento de ser soldados por lo que brindan una mayor confiabilidad.
- Se utilizaron capacitores electrolíticos para disminuir los picos o rizados de la señal continua en la alimentación positiva y negativa de los amplificadores operacionales, a más que brindan una mejor estabilidad del sistema.
- Para el ajuste del control se utilizaron potenciómetros lineales para establecer los parámetros deseados, por consiguiente se implementó dos potenciómetros en serie: uno de $1M\Omega$ de 1 vuelta y otro de $10K\Omega$ de 10 vuelta para obtener una mayor precisión al momento de su calibración.
- En el controlador integral (I) se introdujo un botón de *reset*, pues tiene como finalidad eliminar el resultado de cargas anteriores, lo cual ayuda a tener un mejor resultado al momento de su funcionamiento, también se introdujo una resistencia de $10K$ en paralelo con el capacitor para evitar que el amplificador se sature a baja frecuencia.

- Para el caso de los amplificadores operaciones se utilizaron zócalos para poder colocarlos en el circuito impreso pues una alta potencia del cautín al momento de soldarlos podría dañar los mismos, además que en caso de daños sean fáciles de cambiarlos.
- Para la conexión del controlador se utilizaron borneras, puesto que; en caso de daño de los componentes sean fáciles de cambiar con lo que no es necesario trabajar con la placa electrónica y así evitar daños al momento de su manipulación, el cable que se utilizó para la conexión es multihilos para disminuir el ruido que podría generarse a la hora de su funcionamiento.
- Finalmente para el diseño se consideró la estabilidad del sistema, por consiguiente se introdujeron resistencias entre el pin no inversor de cada amplificador operacional LM741 y tierra.

Un aspecto muy importante a la hora de utilizar amplificadores operaciones es poner seguidores de tensión al inicio de cada uno de los proceso, pues sirve como aislamiento de cada etapa, refuerzo de corriente y adaptación o acoplamiento de impedancias. En la figura 6.11 se presenta el esquema del seguidor de tensión con dos resistencias del mismo valor para que tenga una ganancia igual a uno, en la cual el voltaje de entrada (V_{in}) va a ser igual al voltaje de salida (V_{out}).

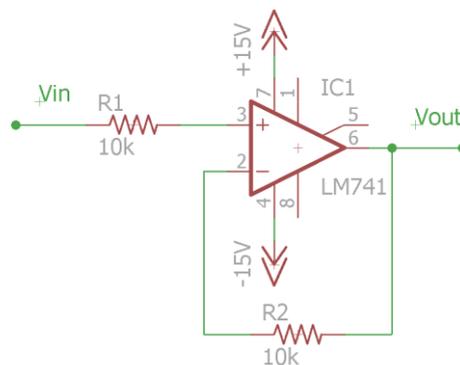


Figura 6.11 Seguidor de tensión.
Fuente: Autor

Considerando estos criterios se procedió a realizar el diseño esquemático del controlador PID y sus variantes, la cual se presenta en la figura 6.12.

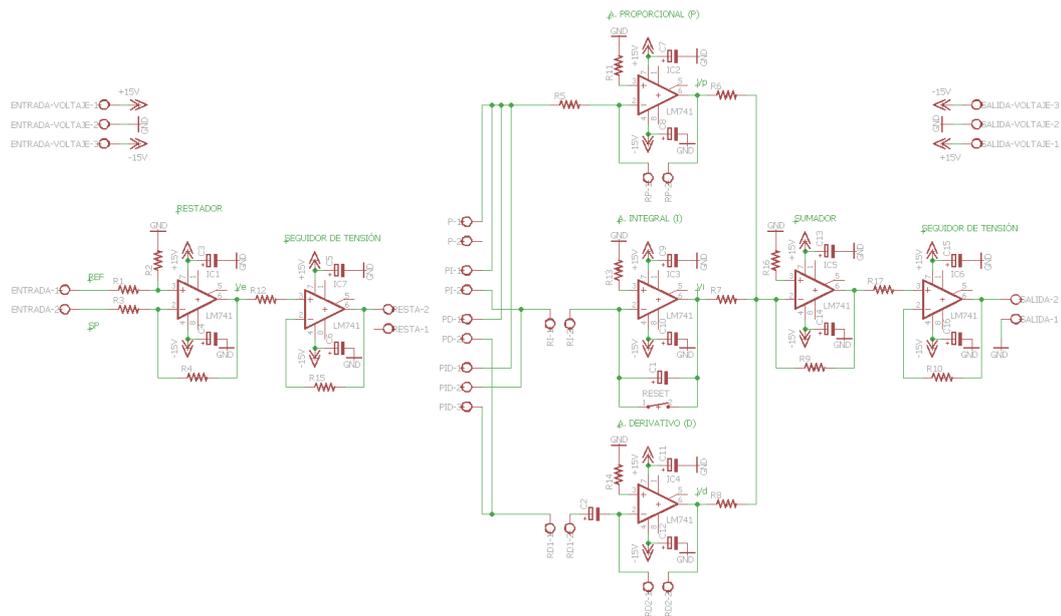


Figura 6.12 Diseño esquemático controlador PID y variantes.
Fuente: Autor

A continuación se presenta en la figura 6.13 el diseño del circuito impreso del controlador PID y sus variantes con sus respectivos conectores, zócalos y sus elementos para su posterior fabricación.

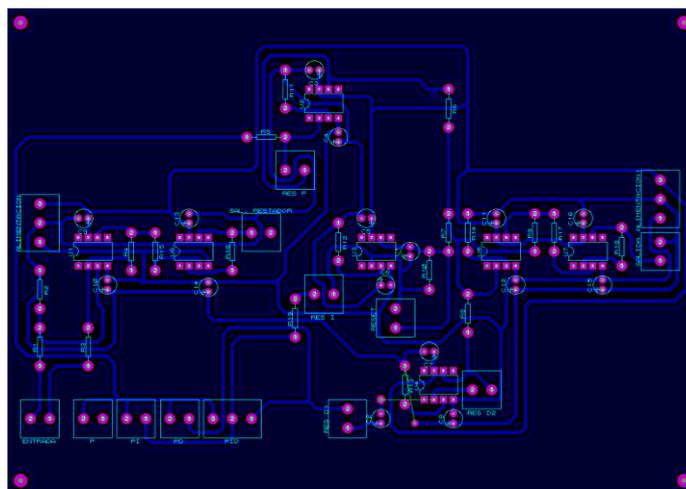


Figura 6.13 Ruteo circuito impreso controlador PID y variantes.
Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño de las pista del controlador se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.14.

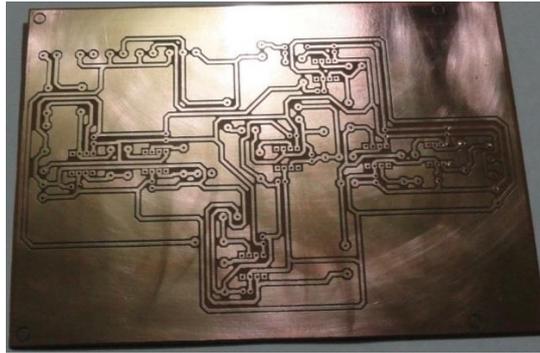


Figura 6.14 Fabricación controlador PID y variantes.

Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes como se presenta en la figura 6.15.



Figura 6.15 Controlador PID y variantes.

Fuente: Autor

6.6.1.7 VOLTAJE DE COMPENSACIÓN

La señal de salida del controlador PID debe ser adecuada para poder aplicar la etapa de potencia como ya se hizo mención en el capítulo 4, en la figura 6.16 se presenta el diseño esquemático del voltaje de compensación, en la cual se ha considerado la estabilidad del sistema, por consiguiente se ha introducido resistencias y capacitores como filtros y un seguidor de tensión.

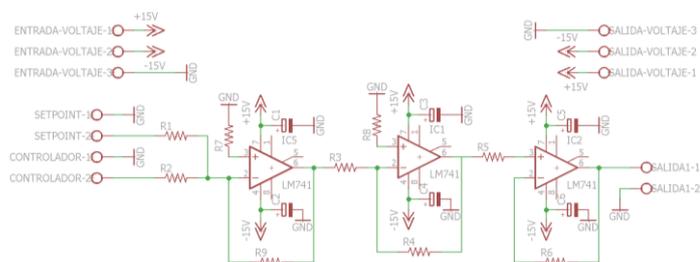


Figura 6.16 Diseño esquemático voltaje de compensación.

Fuente: Autor

A continuación se presenta en la figura 6.17 el diseño del circuito impreso del voltaje de compensación del controlador PID y variantes.

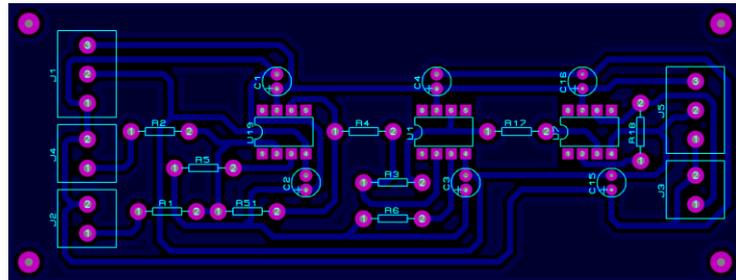


Figura 6.17 Ruteo circuito impreso voltaje de compensación.
Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño de las pista del voltaje de compensación se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.18.

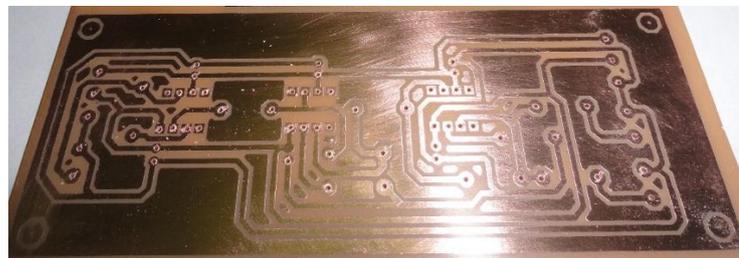


Figura 6.18 Fabricación del voltaje de compensación.
Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes como se presenta en la figura 6.19.



Figura 6.19 Voltaje de compensación del controlador.
Fuente: Autor

6.6.1.8 ACONDICIONADORES DE SEÑAL

REDUCCIÓN DE VOLTAJE EN FORMA LINEAL.

Un acondicionador de señal juega un papel muy importante a la hora de trabajar con tarjetas de adquisición de datos, puesto que; por lo general las mismas trabajan con valores de entrada de voltaje máximo de 5 voltios, y un voltaje superior puede dañar las mismas, por consiguiente es necesario fabricar un acondicionador de señal para que realice la conversión lineal de 0V a 12V a un valor de 0V a 5V, en la figura 6.20 se presenta un acondicionador de señal de voltaje.

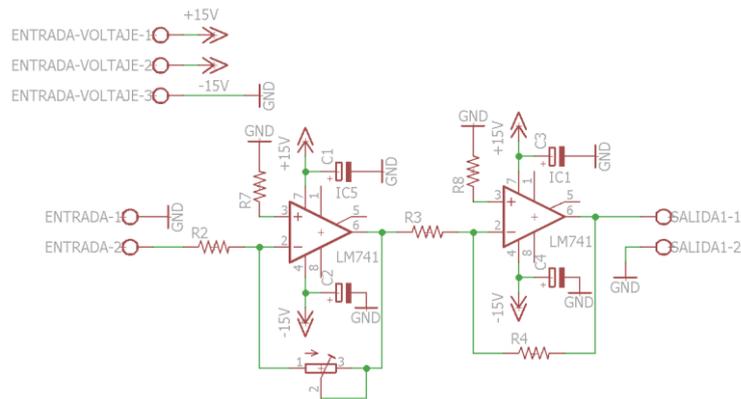


Figura 6.20 Diseño esquemático acondicionador de 0V-12V a 0V-5V.

Fuente: Autor

A continuación se presenta en la figura 6.21 el diagrama esquemático del acondicionador de voltaje de reducción, la cual consta de 2 amplificadores operacionales LM741 configurados como inversores, un potenciómetro que cumple la función de poder calibrar el voltaje indicado y filtros a la entrada positiva y negativa de alimentación de los amplificadores para reducir el ruido.

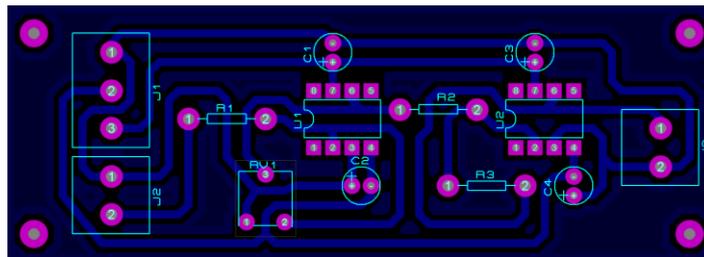


Figura 6.21 Ruteo circuito impreso acondicionador de 0V-12V a 0V-5V.

Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño de las pista del acondicionador de voltaje de reducción se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.22.

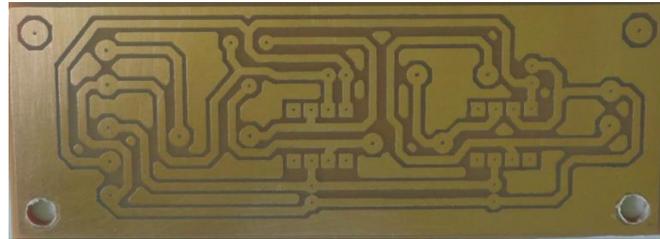


Figura 6.22 Fabricación acondicionador de 0V-12V a 0V-5V.
Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes.

AMPLIFICACIÓN DE VOLTAJE EN FORMA LINEAL.

Su función es aumentar el voltaje de salida en forma lineal con referencia al voltaje de entrada, para este proyecto de investigación se utilizó esta configuración para poder acondicionar la señal emitida por la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments, puesto que el máximo voltaje de salida de la NI DAQ 6008 es de 5V , en la figura 6.23 se presenta el acondicionar de señal de voltaje.

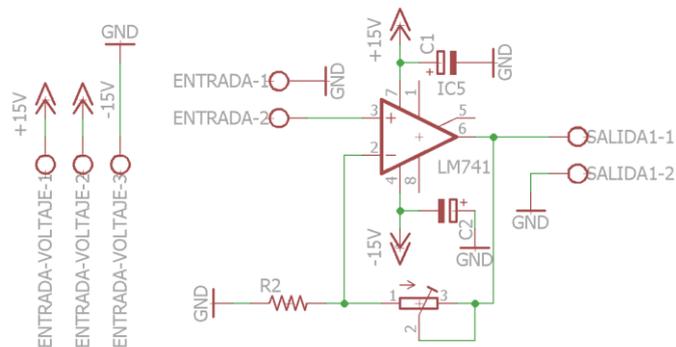


Figura 6.23 Diseño esquemático acondicionador de 0V-5V a 0V-12V.
Fuente: Autor

A continuación se presenta en la figura 6.24 el diagrama esquemático del acondicionador de voltaje de aumento de forma lineal, la cual consta de 1 amplificador operacional LM741 configurado como no inversor, un potenciómetro

que cumple la función de poder calibrar el voltaje y filtros a la entrada positiva y negativa de alimentación del amplificador para reducir el ruido.

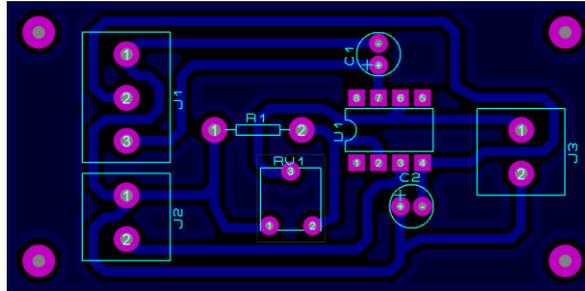


Figura 6.24 Ruteo circuito impreso acondicionador de 0V-5V a 0V-12V.
Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño del acondicionador de voltaje de amplificación se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.25.

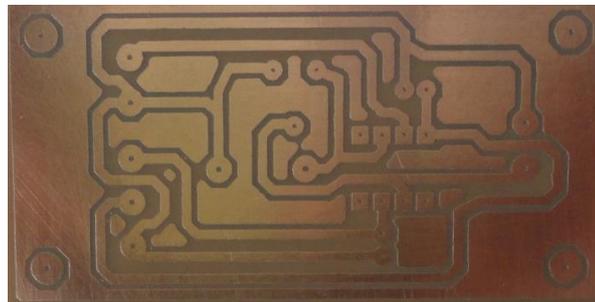


Figura 6.25 Fabricación acondicionador de 0V-5V a 0V-12V.
Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes.

En la figura 6.26 se presenta el montaje de los componentes electrónicos para el acondicionar de señal de aumento y de reducción de voltaje utilizado para este proyecto de investigación.

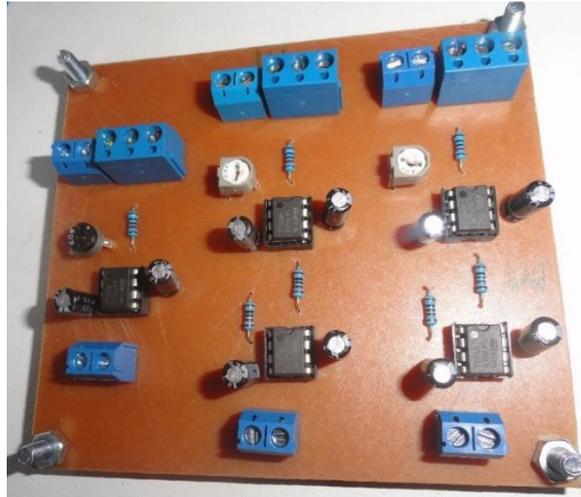


Figura 6.26 Acondicionadores de señal de voltaje.
Fuente: Autor

6.6.1.9 SELECTOR DE POSICIONES.

Para el diseño y construcción del selector de posiciones para establecer el Control Proporcional (P), Control Proporcional-Integral (PI), Control Proporcional-Derivativo (PD) o Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) del sistema de control a lazo cerrado de voltaje se presenta el diseño esquemático en la figura 6.27.

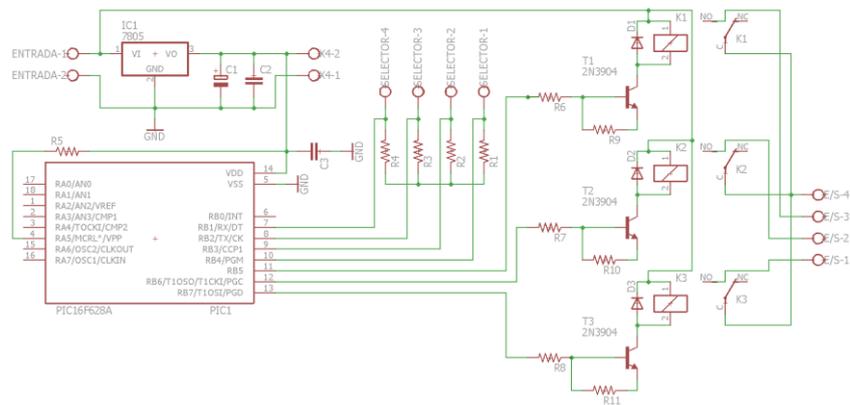


Figura 6.27 Diseño esquemático selector de posiciones para lazo cerrado.
Fuente: Autor

De la figura 6.27 se puede apreciar que el pic16f628a tiene la función de controlar cada uno de los relés los cuales activan o desactivan ya sea la acción proporcional, integral o derivativa conforme el requerimiento del usuario. A continuación se

presenta en la figura 6.28 el diagrama esquemático del selector de posiciones para el control a lazo cerrado y en el anexo B5 el código fuente del pic16f628a.

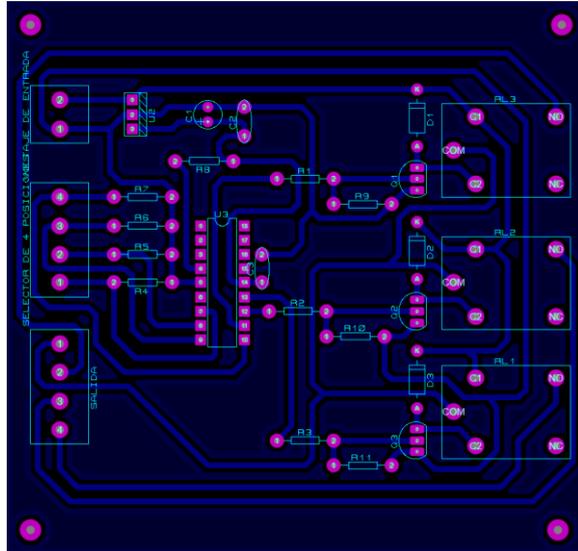


Figura 6.28 Ruteo circuito impreso selector de posiciones para lazo cerrado.
Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño de las pista del selector de posiciones para lazo cerrado se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.29.

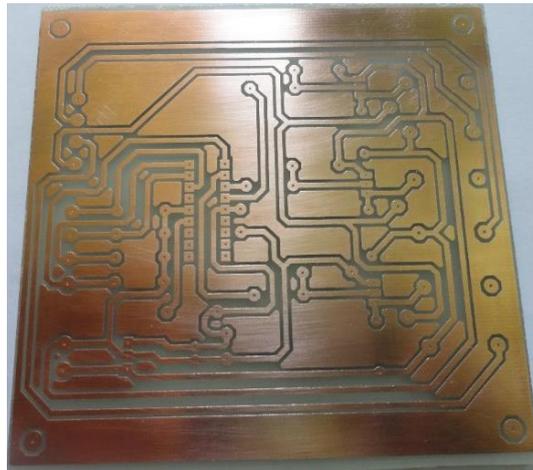


Figura 6.29 Fabricación selector de posiciones para lazo cerrado.
Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes, el cual se presenta en la figura 6.30.

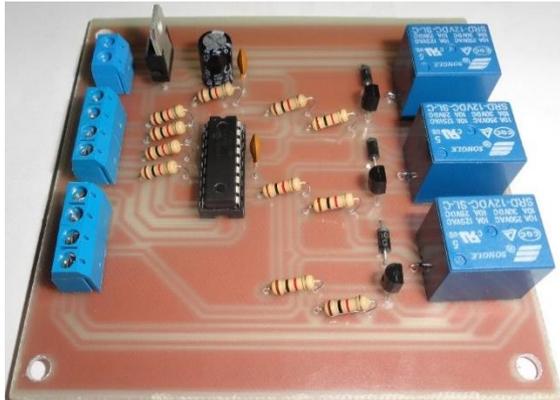


Figura 6.30 Selector de posiciones para lazo cerrado.
Fuente: Autor

6.6.1.10 ETAPA DE POTENCIA

La etapa de potencia es la etapa final de proceso de control, debido a que la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6008 de National Instruments es de control y no de potencia, como ya se manifestó en el capítulo 4.

En la figura 6.31 se presenta el ruteado del circuito, en la cual se utilizó el integrado LM317 que tiene la ventaja de ser directamente proporcional entre el voltaje de entrada con el de salida y con una particularidad especial que el amperaje aumenta acorde a la fuente de alimentación externa.

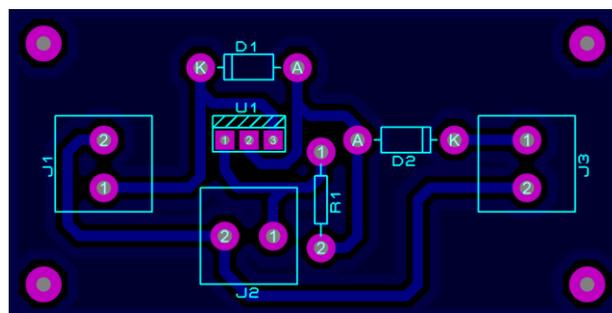


Figura 6.31 Ruteo circuito impreso etapa de potencia.
Fuente: Autor

Una vez obtenido el diseño de las pista para la etapa de potencia se procedió a realizar la placa electrónica por el método de transferencia de calor (método de la plancha), el resultado obtenido se presenta en la figura 6.32.

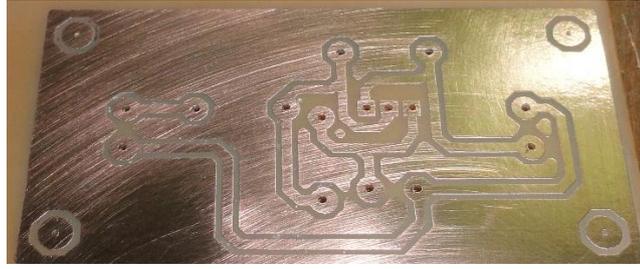


Figura 6.32 Fabricación etapa de potencia.

Fuente: Autor

Finalmente se procedió al taladrado de los diferentes agujeros para el posterior montaje y soldadura de los componentes, el resultado obtenido se presenta en la figura 6.33.

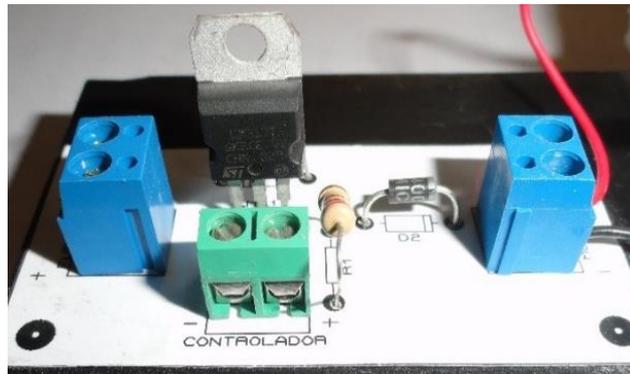


Figura 6.33 Etapa de potencia del motor de corriente continua.

Fuente: Autor

6.7 METODOLOGÍA.

Al culminar con el diseño del banco de pruebas se procede a la construcción de la misma, para esta etapa se debe tomar en cuenta la disposición de cada uno de los elementos electrónicos para que sean cuidadosamente ubicados, de tal manera que cumplan con la función para la cual fueron diseñados, es decir completamente didáctico.

6.7.1 TABLERO.

Para la construcción del tablero se utilizó una plancha de 2mm en acero negro como se presenta en la figura 6.34.



Figura 6.34 Plancha de 2mm en acero negro

Fuente: Autor

Adquirido el material se procedió al cortado con las siguientes medidas 90mm x 1220mm para formar la parte delantera, la cual fue doblada para formar una chapa metálica, para la parte trasera se procedió a un corte de 70mm x 1220mm. Para la estructura se procedió a la adquisición de tubos en acero negro como se presenta en la figura 6.35, de 25mm x 25mm x 1.5mm, cortados de la siguiente manera: 4 tubos de 1400mm para formar la estructura del tablero, 2 tubos de 1220mm y 2 de 400mm para formar la una mesa que sirva de soporte para los instrumentos al momento de tomar datos y finalmente 2 tubos de 1000mm para formar el soporte inferior.



Figura 6.35 Tubo de 25mm x 25mm x 1.5 en acero negro.

Fuente: Autor

El tablero cortado, soldado y ubicado correctamente los orificios para los componentes, se procedió al pintado del mismo como se presenta en la figura 6.36.



Figura 6.36 Perforación para los elementos electrónicos.

Fuente: Autor

6.7.2 SEÑALIZACIÓN DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.

Para la representación didáctica de los circuitos electrónicos se procedió al cerigrafiado de los mismos, como se presenta en la figura 6.37.

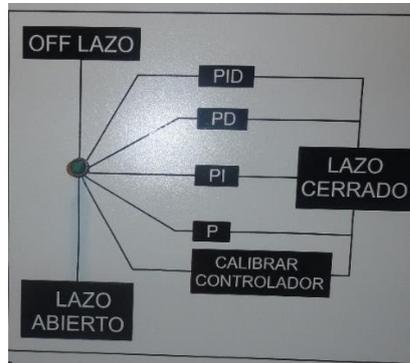


Figura 6.37 Señalización del circuito electrónico.

Fuente: Autor

6.7.3 UBICACIÓN DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS.

Realizado la señalización de los circuitos electrónicos se procedió a la ubicación de los distintos elementos electrónicos como son: pantalla LCD, potenciómetros de una vuelta y multivoltas, jacks y selector de posiciones, los cuales se presentan en la figura 6.38.

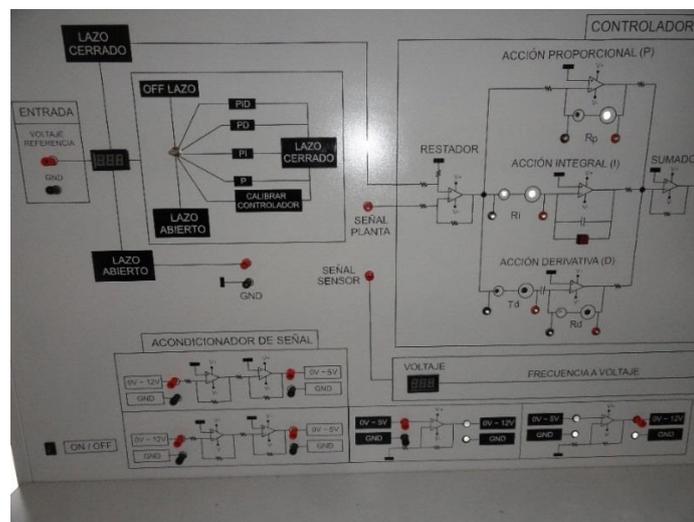


Figura 6.38 Ubicación de los elementos electrónicos.

Fuente: Autor

6.7.4 CABLEADO Y SOLDADO.

El cableado a través de canaletas y el soldado de los elementos electrónicos se realizaron a la par, como se presenta en la figura 6.39.

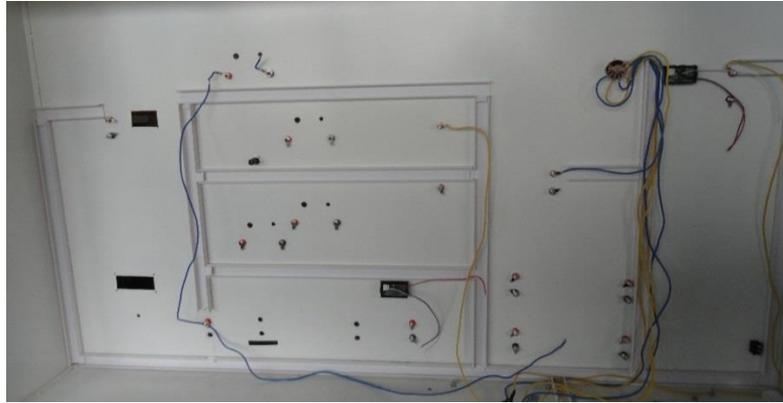


Figura 6.39 Cableado y soldado de los elementos electrónicos.
Fuente: Autor

6.7.5 BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO.

El banco de pruebas a lazo abierto y cerrado de voltaje es el encargado de realizar un proceso de control preestablecido acorde a una consigna de referencia y los parámetros asignados a través de potenciómetros de alta precisión para tender el error al mínimo, como se presenta en la figura 6.40.

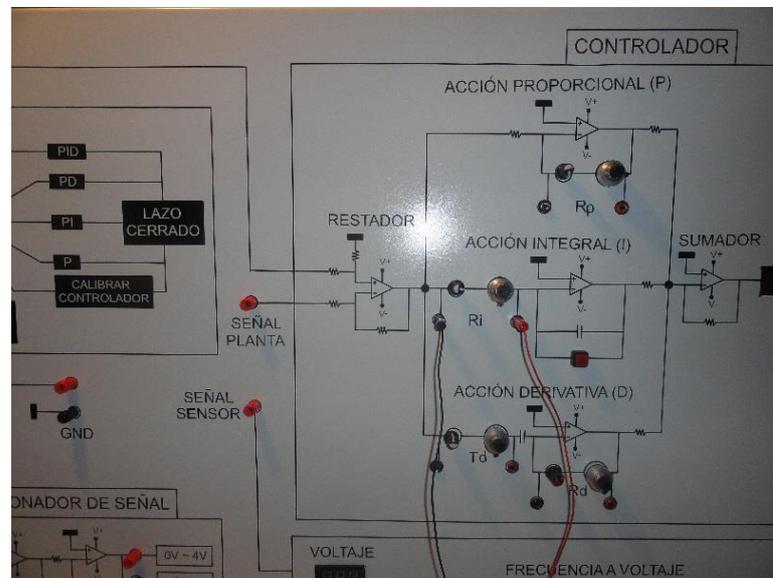


Figura 6.40 Banco de pruebas didáctico de lazo abierto y cerrado.
Fuente: Autor

A continuación se presenta los resultados obtenidos por medio del software Labview para la toma de datos en tiempo real del banco de pruebas didáctico de sistemas de control a lazo abierto y cerrado de voltaje para un motor de corriente continua.

6.7.5.1 LAZO ABIERTO.

Para el sistema de control a lazo abierto ante diferentes pulsos de entrada se presenta en la figura 6.41, en el cual si bien el sistema trata de compensar la variación de voltaje, el error que se genera en estado estable es alto, ya que la señal de salida es independiente de la señal de entrada.

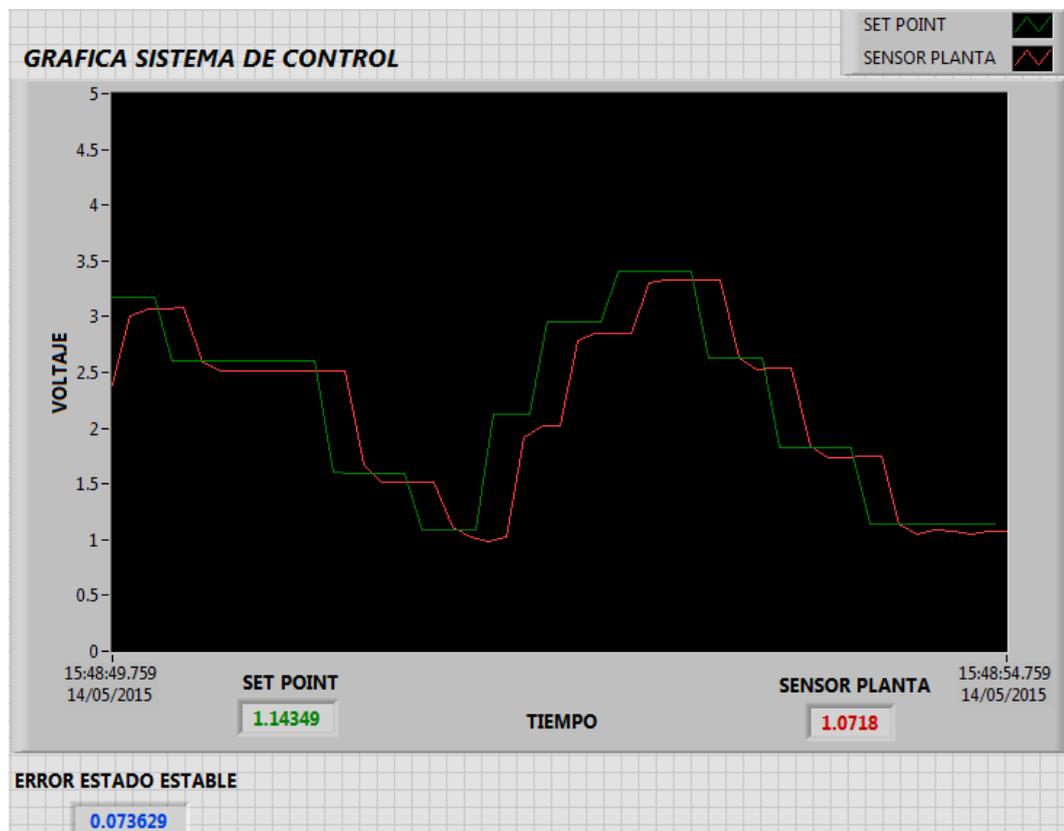


Figura 6.41 Control a lazo abierto de voltaje para un motor DC.

Fuente: Autor

6.7.5.2 LAZO CERRADO.

En el sistema de control a lazo cerrado hay que tener en presente que, la misma cuenta de un control Proporcional (P), control Proporcional-Integral (PI), control

Proporcional-Derivativo (PD) y control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), por consiguiente se presenta el análisis de cada uno de ellos.

CONTROL PROPORCIONAL (P).

Para el sistema de control Proporcional se presenta en la figura 6.42, en la cual reacciona el sistema ante diferentes pulsos de entrada; se puede apreciar claramente que la señal de salida está relacionada directamente con la señal de entrada generando así un sistema de control a lazo cerrado.

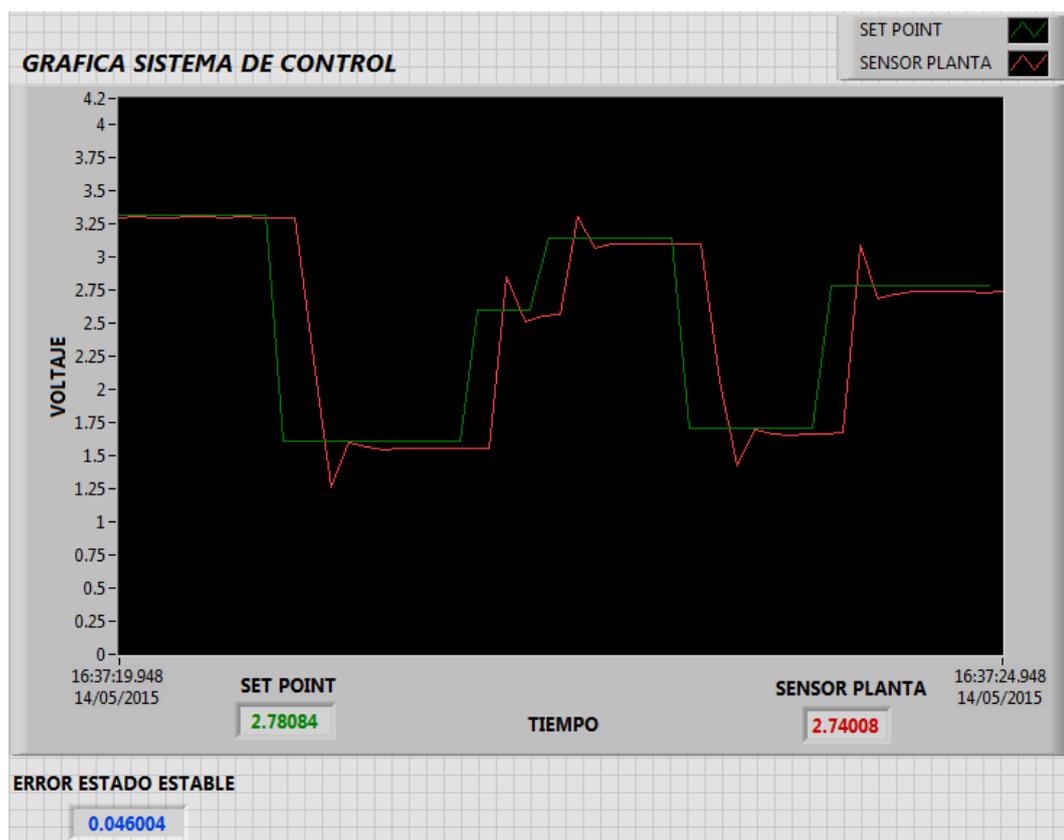


Figura 6.42 Control Proporcional para un motor DC.

Fuente: Autor

De la figura 6.42 se puede establecer que el sistema reacciona muy rápido ante los diferentes pulsos de entrada de voltaje, aunque el sobrepico es demasiado busco, cumple con su función específica la cual es reduce el error en estado estable pero aunque no lo elimina puesto que la señal de control es proporcional al error de control cuando estos son pequeños.

CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL (PI).

El control Proporcional-Integral se presenta en la figura 6.43, en la cual al sistema se le ha aplicado diferentes pulsos de entrada.

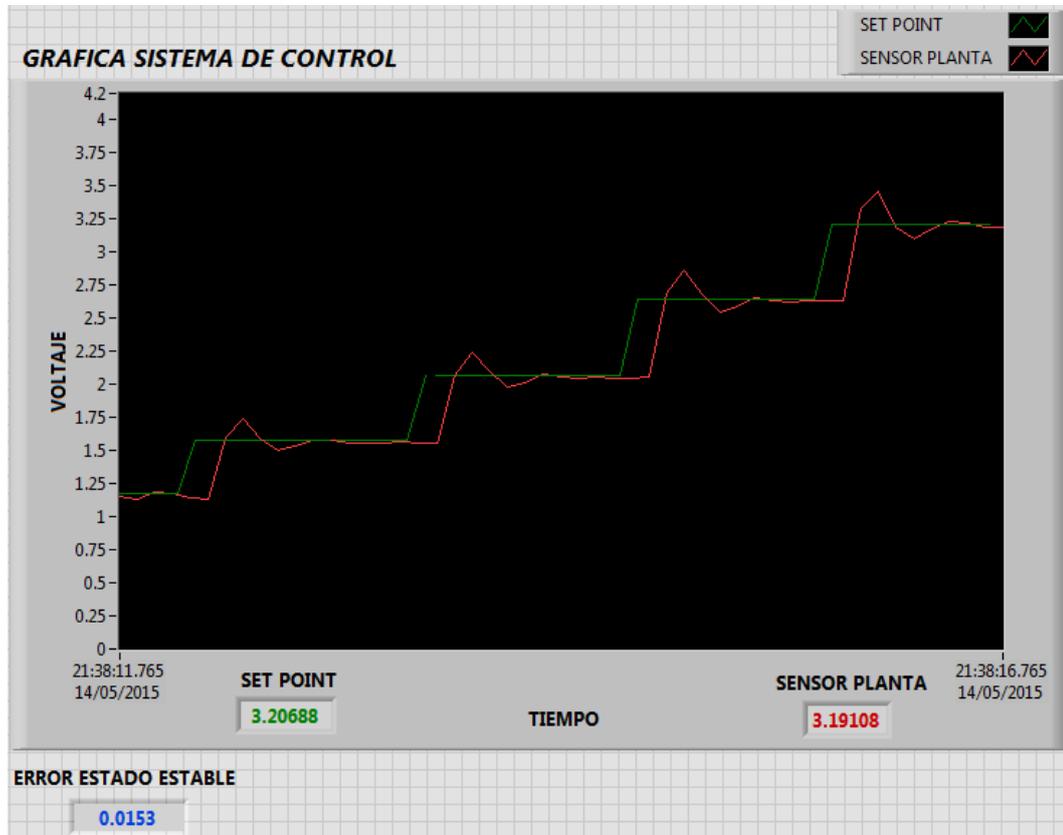


Figura 6.43 Control Proporcional-Integral para un motor DC.
Fuente: Autor

De la figura 6.43 se puede deducir que la acción proporcional es la primera en actuar de forma instantánea, mientras que la acción integral es realizada en un intervalo de tiempo y gracias a este segundo control de acción se elimina la desviación remanente de la acción proporcional, generando una mejor estabilidad ya que se mejora el amortiguamiento al momento de la variación del voltaje de referencia, además de reducir el sobrepico máximo; hay que tener en cuenta que una mala calibración del sistema hace que el mismo se haga más oscilatorio e incluso inestable.

CONTROL PROPORCIONAL - DERIVATIVO (PD).

El control Proporcional-Derivativo se presenta en la figura 6.44, en la cual al sistema se le ha aplicado diferentes pulsos de entrada.

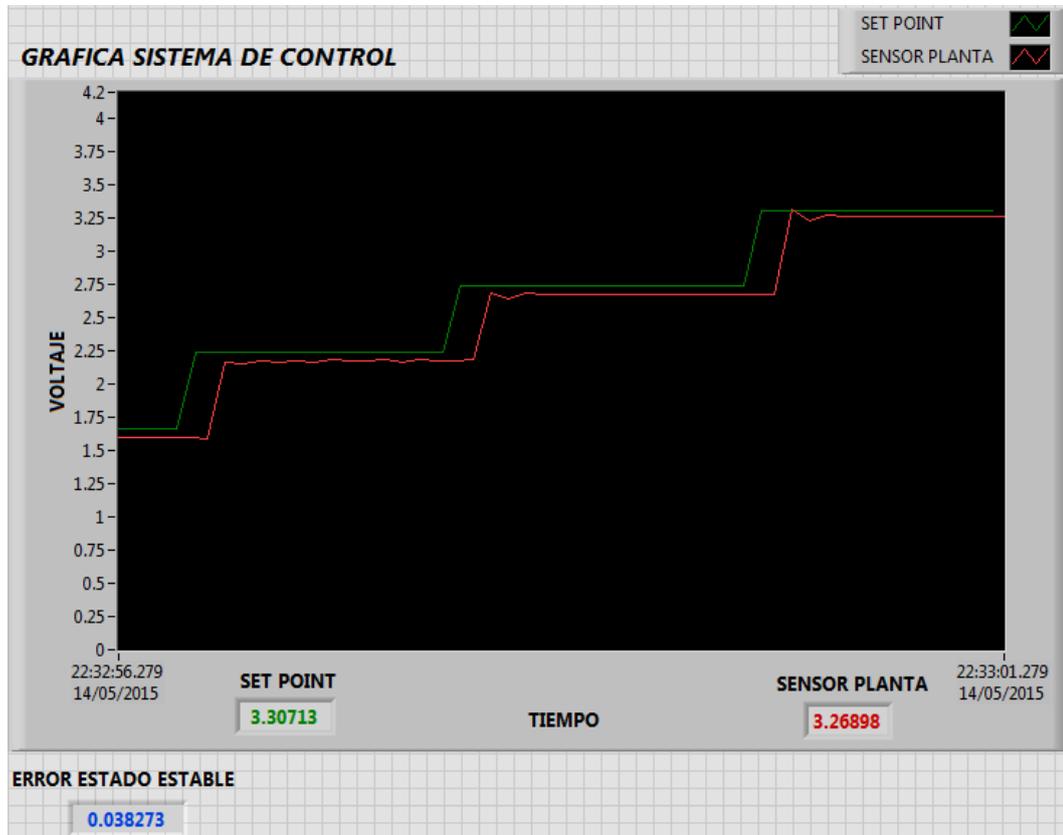


Figura 6.44 Control Proporcional-Derivativo para un motor DC.
Fuente: Autor

De la figura 6.44 se puede apreciar que el sistema de control anticipa el efecto de la acción proporcional gracias a la acción del tiempo derivativo o de adelanto para estabilizar de forma efectiva y más rápidamente la variable controlada después de cualquier perturbación o cambio de la señal de referencia, es decir; es como un efecto anticipativo que impide un crecimiento brusco del error en estado estable con la cual se reduce el sobrepaso máximo y mejora el amortiguamiento, pero el error en estado estable permanece.

Hay que tener en cuenta que este sistema de control es ideal cuando la señal de error varía en el tiempo de forma continua, es decir la señal de salida está en un continuo cambio, pues caso contrario la derivada de una constante es cero, y por ende el

control derivativo no ejercerá ningún efecto. Cabe mencionar que si bien este tipo de controlador es estabilizante, su desventaja es que tiende a amplificar las señales de ruido en altas frecuencias y no es efectivo para sistemas inicialmente estables o ligeramente amortiguados y un exceso en el dimensionado del control derivativo del controlador PD puede ser causa de inestabilidad en el sistema haciendo que la salida, ante variaciones bruscas no sea válida.

CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO-INTEGRAL (PID).

El control Proporcional-Integral-Derivativo se presenta en la figura 6.45, en la cual al sistema se le ha aplicado diferentes pulsos de entrada.

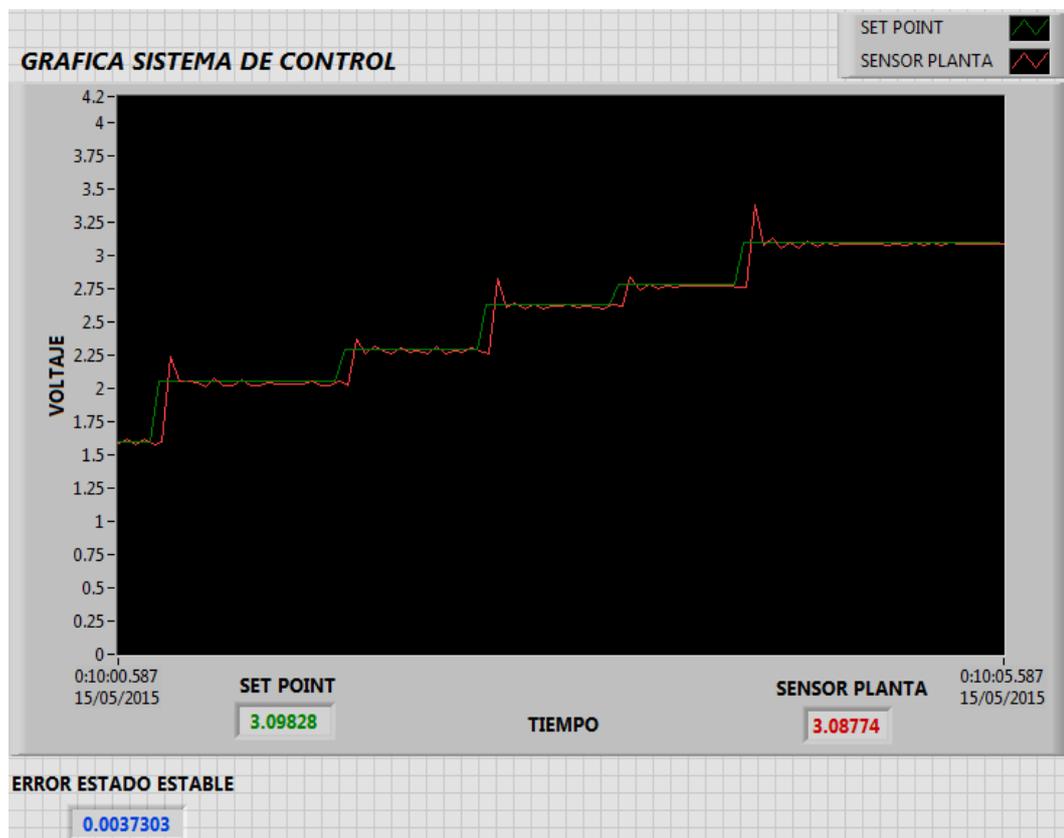


Figura 6.45 Control Proporcional-Integral-Derivativo para un motor DC.

Fuente: Autor

El PID aprovecha todas las características tanto del proporcional, integral y derivativo, de forma que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral, y si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa, la ventaja es que cuenta con una respuesta más

rápida y una inmediata compensación de la señal de error en caso de perturbaciones, pero su principal inconveniente es que el bucle de regulación es más sensible a oscilaciones por ende los ajustes tienen una mayor complejidad.

En la tabla 6.2 se presenta los resultados obtenidos para cada uno de los sistemas de control.

Tabla 6.2 Resultados del sistema de control a lazo cerrado.

LAZO CERRADO												
SETPOINT (VOLTAJE)	CONTROL P			CONTROL PI			CONTROL PD			CONTROL PID		
	ERROR ESTADO ESTABLE	% ERROR	% ERROR ESTADO ESTABLE IDEAL									
3.80	0.044	4.40%	5.50%	0.005	0.50%	0.00%	0.011	1.10%	4.60%	0.002	0.20%	0.00%
3.60	0.038	3.80%	5.50%	0.006	0.60%	0.00%	0.014	1.40%	4.60%	0.007	0.70%	0.00%
3.40	0.042	4.20%	5.50%	0.003	0.30%	0.00%	0.017	1.70%	4.60%	0.008	0.80%	0.00%
3.20	0.046	4.60%	5.50%	0.006	0.60%	0.00%	0.010	1.00%	4.60%	0.002	0.20%	0.00%
3.00	0.040	4.00%	5.50%	0.005	0.50%	0.00%	0.014	1.40%	4.60%	0.003	0.30%	0.00%
2.80	0.030	3.00%	5.50%	0.007	0.70%	0.00%	0.013	1.30%	4.60%	0.009	0.90%	0.00%
2.60	0.050	5.00%	5.50%	0.005	0.50%	0.00%	0.014	1.40%	4.60%	0.004	0.40%	0.00%
2.40	0.044	4.40%	5.50%	0.008	0.80%	0.00%	0.015	1.50%	4.60%	0.008	0.80%	0.00%
2.20	0.036	3.60%	5.50%	0.006	0.60%	0.00%	0.019	1.90%	4.60%	0.005	0.50%	0.00%
2.00	0.037	3.70%	5.50%	0.007	0.70%	0.00%	0.015	1.50%	4.60%	0.007	0.70%	0.00%
1.80	0.042	4.20%	5.50%	0.006	0.60%	0.00%	0.011	1.10%	4.60%	0.002	0.20%	0.00%
1.60	0.040	4.00%	5.50%	0.007	0.70%	0.00%	0.010	1.00%	4.60%	0.006	0.60%	0.00%
1.40	0.040	4.00%	5.50%	0.006	0.60%	0.00%	0.012	1.20%	4.60%	0.005	0.50%	0.00%
1.20	0.030	3.00%	5.50%	0.007	0.70%	0.00%	0.014	1.40%	4.60%	0.006	0.60%	0.00%
1.00	0.048	4.80%	5.50%	0.008	0.80%	0.00%	0.013	1.30%	4.60%	0.007	0.70%	0.00%
0.80	0.048	4.80%	5.50%	0.007	0.70%	0.00%	0.011	1.10%	4.60%	0.009	0.90%	0.00%
0.60	0.047	4.70%	5.50%	0.007	0.70%	0.00%	0.013	1.30%	4.60%	0.006	0.60%	0.00%
0.40	0.046	4.60%	5.50%	0.006	0.60%	0.00%	0.016	1.60%	4.60%	0.008	0.80%	0.00%

Fuente: Autor

6.8 ADMINISTRACIÓN.

A continuación se detalla todos los gastos realizados para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. En las siguientes tablas se presentan los costos involucrando directos e indirectos del proyecto.

6.8.1 COSTOS DIRECTOS.

Los costos directos se detallan en la tabla 6.3 presentada a continuación.

Tabla 6.3 Costos directos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR DEL COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
1	Transformador 3A	1	24V-3A	12.50	12.50
2	Integrado LM7809	1		0.65	0.65
3	Integrado LM7815	1	-	0.65	0.65
4	Integrado LM7915	1	-	0.60	0.60
5	Integrado LM7805	1	-	0.60	0.60
6	Capacitor electrolítico 50 Voltios	4	2200 μ F	1.10	4.40
7	Capacitor electrolítico 50 Voltios	34	0,1 μ F	0.35	11.90
8	Capacitor electrolítico 50 Voltios	3	100 μ F	0.35	1.05
9	Capacitor electrolítico 50 Voltios	4	10 μ F	0.25	1.00
10	Capacitor poliéster	4	100 nF	0.40	1.60
11	Capacitor cerámico	2	100 nF	0.20	0.40
12	Diodo IN4004	5	-	0.20	1.00
13	Puente de diodos	1	3A	0.75	0.75
14	Integrado LM741	16	-	1.10	17.60
15	Porta integrado LM741	16	-	0.25	4.00
16	Switch on-off	2	-	0.65	1.30
17	Fusible	1	1 Amp	0.15	0.15
18	Porta fusible	1	-	0.35	0.35
19	Jack banana pequeña	8	-	0.25	2.00
20	Jack banana mediana	26	-	0.45	11.70
21	Jack conectores	26		0.40	10.40
22	Potenciómetro 1 vuelta	4	1M Ω	1.45	5.80
23	Perillas potenciómetro 1 vuelta	5	-	0.35	1.75
24	Potenciómetro precisión 10 vuelta	4	10K Ω	58.75	235.00
25	Perillas potenciómetro precisión	4	-	49.50	198.00
26	Potenciómetro 1 vuelta	1	10K Ω	0.65	0.65
27	Baquelita A4	2	-	5.50	11.00
28	Cloruro ferrico	1		1.50	1.50
29	Bornera	33	2 Tomas	0.45	14.85
30	Bornera	10	3 Tomas	0.60	6.00
31	Motor DC C2162	1	-	9.50	9.50
32	Sensor barrera HC-020K	1	-	15.50	15.50
33	Resistencias	37	10K Ω - 1/2W	0.10	3.70
34	Resistencias	11	1K Ω - 1/2W	0.10	1.10
35	Pulsador normalmente abierto	1	-	0.75	0.75
36	Cable de poder	1	-	3.50	3.50
37	Jack para chasis	1	110V	0.75	0.75
38	Cables de conexión	1	-	20.00	20.00
39	Arduino uno	1	-	32.00	32.00
40	Pic 16f628a	1	-	4.50	4.50
41	Relé	3	12v	0.85	2.55
42	Transistor	3	2N3904	0.15	0.45
43	Medidor de voltaje	3	-	12.00	36.00
44	Selector de posiciones	1	-	2.00	2.00
45	Switch ojo de cangrejo	3		0.85	2.55

Fuente: Autor

Tabla 6.3 Continuación.

46	LCD 2x16	1	-	10.50	10.50
47	Integrado LM317	1	-	0.75	0.75
48	Trimmer	2	10K	0.55	1.10
49	Trimmer	2	50K	0.75	1.50
50	Nylo	1	200x200x25mm	-	25.00
51	Acrílico	1	150x350x4mm	-	18.50
52	Pernos Allen	4	M8x60	0.90	3.60
53	Pernos avellanados	4	M4*40	0.35	1.40
54	Pernos avellanados	30	M4*20	0.25	7.50
55	Pernos avellanados	4	M4*70	0.40	1.60
56	Tablero de metal	1			350.00
57	Cerigrafiado	1	70x1220mm		30.00
58	NIDAQ 6008	1		390.00	390.00
TOTAL					1 535.45

Fuente: Autor

6.8.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos se detallan en la tabla 6.4 presentada a continuación.

Tabla 6.4 Costos indirectos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
1	Mano de obra	25	-	1.5	37.5
2	Transporte	40	-	1.25	50
TOTAL					87.5

Fuente: Autor

El costo total del proyecto de investigación se presentan en la tabla 6.5.

Tabla 6.5 Costo total.

DETALLE	COSTO
Costos directos	1 535.45
Costos indirectos	112.5
SUBTOTAL	1 647.95
Imprevistos 10%	164.795
TOTAL	1 812.75

Fuente: Autor

6.9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.9.1 CONCLUSIONES.

- Un controlador integral no puede actuar solo, ya que si bien corrige el error en estado estacionario y lo vuelve cero, sin embargo dicho comportamiento muestra una tendencia del controlador a sobre corregir el error, así la respuesta del sistema es de forma muy oscilatoria o incluso inestable.
- Para que un controlador derivativo llegue a ser de utilidad debe actuar junto con otro tipo de acción de control, ya que de forma independiente, este tipo de control no responde a errores de estado estable.
- No calibrar los controladores con sobrepicos muy altos, pues puede causar daños a la planta, el mismo debe estar un máximo del 10% del sobre impulso.
- Un módulo didáctico de sistema de control a lazo abierto y a lazo cerrado ayuda a tener una idea clara de los cambios que sufre la señal de entrada ante dispositivos de control y acondicionamientos de señal.
- Mientras menos parámetros de calibración se tengan que realizar en el controlador, la planta se puede controlar de una mejor manera.
- Cuando más alejado del plano "s" en el eje real a la izquierda se ubica el polo y más cerca del origen se encuentra el cero, se reduce el tiempo de asentamiento por ende más estable el sistema.

6.9.2 RECOMENDACIONES.

- Aislar la tarjeta de adquisición de datos (NI DAQ 6008) ante perturbaciones externas como el ruido para evitar toma de datos errónea, además poner diodos de protección contra retroceso de voltaje.
- No utilizar la NI DAQ 6008 como etapa de potencia ya que el amperaje que maneja este dispositivo es de 200 *miliamperios*, por consiguiente si algún dispositivo requiere más amperaje de lo expuesto puede quemar la tarjeta de adquisición de datos.

- Calibrar los diferentes controladores P, PI, PD o PID antes de encender el banco de pruebas para evitar variaciones en sus valores por el efecto de carga del controlador.
- Para programar arduino uno primero apagar la LCD.

6.10 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN.

El objetivo principal de la previsión de la evaluación es exponer las mejoras y cuidados que se debe tener a la hora de su funcionamiento.

Las mejoras son cambios positivos que pueden ser implementados a futuro las cuales pueden ser:

- Programar arduino uno acorde a las necesidades del usuario.
- Convertir el voltaje análogo del controlador PID en PWM para manejar la etapa de potencia por medio de transistores.

Los cuidados que se deben tener a la hora de su funcionamiento es calibrar correctamente los diferentes parámetros para no tener toma de datos incorrectos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Arduino. (Febrero de 2010). *Arduino*. Obtenido de <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardUno>
- Colomer Campos, J. (2003). *Sistema para el control en lazo cerrado de la temperatura de trabajo de una agrupación integrada de microsensores de gases*. Barcelona.
- Cortes Osorio, J., Muriel Escobar, J. A., & Garcia Buitrago, J. (12 de Agosto de 2009). Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4705332.pdf>
- Díaz Acevedo, J. A., & Muñoz Barragán, F. E. (2011). *Diseño e implementación de un control PID discreto para el control de velocidad de un motor DC*. Colombia.
- Fernández, J. A. (2012). *Regulador PID*. Madrid.
- Gil G., L. A., & Rincón G., J. L. (2014). *Control PID para el control de velocidad de un motor DC*. Pereira.
- Giménez, M. I. (2011). *Introducción a las redes electricas*. Caracas.
- Giraldo B., D., & Tabares G., I. (1997). *TEORÍA DE CONTROL*. Colombia.
- González Querubin, E., & Garavito Vasquez, M. (2007). *Diseño de un controlador PID analogo para un circuito RC de segundo orden mediante la sisotool de matlab*. Colombia.
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Control: Conceptos, Aplicaciones y Simulación con MATLAB*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Junior, A. P. (1991). *Amplificadores Operacionales y Filtros Activos*. Madrid: McGraw-Hill.
- León Galarza, C. (2011). *Diseño e implementación del control PID de velocidad para un motor DC utilizando la tarjeta FPGA SPARTAN 3E y Labview para los laboratorios de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana*. Quito.

- Mabuchi Motor. (22 de Enero de 1997). *Mabuchi Motor*. Obtenido de http://www.design.caltech.edu/Courses/ME72_Archive/1999/handouts/Motor_comparison.pdf
- Maser Automatismos. (2014). *Grupo-Maser.com*. Obtenido de http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm
- Meneses, J. G. (2006). *Control de velocidad de motores de cd con propósitos de bombeo en sistemas hidráulicos*. Pachuca de Soto.
- National Instruments. (Enero de 2006). *National Instruments*. Obtenido de National Instruments: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/202751>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson.
- Ortega, M. (29 de Junio de 2015). *Junta de Andalucía*. Obtenido de http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~23005153/d_tecnologia/bajas/s/2%20bachillerato/SISTEMAS%20AUTOMATICOS%20DE%20CONTROL.pdf
- Pontificia Universidad Católica de Chile. (25 de Enero de 2010). *Pontificia Universidad Católica de Chile*. Obtenido de http://intrawww.ing.puc.cl/siding/public/ingcursos/cursos_pub/descarga.php?id_curso_ic=2089&id_archivo=71594
- Roncero Sánchez , P. L., García Cerrada, A., Feliu Batlle, V., & García Gonzalez, P. (2004). *Control en lazo cerrado para eliminación de armónicos en inversores fuente de tensión*. Ciudad Real.
- Rosero, L. G. (2013). *SISTEMA DE CONTROL DE PESO PARA LLENADO DE SACOS DE HARINA DE 50 KG*. Ibarra.
- Sánchez P., J. R. (2009). *Diseño y construcción de un controlador PID Analógico*. Mérida.
- Sanchez, J. N. (13 de Febrero de 2014). *Universidad Tecnológica de Pereira*. Obtenido de

<http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2014/02/Amplificadores-operacionales.pdf>

Siemens. (2012). *Tecnología de Control*. Barcelona: Building Technologies.

Texas Instruments. (2014). *TEXAS INSTRUMENTS*. Obtenido de TEXAS INSTRUMENTS: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>

ANEXOS

ANEXO A: ELEMENTOS MECÁNICOS

Anexo A1 Motor de corriente continua Marca Mabuchi modelo C2162-60006.

Large (>3 Watts) Motor Comparison

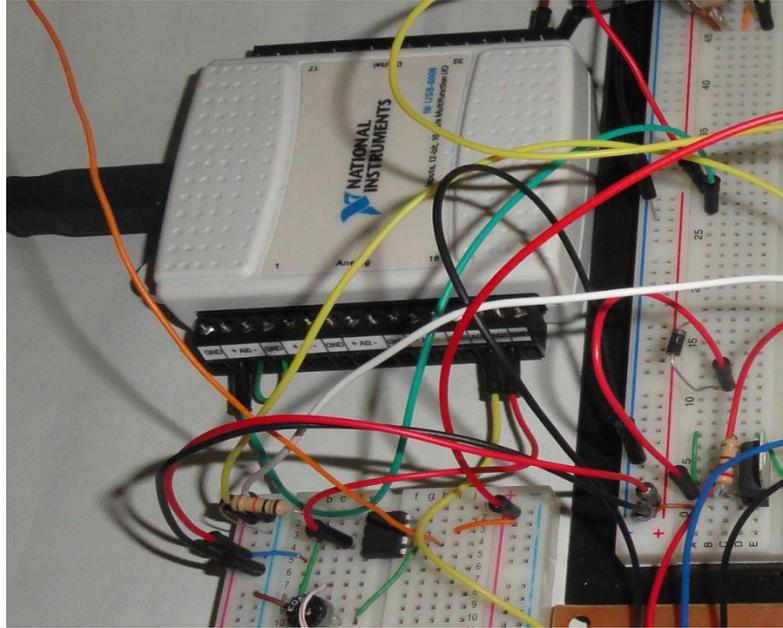
Year	Units	1985/86	1994	1995-97	1998	1999	2000**	2001-03
Manufacturer		Plymouth	HP/Buhler	HP/Mabuchi	HP/Mabuchi	HP/Mabuchi	HP/Mabuchi	HP/Mabuchi
Type		Rubberband	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush
Model Number		#33	1645-60170		RS-555SB	RS-385SH	RS-385SH	RS-385PH
HP Part Number			1.13.043.230	C2162-60006	-19160	-16120	-16120	-
				DN505728	C3604-6022	C6429-60004	C6429-60004	C6429-60004
Rating	Volts		19.10	19.00	15.00	24.00	24.00	18.00
Test	Volts		19.10	24.00	24.00	24.00	12.00	12.00
Source							8 AA	8 AA
Stall Current	Amps		2.00	2.50	1.60	2.52	1.63	1.35
Stall Torque	N-cm		18.40	28.70	9.40	4.75	2.61	2.30
Stall Torque	in-oz		26.08	40.68	13.32	6.73	3.70	3.26
No Load Speed	rpm		1,950	4,550	3,540	11,000	5,850	5,460
No Load Speed	rad/sec		204.20	476.47	370.71	1151.92	612.61	571.77
Max Power	Watts		9.40	34.20	8.72	13.70	4.00	3.29
Max Power	milli-HP		12.60	45.83	11.68	18.36	5.36	4.41
Duration	seconds		30	30	30	30	60	45
Energy	Joules	20.00	282.00	1026.00	262.00	411.00	239.84	147.95
Weight	grams	0.50	417	224	220	70	70	75
Weight	oz	0.02	14.68	7.88	7.74	2.46	2.46	2.64
Power/Weight	Watts/kg		22.54	152.68	39.64	195.71	57.10	43.84
Energy/Weight	Joules/kg	40,000.00	676.26	4,580.36	1,190.91	5,871.43	3,426.24	1,972.61
No Load Current	Amps		0.07	0.15	0.10	0.09	0.09	0.09
Start Up Voltage	Volts		1.50	2.00	3.00	1.50	1.50	1.50
Resistance	Ohms		9.60	8.20	11.60	6.30	6.50	6.50
Electrical Time Constant	milli-sec		1.20		0.90			
Mechanical Time Constant	milli-sec		7.10		16.00			
Motor Const	N-cm/watt ^{1/2}		3.00	1.80	1.78	0.75	0.75	0.75
Torque Constant	N-cm/Amp		9.30	4.80	6.08	1.90	1.90	1.90
Voltage Constant	Volts/Krpm		0.10		6.40	2.00	2.00	2.00
Inertia	g-cm ²		67.80	45.00	50.00	8.00	8.00	8.00
Shaft Diameter	mm		3.96	3.10	3.32	2.30	2.30	2.30
Shaft Diameter	in		0.156	0.122	0.131	0.091	0.091	0.091
Shaft Length	mm			85.00	85.00	13.80	13.80	13.80
Motor Diameter	mm		40.00	37.00	37.50	27.70	27.70	27.70
Motor Length	mm		77.00	64.00	66.00	57.00	57.00	57.00

** Motor for year 2000 is same as for 1999 but is driven by batteries.

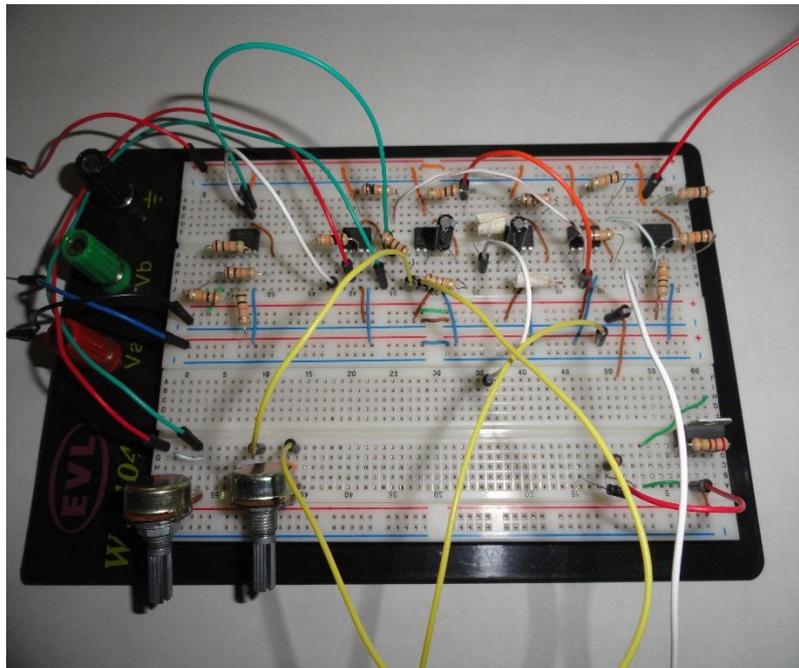
Power shown is obtained when motor is tested with 8 fresh AA batteries in series and loaded to run at an initial speed of 2726 rpm. Initial battery input voltage at this load is 10.7V, and initial current is 1.63 amps. Motor torque and power decrease as batteries discharge.

ANEXO B: PARTES DE CONTROL

Anexo B1 Medición de voltaje a lazo abierto.



Anexo B2 Medición de voltaje a lazo cerrado.



Anexo B3 Código fuente Arduino visualizar RPM en pantalla LCD de 2x16.

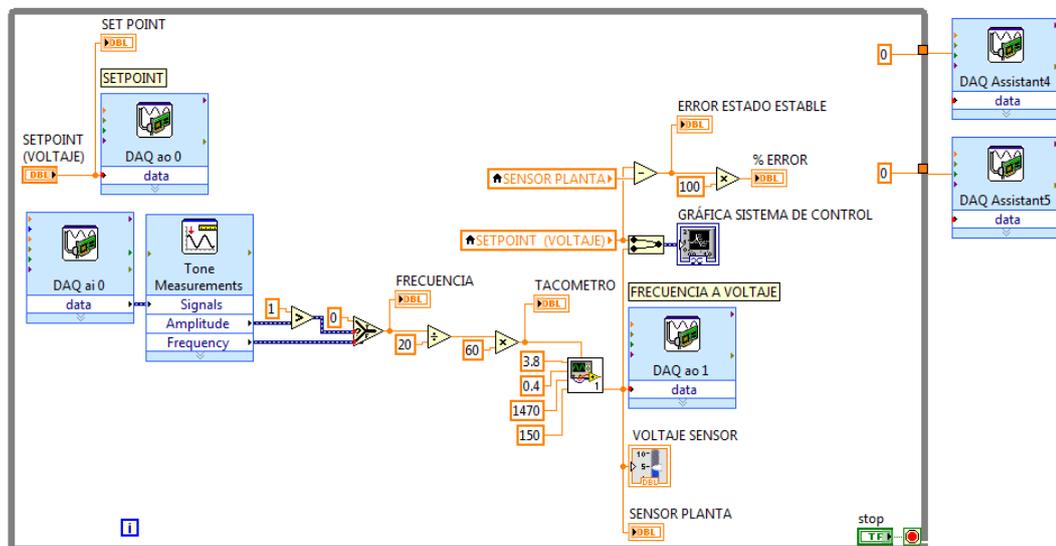
```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 10, 9, 8, 7);
int encoder;
long last=0;
int estado=LOW;
int estado2;
int contar=0;
int muestras=1000;
int ranuras=20;
int milisegundos=500;
float ciclo=0;
void setup()
{
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(13,OUTPUT);
  for (int i=0; i <= 1; i++)
  {
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.print(" INICIANDO");
    delay(500);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.print(" INICIANDO.");
    delay(500);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.print(" INICIANDO..");
    delay(500);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.print(" INICIANDO...");
    delay(500);
  }
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(3, 0);
  lcd.print("VELOCIDAD");
}
void loop()
{
  encoder=analogRead(0);
  if(encoder<muestras)
  estado=LOW;
  else
  estado=HIGH;
  digitalWrite(13,estado);
  if(estado2!=estado)
  {
    contar++;
    estado2=estado;
  }
}
```

```

}
if(millis()-last>=milisegundos)
{
int rpm=((double)contar/ranuras)/2.0*60000.0/(milisegundos);
delay(10);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" ");
lcd.print(rpm);
lcd.print(" RPM ");
contar=0;
last=millis();
}
}

```

Anexo B4 Código fuente en Labview.



En la figura presentada se puede observar:

- La entrada analógica ai0 de la NI DAQ 6008 se utiliza para leer los pulsos del encoder.
- Se realizó una interpolación lineal para obtener la conversión de frecuencia a voltaje entre los rangos de voltaje establecidos previamente.
- Por la salida analógica a01 de la NI DAQ 6008 se toma el voltaje de conversión.

Anexo B5 Código fuente Pic16f628a.

```
#include <code_sel_pid.h>
void main()
{
    output_low(pin_b5);
    output_low(pin_b6);
    output_low(pin_b7);
    WHILE(TRUE)
    {
        if(input(pin_b1)==1)
        {
            output_high(pin_b5);
            output_low(pin_b6);
            output_low(pin_b7);
        }
        else
        {
            if(input(pin_b2)==1)
            {
                output_high(pin_b5);
                output_high(pin_b6);
                output_low(pin_b7);
            }
            else
            {
                if(input(pin_b3)==1)
                {
                    output_high(pin_b5);
                    output_low(pin_b6);
                    output_high(pin_b7);
                }
                else
                {
                    if(input(pin_b4)==1)
                    {
                        output_high(pin_b5);
                        output_high(pin_b6);
                        output_high(pin_b7);
                    }
                    else
                    {
                        output_low(pin_b5);
                        output_low(pin_b6);
                        output_low(pin_b7);
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

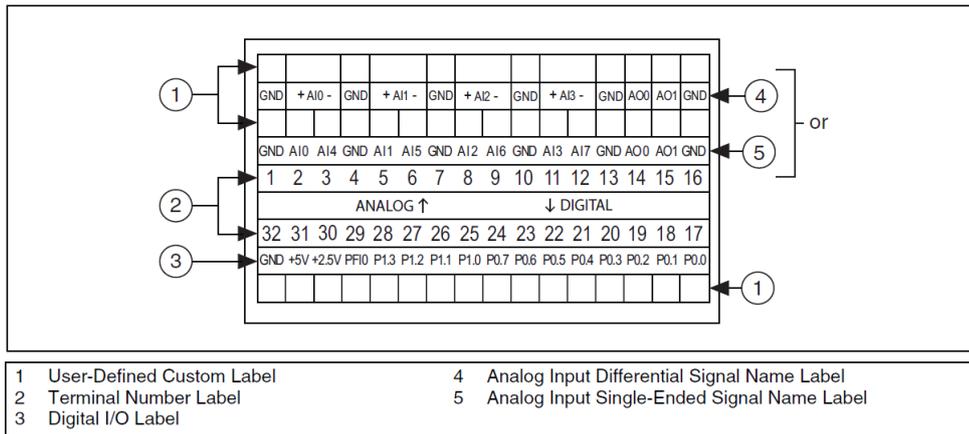
}
 }
 }

Anexo B6 Ni DAQ 6008 Velocidad de muestras.

Feature	NI USB-6008	NI USB-6009
AI resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI sample rate, single channel*	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate)*	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector†	Each channel individually programmable as open collector or active drive†

* System-dependent.
 † This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.

Anexo B7 Ni DAQ 6008 Disposición de pines.



Anexo B8 Potenciómetro de precisión.

7/8" (22.2 mm) Multi Turn Wirewound Potentiometer - 533: 3 Turns / 534: 10 Turns / 535: 5 Turns



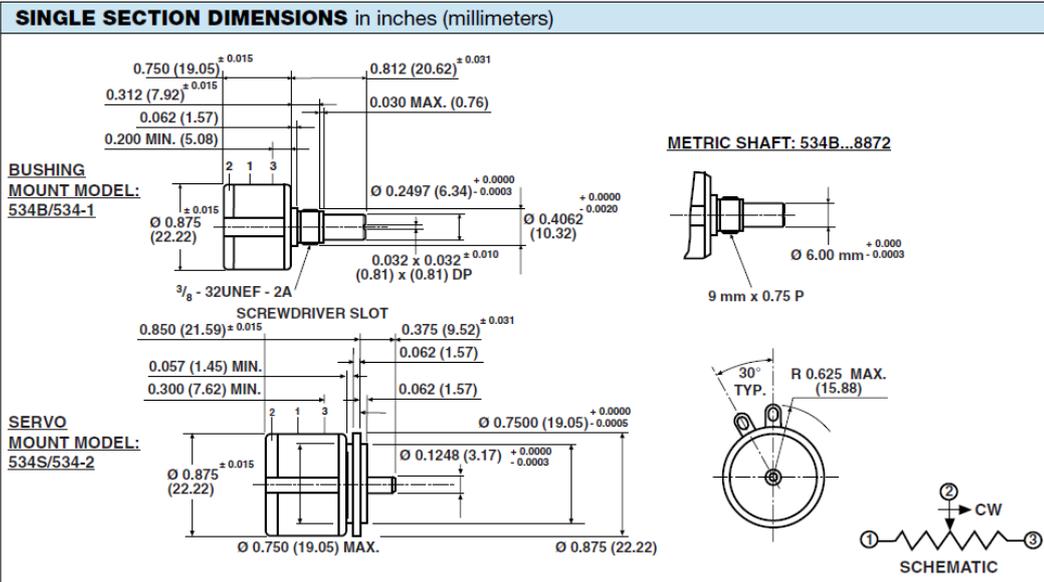
FEATURES

- Bushing and servo mount designs available
- Special resistance tolerances to 1 %
- Rear shaft extensions and support bearing
- Metric shaft available
- Dual gang configuration and concentric shafts
- High torque, center tap, slipping clutch on request
- Special markings and front shaft extensions
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



QUICK REFERENCE DATA	
Sensor type	ROTATIONAL, multi turn wirewound
Output type	Output by turrets
Market appliance	Industrial
Dimensions	7/8" (22.2 mm)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS			
PARAMETER	MODEL 533	MODEL 534	MODEL 535
Resistance range - standard values	50 Ω to 20 kΩ	100 Ω to 100 kΩ	50 Ω to 50 kΩ
Capability range	5 Ω to 60 kΩ	10 Ω to 200 kΩ	5 Ω to 100 kΩ
Standard tolerance	± 5 %	± 5 %	± 5 %
Linearity (independent)	± 0.25 %	± 0.25 %	± 0.25 %
Noise	100 Ω ENR	100 Ω ENR	100 Ω ENR
Rotation (electrical and mechanical)	1080° +10° -0°	3600° +10° -0°	1800° +10° -0°
Power rating (at 70 °C)	1.0 W	2.0 W	1.5 W
Insulation resistance	1000 MΩ minimum 500 V _{DC}		
Dielectric strength	1000 V _{RMS} minimum 60 Hz		
Absolute minimum resistance	Not to exceed linearity x total resistance or 1 Ω, whichever is greater		
Temperature coefficient	20 ppm/°C (standard values, wire only)		
End voltage	0.25 % of total applied voltage, maximum		
Phasing	CCW end points - section 2 phased to section 1 within ± 2°		
Taps	Center tap only		



Anexo B9 Amplificador Operacional LM741.

LM741 Operational Amplifier

Check for Samples: [LM741](#)

FEATURES

- Overload Protection on the Input and Output
- No Latch-Up When the Common Mode Range is Exceeded

DESCRIPTION

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C is identical to the LM741/LM741A except that the LM741C has their performance ensured over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

Connection Diagrams

LM741H is available per JM38510/10101

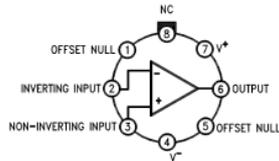


Figure 1. TO-99 Package
See Package Number LMC0008C

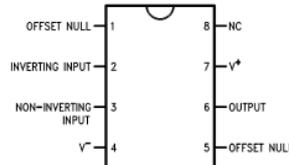


Figure 2. CDIP or PDIP Package
See Package Number NAB0008A, P0008E

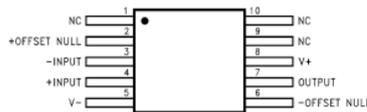


Figure 3. CLGA Package
See Package Number NAD0010A

LM741



Typical Application

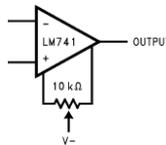
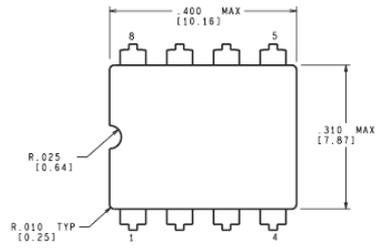


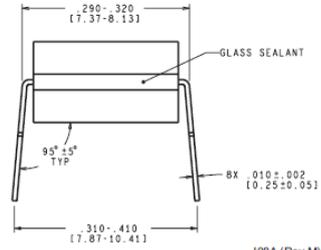
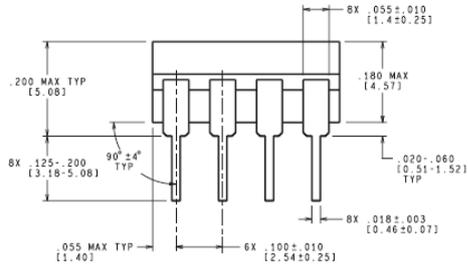
Figure 4. Offset Nulling Circuit



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.



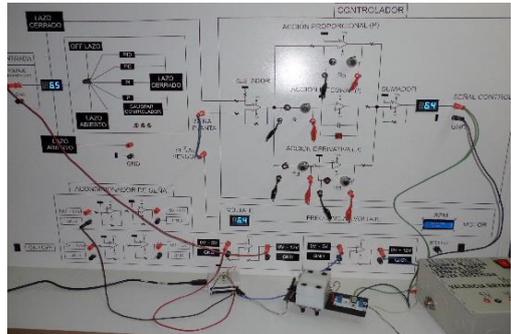
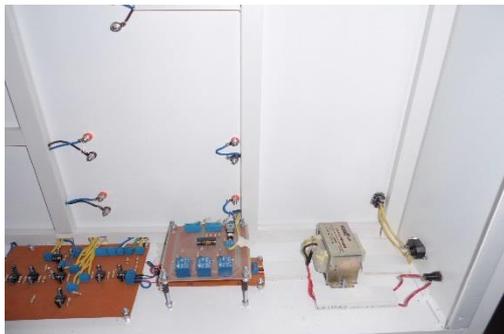
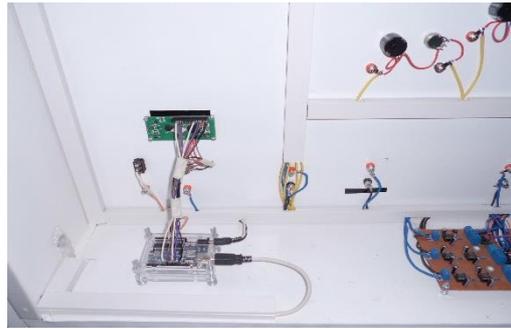
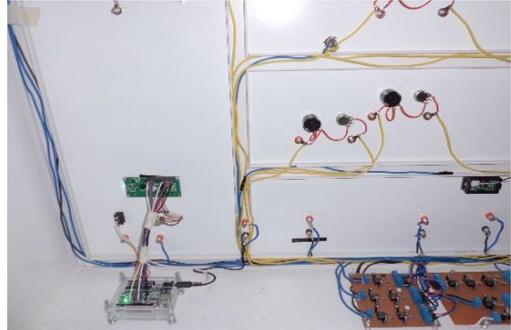
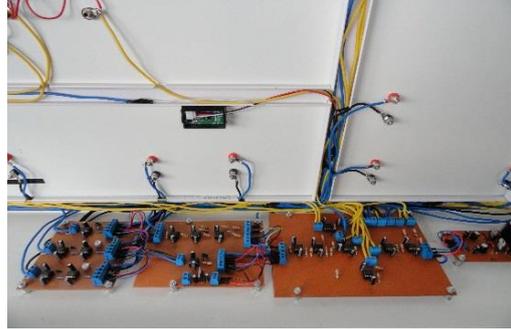
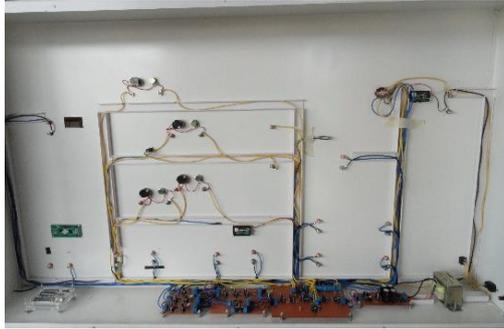
CONTROLLING DIMENSION IS INCH
VALUES IN [] ARE MILLIMETERS



JOBA (Rev M)

ANEXO C: SISTEMA DE CONTROL.

Anexo C1 Módulo Didáctico.



ANEXO D: GUÍA DE PRÁCTICA.

Anexo D1 Lazo abierto.

TEMA

Guía de ensayos en el módulo de sistema de control a lazo abierto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar el montaje de un sistema de control a lazo abierto de voltaje en el módulo didáctico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los elementos constitutivos que conforma un sistema de control a lazo abierto.
- Determinar el error en estable a diferentes pulsos de entrada.

JUSTIFICACIÓN

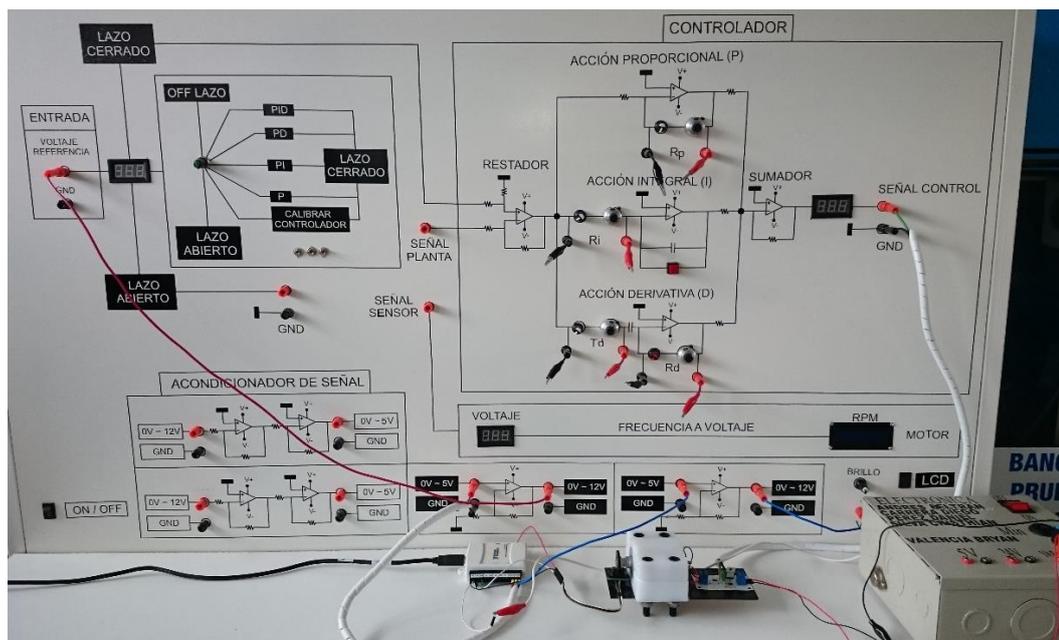
Marco teórico.

PROCEDIMIENTO

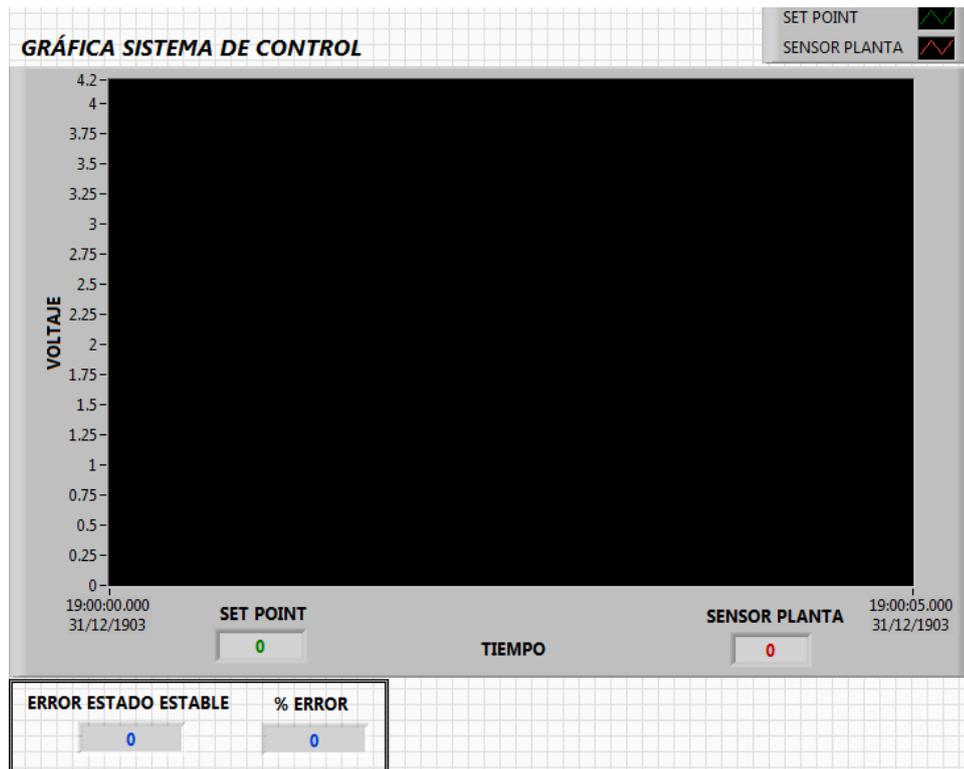
- 1) Encender el módulo didáctico.
- 2) Encender la pantalla LCD.
- 3) Conectar la señal del encoder a la entrada analógica Ai0 de la NI DAQ 6008.
- 4) Conectar la señal del encoder a la entrada analógica de arduino uno.
- 5) Conectar V_{SS} y V_{DD} del encoder a la NI DAQ 6008.
- 6) Conectar la salida analógica Ao0 de la NI DAQ 6008 al amplificador de señal de 0V – 5V a 0V – 12V, y de ahí al voltaje de entrada (setpoint) del módulo didáctico.

- 7) Conectar la salida analógica Ao1 de la NI DAQ 6008 al amplificador de señal de 0V – 5V a 0V – 12V, y de ahí conectar al visualizador de voltaje de conversión del módulo didáctico.
- 8) Conectar el voltaje de salida del setpoint de 0V – 12V a la etapa de potencia.
- 9) Conectar la NI DAQ 6008 a la PC.
- 10) Conectar la fuente de poder externa a la etapa de potencia del motor de corriente continua.
- 11) Conectar todas las GND entre sí.
- 12) Ejecutar el programa en labview para la adquisición de datos en tiempo real.
- 13) Introducir el voltaje de entrada o setpoint hasta el nivel máximo permitido en el módulo didáctico que es de 12V.
- 14) Tomar datos del voltaje de entrada (setpoint) y el voltaje de conversión de frecuencia a voltaje (señal sensor) del motor de corriente continua.
- 15) Evaluar los resultados obtenidos.

Una vez realizado el proceso respectivo el sistema de control a lazo abierto debe quedar de la siguiente manera.



GRÁFICA DE RESULTADOS



Acorde a la gráfica presentada el usuario puede visualizar el error en estado estable del sistema ante una señal tipo escalón o rampa.

CONCLUSIONES

Serán establecidas por los estudiantes luego de realizar el ensayo.

Anexo D2 Lazo cerrado.

TEMA

Guía de ensayos en el módulo de sistema de control a lazo cerrado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar el montaje de un sistema de control a lazo cerrado de voltaje en el módulo didáctico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los elementos constitutivos que conforma un sistema de control a lazo cerrado.
- Determinar el error en estable a diferentes pulsos de entrada para el controlador PID con sus variantes.

JUSTIFICACIÓN

Marco teórico.

PROCEDIMIENTO

- 1) Encender el módulo didáctico.
- 2) Encender la pantalla LCD.
- 3) Conectar la señal del encoder a la entrada analógica Ai0 de la NI DAQ 6008.
- 4) Conectar la señal del encoder a la entrada analógica de arduino uno.
- 5) Conectar V_{SS} y V_{DD} del encoder a la NI DAQ 6008.
- 6) Conectar la salida analógica Ao0 de la NI DAQ 6008 al amplificador de señal de 0V – 5V a 0V – 12V, y de ahí al voltaje de entrada (setpoint) del módulo didáctico.
- 7) Conectar la salida analógica Ao1 de la NI DAQ 6008 al amplificador de señal de 0V – 5V a 0V – 12V, y de ahí conectar al visualizador de voltaje de conversión del módulo didáctico.

- 8) Conectar el voltaje de conversión (señal sensor) a la entrada del controlador (señal planta).
- 9) Conectar el voltaje de salida del controlador de 0V – 12V a la etapa de potencia.
- 10) Conectar la NI DAQ 6008 a la PC.
- 11) Conectar la fuente de poder externa a la etapa de potencia del motor de corriente continua.
- 12) Conectar todas las GND entre sí.
- 13) Ejecutar el programa en labview para la adquisición de datos en tiempo real.
- 14) Introducir el voltaje de entrada o setpoint hasta el nivel máximo permitido en el módulo didáctico que es de 12V.
- 15) Abrir el circuito por medio de interruptores ubicados en la parte de calibración para evitar perturbación en los potenciómetros a la hora de su calibración debido a la acción de carga de los mismos.
- 16) Cerrar el circuito por medio de interruptores una vez establecido los valores de las resistencias para el controlador.
- 17) Seleccionar el tipo de control y establecer el valor de la resistencias acorde a la siguiente tabla:

CONTROL	VALOR RESISTENCIAS
P	$R_p=4.279 \text{ K}\Omega$
PI	$R_p=4.502 \text{ K}\Omega, R_i=35.855 \text{ K}\Omega$
PD	$R_p=10.160 \text{ K}\Omega, T_d=R_d1=447.027 \text{ }\Omega, R_d=R_d2=659.324 \text{ }\Omega$
PID	$R_p=7.2406 \text{ K}\Omega, R_i=14.574 \text{ K}\Omega, T_d=R_d1=1.0401 \text{ K}\Omega, R_d=R_d2=1.4711 \text{ K}\Omega$

- 18) Tomar datos del voltaje de entrada (setpoint) y el voltaje de conversión de frecuencia a voltaje (señal sensor) del motor de corriente continua.
- 19) Evaluar los resultados obtenidos con los valores ideales calculados por medio de software.

Una vez realizado el proceso respectivo el sistema de control a lazo cerrado debe quedar de la siguiente manera.

Ess = Error en estado estable.

Vin = Voltaje de entrada (setpoint).

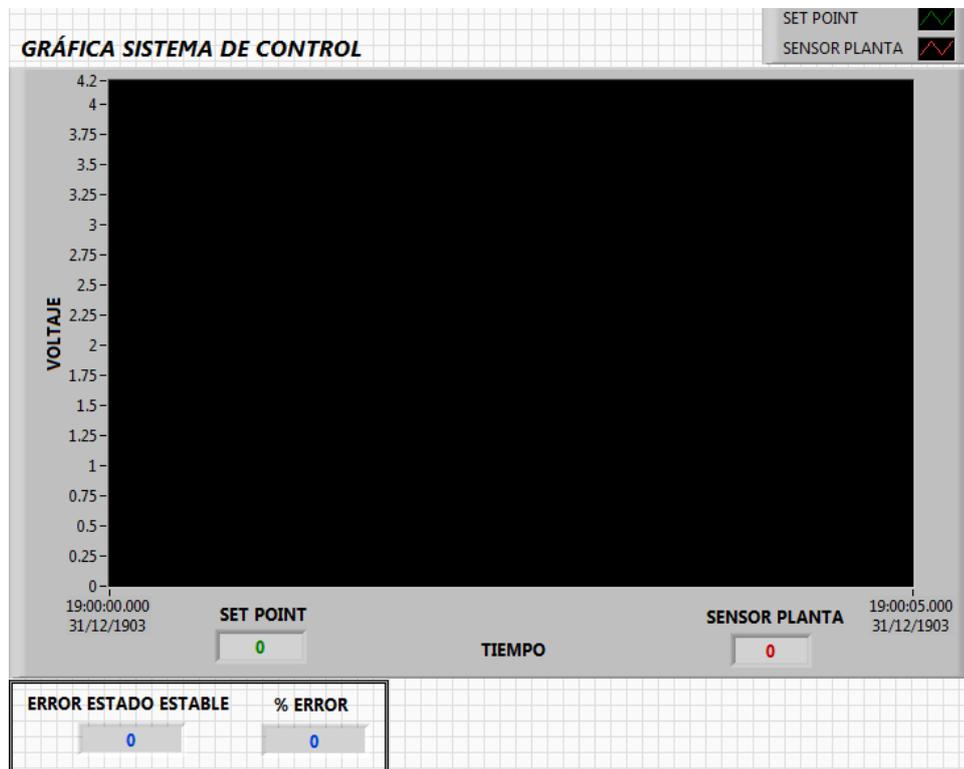
Vout = Voltaje de conversión frecuencia a voltaje (señal sensor).

$$\%Ess = Ess * 100\%$$

Donde:

%Ess = Porcentaje del error en estado estable.

GRÁFICA DE RESULTADOS



Acorde a la gráfica presentada el usuario puede visualizar el error en estado estable del sistema ante una señal tipo escalón o rampa.

CONCLUSIONES

Serán establecidas por los estudiantes luego de realizar el ensayo.