



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Implementación de un HMI para el control PID de velocidad de un motor DC en el
Laboratorio de Instrumentación Virtual.**

Escobar Tarapuez, Kevin Isaac

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Electrónica mención Instrumentación & Aviónica

Monografía, previo a la obtención del título de Tecnólogo en Electrónica mención
Instrumentación y Aviónica

Ing. Cajas Buenaño, Mildred Lisseth

Latacunga

15 de marzo del 2021



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE ELECTRÓNICA MENCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y AVIÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que la monografía, “**IMPLEMENTACIÓN DE UN HMI PARA EL CONTROL PID DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**”. Fue realizado por el señor **ESCOBAR TARAPUEZ, KEVIN ISAAC** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 15 de marzo del 2021

Firma

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Escobar' o similar, escrita sobre una línea horizontal punteada.












ING. CAJAS BUENAÑO, MILDRED LISSETH

C.C.: 0503497604

Document Information

Analyzed document	Trabajo de titulación Capitulo 1,2 y 3 - KEVIN ESCOBAR.pdf (D98194747)
Submitted	3/13/2021 4:12:00 AM
Submitted by	
Submitter email	kiescobar@espe.edu.ec
Similarity	10%
Analysis address	mlcajas.espe@analysis.urkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://docplayer.es/9326777-Introduccion-a-la-instrumentacion-industrial.html Fetched: 3/13/2021 4:29:00 AM	 1
W	URL: http://www.esi2.us.es/~vargas/docencia/tca_/temas/Tema_2_4.pdf Fetched: 3/13/2021 4:29:00 AM	 1
W	URL: https://www.ecured.cu/Control_derivativo Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 2
W	URL: https://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 3
W	URL: https://docplayer.es/94240589-Instituto-tecnologico-superior-aeronautico-carrera-d... Fetched: 7/19/2020 4:48:13 AM	 9
W	URL: http://metodossintonizacionpid.blogspot.com/2014/04/metodos-de-sintonizacion-de-la... Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 1
W	URL: https://www.researchgate.net/publication/260058659_Metodos_de_sintonizacion_de_con... Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 2
W	URL: http://easyandcrazy.blogspot.com/2014/04/metodos-de-sintonizacion-de.html Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 3
W	URL: https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sinton... Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 8
W	URL: http://controladorespidespoch.blogspot.com/p/metodos-de-sintonizacion.html Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 2
W	URL: https://pdfs.semanticscholar.org/4318/a2e423d8840ae4ae5004e895a1f35497ceba.pdf Fetched: 3/13/2021 4:28:00 AM	 2



ING. CAJAS BUENAÑO, MILDRED LISSETH

C.C.: 0503497604



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE ELECTRÓNICA MENCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y AVIÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **ESCOBAR TARAPUEZ, KEVIN ISAAC**, con cédula de ciudadanía 1721068888, declaro que el contenido, ideas y criterios de la monografía: ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN HMI PARA EL CONTROL PID DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL”***. Es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 15 de marzo del 2021

Firma

Una firma manuscrita en tinta azul que dice "Kevin Isaac Escobar". La firma está sobre una línea horizontal punteada.

ESCOBAR TARAPUEZ, KEVIN ISAAC

C.C.: 1721068888



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA MENCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y AVIÓNICA
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **ESCOBAR TARAPUEZ, KEVIN ISAAC**, con la cedula de ciudadanía 1721068888, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar la monografía: ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN HMI PARA EL CONTROL PID DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL”***, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 15 de marzo del 2021

Firma

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'Kevin Escobar', is written over a horizontal dashed line.

ESCOBAR TARAPUEZ, KEVIN ISAAC

C.C.: 1721068888

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico primero a Dios por darme salud y sabiduría, por nunca abandonarme en los momentos más difíciles a lo largo de mi formación como persona y profesional.

A mi madre Fanny Tarapuez, por ser el pilar fundamental de mi familia, quien con esfuerzo y amor me brindó su apoyo incondicional que sin importar las circunstancias y medios pudo darme todo lo necesario, para poder culminar este camino.

A mis hermanos Oswaldo y Rodrigo que me apoyaron incondicionalmente con sus palabras, a mis compañeros Cesar y Erika, que en el transcurso de la vida nos hemos encontrado, quienes me han apoyado y motivado en esta etapa a cumplir mis sueños y en mi formación como profesional.

Kevin Escobar T.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por guiar mi camino y llenarme de bendiciones día a día, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas.

A mi madre quien ha sido mi confidente, amiga y sobre todo por ser la persona responsable de quien soy hoy en día, quien confió siempre en mis capacidades pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron siempre me apoyo.

Agradezco a cada uno de mis maestros que me vieron crecer como persona y dieron su tiempo para impartir sus conocimientos, por cada consejo y experiencias compartidas.

A mi maestro Ing. Pablo Pilatasig por haberme guiado en la elaboración de mi trabajo de titulación y sobre todo por la paciencia que me brindo.

A mi tutora Ing. Mildred Cajas por la ayuda y paciencia brindada pese a la adversidad presentada durante la elaboración del proyecto.

Kevin Escobar T.

Índice de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras.....	14
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Planteamiento del problema.....	19
Antecedentes.....	19
Planteamiento del problema.....	19
Justificación.....	21
Objetivos.....	21
<i>Objetivo general</i>	21
<i>Objetivos específicos</i>	21
Alcance.....	22

Marco teórico.....	23
Motor corriente continua.....	23
Partes de un motor de corriente continua	24
<i>Estator.....</i>	<i>24</i>
<i>Polos auxiliares</i>	<i>25</i>
<i>Rotor.....</i>	<i>26</i>
<i>Colector.....</i>	<i>26</i>
<i>Escobillas.....</i>	<i>27</i>
<i>Entrehierro.....</i>	<i>27</i>
<i>Funcionamiento de un motor DC</i>	<i>28</i>
Tipos de motores de corriente continua	30
<i>Motores de imán permanente (pm).....</i>	<i>30</i>
<i>Motor shunt.....</i>	<i>31</i>
<i>Motor serie</i>	<i>32</i>
<i>Motor compuesto.....</i>	<i>33</i>
Sistema de control.....	33
<i>Elementos básicos de un sistema de control.....</i>	<i>35</i>
<i>Tipos de respuesta ante controladores</i>	<i>35</i>
Tipos de control.....	36
<i>Control proporcional.....</i>	<i>36</i>
<i>Control integral.....</i>	<i>38</i>

<i>Control derivativo</i>	39
<i>Control proporcional, integral y derivativo</i>	42
Señal de referencia y señal de error	42
Métodos de ajustes de controladores PID	43
<i>Método de lazo abierto</i>	44
<i>Método de lazo cerrado</i>	44
Métodos de sintonización de lazo abierto	45
<i>Método de Ziegler y Nichols</i>	45
<i>Método de Cohen y Coon</i>	49
<i>Método de López, Miller, Smith y Murrill</i>	50
<i>Método de Kaya y Sheib</i>	50
<i>Método de Sung, O, Lee y Yi</i>	52
Método de sintonización de lazo cerrado	53
<i>Método de Ziegler y Nichols</i>	53
Introducción a instrumentación virtual	54
LabVIEW	55
<i>Introducción</i>	55
<i>Vis (instrumentos virtuales)</i>	56
<i>Panel frontal</i>	56
<i>Diagrama de bloques</i>	57
<i>El entorno de LabVIEW</i>	57

	11
<i>Paleta de controles (controls palette)</i>	59
<i>Paleta de herramientas (tools palette)</i>	60
<i>Paleta de funciones (functions palette)</i>	61
<i>Función PID</i>	61
Sistema de adquisición de datos	63
<i>Puerto USB</i>	64
<i>Tarjeta NI USB-6009</i>	64
<i>Tabla de datos técnicos NI USB-6009</i>	66
<i>Ventajas de la tarjeta USB-6009</i>	68
Modulo PCT-1	68
Desarrollo del tema	71
Preliminares	71
Software	72
<i>Paso 1: Instalación del software LabVIEW</i>	72
<i>Paso 2: Instalación librería DAQmx</i>	72
<i>Paso 3: Pruebas de la tarjeta NI USB-6009</i>	75
<i>Paso 4: Elaboración del VI</i>	77
<i>Paso 5: Creación del HMI</i>	80
<i>Paso 6: Conexiones de la maqueta</i>	81
Cálculos de sintonización	82
Pruebas y análisis de resultados	85

Conclusiones y Recomendaciones	88
Conclusiones	88
Recomendaciones	89
Bibliografía	90
ANEXOS	93

Índice de tablas

Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler y Nichols.....	48
Tabla 2. Especificaciones de la NI USB-6009.....	66
Tabla 3. Salidas Analógicas	67
Tabla 4. Digitales I/O	67

Índice de figuras

Figura 1. Motor corriente continua.....	23
Figura 2. Partes de un motor de corriente continua.....	24
Figura 3. Estator de un motor de corriente continua.....	25
Figura 4. Polos de conmutación.....	25
Figura 5. Rotor inducido.....	26
Figura 6. Colector de delgas.....	26
Figura 7. Escobillas.....	27
Figura 8. Entrehierro.....	28
Figura 9. Polos del núcleo.....	28
Figura 10. Torque o fuerza de giro.....	29
Figura 11. Motor de imán permanente.....	31
Figura 12. Motor shunt.....	32
Figura 13. Motor serie.....	32
Figura 14. Motor compuesto.....	33
Figura 15. Esquema general de un sistema.....	34
Figura 16. Control genérico.....	35
Figura 17. Respuesta de un sistema.....	36
Figura 18. Control proporcional.....	37
Figura 19. Control integral + proporcional.....	38
Figura 20. Efecto del tiempo integral.....	39
Figura 21. Control derivativo.....	41
Figura 22. Comportamiento del PD con respecto al P.....	41
Figura 23. Control PID.....	42
Figura 24. Estructura lazo abierto.....	44

Figura 25. Estructura lazo cerrado	45
Figura 26. Estructura lazo abierto en modo manual.	46
Figura 27. Tipos de señales.	47
Figura 28. Señal en tipo S y tangente	47
Figura 29. Método de Ziegler y Nichols	49
Figura 30. Método de López.....	50
Figura 31. Método de Kaya y Sheib PID Serie	51
Figura 32. Método de Kaya y Sheib PID Industrial	52
Figura 33. Método de Ziegler y Nichols de un escalón	53
Figura 34. Método de Ziegler y Nichols de un sistema PID	54
Figura 35. Panel Frontal.....	56
Figura 36. Diagrama de bloques	57
Figura 37. Barra de menú	58
Figura 38. Paleta de controles.....	60
Figura 39. Paleta de herramientas	60
Figura 40. Paleta de funciones.....	61
Figura 41. PID.VI.....	62
Figura 42. Tarjeta NI USB-6009.....	64
Figura 43. Entradas y Salidas	65
Figura 44. Tarjeta NI USB-6009 bornes de conexión	65
Figura 45. Módulo PCT-1	69
Figura 46. Módulo PCT-1 Motor DC.....	69
Figura 47. Módulo PCT-1 Vista frontal	70
Figura 48. Conexiones de equipos.....	71
Figura 49. Software LabVIEW.....	72
Figura 50. Descarga de librería.....	73

Figura 51. Librería NI DAQmx.....	73
Figura 52. Ejecución del driver.....	74
Figura 53. Instalación del driver.....	74
Figura 54. Pantalla de pruebas.....	75
Figura 55. Comprobación de librería.....	76
Figura 56. Test de prueba.....	77
Figura 57. DAQ assistant.....	77
Figura 58. Adquisición de señal.....	78
Figura 59. Señal de entrada análoga.....	78
Figura 60. Velocidad del motor.....	79
Figura 61. Diagrama de bloques.....	80
Figura 62. Panel frontal HMI.....	81
Figura 63. Conexiones.....	82
Figura 64. Señal tipo S.....	83
Figura 65. Trazo del tangente.....	83
Figura 66. Señal encoder.....	85
Figura 67. Prueba del control.....	86
Figura 68. Control estable.....	87

Resumen

El proyecto técnico se basa en la implementación de una interfaz humano-máquina (HMI), para el control de un motor de corriente continua (DC), mediante la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009, el módulo PCT-1 y el software LabVIEW 2019, donde se presentará el HMI del control PID. La implementación de este control permitirá el desarrollo de prácticas en el laboratorio de Instrumentación Virtual. En la programación del HMI se realizará un control Proporcional, Integral y Derivativo (PID), del módulo PCT-1, que está compuesto por un motor de corriente continua, acoplado a un disco con un sensor, donde se obtiene un tren de pulsos y un freno electromagnético para crear perturbaciones, el control de velocidad del motor se realiza mediante el manejo o control de voltaje en nivel máximo y nivel mínimo, para poder hacer girar el motor a su máxima capacidad y mínima capacidad, la estación se encuentra condicionada para que trabaje en un rango de 0 voltios a 8 voltios, que en referencia a la velocidad es igual a 0 rpm hasta 4000 rpm (revoluciones por minuto), con referencia a cualquier tierra del módulo y se observa el control PID del motor de acuerdo a la señal obtenida del mismo.

Palabras clave:

- **INTERFAZ HMI**
- **CONTROL PID**
- **FRENO ELECTROMAGNÉTICO**
- **ADQUISICIÓN DE DATOS**
- **REVOLUCIONES POR MINUTO**

Abstract

The technical project is based on the implementation of a human-machine interface (HMI), for the control of a direct current (DC) motor, using the NI USB-6009 data acquisition card, the PCT-1 module and the LabVIEW 2019 software, where the PID control will be presented. The implementation of this control will allow the development of practices in the Virtual Instrumentation laboratory. In the HMI programming, a Proportional, Integral and Derivative (PID) control of the PCT-1 module will be carried out, which is composed of a direct current motor, coupled to a disk with a sensor, where a train of pulses and an electromagnetic brake to create disturbances, the speed control of the motor is carried out by managing or controlling the voltage at maximum level and minimum level, in order to be able to rotate the motor at its maximum capacity and minimum capacity, the station is conditioned to work in a range from 0 volts to 8 volts, which in reference to speed is equal to 0 rpm to 4000 rpm, with reference to any ground of the module and the PID control of the motor is observed according to the signal obtained from it.

Key words:

- **HMI INTERFACE**
- **PID CONTROL**
- **ELECTROMAGNETIC BRAKE**
- **DATA ACQUISITION**
- **REVOLUTIONS PER MINUTE**

Capítulo I

1. Planteamiento del problema

1.1. Antecedentes

El control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), es el algoritmo de control más empleado en la industria, que a través de un lazo de retroalimentación que permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables. (Esteban Sanz & Joan, 2011), lo definen como “la base teórica de todos los métodos de sintonía automática más habitual en los reguladores industriales”. El control PID, “proporciona una gran flexibilidad, no solo en el algoritmo de control, sino también en lo que se refiere al tratamiento de la señal de referencia”.

El proyecto de grado ha sido realizado después de observar que en el Laboratorio de Instrumentación Virtual no cuenta con equipos suficientes para la realización de prácticas de control. La tarjeta NI USB-6009 es un equipo actualizado que permite realizar el control y adquisición de datos, lo que permite que se pueda dar un aprendizaje de calidad.

La tarjeta NI USB-6009 posee un puerto USB lo que permite adaptar a cualquier computador, es de fácil instalación, está a su vez posee también mayor velocidad de muestreo y una amplia gama de aplicaciones, esta tarjeta permite que cada alumno de los diferentes niveles de la carrera de Electrónica Mención Instrumentación y Aviónica pueda ampliar sus conocimientos.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad la optimización, actualización de equipos tecnológicos y las guías didácticas permiten al usuario un mejor desempeño de las máquinas, de este

modo el usuario podrá ampliar sus conocimientos teóricos y prácticos. Con la utilización de un HMI (Interfaz Hombre-Máquina), se podrá tomar decisiones online, también permitiendo hacer un registro de datos y manejo de alarmas.

En la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” sede Latacunga cuenta con el Laboratorio de Automatización y Control de Procesos donde se realizan varias prácticas de control y adquisición de datos digitales y analógicos, donde existe una carencia de equipos tecnológicos para todas las aplicaciones de automatización, lo que permite que la institución se incline en actualizar y/o ampliar los equipos del aula virtual de prácticas, con el fin de que cada uno de los profesionales se encuentren preparados para cada infortunio que se presente en el área laboral y de soluciones oportunas.

La implementación de un control de velocidad PID de un motor DC mediante el software LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009, será de gran ayuda para que los estudiantes de las carreras de Electrónica mención Instrumentación & Aviónica y Automatización e Instrumentación, puedan incrementar sus conocimientos, que será de mucha utilidad para el desarrollo profesional en el campo laboral.

Esta tarjeta de adquisición de datos tiene como propósito realizar prácticas de adquisición de señales, controlando sus variables y monitorearlas a través de LabVIEW. La tarjeta DAQ (Adquisición de Datos), es un equipo que permite generar y a su vez recibir señales digitales y analógicas, es ideal para aplicaciones como mediciones portátiles y es de fácil configuración. Dentro de la Carrera de Electrónica es de gran importancia que el Laboratorio de Instrumentación Virtual posea los equipos e instrumentos necesarios para realizar prácticas sin limitaciones.

1.3. Justificación

Los centros de capacitación con el avance de la tecnología requieren equipos que permitan realizar trabajos de control y adquisición de datos que se encuentren innovadores, esto con el fin de que los estudiantes estén preparados con las bases actualizadas.

Los principales beneficiados del desarrollo de este proyecto serán los estudiantes de la Carrera de Tecnología Superior de Automatización e Instrumentación en área de automática y robótica ya que podrán adquirir habilidades en el control y adquisición de datos mediante la utilización de la tarjeta NI-USB 6009, también el HMI permitirá que los usuarios interactúen con mayor facilidad en el manejo de la tarjeta, además la institución podrá permitir que cada alumno alcance destrezas que le permitan desenvolverse en el campo laboral.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar un HMI para el control PID de velocidad de un motor DC utilizando el software LabVIEW y la tarjeta NI USB-6009 en el laboratorio de instrumentación virtual.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar las características técnicas y especificaciones de funcionamiento de la tarjeta NI USB-6009.
- Desarrollar un HMI mediante el software LabVIEW 2019 para el control PID de velocidad de un motor DC del módulo del aula virtual PCT-1.

- Realizar pruebas de diagnóstico en la interfaz gráfica y desarrollar el control PID de velocidad de un motor de DC mediante la tarjeta NI USB-6009.

1.5. Alcance

El presente proyecto está enfocado en implementar un HMI desarrollado en el software LabVIEW 2019, para el control de velocidad de un motor DC con la tarjeta NI USB-6009, en el Laboratorio de Instrumentación virtual de la Unidad de Tecnologías de las Fuerzas Armadas "ESPE", para el desarrollo del HMI se tomará en cuenta las recomendaciones de la norma ISA 101 y adicionalmente se realizará una guía de laboratorio para la configuración de la tarjeta.

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. Motor corriente continua

En lo propuesto por (Patiño, 2018), el motor de corriente continua es una máquina que transforma energía eléctrica en mecánica provocando un movimiento rotatorio de un campo magnético alrededor de una espira o bobinado que toma diferentes formas. Al pasar la corriente eléctrica por la bobina esta se comporta como un imán cuyos polos se rechazan o atraen con el imán que se encuentra en la parte inferior, al dar media vuelta el paso de corriente se interrumpe y la bobina deja de comportarse como imán, pero por inercia se sigue moviendo hasta que da otra vuelta y la corriente pasa nuevamente repitiéndose el ciclo haciendo que el motor rote constantemente.

Esta máquina es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones para aplicaciones de control y automatización de procesos. La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad. (Garcia, 2015)

Figura 1.

Motor corriente continua.



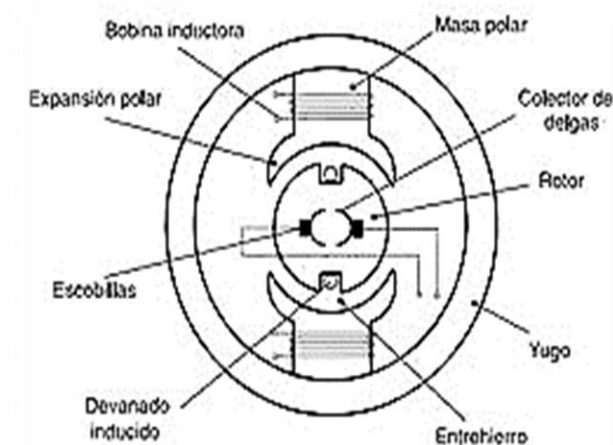
Nota: Tomado de (León, 2015).

2.2. Partes de un motor de corriente continua

Los motores de corriente directa o corriente continua, son utilizados especialmente en casos donde es importante el poder cambiar o regular continuamente la velocidad del motor. En esta sección se analizará las partes de un motor de corriente continua.

Figura 2.

Partes de un motor de corriente continua.



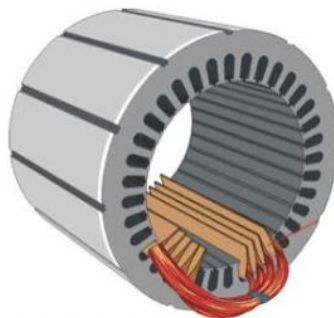
Nota: Tomado de (tecnind2, 2015).

2.2.1. Estator

Es una corona de material ferromagnético, llamado o conocido como carcasa, culata o yugo; es la parte fija del motor responsable del establecimiento del campo magnético de excitación. En su interior se encuentran los polos inductores distribuidos en número par, sujetos mediante tornillos a la carcasa, constituidos por un núcleo y por unas expansiones en sus extremos. Alrededor de los polos se encuentran unas bobinas, que constituyen el devanado inductor, generalmente de hilo de cobre asilado que al ser alimentado por una corriente continua, generan el campo inductor de la maquina presentando alternativamente polaridades norte y sur. (tecnind2, 2015)

Figura 3.

Estator de un motor de corriente continua.



Nota: Tomado de (Tecnicos en electricidad, 2017).

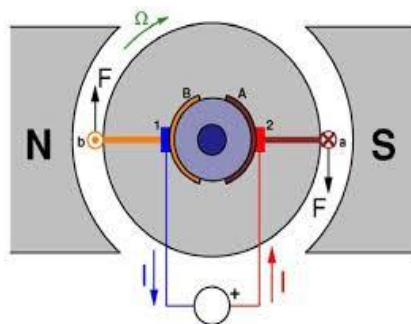
2.2.2. Polos auxiliares

En las máquinas de cierta potencia se encuentran distribuidos alternativamente entre éstos, otros polos auxiliares o de conmutación, macizos y sin expansiones, cuya misión es facilitar la conmutación y evitar la generación de chisporroteo en el contacto entre las delgas del colector y las escobillas. (Automatisoindustrial, 2015)

En la **Figura 4** se muestran los polos opuestos de conmutación del motor de corriente continua, el un polo se denota con la letra N (norte) y el polo opuesto con la letra S (sur).

Figura 4.

Polos de conmutación.



Nota: Tomado de (Rodriguez, 2015).

2.2.3. Rotor

Es la parte móvil del motor, que proporciona el par para mover la carga, consta de un conjunto de bobinas denominadas, como bobinas inducidas que van arrolladas sobre las ranuras de un núcleo de hierro que recibe el nombre de inducido. (tecnind2, 2015)

Figura 5.

Rotor inducido.



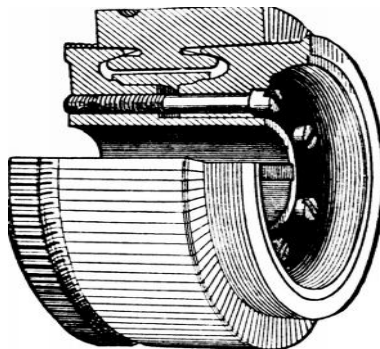
Nota: Tomado de (Alejandro, 2008).

2.2.4. Colector

Son un conjunto de láminas de cobre, aisladas entre sí, que forman el colector y a las cuales se sueldan los extremos de las bobinas inducidas. El conjunto se monta sobre un eje y está apoyado sobre cojinetes. (tecnind2, 2015)

Figura 6.

Colector de delgas.



Nota: Tomado de (Hawkins Electrical Guide, 2017).

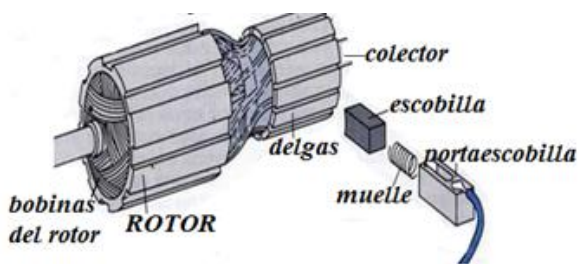
2.2.5. Escobillas

Las escobillas son piezas generalmente de grafito, destinadas a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica entre el elemento móvil, el colector de delgas y el elemento fijo. Las escobillas se sujetan en los porta escobillas, que además de sujetar la escobilla aseguran el correcto contacto con el colector. (Valenzuela, 2013)

En la **Figura 7** se muestra las partes del conjunto de elementos que hacen contacto con las delgas del colector, la escobilla, porta escobillas y muelle.

Figura 7.

Escobillas.



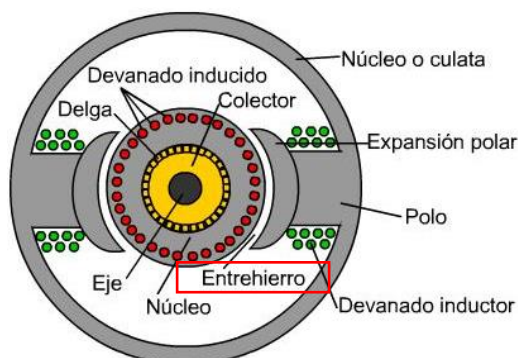
Nota: Tomado de (AulaFacil, 2020).

2.2.6. Entrehierro

Es el espacio que hay entre el estator y el rotor, es imprescindible que exista para evitar el rozamiento entre ambos, aunque debe ser lo menor posible, ya que el aire presenta una elevada reluctancia magnética, y si el entrehierro fuese muy amplio se debilitara el campo magnético inductor. (Automatisoindustrial, 2015)

En base a lo dicho por (tecnind2, 2015), algunos motores además incorporan polos de conmutación, rodeados por unas bobinas conectadas en serie con el devanado inducido y recubiertas de una película aislante para evitar cortocircuitos.

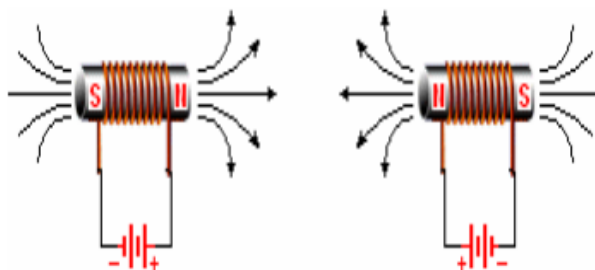
En la **Figura 8** muestra a ubicación del entrehierro, donde el rotor gira dentro del estator y el entrehierro es un espacio que existe entre ambos.

Figura 8.*Entrehierro.*

Nota: Tomado de (Universidad de Vigo, 2011).

2.2.7. Funcionamiento de un motor DC

El funcionamiento se basa en la interacción entre el campo magnético del imán permanente y el generado por las bobinas, ya sea una atracción o una repulsión, hacen que el eje del motor comience su movimiento. Cuando una bobina es recorrida por la corriente eléctrica, esta genera un campo magnético, es decir de dos polos, un polo norte y un polo sur. (Patiño, 2018)

Figura 9.*Polos del núcleo.*

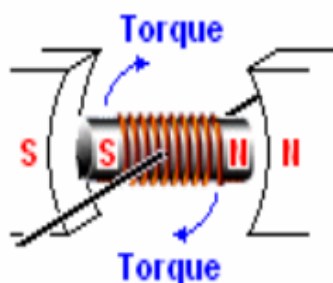
Nota: Tomado de (Patiño, 2018).

Los polos pueden ser invertidos fácilmente con solo cambiar la polaridad de la bobina, por otro lado al núcleo de las bobinas, las convierte en un electroimán, lo que

las cargas opuestas o polos opuestos se atraen y cargas o polos iguales se repelen, esto hace que el eje del motor gire produciendo un determinado torque. (Patiño, 2018)

Figura 10.

Torque o fuerza de giro.



Nota: Tomado de (Patiño, 2018).

La fuerza producida por los cuerpos en rotación es lo que se llama torque. El torque es una fuerza que tiende a rotar o hacer que giren las cosas, mientras mayor sea el torque de un motor, más fuerte es, depende de factores como: la cantidad de corriente, el espesor del alambre de cobre, la cantidad de vueltas del bobinado y la tensión. (Patiño, 2018)

De acuerdo a lo dicho por (tecnind2, 2015), un motor de corriente continua permite regular continuamente la velocidad del eje y obtener un par de arranque elevado, donde se distinguen varias fases de funcionamiento de los motores de corriente continua, los cuales se exponen a continuación.

- **Arranque**, es el momento inicial en el que se conecta a la red, en ese instante el motor debe vencer el par resistente que se le opone debido a la inercia y a los rozamientos de los órganos móviles del motor, este par resistente debe ser inferior al par de arranque del motor, porque de no ser así el motor no arrancaría.

- **Aceleración**, es el periodo en que el motor va ganando velocidad hasta alcanzar la de régimen nominal, por ello el par motor debe ser muy alto en esta fase, ya que además de vencer el par resistente debe acelerar el motor hasta alcanzar la velocidad de funcionamiento nominal.
- **Régimen nominal**, es cuando el motor ha alcanzado su marcha nominal y se mantienen todos los parámetros, en este instante el par motor debe ser igual al par resistente y de signo opuesto.
- **Estabilidad en los motores de corriente continua**, los parámetros del motor pueden modificarse de forma inesperada, debido a pérdidas de carga, etc. Para que el motor se comporte de modo estable es preciso que responda a estas variaciones tratando de anularlas.

2.3. Tipos de motores de corriente continua

Los motores de corriente continua o directa se clasifican de acuerdo a la forma en que se crean los campos magnéticos del estator, como son: motores de imán permanente, motor shunt, motor serie y motor compuesto.

2.3.1 Motores de imán permanente (pm)

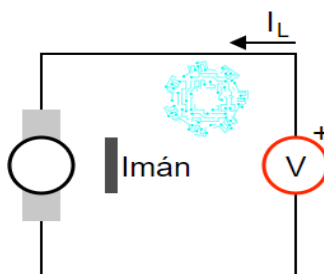
En este tipo de motores, los campos del estator son generados mediante imanes permanentes que no requieren fuente de alimentación externa y por lo tanto no producen un calentamiento. Los motores PM son más ligeros y pequeños en comparación con otros motores de CD con algunas características equivalentes ya que la intensidad del imán permanente es alta. También resulta sencillo invertir el sentido de giro al conmutar la dirección del voltaje aplicado, ya que la corriente y el campo cambian de dirección solo en el rotor. El motor de imán permanente es ideal en aplicaciones de control por computadora debido a su linealidad torque-velocidad, aunque únicamente se utilizan en aplicaciones de baja potencia pues su potencia nominal usualmente se limita

a 5 hp (3278 W) o menos, este motor puede ser con escobillas, sin escobillas o de pasos. (MecatrónicaLATAM, s.f.)

El motor de imán permanente de la **Figura 11**, utiliza un imán para suministrar el flujo de campo magnético, no tienen cables de campo y solo cuentan con dos cables para alimentar la armadura.

Figura 11.

Motor de imán permanente.

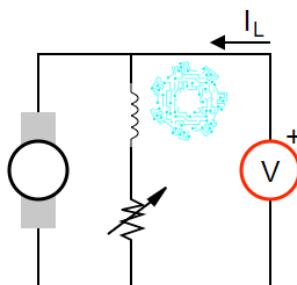


Nota: Tomado de (MecatrónicaLATAM, s.f.).

2.3.2. Motor shunt

Conformados por una armadura de devanados de campo conectados en paralelo que son activos mediante la misma fuente. Los motores shunt presentan velocidad casi constante sobre un gran rango de carga, cuentan con un torque de arranque de apriximadamente 1.5 veces el torque operativo nominal, tienen torque de arranque mas bajo que cualquiera de los motores DC y se puede convertir económicamente para permitir una velocidad ajustable al colocar un potenciometro en serie con los devanados de campo. La corriente de carga total es la suma de las corrientes de armadura y campo. (MecatrónicaLATAM, s.f.)

En la **Figura 12**, el bobinado de excitación se encuentra en paralelo con el circuito de la armadura con un potenciómetro en serie a los devanados.

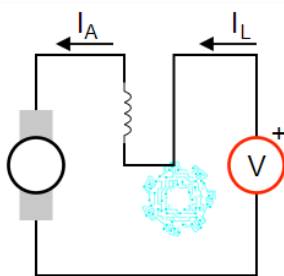
Figura 12.*Motor shunt*

Nota: Tomado de (MecatrónicaLATAM, s.f.).

2.3.3. Motor serie

Cuentan con devanados de armadura y campo conectados en serie, de modo que las corrientes de armadura y campo son iguales. Los motores en serie generan torques de arranque muy altos, su velocidad es extremadamente variable dependiendo de la carga, y gran velocidad cuando la carga es pequeña. Los motores en serie pueden fallar catastróficamente cuando se descargan súbitamente debido a la fuerza dinámica a altas velocidades, a esto se le llama sin control. (MecatrónicaLATAM, s.f.)

En la **figura 13**, se observa que el inducido y el devanado de excitación van conectados en serie, por lo que la corriente de excitación o del inductor es la misma del inducido dada al motor.

Figura 13.*Motor serie*

Nota: Tomado de (MecatrónicaLATAM, s.f.).

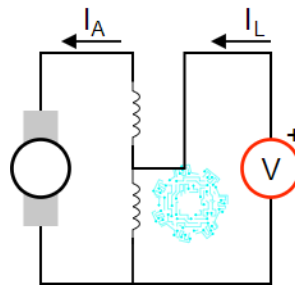
2.3.4. Motor compuesto

Estos motores incluyen tanto devanados de campo en derivación como en serie, lo que resulta en características combinadas de motores en derivación y en serie. Parte de la corriente de carga restante pasa solo a través de los devanados en derivación. La velocidad máxima de un motor compuesto es limitada, su regulación de velocidad no es tan buena como la de un motor en derivación. El torque producido por los motores compuestos es un poco menor que el de los motores en serie de similar tamaño. (MecatrónicaLATAM, s.f.)

En la **Figura 14** El motor posee el devanado en derivación, cuando trabaja en vacío impide el llamado embalamiento de los motores serie, cuando el motor posee una carga el devanado en serie hace que el flujo magnético aumente con lo que la velocidad disminuye.

Figura 14.

Motor compuesto



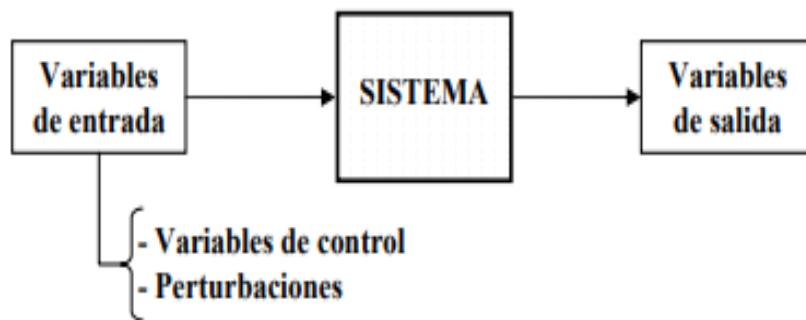
Nota: Tomado de (MecatrónicaLATAM, s.f.).

2.4. Sistema de control

Un sistema dinámico 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. Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos, variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control. (Microsoft)

Figura 15.

Esquema general de un sistema.



Nota: Tomado de (Microsoft).

Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados. (Microsoft)

Según lo expresado por (Microsoft), un sistema de control ideal debe ser capaz de garantizar su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y ser robusto ante perturbaciones y errores del control.
2. Ser eficiente según un criterio preestablecido, el mismo que consiste en que el control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos.
3. Ser de fácil implementación y de operación sencilla en tiempo real con ayuda de un ordenador.

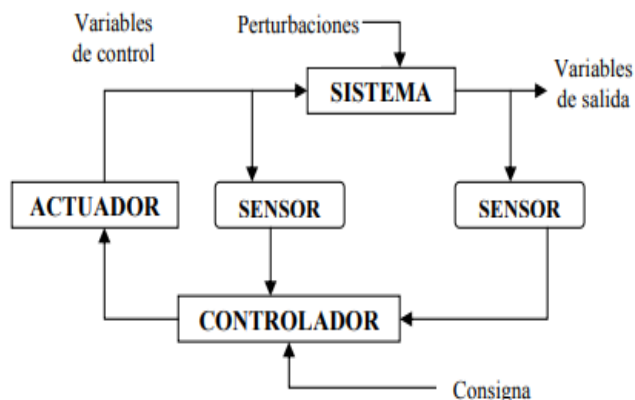
2.4.1. Elementos básicos de un sistema de control

Según (Microsoft), los elementos básicos que conforman un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores: Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- Controlador: Utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.
- Actuador: Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

Figura 16.

Control genérico.



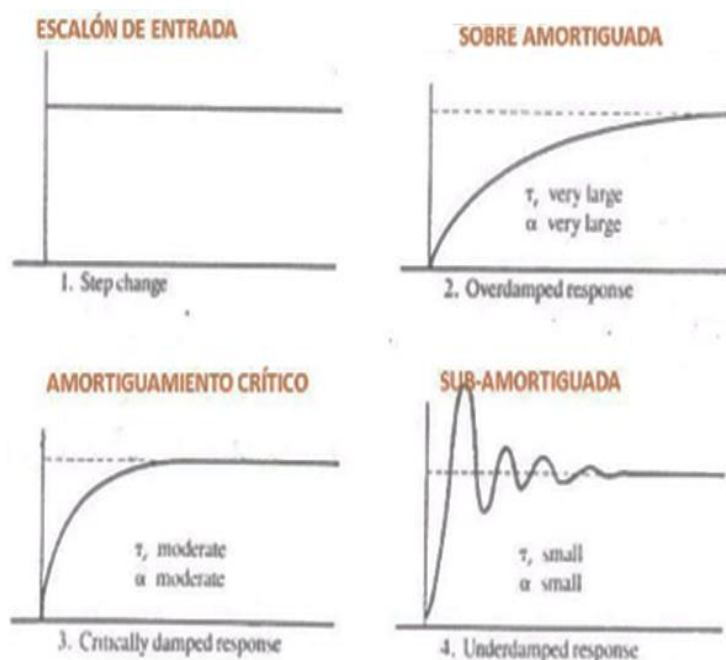
Nota: Tomado de (Microsoft).

2.4.2. Tipos de respuesta ante controladores

La carga de un sistema de control es medida por medio del valor de la variable manipulada requerida, por el proceso en cada instante para obtener una condición balanceada, en la **Figura 17**, se observan los tipos de respuesta que se obtienen de un sistema de control.

Figura 17.

Respuesta de un sistema



Nota: Tomado de (wojeda, s.f.).

2.5. Tipos de control

2.5.1. Control proporcional

Un sistema de control proporcional es un tipo de sistema de control de realimentación lineal. El sistema de control proporcional es más complejo que un sistema encendido/apagado, pero más sencillo que un sistema de control proporcional-integral-derivativo. Un controlador proporcional calcula la diferencia entre la señal de la PV (variable de proceso) y la señal de SP (setpoint), lo que se conoce como error. Este valor representa cuánto el proceso se está desviando del valor del SP. Es el más sencillo de los distintos tipos de control y consiste en amplificar la señal del error antes de aplicarla a la planta o proceso. La salida de un controlador proporcional es el producto de la multiplicación de la señal de error y la ganancia proporcional y puede ser calculado como $SP - PV$ o como $PV - SP$, dependiendo si es que, o no, el controlador tiene

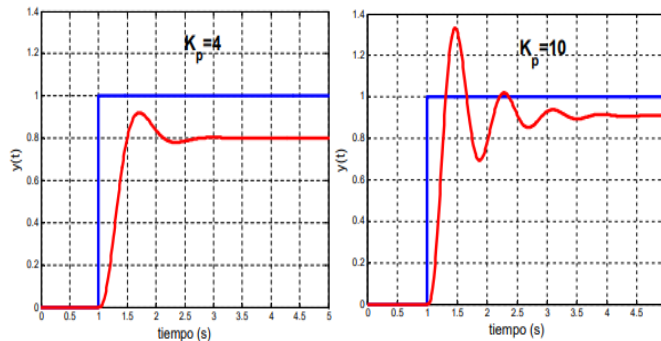
que producir un incremento en su señal de salida para causar un incremento en la variable de proceso, o tener un decremento en su señal de salida para hacer de igual manera un incremento de PV. (Reyes)

La fórmula del control proporcional está dada por: $m(t) = K_p * e(t)$

Según lo expresado por (Ogata, Ecured, 1990), la fórmula del control proporcional, donde: $m(t)$ es la salida del controlador, $e(t)$ es señal del error actuante y K_p es la ganancia de bloque de control o sensibilidad proporcional, a mayor ganancia K_p , mayor actuación ante el error, el sistema evoluciona más rápido, con mayor sobre oscilación. No anula los errores en régimen permanente.

Figura 18.

Control proporcional



Nota: Tomado de (Ortega).

En la **Figura 18**, se observa un control proporcional donde la señal de color azul es el SP y posee una señal de control dada de color rojo, donde las señal no llega al SP por lo que no será un control estable, a diferencia de tener un k_p alto donde existe un sobre impulso en la señal y el error es prolongado.

2.5.2. Control integral

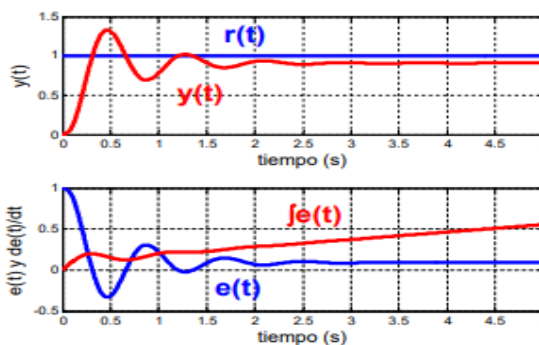
En los reguladores el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error, por lo que en este tipo de control la acción varía en función de la desviación de la salida y del tiempo en que se mantiene esta desviación. (Sánchez M, 2015)

La acción de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario. Si se duplica el valor de $e(t)$, el valor de $m(t)$ varía dos veces más rápido, pero para un error actuante a cero, el valor de $m(t)$ se mantiene estacionario en muchas ocasiones esta acción de control recibe el nombre de control reposición. Según lo expresado por (Ortega), este control se aplica conjuntamente con una acción proporcional, formando un PI, para encontrar un compromiso entre el transitorio y el permanente de la respuesta temporal, el tiempo integral da idea del tiempo que tarda la respuesta temporal en alcanzar el permanente y mejora el régimen permanente, ya que el controlador aumenta el tipo del sistema en bucle abierto.

La fórmula del control integral está dada por: $m(t) = K \int_0^t e(t) dt$

Figura 19.

Control integral + proporcional.

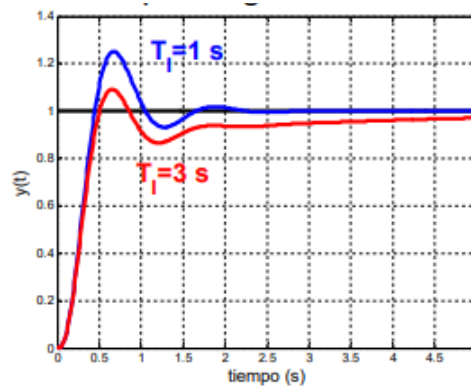


Nota: Tomado de (Ortega)

En la **Figura 19**, se tiene un control integral donde se observa que tarda un tiempo de 3 a 4 veces, en rectificar la señal de error o de perturbación al momento de realizar el control y alcanzar la permanente. Además se observa la combinación de un control integral y un control proporcional, donde se mejora el régimen permanente ya que se aumenta el tipo de sistema en bucle abierto, ese efecto es similar al proporcional.

Figura 20.

Efecto del tiempo integral



Nota: Tomado de (Ortega).

En la **Figura 20**, se observa el efecto de la integral que permite disminuir y eliminar el error en estado estacionario y existe una desviación de los dos controladores, la señal de color rojo y azul temporalmente hasta reducir el error y llegar al SP.

2.5.3. Control derivativo

La acción de control derivativo, es una de las acciones de control empleadas en los lazos de regulación automática y se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error. Es la acción de control donde el valor de la salida es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. (Ogata, Ecured, 1990)

Cuando se agrega un controlador proporcional, concede un medio para obtener un controlador con alta sensibilidad que responde a la velocidad de cambio del error y puede producir una corrección significativa antes de que la magnitud del error sea demasiado grande. El control derivativo, anticipa, pues, el error de accionamiento, inicia una acción correctiva temprana y tiende a aumentar la estabilidad del sistema. (Obando, 2018)

$$\text{La fórmula está dada por: } m(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde $m(t)$ es la salida del controlador, $e(t)$ es el error actuante y T_d es el tiempo derivativo.

El control derivativo se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de control y su repercusión a la variable controlada. (Undecategorized, 2011)

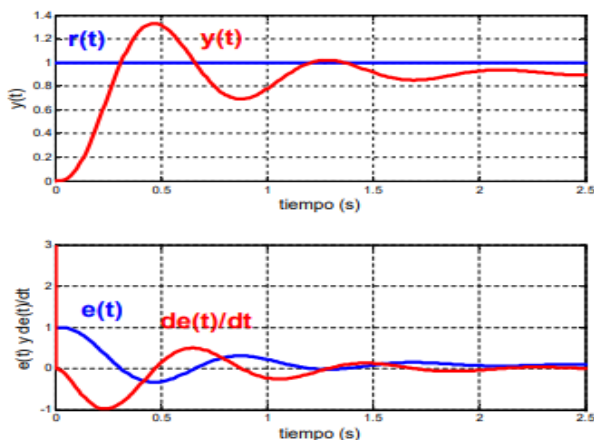
Cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso, ahora cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al valor deseado. El óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mismas oscilaciones por sí solo. (Ogata, Ecured, 1990)

No se debe aplicar esta acción de forma aislada, ya que si el error es constante la señal de control es nula lo que no corrige el error, y si la derivada del error es constante se aplica la misma señal de control constaten por lo que el error crece constantemente. En el control Proporcional más el Derivativo, el tiempo derivativo da idea del tiempo de predicción del error en la respuesta transitoria, existe problemas con ruidos, se suele implementar con un polo de alta frecuencia y disminuye la sobre oscilación por el efecto anticipativo de la acción derivativa. (Ortega)

En la **Figura 21**, $r(t)$ se mantiene constante, $y(t)$ es el error aplicado donde el control derivativo tiene un tiempo de control si el error es constante. En la siguiente señal disminuye la sobre oscilación por el efecto anticipativo de acción derivativa y su tiempo de control es menor.

Figura 21.

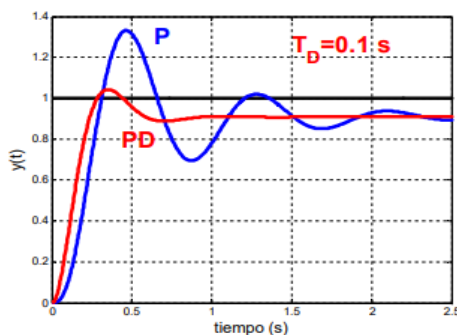
Control derivativo



Nota: Tomado de (Ortega).

Figura 22.

Comportamiento del PD con respecto al P



Nota: Tomado de (Ortega).

En la **Figura 22**, se muestra una comparación entre el control Proporcional y el control Proporcional + Derivativo, la señal de color azul corresponde al control

proporcional y la señal de color rojo corresponde al proporcional-derivativo, existe una diferencia en relación al tiempo de respuesta como muestra la figura, es de 0,1s, donde en control proporcional + derivativo realiza el control mucho más rápido corrigiendo el error. (Ortega)

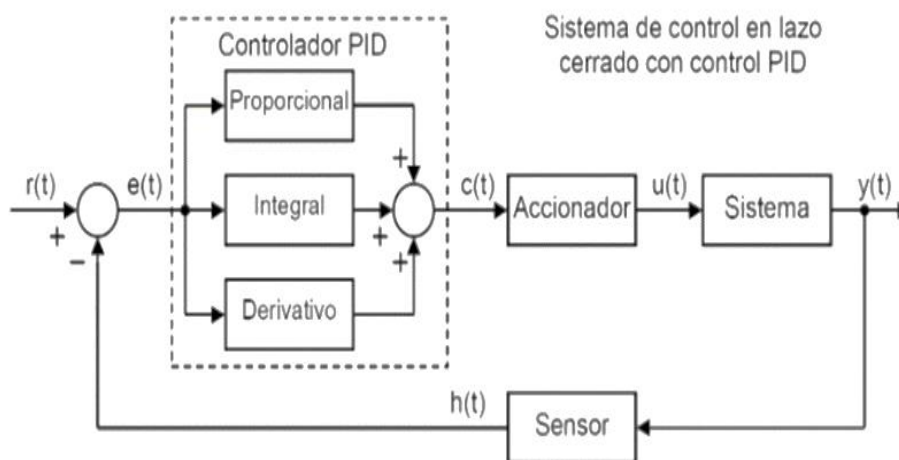
2.5.4. Control proporcional, integral y derivativo

El controlador PID está compuesto de tres controladores descritos anteriormente, el control proporcional, integral y derivativo. Un controlador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema de lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. (Ogata, Picuino, 1990)

En la **Figura 23**, se muestra la estructura de un sistema de control PID en lazo cerrado, mostrando los componentes que lo conforman.

Figura 23.

Control PID



Nota: Tomado de (Ogata, Picuino, 1990).

2.5.5. Señal de referencia y señal de error

La señal $r(t)$ se denomina referencia e indica el estado que se desea conseguir en la salida del sistema $y(t)$. En la **Figura 23**, la entrada al controlador PID es la señal

de error $e(t)$. Esta señal indica al controlador la diferencia que existe entre el estado que quiere conseguir o referencia $r(t)$ y el estado real del sistema medido por el sensor, señal $h(t)$. Mientras la señal de error es grande, esto significa que el estado del sistema se encuentra alejado del estado de referencia determinado, en caso contrario si el error es pequeño esto significa que el sistema ha alcanzado el estado deseado. (Ogata, Picuino, 1990)

La ecuación del controlador PID es: $c(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t) dt + K_d * \frac{de(t)}{dt}$

Donde $c(t)$ es la señal de control, $e(t)$ la señal de error y K_p , K_i , K_d son los parámetros del controlador PID.

2.6. Métodos de ajustes de controladores PID

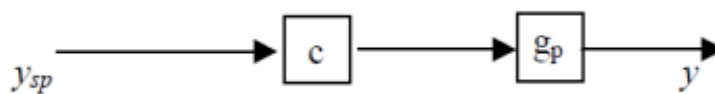
La sintonización de los controladores Proporcional, Integral, Derivativo, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (K_c , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso y a partir de esta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado. Antes de revisar algunas de las técnicas de sintonización disponibles, se establecerán los diferentes tipos de funcionamiento que pueden presentarse en un lazo de control realimentado, donde se encuentran dos entradas, el valor deseado $r(t)$ y la perturbación $z(t)$ además de una señal retroalimentada $y(t)$. Por lo que es importante determinar los requisitos de funcionamiento del lazo de control para seleccionar un procedimiento de sintonización adecuado. (Paredes, 2011)

2.6.1. Método de lazo abierto

Se basa en la curva de respuesta del sistema ante una entrada en escalón. El controlador cuando está instalado opera de manera manual, produciendo una curva de reacción en forma de escalón a la salida del controlador del proceso. Generalmente, a partir de la curva de reacción del proceso existen modelos que son: Primer orden más tiempo muerto, polo doble más tiempo muerto, segundo orden más tiempo muerto, de acuerdo a la curva de reacción del proceso se identifica el modelo, usualmente el de primer orden más tiempo muerto, es el modelo base para la determinación de los parámetros del controlador. (Alfaro, 2002)

Figura 24.

Estructura lazo abierto



Nota: Tomado de (Mazzone, 2002).

En la **Figura 24**, se muestra un bucle o lazo abierto donde: y_{sp} es la señal de entrada, c es el controlador, g_p es el actuador y donde y es la salida, la misma que depende de la señal de entrada, este bucle no verifica que la salida sea igual a la señal de entrada deseada, por lo que este sistema no es capaz de corregir errores que se pueden presentar en la salida.

2.6.2. Método de lazo cerrado

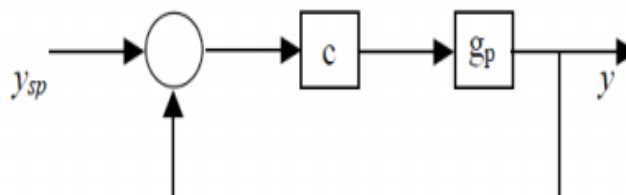
El operador opera automáticamente produciendo un cambio en el valor deseado, se obtiene información del comportamiento dinámico del sistema para identificar un modelo de orden reducido para el proceso, o de las características de la oscilación

sostenida del mismo, para utilizarla en el cálculo de los parámetros del controlador.

(Paredes, 2011)

Figura 25.

Estructura lazo cerrado



Nota: Tomado de (Mazzone, 2002).

En la **Figura 25**, se muestra un bucle o lazo cerrado o realimentado, este tipo de sistema comprueba la señal de salida con respecto a la señal de entrada y toma la decisión de modificarla o no la señal de salida, en este sistema Y_{sp} es la entrada ingresando a un comparador, c es el control, g_{sp} es el actuador y antes de la salida existe una retroalimentación para corregir los errores que se presenten.

2.7. Métodos de sintonización de lazo abierto

2.7.1. Método de Ziegler y Nichols

El primer procedimiento sistematizado para el cálculo de los parámetros de un controlador PID fue desarrollado por Ziegler y Nichols. El criterio de desempeño que seleccionaron fue el de un decaimiento de $\frac{1}{4}$. O sea que el error decae en la cuarta parte de un periodo de oscilación. Las ecuaciones fueron determinadas de forma empírica a partir de pruebas realizadas en el laboratorio con diferentes procesos, y están basadas en un modelo de primer orden, más tiempo muerto identificado por el método de la tangente, para un funcionamiento de lazo de control como regulador con un controlador PID ideal. (Alfaro, 2002)

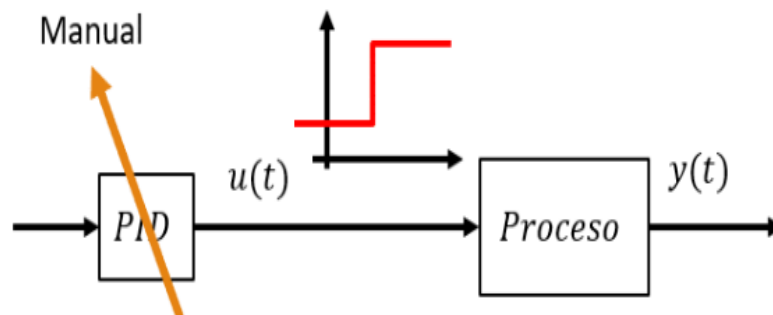
Las fórmulas de sintonización de este método son:

$$a) k_c = 1.2 \frac{\tau}{k_p t_m} \quad b) k_c = 2.0 \frac{\tau}{k_p t_m} \quad c) T_i = 2t_m \quad d) T_d = 0.5t_m$$

Este método utilizado en lazo cerrado, presenta un controlador en modo manual, en la **Figura 26**, se muestra que el control PID es anulado para realizar un control manual para poder generar una variación del tipo escalón en la propia salida del controlador PID. (Ogata K. , 2010)

Figura 26.

Estructura lazo abierto en modo manual.



Nota: Tomado de (Castaño, s.f.).

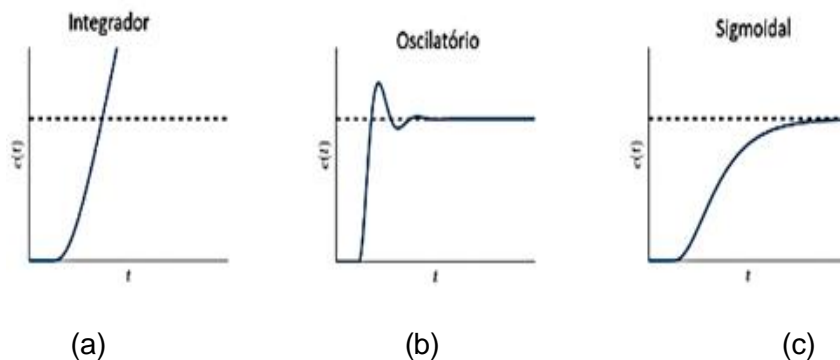
Esto quiere decir que, la señal de entrada será en tipo escalón, a partir de la respuesta de salida se obtienen los parámetros *PID*. Para poder utilizar este método es necesario que el sistema tenga un comportamiento del tipo sigmoideal o en forma de S, por lo que la respuesta no tendrá sobre impulsos en lazo abierto y no tendrá una dinámica integradora que crezca constantemente al transcurrir el tiempo (Ogata K. , 2010). La curva de tipo S que se observa en la **Figura 27**, está dada por dos constantes, la primera es el retardo del tiempo L y por la constante de tiempo τ , dado por un sistema de primer orden con retardo y cuya función de transferencia es:

$$G_p(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

Figura 27.

Tipos de señales.

(a) señal tipo integrador, (b) señal tipo oscilatorio, (c) señal tipo sigmoidal.

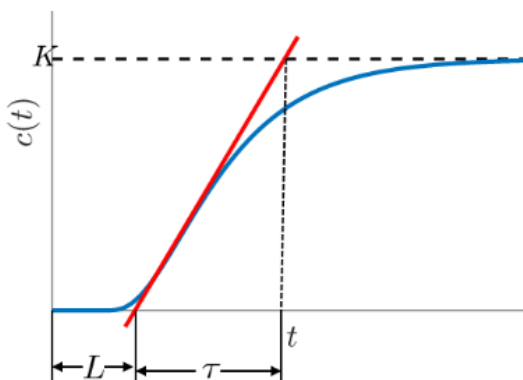


Nota: Tomado de (Castaño, s.f.).

Según lo dicho por (Alfaro, 2002), podremos obtener los parámetros del sistema del primer orden con retardo de la siguiente manera: el retardo y la constante del tiempo se obtienen dibujando una tangente en el punto de inflexión de la curva sigmoidal y después determinar las interacciones de la línea tangente con el eje del tiempo y el eje donde $c(t) = K$ como se muestra en la **Figura 28**.

Figura 28.

Señal en tipo S y tangente



Nota: Tomado de (Castaño, s.f.).

Esta respuesta también puede ser obtenida aproximando a un sistema de segundo orden sobre amortiguado a dinámicas semejantes a un sistema de primer orden. De esa forma Ziegler y Nichols sugirieron a un ajuste PID estableciendo los valores de K_p , T_i y T_d , lo que se puede observar en la **Tabla 1**. (Ogata K. , 2010)

Tabla 1.

Regla de sintonía de Ziegler y Nichols.

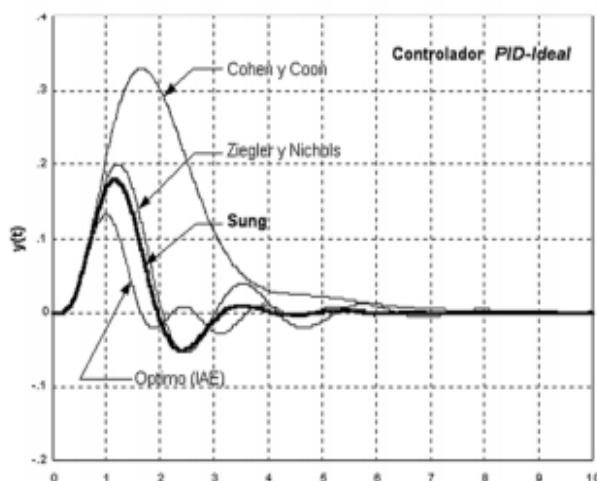
CONTROLADOR	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{L}$	2L	0.5L

Nota: Regla de sintonía de Ziegler y Nichols basada en la respuesta escalón del primer método. Tomado de (Ogata K. , 2010)

Según el autor Corripio (1990) las ecuaciones de sintonía de Ziegler Nichols son buena cuando el factor de incontrolabilidad (L/t) está entre 0.1 y 0.3, sin embargo, hay autores que admiten que puede subir hasta 1.4. Esta sintonía fue creada para controladores analógicos y no para controladores digitales. (Ogata K. , 2010)

Figura 29.

Método de Ziegler y Nichols



Nota: Tomado de (Alfaro, 2002).

2.7.2. Método de Cohen y Coon

Según lo expresado por (Alfaro, 2002), al desarrollar el método de sintonización de Ziegler y Nichols no consideraron que el proceso fuera auto regulado. Por lo que Cohen y Coon introdujeron, entonces un índice de auto regulación definido como $\mu = \frac{t_m}{T}$ y plantearon nuevas ecuaciones de sintonización. Basadas en el mejor modelo de primer orden más tiempo muerto que se puede obtener para lazos de control que funcionan como regulador, en el criterio de desempeño de decaimiento de $\frac{1}{4}$ con sobrepaso mínimo, y con mínima área bajo la curva de respuesta y un controlador PID-ideal.

Las ecuaciones de este método para encontrar los valores de K_c , T_i y T_d del controlador son:

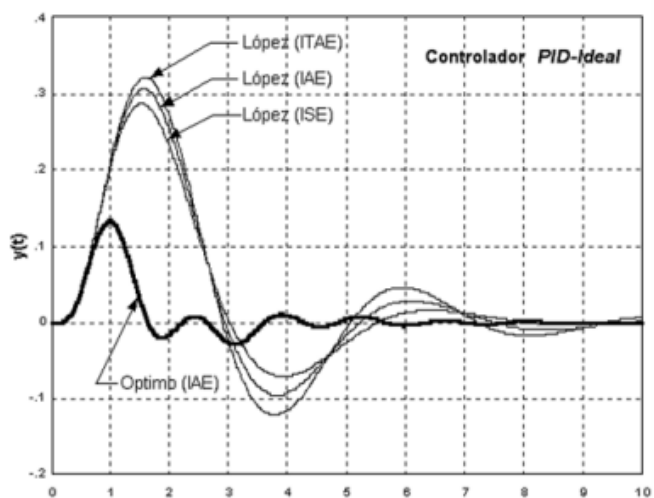
$$a) K_c = \frac{\tau}{k_p t_m} \left(\frac{4}{3} + \frac{t_m}{4\tau} \right) \quad b) T_i = t_m \left(\frac{32 + 6t_m/\tau}{13 + 8t_m/\tau} \right) \quad c) T_d = t_m \left(\frac{4}{11 + 2t_m/\tau} \right)$$

2.7.3. Método de López, Miller, Smith y Murrill

Por lo expuesto en el trabajo de investigación de (Alfaro, 2002), el primer método basado en criterios integrales que presentó ecuaciones para el cálculo de los parámetros del controlador fue desarrollado por López et al, y es conocido como método de López. Definiendo una función de costo de la forma, de la siguiente manera: $\Phi = \int_0^{\infty} F[e(t), t]dt$ donde: F es una función del error y del tiempo, se obtiene un valor que caracteriza la respuesta del sistema. Φ Es una función de los parámetros del controlador (K_c , T_i , T_d). Entre menor sea el valor de Φ , mejor será el desempeño del sistema de control, por ello un desempeño óptimo se obtiene cuando Φ es mínimo.

Figura 30.

Método de López



Nota: Tomado de (Alfaro, 2002).

2.7.4. Método de Kaya y Sheib

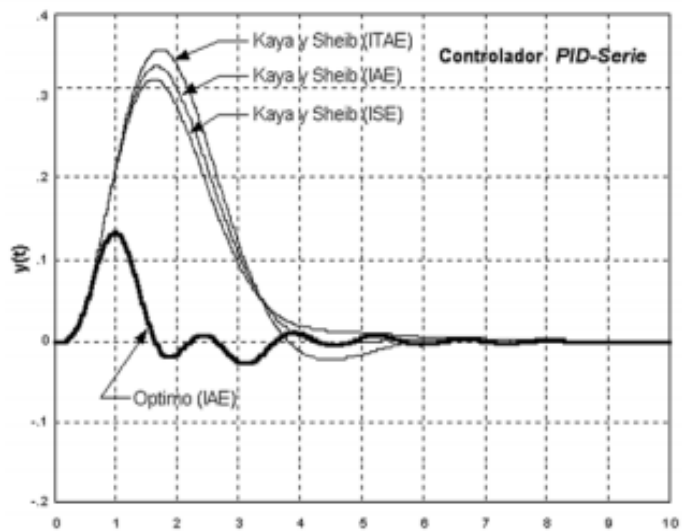
Mientras López desarrolló el método de sintonización para un controlador *PID-Ideal*, Kaya y Sheib realizaron lo mismo para controladores que denominaron *PID-Clásico (PID-Serie)*, *PID-No Interactuante (una variación del PID-Paralelo)* y *PID-*

Industrial. El procedimiento de sintonización está basado en el mejor modelo del primer orden más tiempo muerto que se pueda obtener para lazos de control que funcionan como reguladores. El criterio de desempeño corresponde a la minimización de alguno de los criterios integrales y el controlador, las ecuaciones de sintonización son las mismas dadas por López. (Alfaro, 2002)

En la **Figura 31**, se muestra la señal ITAE, (Integral del error absoluto por el tiempo), la señal IAE, (Integral del error absoluto) y la señal de ISE, (Integral del error cuadrático), es la respuesta de un cambio de la perturbación.

Figura 31.

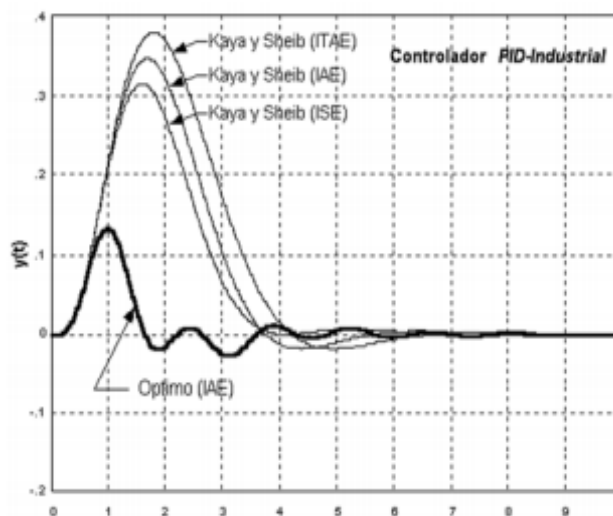
Método de Kaya y Sheib PID Serie



Nota: Tomado de (Alfaro, 2002).

Figura 32.

Método de Kaya y Sheib PID Industrial



Nota: Tomado de. (Alfaro, 2002).

2.7.5. Método de Sung, O, Lee y Yi

Los métodos de sintonización de controladores que optimizan los criterios integrales, vistos anteriormente, se basan en un modelo de primer orden más tiempo muerto. Sung et al, por su parte, basó su procedimiento de sintonización con un modelo de segundo orden más tiempo muerto. Denominado como el mejor modelo de segundo orden más tiempo muerto que se pueda obtener para lazos de control que funcionan como reguladores, el criterio de desempeño corresponde a la minimización de la integral del error absoluto por el tiempo (ITAE) y el controlador un PID-Ideal. En la **Figura 26**, se puede observar la señal de respuesta según el método de Sung. (Alfaro, 2002)

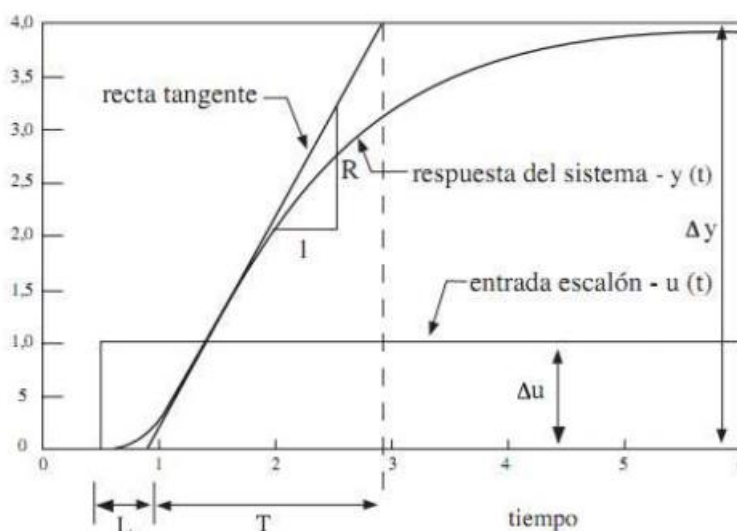
2.8. Método de sintonización de lazo cerrado

2.8.1. Método de Ziegler y Nichols

De la misma manera que sucedió con los procedimientos de sintonización basados en la curva de reacción del proceso, el primer procedimiento de sintonización basado en una prueba de lazo cerrado fue propuesto por Ziegler y Nichols, quienes presentaron ambos procedimientos en la misma publicación. Utilizando un controlador proporcional y un proceso interactivo, el procedimiento requiere aumentar paulatinamente la ganancia del mismo hasta lograr que el sistema esté en una oscilación sostenida ante un cambio del escalón en el valor deseado como se observa en la **Figura 33**. La ganancia en este punto, es la última ganancia K_{cu} y el periodo de oscilación es de la misma manera el último T_u . Para el ajuste proporcional se selecciona como indica, el decaimiento de $\frac{1}{4}$ como compromiso entre el error permanente y el decaimiento P deberá ser la mitad de la última ganancia (Alfaro, 2002).

Figura 33.

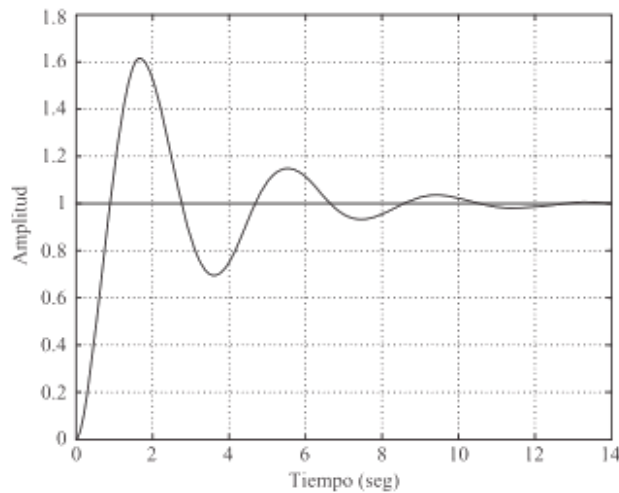
Método de Ziegler y Nichols de un escalón



Nota: Tomado de (Mazzone, 2002).

Figura 34.

Método de Ziegler y Nichols de un sistema PID



Nota: Tomado de (Ogata K. , 2010).

2.9. Introducción a instrumentación virtual

En las últimas décadas ha incrementado de manera considerable el uso de la PC (Computador), en aplicaciones de medición, control y automatización. Esto permite que el usuario interactúe con la computadora como si utilizara un instrumento o equipo real, debido a nuevas tecnologías que han modificado la forma de trabajo brindando varios beneficios en productividad, precisión y rendimiento. La instrumentación virtual es una herramienta muy importante enfocada en la adquisición de datos, medición de señales y acciones control, esto gracias a una computadora del tipo industrial o una estación de trabajo, equipado con programas que permitan tener una interfaz con la PC y el sistema a controlar. Con la ayuda de los instrumentos virtuales los ingenieros y científicos crean sistemas de medición y monitoreo remoto, que son definidas por el usuario en su funcionalidad y apariencia, y no son limitadas por el fabricante en sus funciones tradicionales. (Paredes, 2011)

2.9.1. LabVIEW

2.9.1.1. *Introducción*

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), es una plataforma y entorno de lenguaje de programación visual, para desarrollar o diseñar sistemas y aplicaciones de forma rápida y sencilla. (Paredes, 2011)

En National Instruments, (Instruments, 2020) nos dice que LabVIEW es un sistema de programación gráfica para la creación de aplicaciones donde se desarrolla la adquisición, control, análisis y presentación de datos. Las ventajas que presenta el empleo de LabVIEW son:

- Reduce el tiempo de desarrollo de aplicaciones de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de manejar.
- Posee gran flexibilidad de sistema, permite cambios y actualizaciones del software y hardware.
- Permite que el usuario desarrolle soluciones completas y complejas.
- En un único sistema se puede integrar funciones de control, adquisición, análisis y presentación de datos.
- Tiene la posibilidad de varias interfaces de comunicaciones, al igual que aplicaciones escritas en otros lenguajes.

Para el manejo del software LabVIEW no es necesario tener gran conocimiento y experiencia en programación, ya que está compuesto por iconos y términos de conocimiento a científicos e ingenieros, además se apoya en símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para el desarrollo de aplicaciones. El software de LabVIEW posee extensas librerías de funciones, operaciones y subrutinas, además de las funciones básicas utilizadas en lenguajes de programación, a su vez incluye librerías específicas para la adquisición de datos, comunicaciones y librerías de funciones. (Paredes, 2011)

2.9.1.2. VIs (*instrumentos virtuales*)

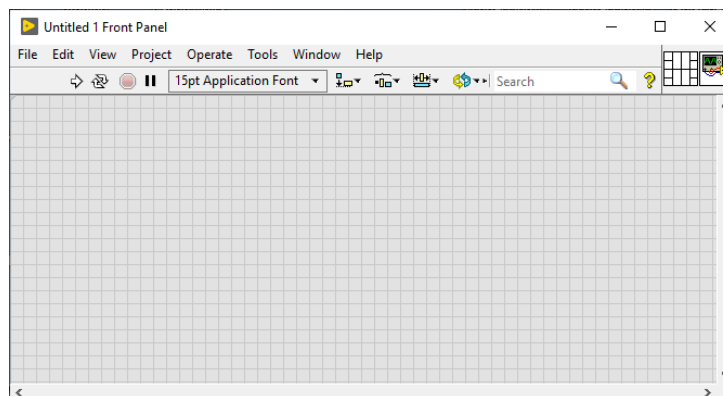
Los programas desarrollados en LabVIEW se conocen como instrumentos virtuales VIs, ya que poseen la apariencia de los instrumentos reales y funciones provenientes de lenguajes de programación convencionales. Los VIs poseen una interface interactiva con el usuario llamada panel frontal, donde se simula el control o equipo físico de trabajo. El panel frontal es la interface hombre – máquina de un VI. Los VIs siguen las instrucciones de un diagrama de bloques realizado en lenguaje tipo G, donde se define la funcionalidad, se coloca iconos que realizan una determinada función y se interconectan. (Instruments, 2020)

2.9.1.3. *Panel frontal*

Es la interfaz gráfica que simula el control o funcionamiento de un instrumento real, permite el ingreso y salida de datos, puede estar formado por perillas, pulsadores, botones y gráficos denominados como controladores o indicadores. Los controladores permiten el ingreso de datos y son manipulados por el usuario. Los indicadores presentan los resultados de alguna operación y estos no pueden ser manipulados por el usuario. (Paredes, 2011)

Figura 35.

Panel Frontal



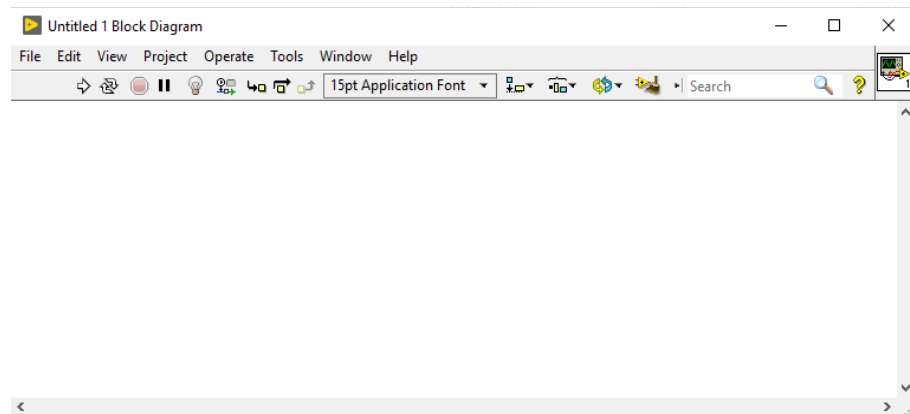
Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

2.9.1.4. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques es donde se desarrolla el programa del VI, para realizar cualquier operación ya sea de entradas y salidas que fueron creados en el panel frontal. El diagrama de bloques incluye las librerías de trabajo como funciones y estructuras.

Figura 36.

Diagrama de bloques

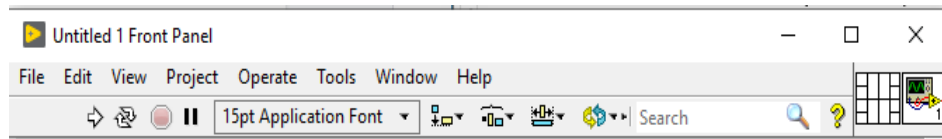


Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

El diagrama de bloques se va conectando cada objeto entre si dependiendo del trabajo a realizar, como si fuera un circuito. Las terminales de entrada y salida se unen con los controladores e indicadores correspondientes. (TutorialLabVIEW, 2020)

2.9.1.5. El entorno de LabVIEW

Los elementos básicos en el entorno de LabVIEW son los menús que se encuentran en la parte superior de la pantalla del panel frontal y diagrama de bloques. La paleta de herramientas y la paleta de controles se despliegan y se colocan en cualquier parte de la pantalla (Paredes, 2011).

Figura 37.*Barra de menú*

Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

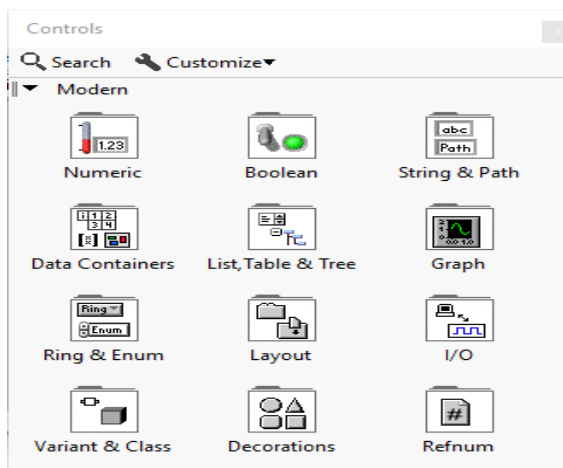
Gracias al entorno de trabajo del programa por (Instruments, 2020), en la barra de menú se encuentran las siguientes opciones:

- **File:** Las opciones que se encuentran en este menú permiten realizar la operación de Abrir, Guardar, Imprimir y Salir.
- **Edit:** En las operaciones básicas de edición están las opciones de Cortar, Copiar, Pegar y Borrar.
- **View:** Dentro de este menú se encuentra la paleta de control y la paleta de herramientas.
- **Project:** Se puede crear un nuevo proyecto y abrir un proyecto antes guardado.
- **Operate:** El control del archivo, Ejecutar o correr programa, Parar y cambiar el modo de ejecución.
- **Tools:** Varias herramientas de acceso rápido.
- **Window:** Control de las pantallas del archivo, panel frontal y diagrama de bloques.
- **Help:** Ayuda acerca de funciones del VI, manual y especificaciones de trabajo.
- **Run:** Ejecución del VI
- **Run Continuously:** Ejecución continuada del VI

- **Abort Execution:** Parada o Stop en cualquier momento de la ejecución del VI
- **Pause:** Para momentánea de la ejecución del VI
- **Text Settings:** Permite personalizar el panel frontal.
- **Align Objects:** Menú desplegable para alinear los objetos seleccionados de control o indicadores en el panel frontal o diagrama de bloques.
- **Distribute Objects:** Distribuye los objetos seleccionados en el panel frontal.
- **Resize Objects:** Cambia el tamaño de los objetos.
- **Reorder:** Reordena los componentes seleccionados en el panel frontal y diagrama de bloques.

2.9.1.6. Paleta de controles (controls palette)

Para poder crear el panel frontal es necesario colocar controladores e indicadores, obtenidos de la paleta de controles. Cada icono que se encuentra en la paleta de controles posee una sub paleta, con operaciones adicionales que se colocan según se requiera en el panel frontal. Un controlador es un objeto que utiliza el usuario para interactuar con el VI, dando valores o controlando la operación del proceso. Las herramientas más utilizadas como controladores, son los botones, cuadros de texto de valores y controles digitales. El indicador colocado en el panel frontal muestra los datos de operaciones al usuario, pueden ser en medidores analógicos o digitales y gráficas. Al colocar un controlador o indicador en el panel frontal automáticamente se muestra el mismo en el diagrama de bloques para ser conectado respectivamente, en el orden dado por el usuario. (Paredes, 2011)

Figura 38.*Paleta de controles.*

Nota: Tomado de, (Instruments, 2020).

2.9.1.7. Paleta de herramientas (tools palette)

La paleta de herramientas se puede utilizar tanto en panel frontal como en el diagrama de bloques para realizar modificaciones y arreglos. En este caso en puntero, cambia su forma de acuerdo a la herramienta seleccionada dentro de la paleta, como puede ser en color, escritura y unión de objetos. En el modo automático el puntero automáticamente toma la forma necesaria al colocarse sobre el objeto tanto en el panel frontal como el diagrama de bloques. Esto permite personalizar el VI para hacerlo más amigable al usuario. (Paredes, 2011)

Figura 39.*Paleta de herramientas*

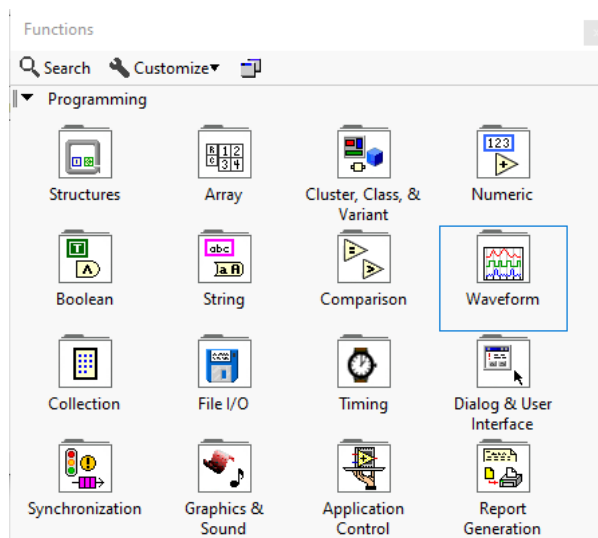
Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

2.9.1.8. Paleta de funciones (functions palette)

La paleta de funciones se utiliza solamente en el diagrama de bloques. Los controles e indicadores que se presentan en el diagrama de bloques trabajan con sus terminales respectivamente y además el VI posee funciones como estructuras, arrays, booleanos y de comparación, etc. Estos permiten que la estructura del VI sea completa proporcionando mayor funcionalidad. (Instruments, 2020)

Figura 40.

Paleta de funciones



Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

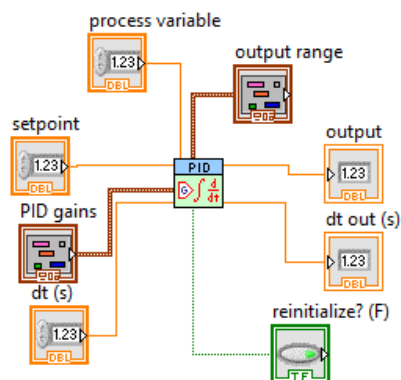
2.9.1.9. Función PID

Los dispositivos de control PID son de carácter analógico, requiriendo para su funcionamiento una variable de entrada denominada variable del proceso (VP). Su salida estará condicionada por los parámetros de sus acciones proporcional, integral y derivativa (Esteban Sanz & Joan, 2011).

En LabVIEW 2019 dentro de las librerías, en la paleta de funciones encontramos la sección de control y simulación, allí se encuentra el cuadro de función PID, por lo que es necesario instalar las librerías de National Instruments en su totalidad.

Figura 41.

PID.VI



Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

Dentro de la función PID según (Instruments, 2020) encontramos:

- **OUTPUT RANGE.** Especifica el rango al cual forzar la salida de control. El rango predeterminado es de -100 a 100, que corresponde a los valores especificados en términos de porcentaje de la escala completa. Puede cambiar este rango en algo apropiado para el sistema de control. Este VI implementa el integrador, cuando la salida del controlador está saturada en los valores mínimos y máximos especificados.
- **SETPOINT.** Especifica el valor del punto de ajuste o valor deseado de la variable del proceso.
- **PROCESS. VARIABLE.** Especifica el valor medido de la variable de proceso que se controla. Este valor es igual al valor de retroalimentación del bucle de control de retroalimentación.

- **PID GAINS.** Especifican los parámetros de ganancia proporcional, tiempo integral y tiempo derivado del controlador.
- **dt(s).** Especifica el tiempo del ciclo o intervalo en segundos en el que se llama al VI. Si el dt(s) es menor o igual a cero, este VI calcula el tiempo desde la última vez que se llamó un temporizador interno con una resolución de 1ms. Si el dt(s) es inferior a 1ms se especifica el valor explícitamente.
- **REINITIALIZE.** Especifica si se reinician los parámetros internos, como el error integrado del controlador.
- **OUTPUT.** Devuelve la salida de control del algoritmo PID que se aplica al proceso controlado. Si este VI, no recibe una entrada no válida, la salida devuelve NaN.
- **dt (s).** Devuelve el intervalo de tiempo real en segundos. dt out(s) devuelve el valor de dt(s) o el intervalo calculado si establece dt(s) en -1.

2.10. Sistema de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos, son equipos o procesos que se utilizan para recopilar información o tomar señales del entorno para convertirlas en datos, documentarlas o analizarlas y para ser presentadas. En ocasiones la información recibida debe ser procesada cuando es adquirida de un sistema de control, para obtener una serie de señales de control. El equipo que permite la adquisición de datos y transformación es una tarjeta DAQ (de Adquisición de Datos). DAQ hardware son por lo general las interfaces entre la señal y una PC. Puede ser en forma de módulos que pueden ser conectados al computador por medio de los puertos de entrada. Los puertos son los cuales permiten enviar y recibir dichos datos. La interfaz puede ser de tipo físico o a nivel software. (Paredes, 2011)

2.10.1. Puerto USB

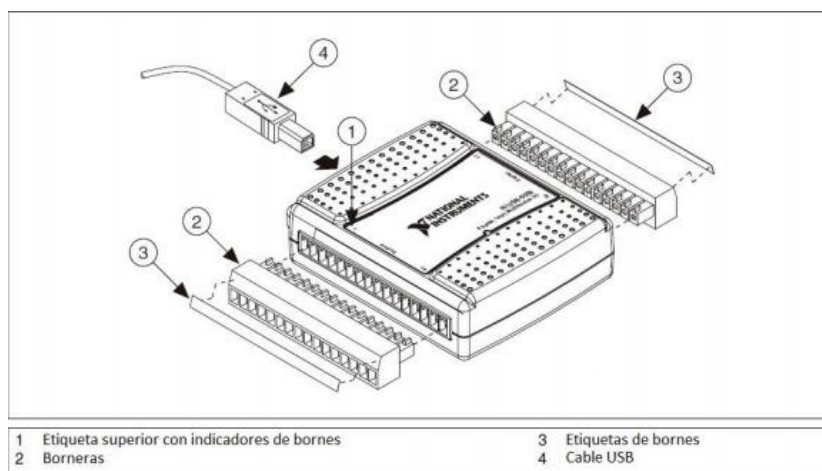
El puerto USB (Universal Serial Bus), es un puerto diseñado para conectar varios periféricos a una computadora. Este puerto USB es un estándar que se encuentra instalado en todo tipo de ordenador. Este puerto permite el reconocimiento instantáneo de cada equipo. Permiten una alta velocidad de 280 Mbit/s (35 MB/s) de transferencia de datos y a través del cable USB de cada equipo permite alimentar o cargar dispositivos externos. (Instruments, 2020)

2.10.2. Tarjeta NI USB-6009

La tarjeta NI USB-6009 está compuesta de cuatro elementos, la etiqueta superior con indicaciones de bornes, consta de dos grupos de bornes de conexión la analógica y digital, cada grupo de bornes se encuentran etiquetadas y el cable USB para alimentación y transmisión de datos, en la **Figura 42**, se muestra la ubicación de cada uno de los componentes antes descritos. (Echeverria, 2020)

Figura 42.

Tarjeta NI USB-6009

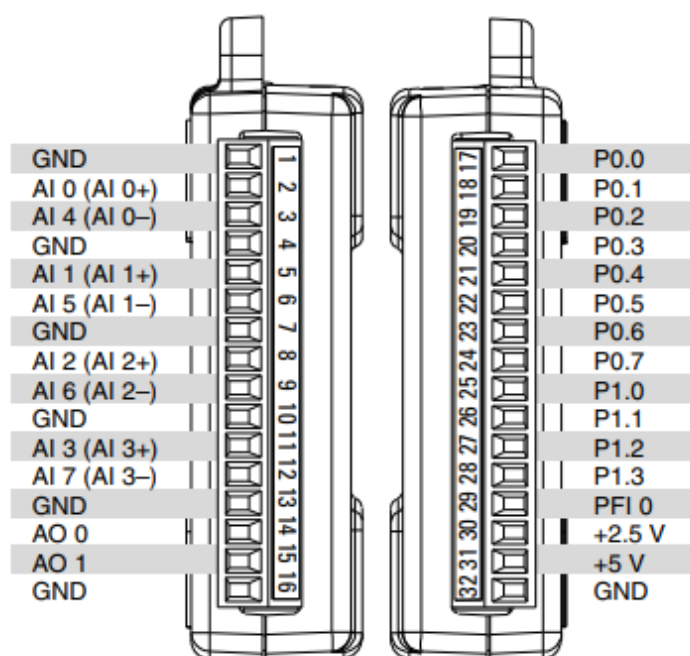


Nota: Un grupo de borneras corresponde a las entradas y salidas analógicas y el grupo opuesto corresponde a las entradas y salidas digitales, además la entrada trigger o contador, +5V y tierra (GND). Tomado de (Echeverria, 2020)

Figura 43.*Entradas y Salidas*

Entradas/salidas analógicas del borne 1 al 16															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
GND	+AI0-	GND	+AI1-	GND	+AI2-	GND	+AI3-	GND	AO0	AO1	GND				
GND	AI0	AI4	GND	AI1	AI5	GND	AI2	AI6	GND	AI3	AI7	GND	AO0	AO1	GND

Entradas/salidas digitales, +5 V y tierra del borne 17 al 32															
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
GND	+5V	+2.5V	PF10	P1.3	P1.2	P1.1	P1.0	P0.7	P0.6	P0.5	P0.4	P0.3	P0.2	P0.1	P0.0

Nota: Tomado de (Echeverria, 2020).**Figura 44.***Tarjeta NI USB-6009 bornes de conexión**Nota:* Tomado de (Instruments, 2020).

Los requisitos para poder trabajar con la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009, es necesario que el computador se encuentre instalado NI LabVIEW y la librería o drive NI-DAQmx, sea compatible con la versión de LabVIEW instalada. (Instruments, 2020)

2.10.3. Tabla de datos técnicos NI USB-6009

Tabla 2.

Especificaciones de la NI USB-6009

ENTRADA ANALÓGICA	
Entradas Analógicas	
Diferencial	4
De un solo extremo	8, seleccionable por software
Resolución de entrada	
Diferencial	14 bits
De un solo extremo	13 bits
Frecuencia de muestreo máxima(agregada)	48 ks/s depende del sistema
Tipo de convertidor	Aproximación sucesiva
AI FIFO	512 bytes
Tiempo de resolución	41,67 ns (base de tiempo de 24Mhz)
Precisión de tiempo	100 ppm de frecuencia de muestreo real
Rango de Entrada	
Diferencial	$\pm 20\text{ V}$, $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 4\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$
De un solo extremo	$\pm 10\text{ V}$
Impedancia de entrada	144 k Ω
Protección al sobre voltaje	$\pm 35\text{ V}$
Fuente de activación	Software o disparador externo
Ruido del sistema	
Diferencial	
$\pm 20\text{ V}$ rango	5 mVrms
$\pm 1\text{ V}$ rango	0.5 mVrms

Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

Tabla 3.*Salidas Analógicas*

SALIDA ANALÓGICA	
Salidas Analógicas	2
Resolución de Salida	12 bits
Tasa de actualización máxima	150Hz, temporizado por software
Rango de salida	0 V to +5 V
Impedancia de salida	50 Ω
Unidad de corriente de salida	5 mA
Estado de encendido	0 V
Velocidad de subida	1 V/ μ s
Corriente de cortocircuito	50 mA
Precisión absoluta (sin carga)	
Típico	7 mV
Máximo a escala completa	36.4 mV

Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

Tabla 4.*Digitales I/O*

DIGITAL I/O	
Líneas de I/O digitales	
P0.<0..7>	8 líneas
P1.<0..3>	4 líneas
Control de dirección	Cada canal programable individualmente como I/O
Tipo de controlador de salida	Cada canal programable individualmente como colector abierto
Compatibilidad	TTL, LVTTTL, CMOS
Rango de voltaje máximo absoluto	(-0.5 V to 5.8 V) con respecto a GND

Nota: Tomado de (Instruments, 2020).

2.10.4. Ventajas de la tarjeta USB-6009

La ventaja del uso de la tarjeta DAQ es la flexibilidad de procesamiento, poder realizar trabajos en tiempo real, posee una gran capacidad de almacenamiento, permite un rápido acceso a la información, adquiere una gran cantidad de datos para análisis, permite emular varios dispositivos de medición y activar instrumentos al mismo tiempo. Se utiliza en la industria, investigación científica, control de máquinas, en estudio didáctico y producción. (Instruments, 2020)

2.11. Modulo PCT-1

El módulo DC MOTOR SPEED CONTROL SYSTEM, PCT-1 está compuesto por:

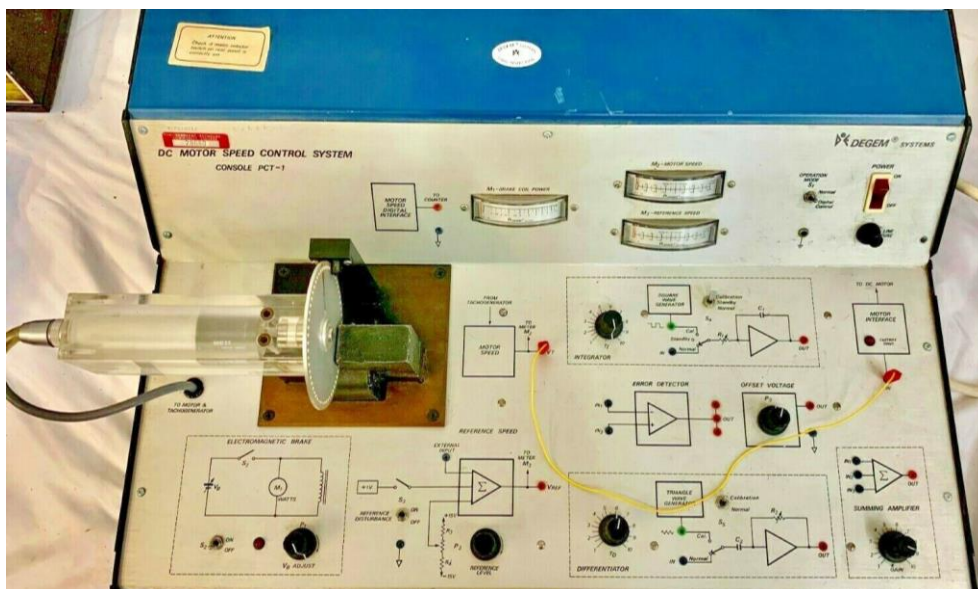
- Un motor DC de 4400 rpm.
- Un disco de pulsos.
- Un sensor de pulsos (encoder).
- Un freno electromagnético.

El módulo entrega un voltaje de 0 a 8 voltios con respecto a su velocidad que es de 0 a 4400 rpm, permite obtener dos salidas en trenes de pulso negativo y positivo. El módulo está configurado de modo que al ingresar voltaje positivo el motor gire en sentido horario y al ingresar voltaje negativo en sentido opuesto.

El módulo consta de un control PID analógico que consta de, la señal de error, la señal de referencia, la integración y la derivación la suma de todo es la salida del PID del actuador analógico como se puede observar en la **Figura 45**.

Figura 45.

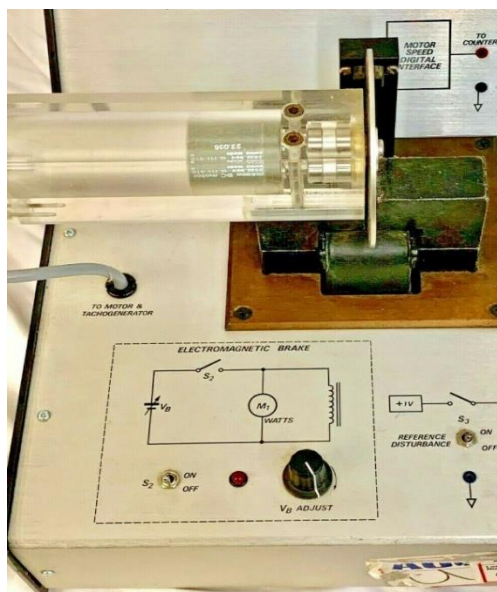
Módulo PCT-1



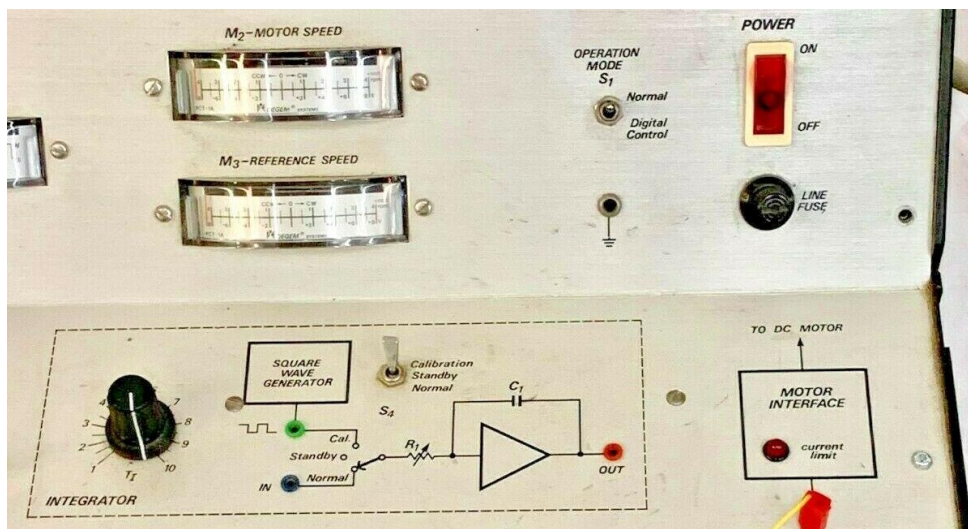
Nota: Módulo TCP-1 del laboratorio de instrumentación virtual.

Figura 46.

Módulo PCT-1 Motor DC



Nota: Módulo TCP-1 vista del motor DC y esquema del freno electromagnético.

Figura 47.*Módulo PCT-1 Vista frontal*

Nota: Módulo TCP-1 indicador de velocidad y control integrador analógico.

Capítulo III

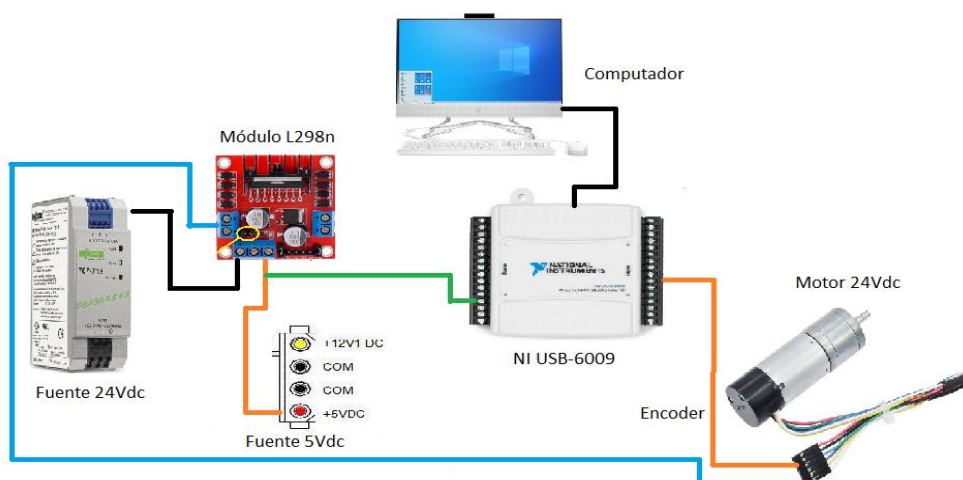
3. Desarrollo del tema

3.1. Preliminares

El capítulo tres detalla el procedimiento para el desarrollo del control PID del módulo PCT-1, consiste en controlar y estabilizar la velocidad del motor de corriente continua a un valor de SP (RPM), por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 y el software LabVIEW. Por motivo de la emergencia sanitaria se realizó una maqueta provisional semejante al módulo PCT-1 del laboratorio de Instrumentación Virtual, los materiales utilizados son: una fuente de alimentación de 24Vdc, un módulo L298n (puente H), un sensor encoder GP1A30R y un motor de 24Vdc. En la **Figura 48**, se muestra las conexiones realizadas. La tarjeta NI USB-6009, permite realizar adquisición de señales analógicas, esta tarjeta tiene una amplitud de salida máxima de 5V dc, razón por la cual se utilizó el módulo L298n para el acondicionamiento del motor. El HMI ser implemento en el software LabVIEW 2019.

Figura 48.

Conexiones de equipos



Nota: Conexiones de trabajo.

3.2. Software

A continuación, se detalla los pasos a seguir para implementar el control PID de velocidad de un motor DC y creación del HMI.

3.2.1. Paso 1: Instalación del software LabVIEW

Se debe tomar en cuenta para la elaboración del programa utilizar la versión actualizada del software Labview, activando todas las librerías, de trabajo necesarias.

Figura 49.

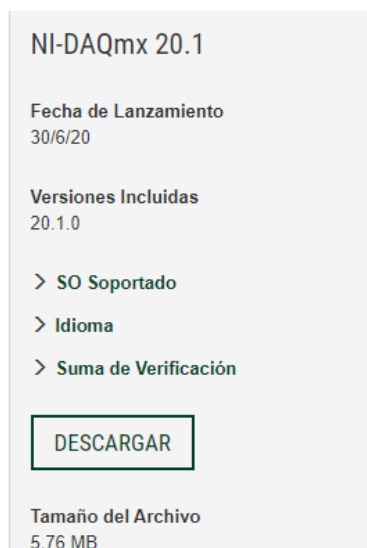
Software LabVIEW



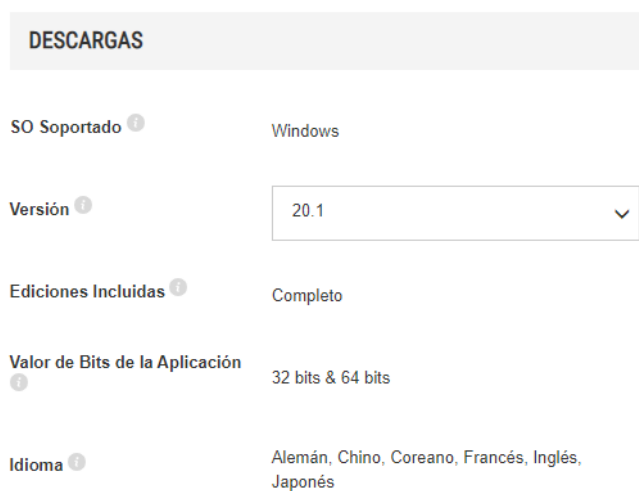
Nota: La versión instalada del software es del 2019.

3.2.2. Paso 2: Instalación librería DAQmx

La librería NI DAQmx es utilizada para la adquisición de datos y obtención de señales. Con la configuración del programa LabVIEW la transferencia de datos es más rápida y confiable. Esta librería se la puede descargar en la página de National Instruments, en la **Figura 50**, se observa la versión actualizada.

Figura 50.*Descarga de librería**Nota:* Librería NI-DAQmx.

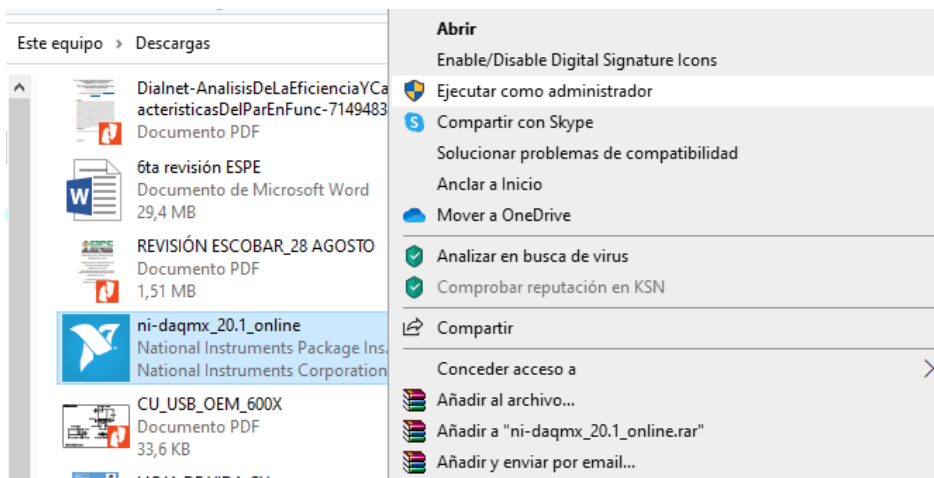
En la página oficial de National Instruments, en la opción descargas se encuentran las especificaciones de la librería para descargar, en la **Figura 51**, se visualiza la característica correspondiente al software.

Figura 51.*Librería NI DAQmx**Nota:* Características del software.

Una vez terminada la descarga del archivo, para la instalación se procede a ejecutar el archivo como administrador como se muestra, en la **Figura 52**. Se espera unos minutos hasta que se ejecute y se podrá observar una ventana de instalación, en la **Figura 52**, se ve la barra de carga de la instalación de la librería.

Figura 52.

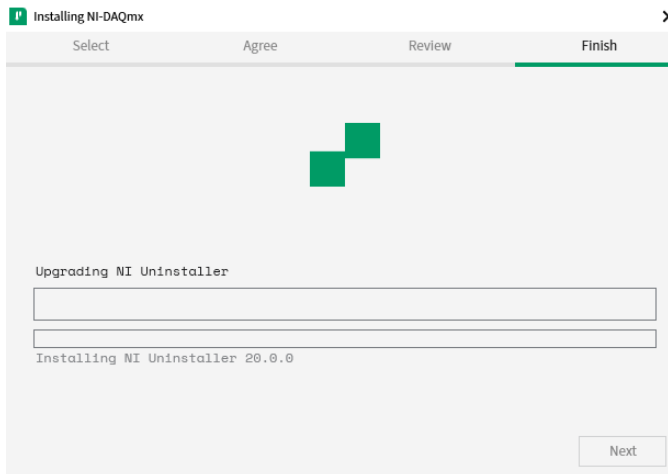
Ejecución del driver



Nota: Ejecución del driver.

Figura 53.

Instalación del driver



Nota: Instalación del software.

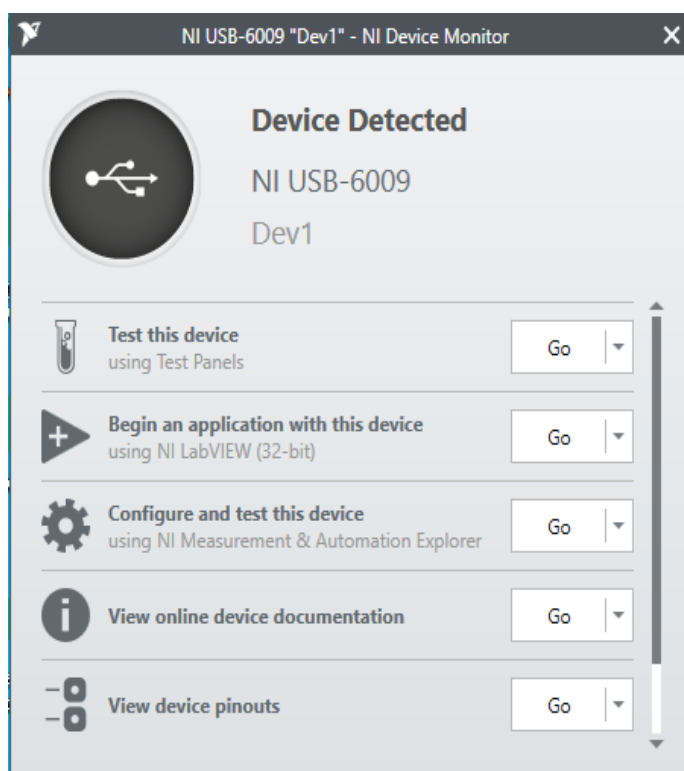
3.2.3. Paso 3: Pruebas de la tarjeta NI USB-6009

Después de instalar la librería NI DAQmx, conectamos la tarjeta NI USB-6009 a la PC mediante la interfaz USB. En la **Figura 54**, se visualiza la pantalla de pruebas cuando el PC reconoce la tarjeta NI USB-6009.

A continuación, se debe realizar las siguientes pruebas de funcionamiento como se observa en la **Figura 54**.

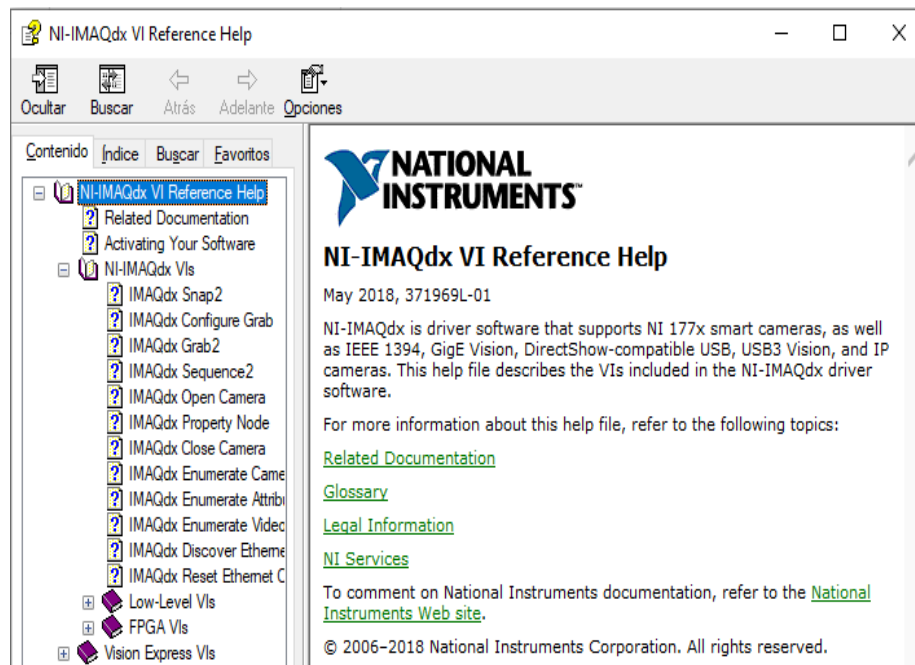
Figura 54.

Pantalla de pruebas



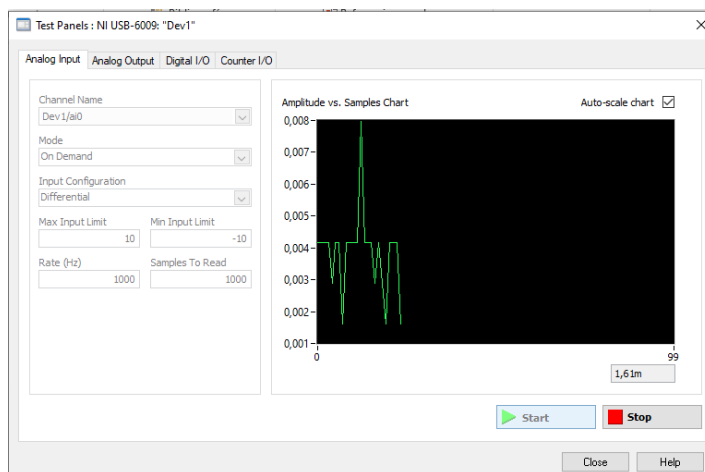
Nota: Pantalla de pruebas de la tarjeta NI USB-6009.

Al momento de iniciar el VI se puede comprobar que las librerías de NI DAQ están instaladas correctamente **Figura 55**.

Figura 55.*Comprobación de librería*

Nota: La librería se abre mediante el buscador.

En la pantalla de test como muestra la **Figura 56**, se observa la barra de opciones que permite configurar E/S (entradas y salidas) analógicas y E/S digitales, según se requiera en la aplicación, desde este panel se puede habilitar los puertos que se van a utilizar en la adquisición de datos. El borne AI0 se configuró como entrada analógica, para adquirir la señal A del encoder, se configuró el borne PF10 para el control de la señal, el borne +5V para alimentar el sensor y el borne AO0 para el control de voltaje del motor.

Figura 56.*Test de prueba*

Nota: Las pruebas realizadas, permiten conocer el estado de la tarjeta.

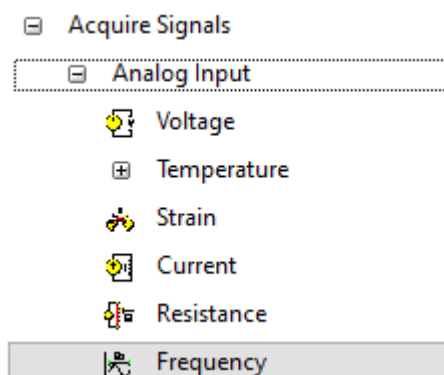
3.2.4. Paso 4: Elaboración del VI

La elaboración del VI se realizó con el software LabVIEW versión 2019. En el diagrama de bloques utilizamos el DAQ assistant para obtener la señal del motor.

Figura 57.*DAQ assistant*

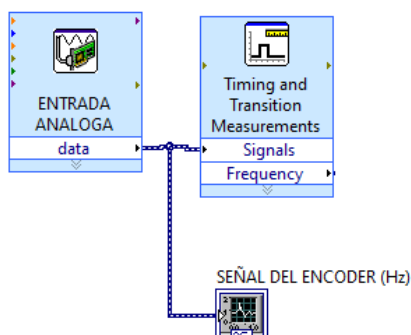
Nota: Para la ubicación del DAQ assistant se abre la paleta de funciones o se presiona el botón derecho del mouse, en la opción measurement I/O y se abre el bloque NI DAQmx.

Se configura el DAQ assistant para adquirir la señal del encoder mediante una entrada análogo de voltaje como muestra en la **Figura 58**.

Figura 58.*Adquisición de señal*

Nota: Configuración entrada analógica (voltaje).

Una vez configurada la entrada análoga de la tarjeta con los debidos parámetros para obtener el valor de frecuencia se conecta a un Waveform Graph para visualizar la frecuencia del encoder. La misma señal se ingresa a un Timing and Transition Measurements, este realiza mediciones de tiempo y transición como frecuencia, periodo y ciclo de trabajo en pulso, permite visualizar datos reales como se muestra en la **Figura 59**. Para este caso solo se optó por usar la señal de frecuencia.

Figura 59.*Señal de entrada análoga*

Nota: Entrada análoga condicionada.

En un indicador se observa la señal de frecuencia obtenida, la misma que es acondicionada de acuerdo a los parámetros del sensor encoder. Para encontrar la velocidad (rpm) en función de la frecuencia se realizó la ecuación:

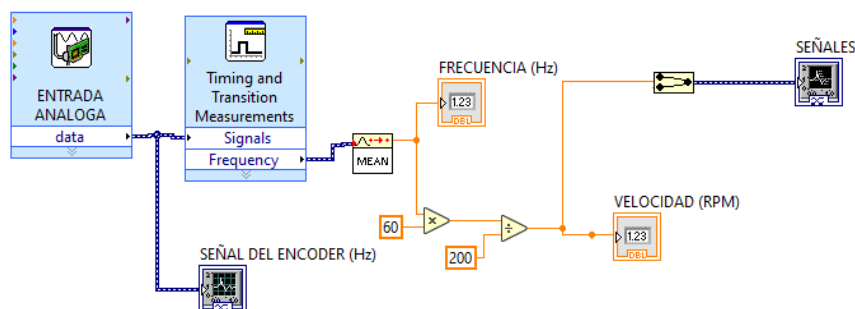
$$V = \frac{F * T}{N} \quad V = \frac{8000 * 60}{200} = 2400 \text{ rpm}$$

- V = velocidad en (revoluciones por minuto).
- F = frecuencia determinada al 100% del trabajo del motor (8KHz).
- T = constante de tiempo igual a 60 minutos.
- N = pulsos por revolución igual a 200 P/R.

En la en la **Figura 60**, se muestra la señal ya acondicionada para obtener el valor de la velocidad RPM y se envía a un Waveform Graph para visualizar la señal.

Figura 60.

Velocidad del motor



Nota: Los datos para el acondicionamiento se obtienen de la datasheet del encoder.

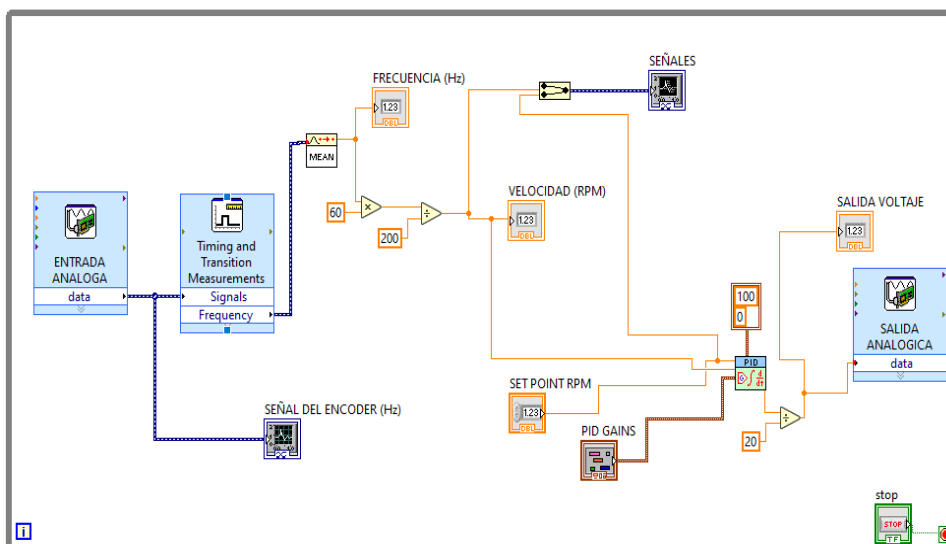
En la pantalla Block Diagrams, seleccionamos el bloque PID VI para realizar el control, con los valores de PV y el SP, el valor de la PV y de SP está en un rango de 0 - 2400 rpm. El rango de PID gains está en un horizonte de 0 A 100, en el PID gains se visualiza los valores de Kc, Ti y Td. A la salida del PID.vi se realiza un escalamiento de

0 – 5 debido al rango de la salida analógica de la tarjeta de 0 – 5 V dc. El control numérico del SP y de PV se muestra en un Waveform Graph.

En la **Figura 61**, se muestra los bloques de la entrada de la señal análoga, indicadores, controladores y el control PID.vi.

Figura 61.

Diagrama de bloques



Nota: En el diagrama de bloques se muestra la adquisición de la señal, las operaciones matemáticas para el control de velocidad del motor y el control PID.

3.2.5. Paso 5: Creación del HMI

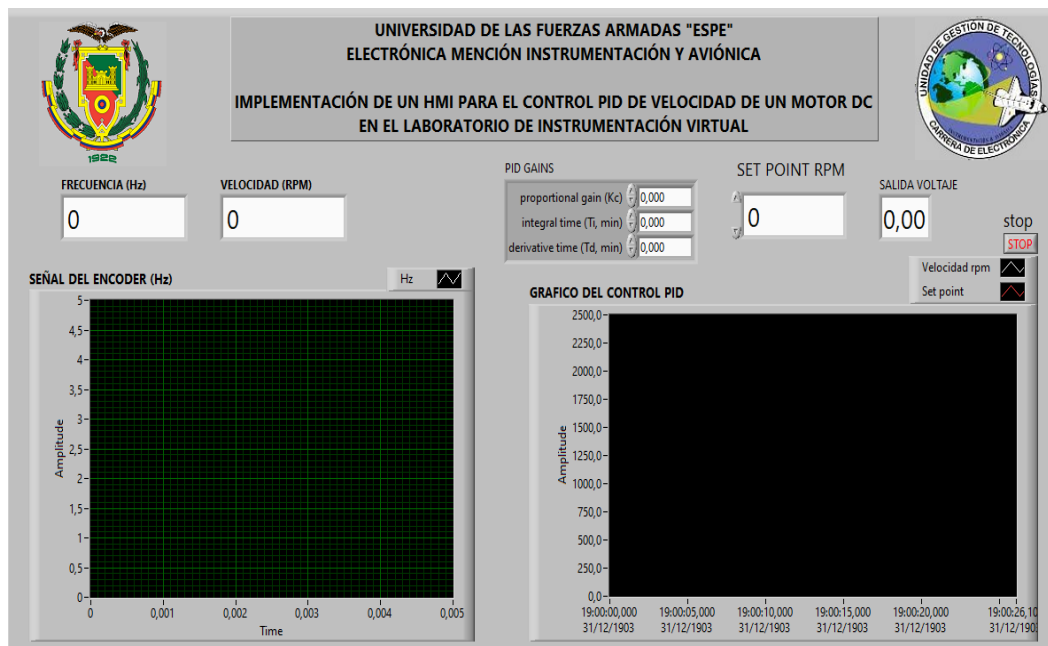
Para la creación del HMI, se tomó en cuenta la norma ISA 101, la cual permite que los usuarios puedan entender la terminología y el desarrollo del HMI, la norma permite que la interfaz, sea segura y eficiente en el control de un proceso en todas las condiciones de funcionamiento. Mejora las habilidades del usuario al momento de detectar, diagnosticar y responder correctamente ante situaciones imprevistas.

En la **Figura 62**, se muestra el panel frontal del HMI, esta pantalla contiene detallado el tema del proyecto, y demás componentes que permite realizar el control

PID. Los indicadores permiten visualizar la velocidad (rpm), la frecuencia (Hertz), los controladores PID gains, Setpoint y dos Waveform Graph para observar las señales del control PID y del encoder.

Figura 62.

Panel frontal HMI



Nota: El HMI está conforme a lo que estipula la norma ISA 101.

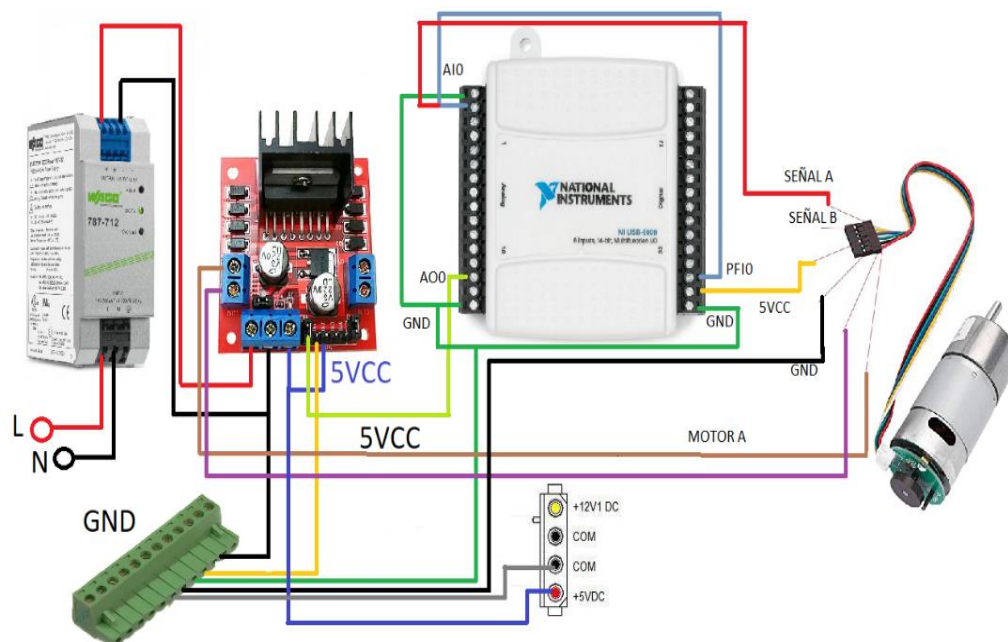
3.2.6. Paso 6: Conexiones de la maqueta

Para la alimentación del motor DC se conecta una fuente de 24Vdc al módulo L298n (sin el jumper regulador de 12Vdc), para el funcionamiento. Se conecta 5V para la alimentación del módulo, los pines IN2, el pin IN1 se deben conectar al pin VCC y GND respectivamente. El módulo tiene un jumper conectado al enable de la entrada A del motor, este jumper se retira para conectar la salida analógica de la tarjeta (pin AO0), para el control del motor. Todos los puertos GND son pines comunes, la entrada analógica AI0 se conecta al pin PFI0 para adquirir la señal A del encoder con

estabilidad, el encoder es alimentado con 5V de la tarjeta USB-6009, y la alimentación del motor se conecta a la salida del motor A.

Figura 63.

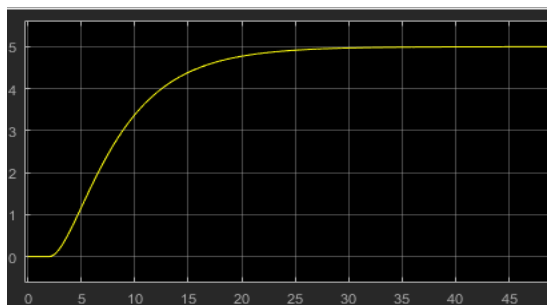
Conexiones



Nota: Conexiones de la maqueta.

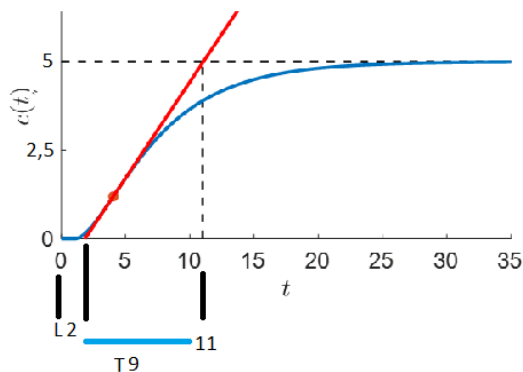
3.3. Cálculos de sintonización

Para realizar los cálculos de K_c , T_i , T_d , se obtuvo la señal en forma de S, que se adquirió del control de lazo abierto, se observa el tiempo de retardo del sistema (L), el punto máximo donde la señal se estabiliza (K) y la constante de tiempo (T). En la **Figura 64**, se muestra la señal obtenida en referencia al control de lazo abierto del motor de 24Vdc y la señal del encoder.

Figura 64.*Señal tipo S*

Nota: Señal tipo S determinada en lazo abierto del control.

En la señal de tipo S se traza una línea tangente en el punto de inflexión donde se mide el instante inicial donde inicia el escalón hasta donde la tangente corta el eje del tiempo es donde se encuentra L (retardo del sistema), K (ganancia del sistema), es la constante donde la señal del sistema se estabiliza y para determinar la constante del tiempo, es donde la línea tangente se intersecta con la línea prolongada de la ganancia del sistema, pues la distancia que existe desde L hasta la intersección de la constante del tiempo. En la **Figura 65**, se muestra que el retardo del sistema es igual a 2 y donde se estabiliza el sistema es igual a 5.

Figura 65.*Trazo del tangente*

Nota: La línea tangente es esencial para poder determinar los puntos de corte.

- K es donde se estabiliza la señal igual a 5 seg.
- L es el retardo del sistema igual a 2 seg.
- T es la constante de tiempo igual a 9 seg.

Basado en las ecuaciones de la tabla Ziegler y Nichols se obtiene los valores de los controles P (proporcional), PI (proporcional, integral) y los valores del control PID.

El control proporcional se obtiene de la siguiente ecuación:

$$K_p = \frac{T}{KL} = \frac{9}{(5)(2)} = 0,9$$

El control proporcional-integral se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$K_p = 0,9 \frac{T}{KL} = 0,9 \frac{9}{(5)(2)} = 0,81$$

$$T_i = \frac{L}{0,3} = \frac{2}{0,3} = 6,66$$

El control proporcional-integral-derivativo se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{KL} = 1,2 \frac{9}{(5)(2)} = 1,08$$

$$T_i = 2L = 2(2) = 4$$

$$T_d = 0,5L = 0,5(2) = 1$$

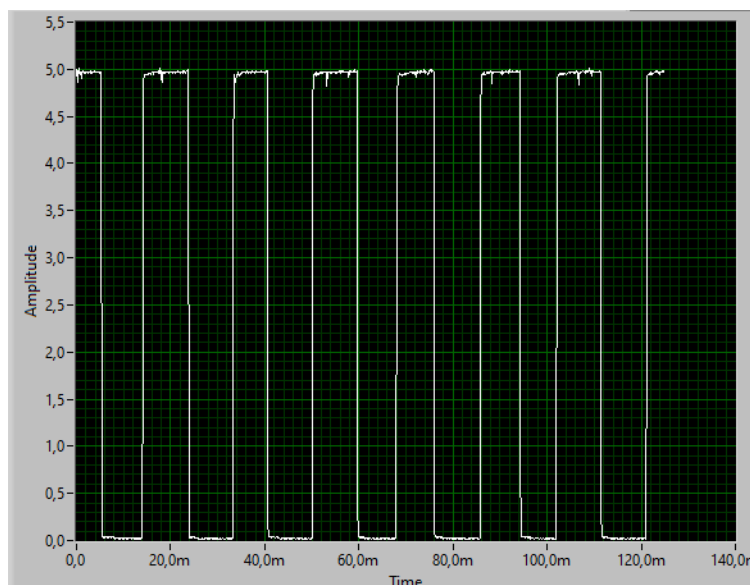
Estos son los valores obtenidos de acuerdo al método de sintonización de Ziegler y Nichols, que deben ser ingresados en el control PID en los parámetros de K_c , T_i y T_d .

3.4. Pruebas y análisis de resultados

Desde la computadora se controla el sistema, una vez determinado los valores de K_c , T_i y T_d , para el control PID de velocidad del motor dc.

Figura 66.

Señal encoder



Nota: La señal obtenida del encoder a 40K muestras por segundo.

En la **Figura 66**, se muestra una respuesta de entrada cuadrática obtenida mediante la lectura de la velocidad, esta señal es aceptable porque concuerda con los datos especificados del motor.

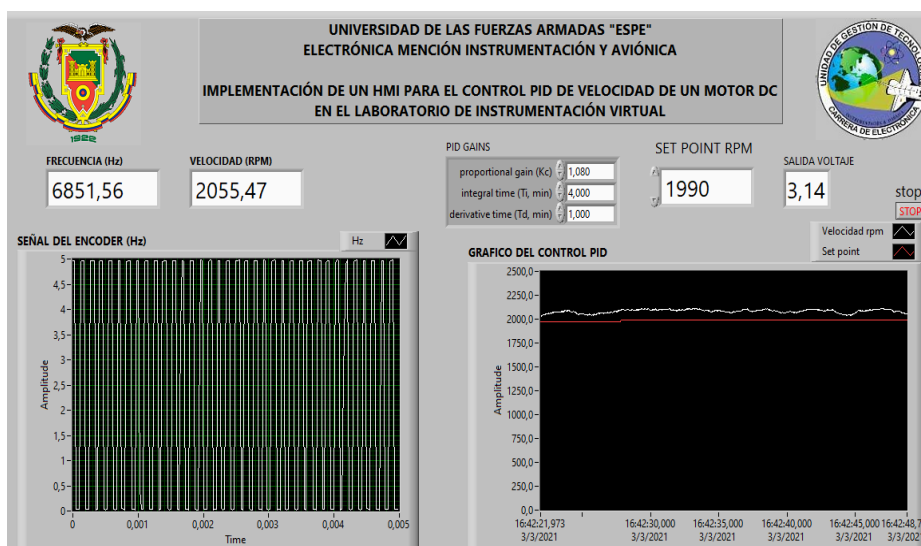
A pesar de obtener una señal de entrada aceptable el método de Ziegler y Nichols es un tipo de controlador que en las sintonías pueden dar respuestas muy

oscilatorias y para poder mejorar la respuesta se debe disminuir la ganancia del controlador a la mitad para obtener una respuesta considerable dependiendo de la dinámica del proceso.

Por lo que en la **Figura 67**, se muestra que los valores en Kc, Ti y Td no permiten realizar un control estable y no se garantiza la estabilidad del sistema.

Figura 67.

Prueba del control



Nota: Los valores puestos dan un control inestable.

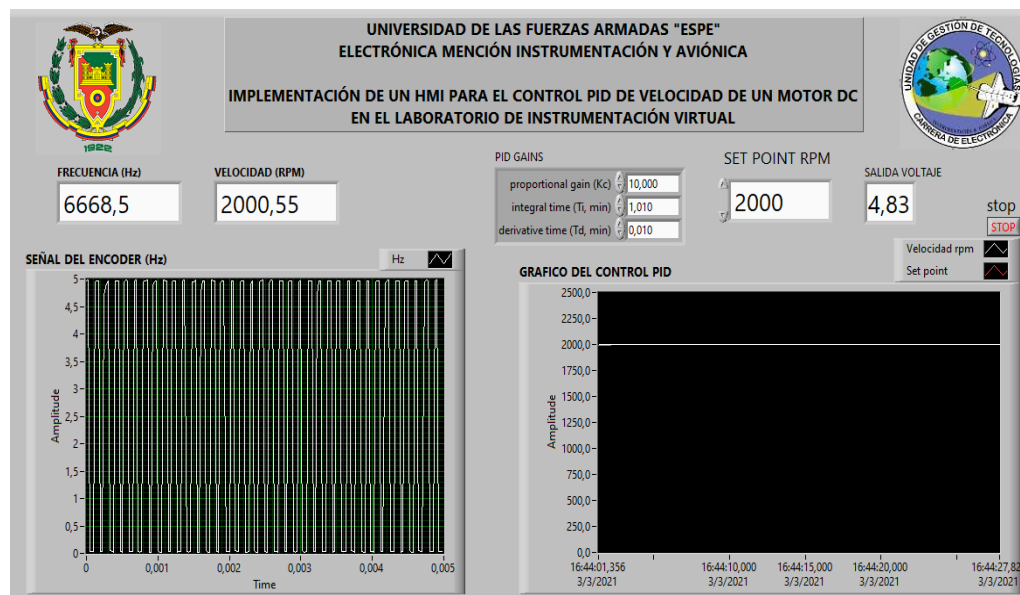
Para poder obtener un control estable del sistema, se tuvo que realizar el control mediante monitoreo dentro los controles de Kc, Ti y Td hasta conseguir que el Setpoint y la PV se igualen y sean estables, en la **Figura 68**, se muestra los valores obtenidos para el control PID que son:

$$Kc = 10,000$$

$$Ti = 1,010$$

$$Td = 0,010$$

Figura 68.

Control estable

Nota: Los controles de Kc, Ti y Td son estables.

Capítulo IV

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- La implementación de módulo para el control PID de velocidad de motor DC contribuirá al desarrollo académico práctico de los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.
- Determinamos las características que posee la tarjeta USB-6009, mediante el uso de su manual y pruebas de funcionamiento, entre sus principales características están: E/S analógicas (8 bornes referenciales y 4 bornes diferenciales), 12 E/S digitales y un borne específico PFI0 que permite ser configurado como disparador digital o entrada como contador de eventos.
- El HMI desarrollado para control PID de velocidad de un motor dc, adquiere una señal de pulsos que se condiciona (ancho de pulso y la frecuencia) mediante LabVIEW, esto permite determinar la señal de sintonía y el control del motor, el HMI muestra la señal SP, PV y CV con sus respectivos controladores e indicadores basados en la norma ISA 101.
- El método de Ziegler y Nichols de control PID es un método que puede dar una señal muy oscilatoria, de modo que es necesario disminuir la ganancia proporcional a la mitad dependiendo de la dinámica del proceso.
- Para la implementación del control PID de un motor dc, se adquirió un motor de 24V dc, un sensor encoder y un módulo controlador de motores, con la ayuda de estos equipos se pudo tener una similitud al funcionamiento del módulo del laboratorio de Instrumentación Virtual PCT-1 pudiendo así realizar el control PID.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda verificar en la datasheet del sensor encoder sus parámetros de trabajo además de conocer e identificar los pines de transmisión de señal y alimentación, también se debe condicionar la señal de lectura del encoder mediante el software LabVIEW para que la señal adquirida no presente perturbaciones.
- Utilizar el módulo controlador de motores L298n, una vez retirado el jumper de voltaje se puede alimentar los 24Vdc que se requiere para que se alimente al motor además permite realizar las condiciones para comunicar el módulo con la tarjeta de adquisición de datos.
- Es necesario instalar los drivers necesarios del software LabVIEW para el reconocimiento de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 y poder realizar el control PID, además identificar y verificar que los bornes de la tarjeta de adquisición de datos se encuentren correctamente habilitados y en buen estado.

Bibliografía

- Alejandro. (26 de 04 de 2008). *blogspot*. Recuperado el 05 de Junio de 2020, de <https://electricidad-viatger.blogspot.com/2008/04/motores-de-corriente-continua-de-imn.html>
- Alfaro, V. (2002). *semanticscholar*. Recuperado el 28 de Agosto de 2020, de Métodos de sintonización de controladores PID: <https://pdfs.semanticscholar.org/4318/a2e423d8840ae4ae5004e895a1f35497ceba.pdf>
- AulaFacil*. (2020). Recuperado el 19 de Agosto de 2020, de <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica/electromagnetismo/partes-esenciales-de-un-motor-y-sus-nombres-l30072>
- Automatisoindustrial*. (15 de 08 de 2015). Recuperado el 04 de Junio de 2020, de Formación para la industria: <https://automatisoindustrial.com/motores/1-3-5-motores-de-corriente-continua/constitucion-motor-corriente-continua/>
- Castaño, S. (s.f.). *CAE*. Recuperado el 22 de 12 de 2020, de Control Automático Edicación: https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/#Ziegler_y_Nichols_8211_Metodo_2_Lazo_Cerrado
- Echeverria, L. (16 de Julio de 2020). *insdecem*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2020, de La tarjeta NI USB-6009: <http://www.insdecem.com/archivos/documentos/Trabajando%20con%20la%20NI%20USB.pdf>
- Esteban Sanz, S. R., & Joan, S. (15 de 01 de 2011). *ESAll*. Recuperado el 22 de Diciembre de 2020, de <https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=14589/2011/1/54326/40446-3452.pdf>
- Hawkins Electrical Guide, V. 1. (2017). Colector de delgas. En R. Miguel (Ed.), *Máquinas de Corriente Continua* (pág. 4). España. Recuperado el 05 de Junio de 2020, de <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Maquinas%20cc.pdf>
- Instruments, N. (2020). *ni*. Recuperado el 22 de Diciembre de 2020, de <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/>
- León, M. (2015). Pistas Educativas. En A. G. León Maria, *Motores de Corriente Alterna Síncronos y Corriente Directa* (pág. 30). Celaya, Mexico. Recuperado el 03 de Junio de 2020
- Mazzone, V. (03 de 2002). *newcastle*. Recuperado el 23 de Octubre de 2020, de Controladores PID: <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- MecatrónicaLATAM*. (s.f.). Recuperado el 15 de Junio de 2020, de <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/>

- Microsoft. (s.f.). Recuperado el 17 de Julio de 2020, de Tesinaglobal: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Obando, L. (09 de 04 de 2018). *dademuchconnection*. Recuperado el 24 de Julio de 2020, de <https://dademuch.com/2018/04/09/pid-efecto-de-las-acciones-de-control-integral-y-derivativo/>
- Ogata. (1990). *Ecured*. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de Ingeniería de control moderna: https://www.ecured.cu/Control_integral#Funcionamiento_de_un_control_con_acci.C3.B3n_integral
- Ogata. (1990). *Ecured*. Recuperado el Julio de 20 de 2020, de https://www.ecured.cu/Control_proporcional
- Ogata. (1990). *Ecured*. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de Ingeniería de control moderna: https://www.ecured.cu/Control_derivativo
- Ogata. (1990). *Picuino*. Recuperado el 24 de Julio de 2020, de Ingeniería de Control Moderna: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (Quinta ed.). Madrid: Pearson Educación. S.A. Recuperado el 22 de Octubre de 2020, de https://www.u-cursos.cl/usuario/78303fe04da8e4eb340eaae09f1840b2/mi_blog/r/Ingenieria_de_Control_Moderna_Ogata_5a_ed.pdf
- Ortega, M. (s.f.). *Conceptos básicos de acontrol*. Recuperado el 21 de Julio de 2020, de Regulación Automática: http://www.esi2.us.es/~vargas/docencia/tca_/temas/Tema_2_4.pdf
- Paredes, L. (28 de 02 de 2011). *Repositorio*. Recuperado el 07 de Agosto de 2020, de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/7386/T-ESPE-ITSA-000038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Patiño, J. (03 de 2018). Motores de corriente continua. En P. Jorge L, *Maquinas Electricas (Taller V)* (págs. 4 - 3). Recuperado el 03 de Junio de 2020, de [file:///C:/Users/Isaac/Downloads/M%C3%93DULO%20N%C2%B01%20DE%20M%C3%81QUINAS%20EL%C3%89CTRICAS\(TALLER%20V\)%20MOTORES%20DE%20C.C-2018.pdf](file:///C:/Users/Isaac/Downloads/M%C3%93DULO%20N%C2%B01%20DE%20M%C3%81QUINAS%20EL%C3%89CTRICAS(TALLER%20V)%20MOTORES%20DE%20C.C-2018.pdf)
- Reyes, R. (s.f.). *SlideShare*. Recuperado el 19 de Julio de 2020, de Control Proporcional: <https://es.slideshare.net/worldblack101/control-proporcional>
- Rodriguez, M. (2015). unican. En M. Rodriguez, *Maquinas Electricas I - G862* (pág. 9). ESPAÑA. Recuperado el 04 de Junio de 2020, de Maquinas Electricas I - G862.
- Sánchez M, A. J. (01 de 2015). *SlideShare*. Recuperado el 22 de Julio de 2020, de TIPOS DE CONTROLADORES: <https://es.slideshare.net/luisquijada77/teoria-de-control-controladores-y-sistemas-de-control>
- Tecnicos en electricidad*. (25 de 08 de 2017). Recuperado el 04 de Junio de 2020, de <http://tecnielectricidad.blogspot.com/2017/08/consejos-de-rebobinar-un-motor.html>

- tecnind2. (27 de 04 de 2015). *Maquinas Electricas*. Recuperado el 04 de Junio de 2020, de <https://maquinaselectricastecnind.wordpress.com/2015/04/27/partes-de-un-motor-de-corriente-continua/>
- Undecategorized*. (02 de 09 de 2011). Recuperado el 24 de Julio de 2020, de simulaciones de procesos udenar: <https://simulaciondeprocesosudenar.wordpress.com/2011/09/02/i-just-made-a-new-voki-see-it-here/>
- Universidad de Vigo*. (20 de Diciembre de 2011). Recuperado el 10 de Junio de 2020, de http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/dispositivos_maquinasrotatorias.htm
- Valenzuela, J. (2013). En *Manula de tipos de motores eléctricos, reconocimiento y sus aplicaciones en la industria* (pág. 8). Quito, Ecuador. Recuperado el 10 de Junio de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6069/1/CD-4796.pdf>
- wojeda. (s.f.). *DOCPLAYER*. Recuperado el 19 de Julio de 2020, de IIMPI: <https://docplayer.es/9326777-Introduccion-a-la-instrumentacion-industrial.html>

ANEXOS