



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TEMA: SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA DE LA
VARIABLE NIVEL PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE
PROCESOS**

**AUTORES: ROSERO HIDALGO, MAURICIO GIOVANNY
POGO MORETA, RAI ALEXANDER**

DIRECTOR: ING. PRUNA PANCHI, EDWIN PATRICIO

LATACUNGA

2018



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA DE LA VARIABLE NIVEL PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS”** realizado por los señores **MAURICIO GIOVANNY ROSERO HIDALGO** y **RAI ALEXANDER POGO MORETA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **MAURICIO GIOVANNY ROSERO HIDALGO** y **RAI ALEXANDER POGO MORETA** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 07 de agosto del 2018

Ing. Edwin Pruna P.

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Mauricio Giovanni Rosero Hidalgo**, con cedula de identidad N°0503332660 y **Rai Alexander Pogo Moreta**, con cedula de identidad N° 1722663513 declaramos que el presente trabajo de titulación, “**SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA DE LA VARIABLE NIVEL PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 07 de agosto del 2018

Mauricio Giovanni Rosero Hidalgo

C.C.: 0503332660

Rai Alexander Pogo Moreta

C.C.: 1722663513



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **MAURICIO GIOVANNY ROSERO HIDALGO** y **RAI ALEXANDER POGO MORETA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA DE LA VARIABLE NIVEL PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 07 de agosto del 2018

Mauricio Giovanni Rosero Hidalgo

C.C.: 0503332660

Rai Alexander Pogo Moreta

C.C.: 1722663513

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mami Mónica quien es mi guía, mi fortaleza y mi tesoro más grande, quien no me deja rendirme ante ninguna adversidad y me enseña cada día a ser una mejor persona. A mi abuelita Lita quien con su cariño y entusiasmo me anima a seguir día a día, por darme los consejos más lindos y sinceros cuando más los necesito. A mi hermano Raúl que es mi compañero de alegrías y tristezas, la persona que siempre me va a entender cuando nadie más lo haga. A mis tías y a mis primos chiquitos que me brindan su alegría y apoyo incondicional en todo momento. A mi novia Camila que está a mi lado en las buenas y en las malas, brindándome confianza en cada paso que doy.

Mauricio

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Paca y Edmo quienes con su apoyo, dedicación, esfuerzo y cariño incondicional me acompañan día a día en el trascurso de mi vida. A mis abuelitos, hermanos, primos y tíos quienes me han entregado su confianza, siendo todos un pilar fundamental en mi vida.

Rai

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi mami Mónica por su amor y paciencia a lo largo de mi vida, por enseñarme a defenderme por mí mismo y hacer de mí una persona con valores y principios firmes, cualidades que me permiten culminar con éxito todos mis proyectos.

Al ingeniero Edwin Pruna por su acertada guía en la realización de este proyecto y por brindarme conocimientos que me permitirán defenderme a lo largo de mi vida profesional.

A todas las personas que me han brindado su apoyo en algún momento de mi vida estudiantil, ustedes han aportado para poder terminar esta etapa con éxito.

Mauricio

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado fuerza y sabiduría para alcanzar mis objetivos, a mi madre y a mi padre que con su apoyo incondicional hicieron que sea posible cumplir mis sueños. A mis profesores los cuales me brindaron sus conocimientos durante mi vida estudiantil, a mis amigos y familiares quienes me dieron palabras de aliento en momentos difíciles y a todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron para alcanzar este gran logro.

Rai

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA	
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación e Importancia.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Variables de la investigación	5
1.5.1 Variable Independiente	5
1.5.2 Variable Dependiente.....	5
1.6 Hipótesis.....	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Control Automático de Procesos	6
2.2 Transmisores Industriales	6
2.2.1 Transmisores electrónicos	6
2.2.2 Transmisores digitales	7
2.2.3 Transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550	7

2.2.4	Transmisor de nivel Rosemount™ 5402	8
2.3	PLC (Controlador Lógico Programable)	9
2.4	Controlador PID.....	10
2.5	Métodos de sintonía de controladores PID	11
2.5.1	Métodos de sintonía para procesos de primer orden más tiempo muerto (FODT).....	11
2.5.2	Método de sintonía para procesos integrantes más tiempo muerto (IPD) ...	14
2.6	Control en cascada	15
2.6.1	Estructura de control	16
2.6.2	Criterio de diseño	17
2.6.3	Procedimiento de sintonía.....	18
2.7	Realidad virtual.....	19
2.7.1	Gafas de realidad virtual	19
2.7.2	Dispositivo de reconocimiento gestual (Leap Motion).....	19
2.7.3	Realidad virtual en la educación	19
2.8	Motor gráfico Unity3D	20
CAPÍTULO III		21
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN		21
3.1	Implementación del control en cascada	22
3.1.1	Diagrama P&ID de la estación de control de nivel	22
3.1.2	Análisis de las características del sistema	23
3.1.3	Ajuste de los transmisores de la planta	23
3.1.4	Identificación del sistema y sintonización	35
3.1.5	Programación del PLC para la implementación del control en cascada	41
3.1.6	Diseño del HMI en Labview para el monitoreo y control del proceso.....	43
3.2	Implementación del entorno virtual.....	44
3.2.1	Diseño de la planta en Autocad Plant 3D	44
3.2.2	Diseño del ambiente virtual en Unity3D.....	47
3.2.3	Integración del dispositivo Leap Motion en Unity3D	49
3.2.4	Integración del dispositivo Oculus Rift en Unity3D.....	52
3.2.5	Desarrollo de la comunicación entre Unity3D y Labview	54
3.2.6	Animación de los componentes de la planta	55
3.2.7	Características interactivas adicionales.....	57
CAPÍTULO IV.....		60
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		60

4.1	Características de la respuesta del sistema sometido al control en cascada	60
4.1.1	Métodos de sintonía utilizados.....	60
4.1.2	Aplicación de perturbaciones al sistema	61
4.1.3	Respuesta del sistema utilizando una válvula de control.....	63
4.2	Comparación con el método de control clásico de lazo único	63
4.3	Parámetros del proceso en el entorno virtual.....	68
4.4	Comprobación de la hipótesis.....	70
4.5	Alcances	72
4.6	Limitaciones.....	73
CAPÍTULO V		74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		74
5.1	Conclusiones.....	74
5.2	Recomendaciones.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		76
ANEXOS		79
Anexo A: Diagrama de conexiones del sistema		
Anexo B: Hojas de especificaciones técnicas de los transmisores del proceso		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de sintonía, lazo secundario	38
Tabla 2 Parámetros de sintonía, lazo primario	40
Tabla 3 Parámetros de sintonía, válvula de control	40
Tabla 4 Análisis de resultados para control en cascada	61
Tabla 5 Análisis de resultados PID vs Control en cascada (Método de sintonía de Ford)	64
Tabla 6 Análisis de resultados PID vs Control en cascada (Método de sintonía de Åström & Hägglund).....	65
Tabla 7 Análisis de resultados PID vs Control en cascada (Método de sintonía de Zou and Bigham)	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transmisor de Flujo Georg Fischer Signet 8550	7
Figura 2. Transmisor de nivel Rosemount 5402	8
Figura 3. PLC (Controlador Lógico Programable)	9
Figura 4. Estructura de un lazo de control simple	11
Figura 5. Estructura de un control en cascada	17
Figura 6. Esquema de funcionamiento del sistema didáctico completo	21
Figura 7. Diagrama P&ID de la estación de control	22
Figura 8. Ingreso al menú de calibración	23
Figura 9. Código de ingreso	24
Figura 10. Salir del menú	25
Figura 11. Conexión HART con el transmisor Rosemount 5402	25
Figura 12. Interfaz del software Rosemount Radar Master	25
Figura 13. Selección del protocolo de comunicación	26
Figura 14. Ventana de inicio del software Rosemount Radar Master	26
Figura 15. Selección de dispositivo	27
Figura 16. Escaneo de dispositivos	27
Figura 17. Ventana Guided Setup	28
Figura 18. Propiedades del dispositivo	28
Figura 19. Configuración de etiqueta	29
Figura 20. Unidades de medida	29
Figura 21. Geometría del tanque	30
Figura 22. Condiciones del proceso en el tanque	30
Figura 23. Cálculo de volumen	31
Figura 24. Unidades de salida digital	31
Figura 25. Finalización del asistente de configuración	32
Figura 26. Calibración de distancia	33
Figura 27. Calibración de nivel	34
Figura 28. Instrucciones de calibración de salida analógica	35
Figura 29. Aplicación de Labview para determinar la dinámica del sistema: a) Panel frontal, b) Diagrama de bloques	36
Figura 30. Herramienta de sintonía	37

Figura 31. Método de Ziegler and Nichols.....	38
Figura 32. Método Cohen-Coon.....	38
Figura 33. Método Lambda	39
Figura 34. Subrutina de escalamiento.....	41
Figura 35. Rutina principal	42
Figura 36. HMI para el monitoreo y control: a) Esquema del proceso, b) Panel de sintonía y tendencias	44
Figura 37. Ruteo de tuberías en Autocad Plant 3D	45
Figura 38. Creación de instrumento personalizado en Autocad Plant 3D	45
Figura 39. Instrumento personalizado para creación de nodos de conexión	46
Figura 40. Diseño preliminar de la planta en Autocad Plant 3D.....	46
Figura 41. Entorno virtual con texturas en cada objeto	47
Figura 42. Pantallas del HMI virtual	48
Figura 43. Objeto “Player” para el desplazamiento dentro del entorno.....	48
Figura 44. Reconocimiento de manos con Leap Motion.....	49
Figura 45. Aplicación Orion Beta de Leap Motion	49
Figura 46. Importación de paquetes en Unity3D	50
Figura 47. Parámetros de configuración de los scripts utilizados para el movimiento del jugador	51
Figura 48. Gesto para movimiento del jugador hacia adelante.....	51
Figura 49. Gesto para movimiento del jugador hacia atrás	51
Figura 50. Oculus Rift	52
Figura 51. Aplicación Oculus Rift	52
Figura 52. Habilitación de Oculus Rift para utilizarlo en aplicaciones externas	53
Figura 53. Activación del soporte para realidad virtual en Unity3D.....	53
Figura 54. Intercambio de datos entre aplicaciones a través del protocolo TCP/IP	54
Figura 55. Formato de envío y recepción de datos	55
Figura 56. Animación de válvulas manuales para el variador de velocidad como E.C.F.....	56
Figura 57. Animación de válvulas manuales para la válvula de control como E.C.F.....	56

Figura 58. Animación del flotador del rotámetro virtual	56
Figura 59. Animación para llenado del tanque	57
Figura 60. Ventana de instrucciones generales	58
Figura 61. Pantalla informativa.....	58
Figura 62. Válvula de carga para el modo simulación	59
Figura 63. Respuesta del control en cascada	60
Figura 64. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Ford)	61
Figura 65. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Åström & Hägglund)	62
Figura 66. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Zou and Bigham) .	62
Figura 67. Control con variador vs Control con válvula	63
Figura 68. PID lazo simple vs Control en cascada (Ford).....	64
Figura 69. PID lazo simple vs Control en cascada (Åström & Hägglund) ...	65
Figura 70. PID lazo simple vs Control en cascada (Zou and Bigham)	66
Figura 71. Respuesta ante perturbaciones: PID Lazo simple vs Control en Cascada (Ford)	67
Figura 72. Respuesta ante perturbaciones: PID Lazo simple vs Control en Cascada (Åström & Hägglund)	67
Figura 73. Respuesta ante perturbaciones: PID Lazo simple vs Control en Cascada (Zou and Bigham)	68
Figura 74. Datos del proceso en el entorno virtual	69
Figura 75. Resultado Pregunta 1	70
Figura 76. Resultado Pregunta 2	70
Figura 77. Resultado Pregunta 3	71
Figura 78. Resultado Pregunta 4	71
Figura 79. Resultado Pregunta 5	71
Figura 80. Resultado Pregunta 6	72
Figura 81. Resultado Pregunta 7	72

RESUMEN

Se implementó un sistema de control en cascada para la variable nivel en la estación ND-0704 del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Extensión Latacunga, mismo que será utilizado para el aprendizaje de control de procesos a través de un entorno de realidad virtual. Dicho entorno ha sido desarrollado en base al diagrama P&ID de la estación de control y pretende emular el funcionamiento de una planta industrial. El sistema didáctico permite el monitoreo y regulación del nivel del tanque de la estación de entrenamiento desde el entorno virtual implementado, además de la simulación del control en cascada del mismo proceso, característica que permite el acercamiento de los estudiantes al control de procesos de una manera interactiva y realista. Se hace uso de dispositivos periféricos como las gafas de realidad virtual Oculus Rift y el controlador gestual Leap Motion que permiten la interacción e inmersión en el entorno para complementar la experiencia de aprendizaje.

PALABRAS CLAVE:

- **AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**
- **CONTROL EN CASCADA**
- **REALIDAD VIRTUAL**
- **LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES - DIDÁCTICA**

ABSTRACT

A cascade control system was implemented for the level variable in the ND-0704 station of the Industrial Networks and Processes Control Laboratory of Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Extensión Latacunga, which will be used for process control learning through a virtual reality environment. This environment has been developed based on the P&ID diagram of the control station and aims to emulate the operation of an industrial plant. The didactic system allows the monitoring and regulation of the tank level of the training station from the implemented virtual environment, in addition permits the simulation of cascade control of the same process, a feature that allows students to approach process control in an interactive and realistic manner. It makes use of peripheral devices such as the Oculus Rift virtual reality glasses and the gestural controller Leap Motion that allow the interaction and immersion in the environment to complement the learning experience.

KEYWORDS:

- **INDUSTRIAL AUTOMATION**
- **CASCADE CONTROL**
- **VIRTUAL REALITY**
- **INDUSTRIAL NETWORKS LABORATORY - DIDACTIC**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La industria de procesos está compuesta de sistemas de control avanzado los cuales en su gran mayoría requieren de personal altamente calificado para su diseño y operación; si por algún motivo el personal no está capacitado adecuadamente se podrían producir errores de diseño y de operación los cuales podrían ocasionar grandes problemas al sector industrial.

Para lograr tener un personal altamente capacitado en este ámbito, es necesario impartir a los futuros profesionales conocimientos sobre los diferentes sistemas que encontrarán en la industria ya que no siempre estos se basarán en sistemas de control simple, es por esto que existe la necesidad de implementar nuevos procesos en el aprendizaje del control automático.

En el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos existen las herramientas necesarias para la implementación de sistemas didácticos que contribuyan al mejoramiento del proceso enseñanza-aprendizaje a través de tecnologías que se encuentran en auge en muchos ámbitos para este fin, entre las cuales se puede destacar la realidad virtual por su capacidad de generar un alto impacto y un acercamiento de los estudiantes con los procesos de ingeniería al ser usada como medio educativo.

1.2 Antecedentes

En las industrias de control de procesos, el controlador PID es ampliamente utilizado, debido a que para implementarlo no es necesario

conocer a priori la dinámica del proceso que se desea controlar, además es un sistema robusto en el cual se produce una acción correctiva ante cualquier perturbación que afecte la variable controlada. Una de sus principales desventajas es que solo se produce una acción correctiva cuando la variable controlada se ha desviado de su punto de consigna por lo cual no puede anticiparse a los efectos de perturbaciones, aunque estos sean conocidos (Kinoshita & Yamamoto, 2016).

Para satisfacer la necesidad de corregir estos efectos, existen varias técnicas de control avanzado que ayudan a mejorar el comportamiento del control simple. Una estrategia muy efectiva dentro de las técnicas de control avanzado es el control en cascada, el cual utiliza dos controles realimentados, uno llamado primario (maestro) y otro llamado secundario (esclavo), mismos que ayudan a manipular una variable de proceso de manera óptima. Esta característica hace que su utilización se haya extendido en la industria (Acedo Sánchez, 2003).

A medida que la industria se expande, la educación en ingeniería requiere de una mejora continua, es por eso que desde hace algunos años entró en auge el uso de la realidad virtual que se ha convertido en una herramienta potencial para las actividades de ingeniería y la educación. Inicialmente, las aplicaciones de realidad virtual, en conjunción con modelos geométricos tridimensionales, se limitó a la revisión de diseño, prototipos virtuales y fines de marketing, principalmente en las industrias automotriz y aeronáutica. En el ámbito educacional existe una necesidad real de desarrollar un sistema de educación interactivo y eficaz para los estudiantes y los profesionales del sector industrial, de manera que sea posible un estudio que permita desarrollar un mayor acercamiento a una experiencia práctica (Raposo, y otros, 2009).

En general, los avances de los medios digitales y la realidad virtual han comenzado a desempeñar mayores papeles en el campo educacional ya que un juego de realidad virtual provee un ambiente de entrenamiento integral e

inmersivo, lo cual conllevaría nuevas oportunidades en los procesos de enseñanza y aprendizaje (Le, Pedro, & Park, 2014).

1.3 Justificación e Importancia

En la industria moderna, el nivel es un parámetro de control importante en los procesos de producción. Es primordial en la industria petrolera, la industria química, en la protección del medio ambiente, el tratamiento del agua, la metalurgia y otras industrias. El nivel de tanques y recipientes es supervisado y controlado continuamente. Se puede controlar la cantidad de materias primas o productos terminados en el contenedor verificando y ajustando el balance de los materiales de entrada y salida. Se puede monitorear el proceso de producción o nivel del contenedor para asegurar la calidad y cantidad de los productos y procesos (Cao & Deng, 2016; Raja & Ali, 2017).

Por otro lado, el control en cascada es una técnica avanzada de control regulatorio utilizada para mejorar la respuesta dinámica ante los efectos de las perturbaciones mediante el uso de dos controladores (primario y secundario) para manipular una variable de proceso por lo cual es ampliamente utilizado en la industria. El uso de esta técnica en la regulación de nivel de un tanque u otro recipiente es capaz de incrementar la efectividad en el control del proceso si se eligen las variables de control adecuadas para ello (Raja & Ali, 2015; Padhan & Reddy, 2015).

El presente proyecto pretende desarrollar un sistema didáctico para el aprendizaje del control automático avanzado, para lo cual se implementará un control en cascada para la estación de nivel del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Extensión Latacunga y un entorno virtual inmersivo que simule el comportamiento de la planta a la cual se ha aplicado el control antes mencionado. Con este sistema el aprendizaje de esta técnica de control avanzado resulta efectivo y perdurable en los estudiantes por el alto impacto

que genera en ellos, además la retención de información se incrementa significativamente cuando los estudiantes están expuestos a más de un medio educativo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Desarrollar un sistema de control en cascada didáctico, utilizando la realidad virtual y dispositivos de inmersión e interacción, para el aprendizaje del control de procesos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar acerca de la técnica de control en cascada para la regulación de la variable nivel y sobre la realidad virtual aplicada a la educación en ingeniería.
- Implementar el control en cascada para la regulación de la variable nivel y un HMI para el control y visualización de las variables relevantes del proceso.
- Diseñar un entorno virtual utilizando Unity3D que conste de la planta para el control de nivel y un HMI para el control y visualización de las variables del proceso.
- Emular el control del sistema en el entorno virtual utilizando los datos de las variables del proceso.
- Realizar pruebas funcionales del sistema, evaluar su desempeño y analizar los resultados obtenidos.

1.5 Variables de la investigación

1.5.1 Variable Independiente

Sistema de control en cascada didáctico para el aprendizaje del control de procesos en base a herramientas de realidad virtual.

1.5.2 Variable Dependiente

Aprendizaje del control de procesos de los estudiantes de ingeniería.

1.6 Hipótesis

El sistema didáctico en base a realidad virtual, proporcionará un método para la enseñanza-aprendizaje del control de procesos más efectivo que los métodos tradicionales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Control Automático de Procesos

El control automático de procesos es utilizado para mantener en un punto de consigna las variables que abarca un proceso estas variables pueden ser: temperatura, presión, nivel, etc. Los procesos en los cuales está involucrado el control automático son de naturaleza dinámica es decir siempre ocurren cambios en ellos y si no se realizan acciones pertinentes o correctivas en las variables importantes del proceso, los índices de producción y calidad no cumplirán con el diseño establecido (Smith & Corripio, 1991).

2.2 Transmisores Industriales

Los transmisores industriales obtienen el valor de la variable del proceso por medio del elemento primario conocido también como sensor y la transmiten hacia un receptor por medio de señales eléctricas, digitales o neumáticas estandarizadas (Solé, 2010).

2.2.1 Transmisores electrónicos

Los transmisores electrónicos convierten la señal de la variable del proceso a una señal electrónica de 4-20 mA c.c. tiene un porcentaje de exactitud de $\pm 0,5\%$. Estos transmisores se alimentan con una fuente de poder de 24 V c.c. y un circuito de dos hilos.

Si el receptor recibe señales de voltaje debe disponer de una resistencia de 250 ohms conectada en la entrada para tener tensiones de 1 V c.c. a 5 V c.c. y no se perderá tensión en la línea (Solé, 2010).

2.2.2 Transmisores digitales

Cuando apareció la señal digital aplicable a los transmisores, mejoró notablemente la exactitud conseguida en la medida. La señal del proceso es muestreada a una frecuencia mayor que el doble del de la señal (teorema de muestreo de Nyquist-Shannon) y de este modo, la señal digital obtenida consiste en una serie de impulsos en forma de bits.

Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 8 bits entonces puede enviar 8 señales binarias (0 y 1) simultáneamente (Solé, 2010).

2.2.3 Transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550

El transmisor de flujo GF Signet 8550 mostrado en la Figura 1 es una solución avanzada que convierte la señal de cualquiera de los sensores a una salida de 4 a 20 mA. Además tiene una gran flexibilidad ya que tiene opción de traer 2 relevadores para control de procesos, se puede montar fácilmente en tuberías o paneles y es fácilmente escalable a cualquier unidad de flujo, por su diseño es amigable y brinda confiabilidad al usuario (EQUYSIS, s.f.).



Figura 1. Transmisor de Flujo Georg Fischer Signet 8550
Fuente: (EQUYSIS, s.f.)

2.3 PLC (Controlador Lógico Programable)

Un controlador lógico programable (PLC) es una forma especial de controlador basado en microprocesador que utiliza una memoria programable para almacenar instrucciones y para implementar funciones tales como lógica, secuencia, temporización, conteo y aritmética para controlar máquinas y procesos. Figura 3, están diseñados para ser operados por ingenieros con un conocimiento limitado de computadoras y lenguajes informáticos. No están diseñados para que solo los programadores de computadoras puedan configurar o cambiar los programas. Por lo tanto, los diseñadores del PLC lo han pre-programado para que el programa de control pueda ingresarse usando una forma de lenguaje simple, bastante intuitivo. Se usa el término lógico porque la programación se ocupa principalmente de implementar la lógica y la conmutación operaciones, por ejemplo, si se produce A o B, se activará C, si se produce A y B entonces se activará D. El operador ingresa una secuencia de instrucciones, es decir, un programa, en la memoria del PLC. Luego, el controlador monitorea las entradas y salidas de acuerdo con este programa y lleva a cabo las reglas de control para las cuales ha sido programado.

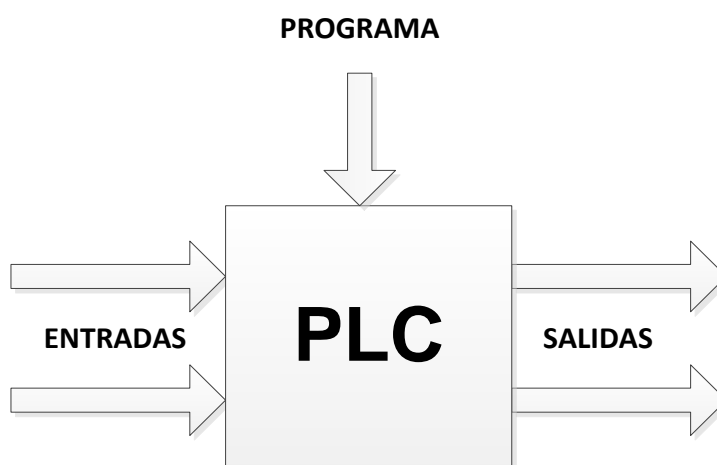


Figura 3. PLC (Controlador Lógico Programable)

Los PLC tienen la gran ventaja de que el mismo controlador básico se puede usar con una amplia gama de sistemas de control. Para modificar un sistema de control y las reglas que se utilizarán, todo lo que es necesario es

que el operador introduzca un conjunto diferente de instrucciones. No hay necesidad de volver a cablear. El resultado es un sistema flexible y rentable que se puede usar con sistemas de control que varían ampliamente en cuanto a su naturaleza y complejidad.

Los PLC son similares a las computadoras, pero mientras que las computadoras están optimizadas para tareas de cálculo y visualización, los PLC están optimizados para las tareas de control y en entornos industriales (Bolton, 2006).

2.4 Controlador PID

El controlador PID es el algoritmo de control más común se basa en la simple implementación de la idea de realimentación, esta puede reducir los efectos producidos por las perturbaciones logrando que un proceso siga adecuadamente a su punto de consigna, gracias a estas ventajas en control de procesos el controlador PID es utilizado en más del 95 por ciento de lazos de control.

Los controladores PID han sobrevivido a muchos cambios de tecnología, que van desde la neumática a los microprocesadores pasando por los tubos de vacío, los transistores, y los circuitos integrados. El microprocesador ha tenido una influencia crucial sobre el controlador PID. Prácticamente todos los controladores PID fabricados hoy día se basan en microprocesadores.

Esto ha creado oportunidades para proporcionar características adicionales tales como sintonía automática, planificación de ganancia, adaptación continua y diagnóstico, además se implementa de muchas formas diferentes, como un controlador único o como parte de un paquete DDC (Control Digital Directo) o un sistema de control de procesos distribuido jerárquico (Åström & Hägglund, 2009).

2.5 Métodos de sintonía de controladores PID

La Figura 4 muestra la estructura de un lazo de control PID de una planta, si se puede obtener un modelo matemático de la planta, entonces es posible aplicar diversos métodos para determinar los parámetros de sintonía del controlador que cumplirán las especificaciones del sistema. Sin embargo, si el modelo matemático de la planta no puede obtenerse fácilmente, entonces no es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. Para solucionar este problema se debe recurrir a enfoques experimentales para ajustar los controladores PID (Ogata, 2002).

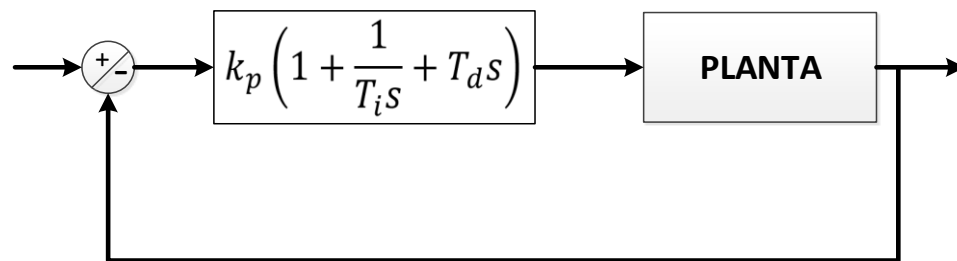


Figura 4. Estructura de un lazo de control simple

2.5.1 Métodos de sintonía para procesos de primer orden más tiempo muerto (FODT)

a) Método de sintonía Lambda

La sintonía de lambda es un caso especial de asignación de polos que se utiliza con frecuencia en la industria de procesos. El proceso se modela por el modelo FODT mostrado en la ecuación 1 (Åström & Häggglund, 2009).

$$P(s) = \frac{k_p}{1 + sT} e^{-sL} \quad (1)$$

Para la obtención del diseño PID, se usa la forma interactuante del controlador mostrado en la ecuación 2.

$$C'(s) = K' \frac{(1 + sT'_i)(1 + sT'_d)}{sT'_i} \quad (2)$$

Se aproxima el retardo de tiempo, lo que da la función de transferencia del proceso, ecuación 3.

$$P(s) = \frac{k_p}{1 + sT} e^{-sL} \approx \frac{k_p \left(1 - \frac{sL}{2}\right)}{(1 + sT) \left(1 + \frac{sL}{2}\right)} \quad (3)$$

El tiempo integral se escoge como $T'_i = T$ y el tiempo derivativo como $T'_d = L/2$. Los ceros del controlador entonces cancelaran los polos del proceso, y la función de transferencia del lazo se hace, ecuación 4.

$$G_1(s) = P(s)C'(s) \approx \frac{k_p K' \left(1 - \frac{sL}{2}\right)}{sT} \quad (4)$$

La ecuación característica se muestra en la ecuación 5.

$$s \left(T - k_p K' \frac{L}{2} \right) + k_p K = 0 \quad (5)$$

Requiriendo que el polo en lazo cerrado sea $s = -1/T_{cl}$ encontramos lo mostrado en la ecuación 6.

$$k_p K' = \frac{T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad (6)$$

Que da las reglas de sintonía mostradas en las ecuaciones 7,8 y 9.

$$K' = \frac{1}{k_p} \frac{T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad (7)$$

$$T'_i = T \quad (8)$$

$$T'_d = \frac{L}{2} \quad (9)$$

Los parámetros para el controlador PID no interactuante son los mostrados en las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$K = \frac{1}{k_p} \frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad (10)$$

$$T_i = T + \frac{L}{2} \quad (11)$$

$$T_d = \frac{TL}{L + 2T} \quad (12)$$

b) Método de sintonía de Cohen-Coon

Este método se basa también en un modelo FOTD mostrado en la ecuación 1, como el proceso se caracteriza por tres parámetros (k_p, L, T) es posible dar fórmulas de sintonía donde los parámetros del controlador se expresan en términos de estos parámetros (Åström & Hägglund, 2009).

Las ecuaciones de sintonía se muestran a continuación:

$$K = \frac{1.35 \left(1 + \frac{0.18\tau}{1 - \tau}\right)}{a} \quad (13)$$

$$T_i = L \left(\frac{2.5 - 2.0\tau}{1 - 0.39\tau}\right) \quad (14)$$

$$T_d = L \left(\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau}\right) \quad (15)$$

Donde:

$$a = \frac{k_p L}{T} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{L}{L + T} \quad (17)$$

c) Método de sintonía de Ziegler and Nichols

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , tiempo integral T_i , y el tiempo derivativo T_d , basado en las características de la respuesta de una planta dada (Ogata, 2002).

Este método al igual que los mencionados anteriormente se basa en los parámetros de un sistema FODT mostrado en la ecuación 1. Los parámetros de sintonía del controlador están en función de los parámetros del modelo mencionado, estas ecuaciones se muestran a continuación:

$$K = 1.2 \frac{T}{L} \quad (18)$$

$$T_i = 2L \quad (19)$$

$$T_d = 0.5L \quad (20)$$

2.5.2 Método de sintonía para procesos integrantes más tiempo muerto (IPD)

Los métodos de sintonía descritos a continuación están basados en el modelo mostrado en la ecuación 21 (O'Dwyer, 2006).

$$G(s) = \frac{k_m}{s} e^{-s\tau_m} \quad (21)$$

a) Åström & Hägglund (1995)

$$K = \frac{0.94}{k_m \tau_m} \quad (22)$$

$$T_i = 2\tau_m \quad (23)$$

$$T_d = 0.5\tau_m \quad (24)$$

b) Ford (1953)

$$K = \frac{1.48}{k_m \tau_m} \quad (25)$$

$$T_i = 2\tau_m \quad (26)$$

$$T_d = 0.37\tau_m \quad (27)$$

c) Zou et al. (1997), Zou and Brigham (1998)

$$K = \frac{2}{k_m(\lambda + 0.5\tau_m)} \quad (28)$$

$$T_i = 2\lambda + \tau_m \quad (29)$$

$$T_d = \frac{\lambda + 0.25\tau_m}{2\lambda + \tau_m} \quad (30)$$

Donde:

$$0.5\tau_m \leq \lambda \leq 3\tau_m \quad (31)$$

2.6 Control en cascada

Existen diferentes procesos con lazos simples de control realimentados entre los que se produce interacción. Para eliminarlas es necesario mediarla y controlarla por medio de un sistema de control denominado cascada (Acedo Sánchez, 2003).

El control en cascada es uno de los métodos más exitosos para mejorar el rendimiento del control de bucle único. Puede mejorar drásticamente el rendimiento de las estrategias de control, reduciendo tanto la desviación máxima como el error integral para las respuestas de perturbación. Dado que los cálculos requeridos son simples, el control en cascada se puede implementar con una amplia variedad de equipos analógicos y digitales. Esta combinación de facilidad de implementación y una mejora del rendimiento del

control potencialmente grande ha llevado a la aplicación generalizada del control en cascada durante muchas décadas.

Como se explicó anteriormente, las mejoras de bucle único aprovechan la información adicional para mejorar el rendimiento del sistema de control de realimentación PID. El controlador en cascada usa una medida adicional de una variable del proceso para ayudar en el sistema de control. La selección de esta medida adicional, que se basa en información sobre las perturbaciones más comunes y sobre las respuestas dinámicas del proceso, es fundamental para el éxito del controlador en cascada. Por lo tanto, la comprensión de la dinámica y el funcionamiento del proceso son esenciales para un diseño de control en cascada adecuado (Marlin, 1995).

2.6.1 Estructura de control

El control en cascada consta de controladores realimentados anidados, el controlador de nivel denominado master o primario, se utiliza para fijar el punto de consigna del secundario. La variable a controlar es la medida por el controlador primario, mientras que la medida de caudal del secundario es una variable intermedia.

En un sistema de control en cascada, la dinámica del lazo secundario debe ser siempre más rápida que la del primario, caso contrario, no es posible que funcione correctamente. La Figura 5 muestra la estructura de un control en cascada.

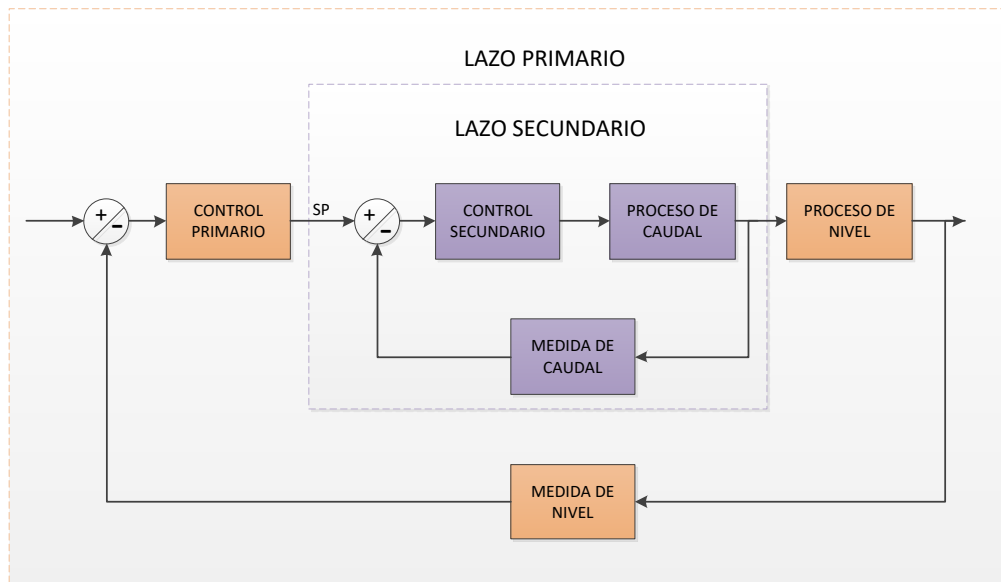


Figura 5. Estructura de un control en cascada

2.6.2 Criterio de diseño

Los criterios de diseño se resumen de forma concisa para que puedan aplicarse de forma general. El cumplimiento de estos criterios garantiza que el control en cascada se diseñe correctamente y se use solo cuando corresponda. Los dos primeros elementos abordan la selección del control en cascada. Naturalmente, solo cuando el control de bucle único no proporciona un rendimiento de control aceptable es necesaria una mejora, como el control en cascada. El control de bucle único proporciona un buen rendimiento cuando la dinámica es rápida, el tiempo muerto es pequeño y las perturbaciones son pequeñas y lentas.

El segundo criterio requiere la medida de una variable secundaria aceptable que esté disponible o pueda agregarse con un costo razonable. Esta variable secundaria debe cumplir tres criterios.

Primero, debe indicar la ocurrencia de una perturbación importante; es decir, la variable secundaria debe responder de manera predecible cada vez que se produce la perturbación. Naturalmente, la perturbación debe ser importante (es decir, tener un efecto significativo sobre la variable controlada y ocurrir con frecuencia), o no habría ninguna razón para atenuar su efecto.

En segundo lugar, la variable secundaria debe estar influenciada por la variable manipulada. Esta relación causal es necesaria para que un bucle de control de retroalimentación secundario funcione correctamente. El lazo secundario debe ser relativamente rápido para que pueda atenuar una perturbación antes de que la perturbación afecte a la variable primaria. Una directriz general es que el lazo secundario debe ser tres veces más rápido que el primario (Marlin, 1995).

2.6.3 Procedimiento de sintonía

El ajuste de un sistema de control en cascada se puede hacer de la siguiente manera:

1. Con el controlador maestro en modo manual, el controlador esclavo se sintoniza primero. Normalmente solo se utiliza una acción proporcional (P) para el controlador esclavo. Sin embargo, en ocasiones se usa la acción integral (I) cuando el proceso tiene una constante de tiempo corto, como en el caso de los procesos de flujo. El lazo esclavo se puede tratar como si fuera un bucle de control único, las constantes P e I del controlador esclavo se pueden determinar utilizando cualquiera de los métodos de ajuste de los controladores PID mencionados anteriormente.
2. Una vez que se ha ajustado el controlador esclavo, se cambia al modo automático y el controlador maestro se configura para el control PI o PID. El bucle maestro se puede considerar como un bucle de control único porque el bucle esclavo se puede tratar como un elemento de control final. Según esta suposición, el controlador maestro se puede sintonizar utilizando cualquiera de los métodos de sintonía mencionados anteriormente (Festo Didactic , s.f.).

2.7 Realidad virtual

La realidad virtual se define como una simulación de la realidad, una representación de objetos tridimensionales generados por un sistema informático. La perfección que se ha logrado en esta simulación ha hecho que cada vez sea más difícil distinguir la realidad sensorial de la realidad artificial; lo sensible de lo ficticio. (Unigarro Gutiérrez, 2004).

2.7.1 Gafas de realidad virtual

Son dispositivos que se colocan en la cabeza del usuario. Existen varias opciones de gafas o cascos visores, el precursor en este caso es el OCULUS, el cual pone una pantalla y la divide en dos, esto supone un limitante en la resolución. Otras opciones de visores ponen una pantalla para cada ojo duplicando su valor, pero al igual su resolución. Aunque no permite ver lo que rodea a la persona, algunas gafas como las Samsung permiten ver el entorno mediante su cámara incorporada, siendo un poco rara la experiencia. Las imágenes de cada ojo puede ser ligeramente distintas, de forma que el efecto que se puede ver es un relieve o en 3D (SD Estudio Digital SAS, 2015).

2.7.2 Dispositivo de reconocimiento gestual (Leap Motion)

Leap Motion es un pequeño dispositivo con conexión USB, que usa dos cámaras y tres LEDs infrarrojos para hacer un seguimiento de manos y dedos con un alcance máximo de un metro y una precisión espacial de 0.01 milímetros (Andrades, 2013).

2.7.3 Realidad virtual en la educación

En las universidades y centros de enseñanza se ha observado el incremento de la utilización de las tecnologías de la información y las comunicaciones en los procesos de enseñanza y aprendizaje en donde se

utilizan tecnologías basadas en inteligencia artificial, como los tutores inteligentes, los sistemas de gestión del aprendizaje o los videojuegos. De este modo es posible la construcción de sistemas de monitorización inteligente para analizar el progreso en el aprendizaje de los estudiantes, también se podrían plantear diferentes escenarios donde los alumnos dispondrían de interfaces cerebrales para interactuar directamente con una máquina y un software que podría realizar las tareas de un tutor virtual con conexión directa a las áreas de aprendizaje cerebrales (Sánchez Vila & Lama Penín, 2007).

Por lo tanto, cada vez más se demanda medios formativos y docentes innovadores, que motiven y respondan a los intereses y objetivos de la sociedad. Debido a esto se muestra el planteamiento constructivo en el que se propician actividades tales que el estudiante guíe su propio proceso de aprendizaje. Los sistemas hipermedia son un paradigma claro de este planteamiento. En otro sentido y siguiendo las teorías didácticas, existe el binomio del aprendizaje individualizado o el aprendizaje en colaboración con otros (Urretavizcaya, 2001).

2.8 Motor gráfico Unity3D

Unity3D es un potente motor 3D multiplataforma y un entorno de desarrollo fácil de usar. Lo suficientemente fácil para el principiante y lo suficientemente potente para el experto; Unity3D debería interesar a cualquiera que quiera crear fácilmente juegos y aplicaciones 3D para dispositivos móviles, computadoras de escritorio, Internet y consolas (Zamojc, 2012).

El editor de Unity3D presenta herramientas múltiples que permiten una edición e iteración rápidas en tus ciclos de desarrollo, lo que incluye el modo Play para tener vistas previas rápidas de tu trabajo en tiempo real, es un foco creativo para artistas, diseñadores, desarrolladores y otros miembros. (Unity3d, 2018).

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo detalla la implementación del control en cascada y el entorno virtual para el aprendizaje del control de procesos, específicamente el control en cascada, mismos que conforman el sistema didáctico.

El esquema que describe el funcionamiento del sistema didáctico se muestra en la Figura 6.

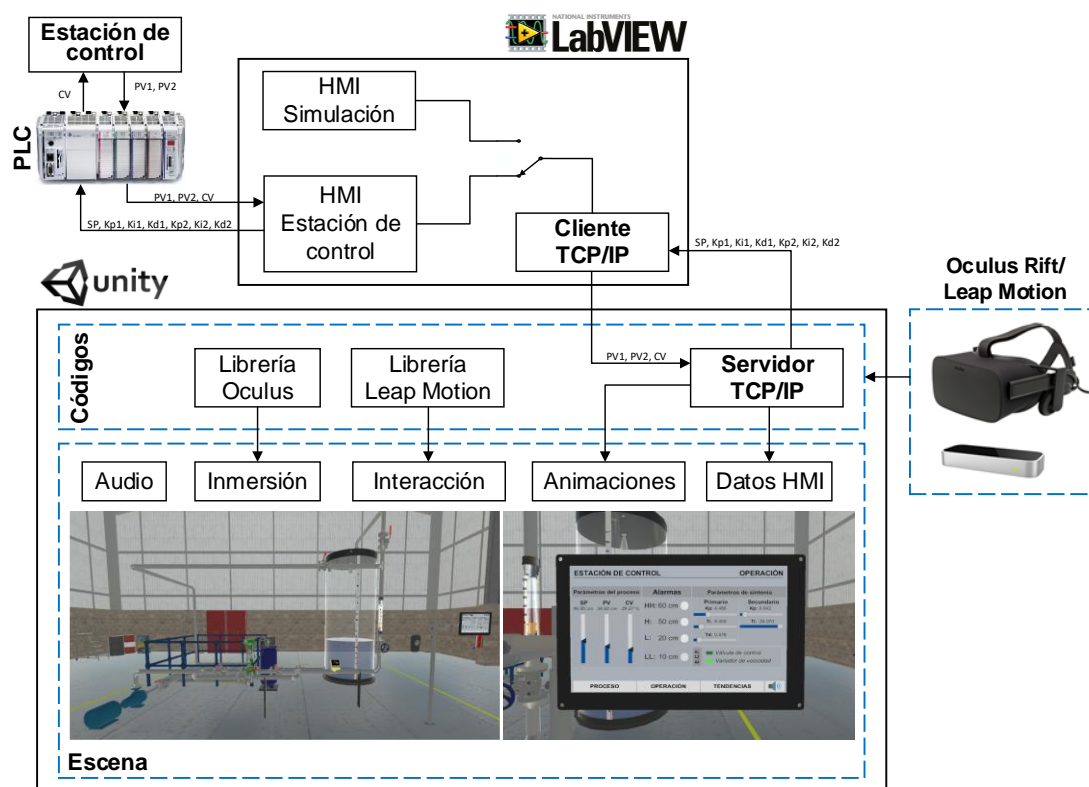


Figura 6. Esquema de funcionamiento del sistema didáctico completo

El sistema requiere la interacción entre Labview y Unity3D para el intercambio de los datos relevantes en el proceso a controlar, para lo cual, en primera instancia, se han desarrollado las programaciones y diseño de interfaces en cada uno de forma separada, para después implementar un método conexión entre sí a través del protocolo de comunicación TCP/IP.

Además, se hace uso de dispositivos periféricos como Oculus Rift y Leap Motion los cuales proveen la inmersión e interacción requeridas en el entorno.

Para comprender cada etapa de la estructura del sistema se ha subdividido este capítulo en dos secciones: Implementación del control en cascada e implementación del entorno virtual.

3.1 Implementación del control en cascada

3.1.1 Diagrama P&ID de la estación de control de nivel

En la Figura 7 se muestra el diagrama P&ID de la estación de control de nivel en la que se implementará la estrategia de control en cascada, mismo que será utilizado como base para el diseño del entorno virtual.

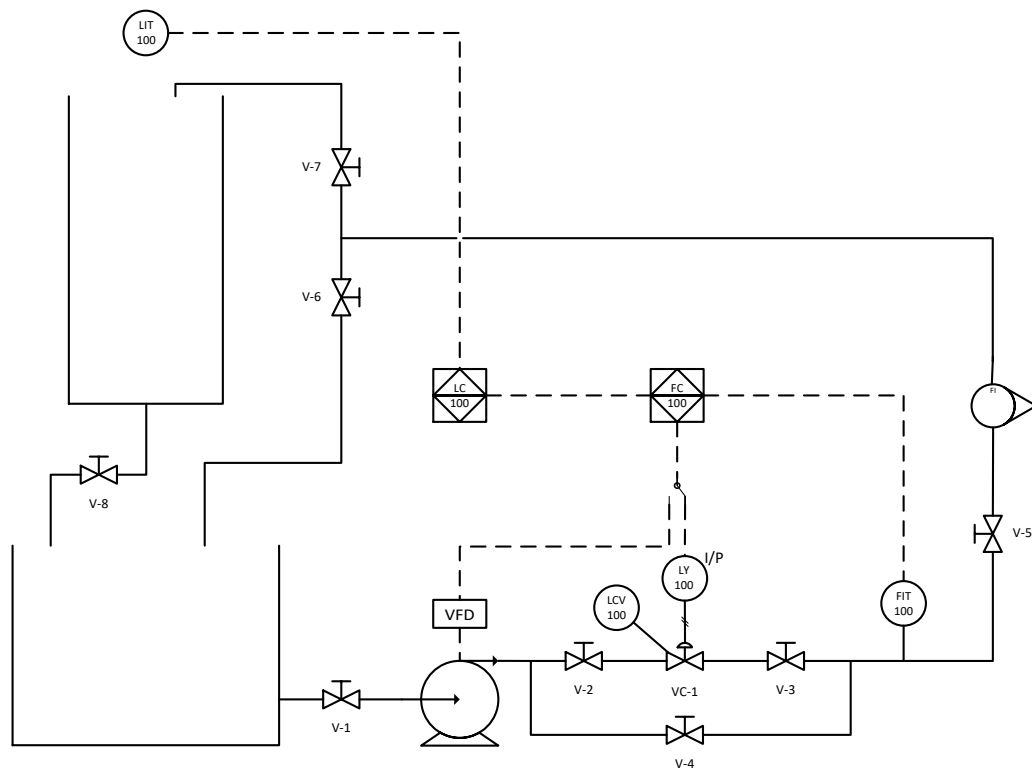


Figura 7. Diagrama P&ID de la estación de control

3.1.2 Análisis de las características del sistema

El sistema mostrado en la Figura 7 consta de dos variables medidas: flujo de entrada en el tanque y nivel del tanque. Estas medidas son sensadas por un transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550 y un transmisor de nivel de radar Rosemount 5402 respectivamente, para que el control en cascada tenga un buen desempeño se debe determinar adecuadamente las variables primaria y secundaria.

La variable secundaria debe ser mucho más rápida en respuesta que la primaria para que se pueda realizar una acción correctiva adecuada, la variable flujo de agua es mucho más rápido que el nivel de agua por lo tanto esta será definida como variable secundaria y el nivel será la variable primaria, la cantidad de flujo de agua a través de las tuberías será controlado por dos métodos, el primero será por medio de un variador de frecuencia el cual controlara la velocidad de la bomba centrífuga que pondrá en movimiento el agua a través de las tuberías y el segundo método será a través de una válvula de control la cual permitirá o negara el paso del agua por las tuberías.

3.1.3 Ajuste de los transmisores de la planta

a) Ajuste del transmisor de flujo de paletas Georg Fischer Signet 8550-1

Para ingresar al menú de calibración del transmisor de flujo se debe presionar por 2 segundos la tecla enter como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Ingreso al menú de calibración
Fuente: (Georg Fischer Piping Systems, 2012)

Una vez en el menú de calibración se debe ingresar la clave con la secuencia de teclas mostrada en la Figura 9.

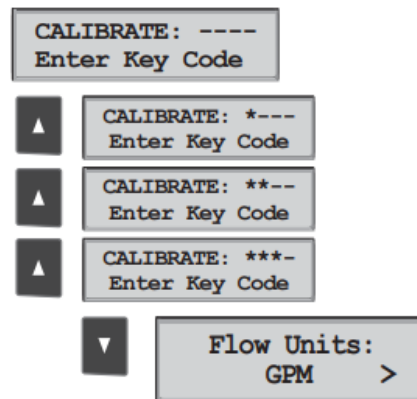


Figura 9. Código de ingreso

Fuente: (Georg Fischer Piping Systems, 2012)

Desplácese por el menú mostrado con las teclas de flecha ▲ o ▼ hasta llegar a Flow K-Factor, Presione la tecla ► para editar la opción seleccionada, El factor K convierte la frecuencia de entrada del sensor de flujo en una velocidad de flujo el valor de este parámetro es exclusivo del modelo del sensor y del tamaño de la tubería. Los límites de este parámetro van desde 0.0001 a 99999. Presionar la tecla enter y guardar la configuración.

Dirigirse al menú Total K-Factor y presionar la tecla ► para editar este parámetro que convierte la frecuencia de entrada del sensor de flujo en un total volumétrico. La configuración suele ser la misma que el factor K de flujo, o diferente por x10 o x100 sus límites van desde 0.0001 a 99999. Presionar la tecla enter para guardar la configuración.

Una vez guardadas las configuraciones realizadas, para salir a la operación normal del transmisor presionar simultáneamente las teclas arriba y abajo simultáneamente como se muestra en la Figura 10 (Georg Fischer Piping Systems, 2012).



Figura 10. Salir del menú

Fuente: (Georg Fischer Piping Systems, 2012)

b) Ajuste del transmisor de nivel de radar Rosemount 5402

➤ Configuración

Conectar el transmisor Rosemount 5402 como se muestra en la Figura 11.

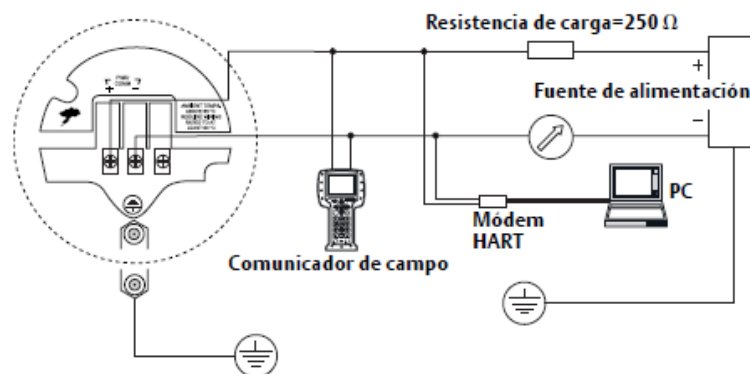


Figura 11. Conexión HART con el transmisor Rosemount 5402

Fuente: (Emerson, 2013)

Para la configuración, calibración y ajuste del transmisor se utiliza el software Rosemount Radar Master, ver Figura 12.



Figura 12. Interfaz del software Rosemount Radar Master

En la ventana mostrada en la Figura 13, seleccionar el tipo de comunicación que se va a utilizar para la comunicación con el dispositivo. Se utilizará el protocolo de comunicación HART. Previamente se debe haber cambiado la dirección POLL del transmisor para que exista comunicación mediante el protocolo mencionado.



Figura 13. Selección del protocolo de comunicación

Seleccionado el protocolo de comunicación se iniciará el software y mostrará la ventana mostrada en la Figura 14 donde se seleccionará el puerto en donde se encuentra conectado el cable HART.

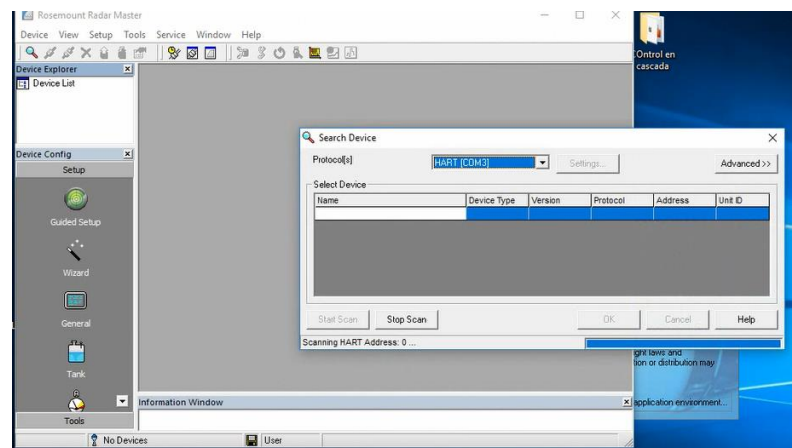


Figura 14. Ventana de inicio del software Rosemount Radar Master

Para realizar la búsqueda del dispositivo conectado realizar un clic en el botón “Advanced” y aparecerá la siguiente ventana mostrada en la Figura 15.

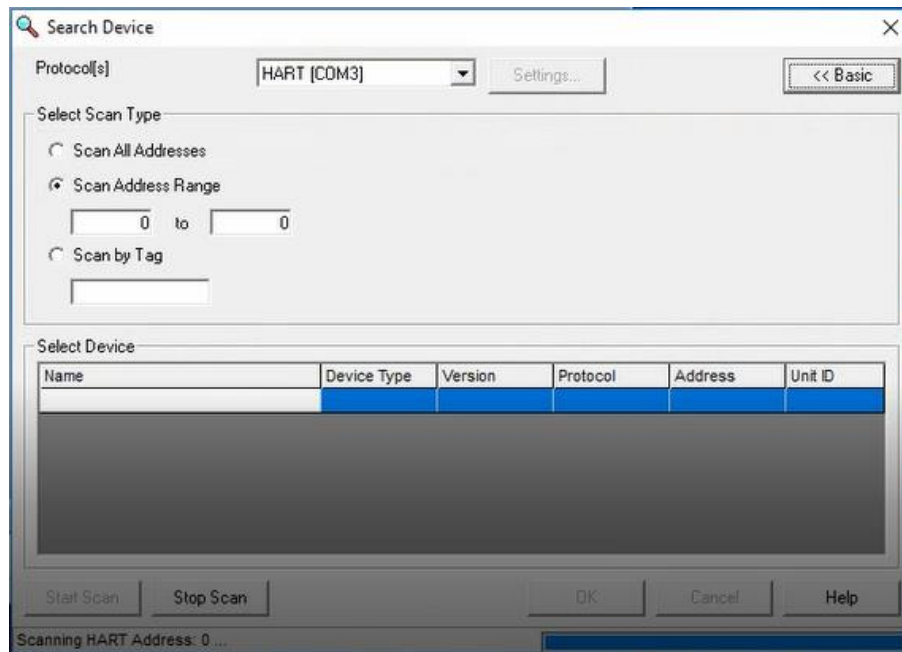


Figura 15. Selección de dispositivo

En esta ventana se seleccionará “SCAN ADDRESS RANGE” para ingresar el rango de búsqueda de dispositivos, una vez ingresado el rango de búsqueda presionar el botón “START SCAN” para iniciar la búsqueda de dispositivos. Si el dispositivo está conectado adecuadamente aparecerá el mensaje mostrado en la Figura 16 indicando que el dispositivo ha sido encontrado.

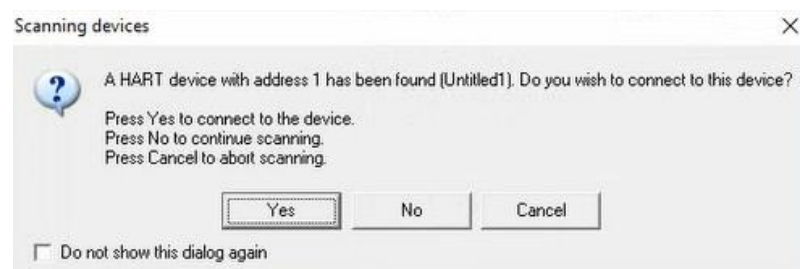


Figura 16. Escaneo de dispositivos

Una vez que se ha conectado con el dispositivo aparecerá automáticamente la ventana Guided Setup, ver Figura 17. esta ventana ayudará la configuración del dispositivo.



Figura 17. Ventana Guided Setup

Se deberá hacer clic en el botón “Run Wizard for guided setup”. Seguir las instrucciones correspondientes a “Basic Configuration” donde el usuario será guiado a través de un breve procedimiento de instalación del transmisor. Iniciado el Run Wizard for guided setup aparecerá la ventana mostrada en la Figura 18 donde aparecerá la información general del dispositivo.

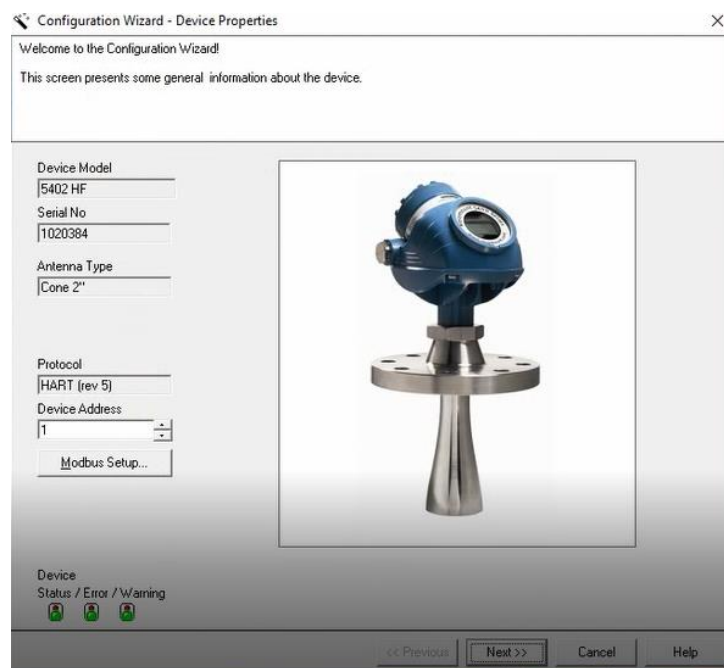


Figura 18. Propiedades del dispositivo

Verificada la información del dispositivo dar clic en el botón Next, luego aparecerá la ventana mostrada en la Figura 19 donde se podrá ingresar una etiqueta (Tag), una descripción de la etiqueta, un mensaje y la fecha.

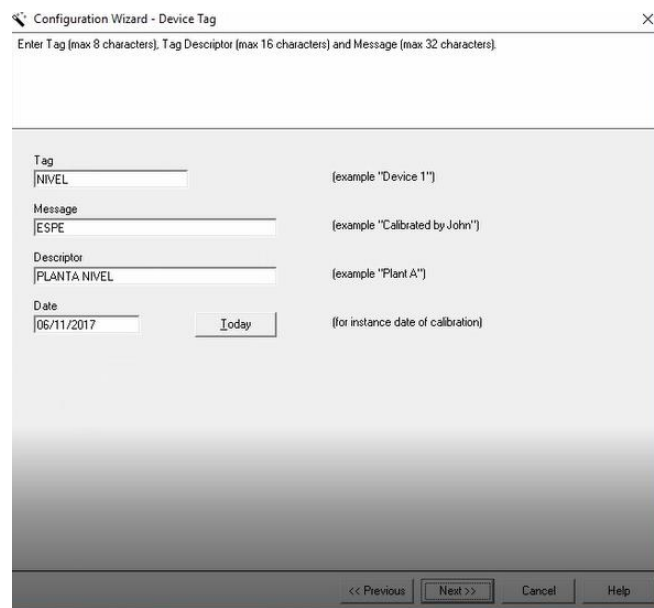


Figura 19. Configuración de etiqueta

La siguiente ventana mostrada en la Figura 20 indica las unidades de medida para el dispositivo.

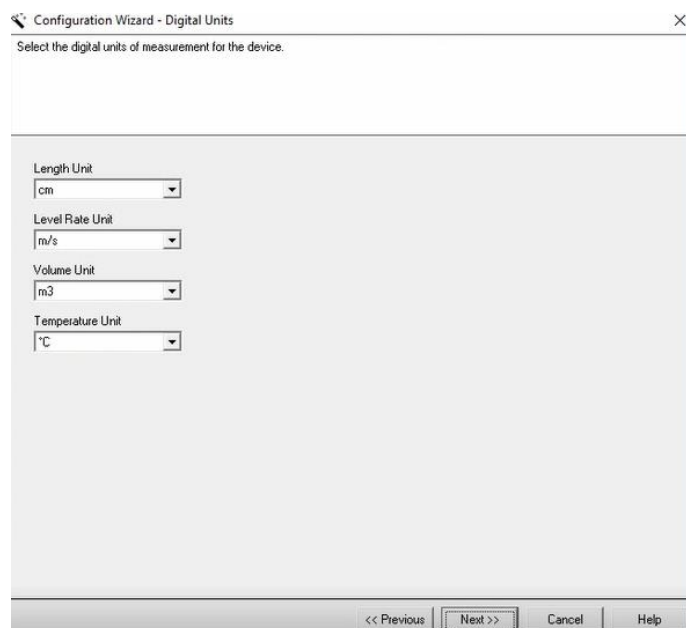


Figura 20. Unidades de medida

La ventana mostrada en la Figura 21 permite seleccionar el tipo de tanque utilizado.

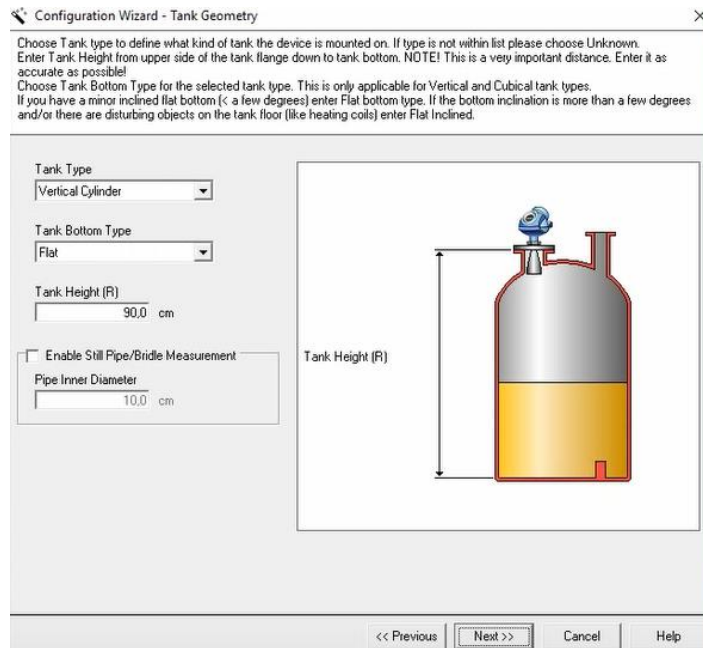


Figura 21. Geometría del tanque

Luego, aparecerá la ventana mostrada en la Figura 22 donde se seleccionará las condiciones del proceso en el tanque.

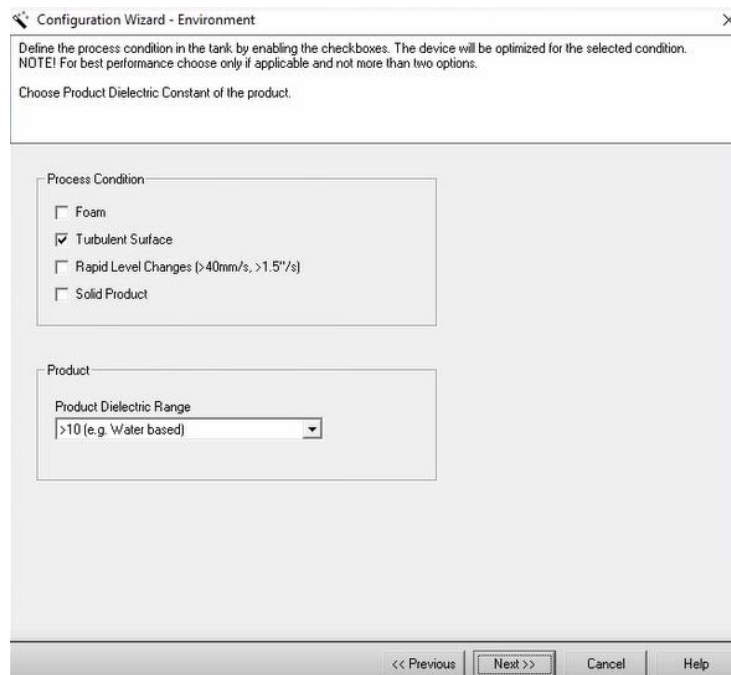


Figura 22. Condiciones del proceso en el tanque

Aparecerá la ventana mostrada en la Figura 23 donde si se desea calcular el volumen se debe elegir un método de cálculo definido previamente, de acuerdo con la forma del depósito. Si no se desea calcular el volumen, elegir None.

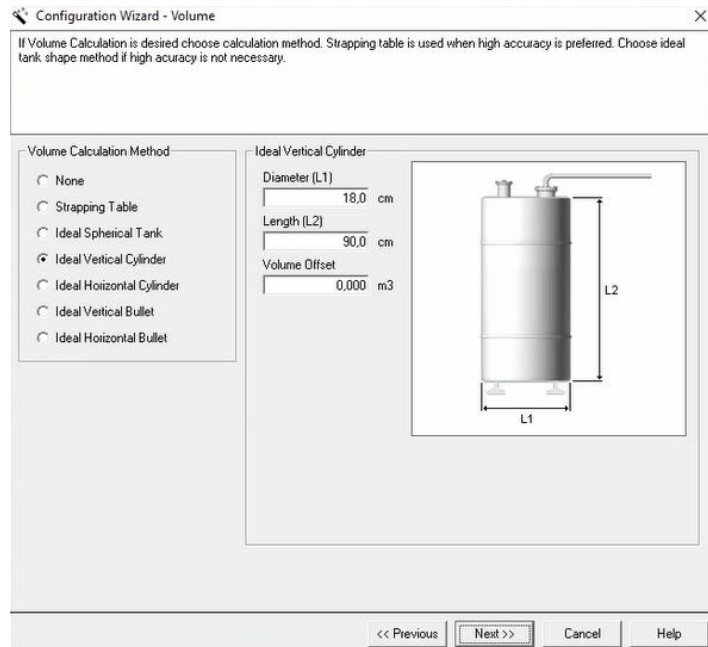


Figura 23. Cálculo de volumen

La siguiente ventana mostrada en la Figura 24 permite seleccionar las variables para la salida digital del dispositivo.

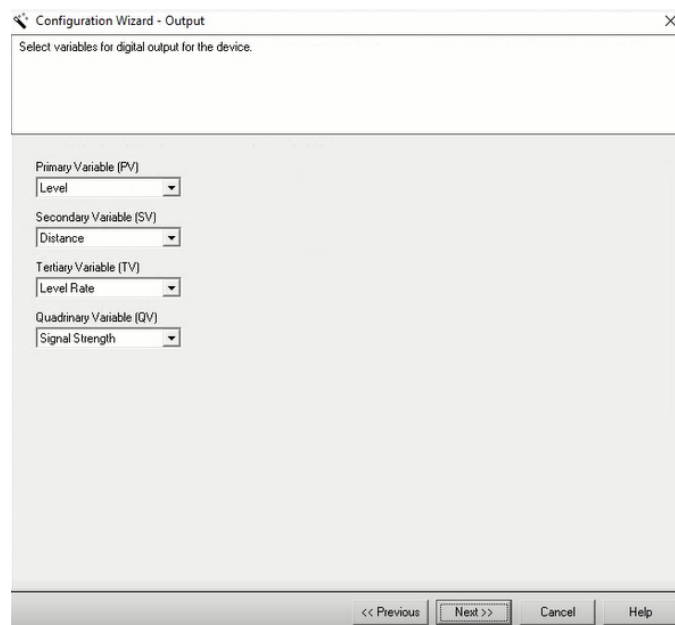


Figura 24. Unidades de salida digital

Dar clic en siguiente, aparecerá la ventana mostrada en la Figura 25.

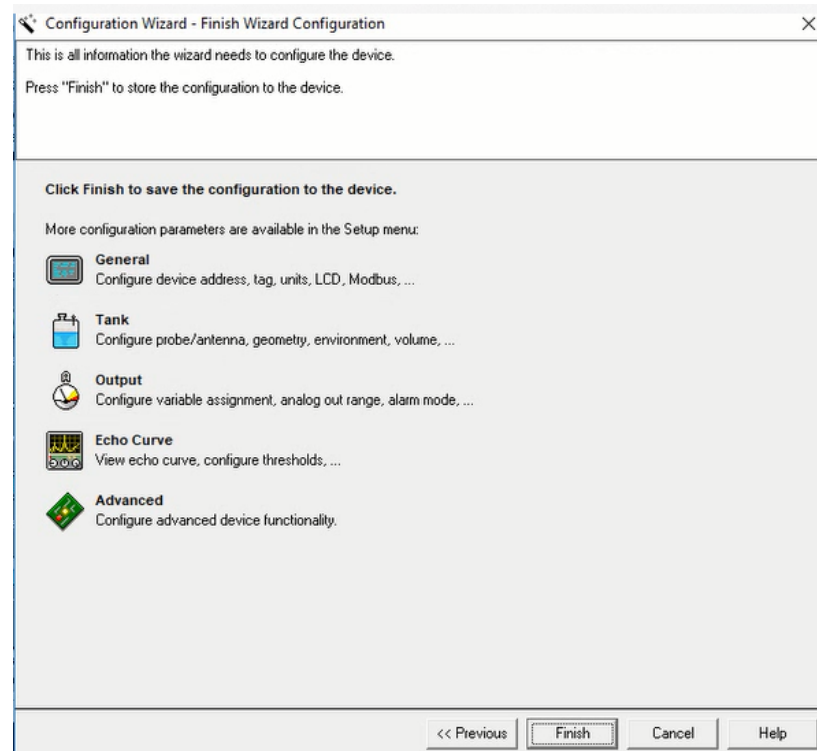


Figura 25. Finalización del asistente de configuración

De esta manera finaliza la configuración básica con el Asistente de Radar Master. Proceder con la configuración guiada para determinar qué configuración adicional se requiere (Emerson, 2013).

➤ **Ajuste de nivel y distancia**

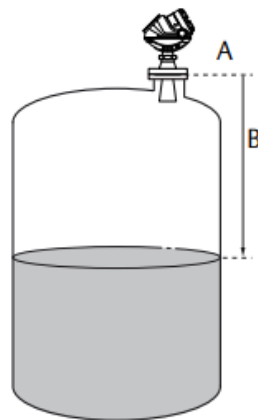
El ajuste de nivel y distancia puede ser necesario cuando se usa una boquilla o tubería o si hay perturbaciones en la zona cercana causadas por un objeto físico.

Los recipientes no metálicos (por ejemplo, de plástico) y la geometría de instalación pueden introducir un desplazamiento para el punto de referencia cero. Este desplazamiento puede ser de hasta ± 25 mm. La compensación se puede realizar con la calibración de distancia.

Al ajustar o calibrar el transmisor, es importante que la superficie del producto esté en calma y que el tanque no se esté llenando ni vaciando.

La calibración de distancia se puede realizar a través de RRM (Rosemount Radar Master).

1. Seleccione el ícono "Tank" en Configuración de dispositivo / Configuración en el espacio de trabajo de RRM.
2. En la ventana Tanque, seleccione la pestaña Geometry tab.
3. Seleccione el botón Advanced.
4. Ingrese el valor deseado en el campo Distancia de calibración y seleccione el botón Store (Emerson, 2016).



A. Punto de referencia

B. Distancia

Figura 26. Calibración de distancia

Fuente: (Emerson, 2016)

La calibración de nivel se realiza de una manera similar:

1. Mida el nivel real del producto.
2. Ajuste el Tank Height para que el nivel del producto medido por el transmisor corresponda al nivel real del producto (Emerson, 2016).

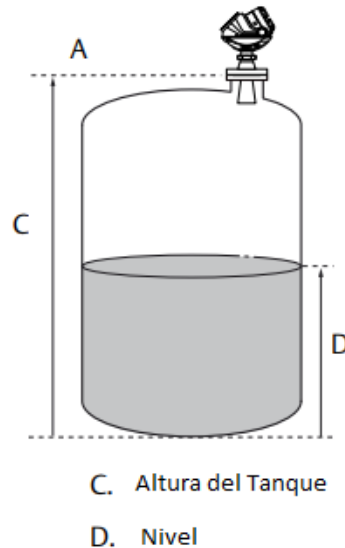


Figura 27. Calibración de nivel

Fuente: (Emerson, 2016)

También puede ajustarse o calibrarse la salida analógica comparando la corriente de salida real con las corrientes nominales de 4 mA y 20 mA. La calibración se realiza en la fábrica y normalmente no es necesario recalibrar el transmisor. La función de calibración de salida analógica está disponible a través del comando HART. En RRM, esta función está disponible a través de Setup>Output.

Para calibrar la corriente de salida analógica se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Inicie RRM y asegúrese de que el transmisor se comunice con la PC.
2. Seleccione el ícono Output en la barra de herramientas Config/Setup
3. Seleccione la pestaña Analog Out en la ventana de Salida.
4. Seleccione el botón Calibrate DAC.
5. Siga las instrucciones mostradas en la Figura 28 para calibrar las salidas de 4 mA y 20 mA (Emerson, 2016).

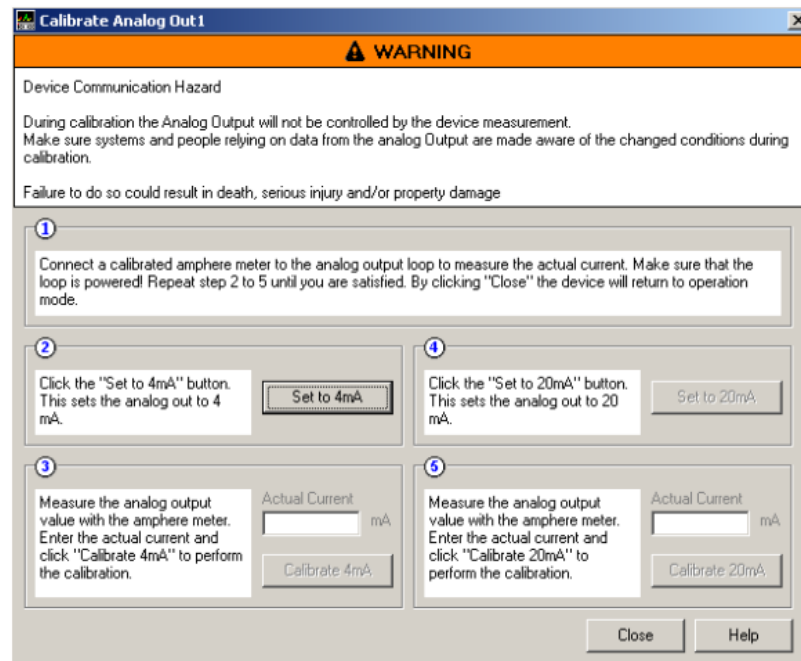


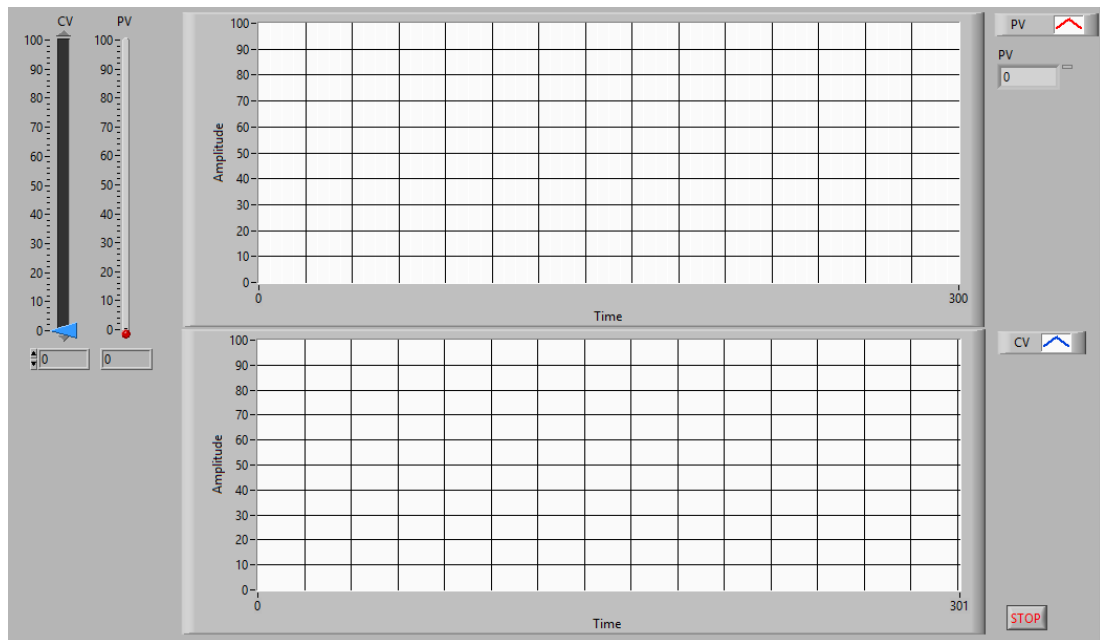
Figura 28. Instrucciones de calibración de salida analógica

3.1.4 Identificación del sistema y sintonización

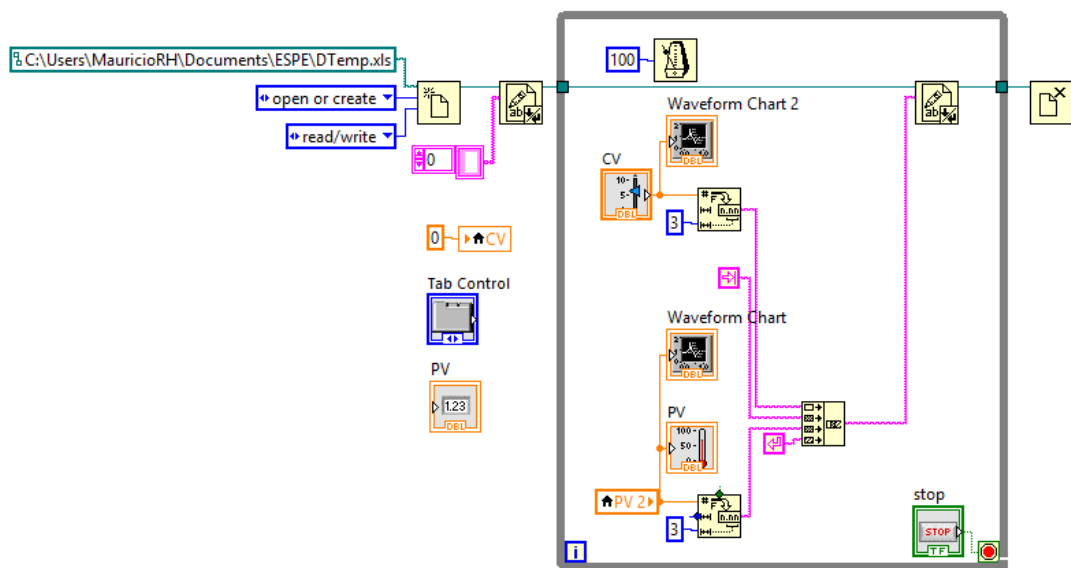
Para una correcta sintonía del control en cascada es necesario determinar la dinámica del proceso de cada de cada bucle que conforma el sistema en cascada para lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento.

Primero se determinará la función de transferencia del sistema que tiene la variable secundaria la cual es mucho más rápida que la variable primaria. La función de transferencia de este sistema se estima con la expresión matemática de primer orden más tiempo muerto que se presentó anteriormente, ver ecuación 1.

Para determinar los parámetros (k_p, T, L) de la ecuación 1, se implementa la interfaz de visualización en el software Labview el cual permite enviar una entrada escalón (CV) y obtener su respuesta (PV) para poder estimar la función de transferencia adecuadamente, en la Figura 29 se muestra la interfaz utilizada para la determinación de la respuesta del sistema a una entrada escalón.



a)



b)

Figura 29. Aplicación de Labview para determinar la dinámica del sistema:
a) Panel frontal, b) Diagrama de bloques

Realizado este proceso y obtenidos los datos de entrada (CV) y salida (PV) del sistema con ayuda de la herramienta “ident” de Matlab se realiza la una estimación con los datos obtenido para la determinación de la función de transferencia del sistema.

La función de transferencia obtenida se muestra en la ecuación 32.

$$G(s) = \frac{1.0048}{1 + 24.07s} e^{-1.446s} \quad (32)$$

Para determinar la función de transferencia del sistema que contiene la variable primaria es necesario que el controlador de la variable secundaria este implementado ya que este viene a ser parte del sistema de la variable primaria e influye en su comportamiento.

El controlador que se implementa en el lazo secundario es PI, no se incluye una acción derivativa en este controlador porque le restaría velocidad a la respuesta del sistema. Para sintonizar el lazo secundario se utiliza la herramienta de sintonización mencionada en (Pruna, Rosero, Pogo, Escobar, & Acosta, 2018) que ha sido desarrollada en Matlab.

La Figura 30 muestra la herramienta de sintonía, en la cual se ingresan los parámetros de la función de transferencia obtenida para posteriormente calcular los parámetros de sintonía del controlador PI de acuerdo a los métodos descritos en el capítulo II.

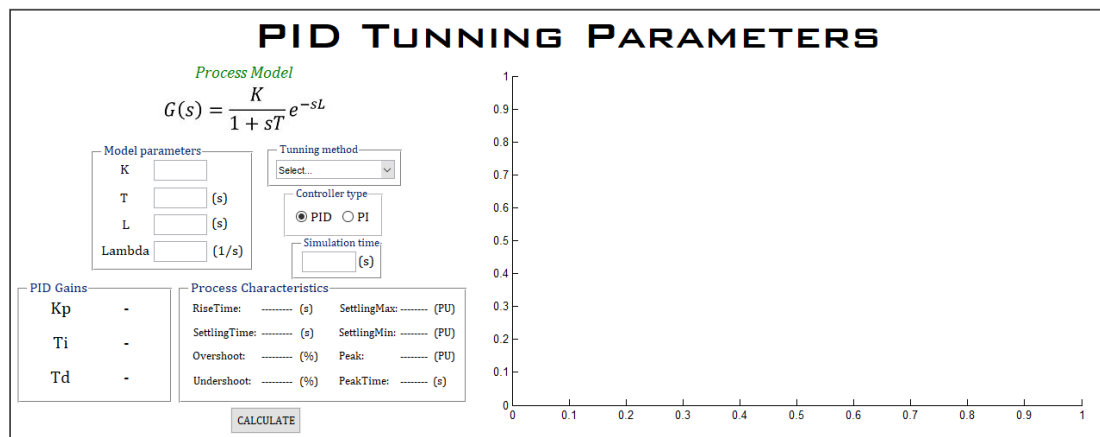


Figura 30. Herramienta de sintonía

Los parámetros de sintonía obtenidos con la herramienta se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1
Parámetros de sintonía, lazo secundario

Métodos	Kp	Ti	Td
Ziegler and Nichols	10.66	4.519	-
Cohen-Coon	14.99	4.237	-
Lambda ($\lambda=27$)	0.842	24.07	-

La Figura 31 muestra la respuesta simulada del sistema al aplicar el método de sintonía de Ziegler and Nichols.

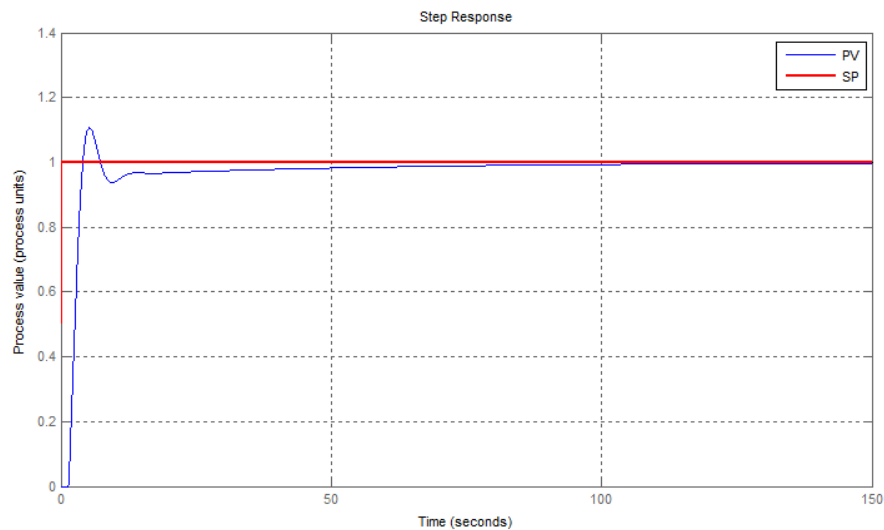


Figura 31. Método de Ziegler and Nichols

La Figura 32 muestra la respuesta simulada del sistema al aplicar el método de sintonía de Cohen-Coon.

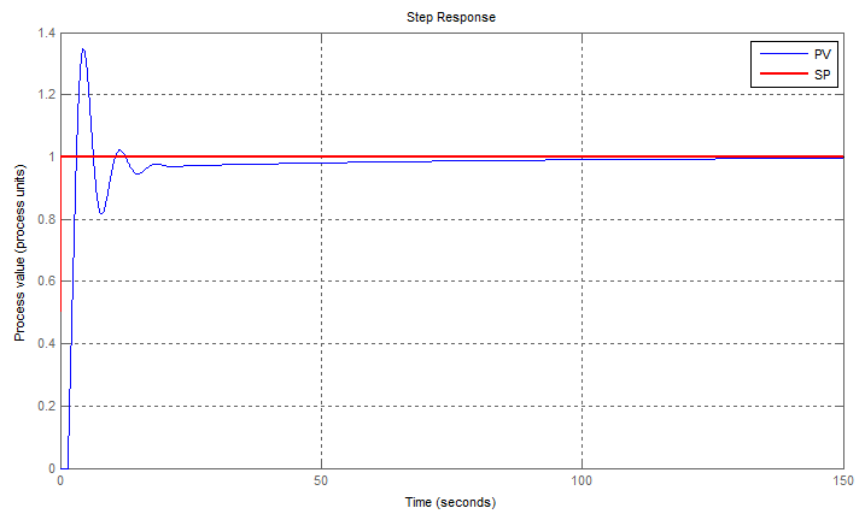


Figura 32. Método Cohen-Coon

La Figura 33 muestra la respuesta simulada del sistema al aplicar el método de sintonía de Lambda.

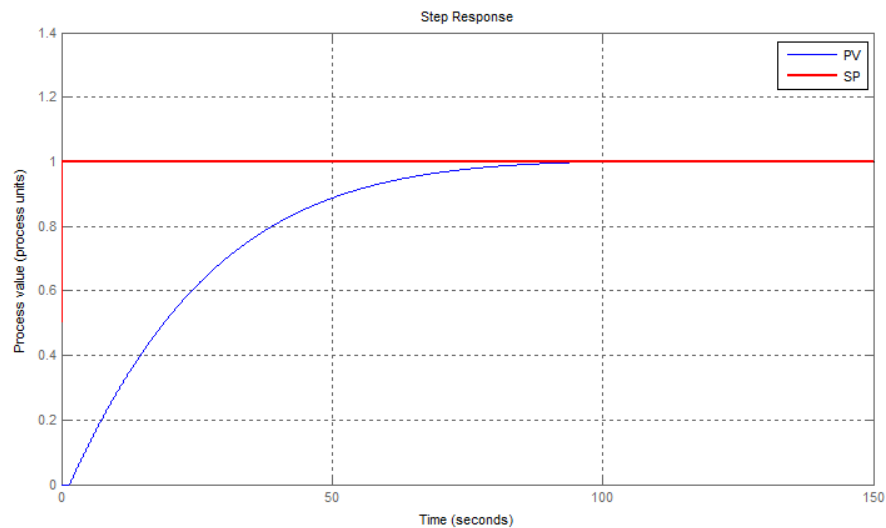


Figura 33. Método Lambda

A simple vista se observa que el método de sintonía más eficiente para el lazo secundario es Lambda, debido a que no presenta sobre impulso y llega al punto de consigna mucho más rápido que los otros métodos calculados.

Una vez implementado el controlador PI en el lazo secundario se obtiene la función de transferencia del lazo primario, en este lazo ya no se determinará una función de primer orden más tiempo muerto debido a que el proceso de llenado de un tanque es un proceso integrante (IDP) su ecuación característica se muestra en la ecuación 21.

Para obtener los parámetros k_m y τ_m de la función de transferencia se realiza el mismo procedimiento que en el lazo secundario, a través de la interfaz implementada en Labview, ver Figura 29.

Con los datos obtenidos se obtiene la función de transferencia mostrada en la ecuación 33.

$$G(s) = \frac{0.04991}{s} e^{-4.2s} \quad (33)$$

Determinada la función de transferencia del lazo primario se procede a sintonizar el sistema con los métodos de sintonía para procesos integrantes detallados en el capítulo II, las constantes de sintonía obtenidas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros de sintonía, lazo primario

Métodos	Kp	Ti	Td
Ford	7.06	8.4	1.54
Åström & Hägglund	4.48	8.4	2.1
Zou and Bigham	4.2404	18.9	1.866

Los resultados obtenidos con los parámetros calculados se detallan en el capítulo IV.

Una alternativa más que se utilizó para implementar esta técnica de control es una válvula de control como elemento de control final, la cual permitirá controlar la variable secundaria al igual que el variador de frecuencia.

Se presentaron ciertos inconvenientes al obtener los modelos matemáticos de la planta utilizando este dispositivo de control debido a que al momento de obtener la dinámica del proceso la válvula producía cambios bruscos en la medición del flujo lo que hacía que la estimación de los datos adquiridos no sea la adecuada. Por tal motivo la sintonización del control en cascada con válvula de control no se la realizó de manera analítica. Esta sintonía se realizó en lazo cerrado, obteniendo las constantes de sintonía mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3

Parámetros de sintonía, válvula de control

Método	Kp	Ti	Td
Experimental(Lazo primario)	4.91	5.6	1.036
Experimental(Lazo secundario)	0.842	24.07	-

3.1.5 Programación del PLC para la implementación del control en cascada

La programación se la realiza en el software RSLogix 5000 de Allen-Bradley para un PLC CompactLogix L32E 1769, los bloques de programación se detallan a continuación.

La Figura 34 muestra la subrutina de escalamiento en la cual se realizan los escalamientos de cada uno de los parámetros que se utilizan en el control.

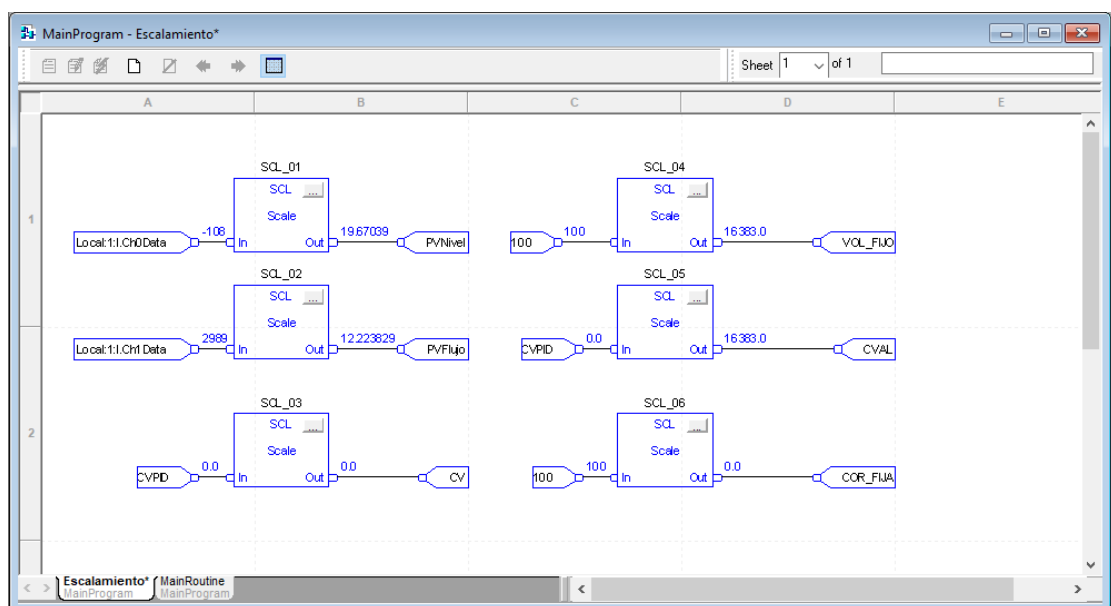


Figura 34. Subrutina de escalamiento

SCL_01 y SCL_2 realizan el escalamiento de los datos obtenidos del módulo analógico 1769-IF4 en el cual se conectan los transmisores de flujo y nivel.

SCL_03 y SCL_05 realizan el escalamiento de la salida del controlador PID maestro para que pueda ser enviado al elemento de control final ya sea este variador o válvula.

SCL_04 y SCL_06 realizan el escalamiento para mantener un valor constante en los actuadores del sistema, es decir si se está realizando un control con variador SCL_06 convertirá el valor entero fijo 100 a un valor en

bits 16383 que posteriormente será enviada al posicionador de la válvula mediante el módulo genérico de salidas analógicas 1769 para mantener cerrada la válvula, si se realiza un control con válvula entonces se deberá tener flujo constante, para esto, SCL_04 convertirá el valor entero 100 a un valor en bits 16383 que posteriormente será enviado al variador de frecuencia el cual accionara la bomba centrífuga del sistema para mantener un flujo de agua constante.

La Figura 35 muestra la rutina principal, la cual se describe a continuación.

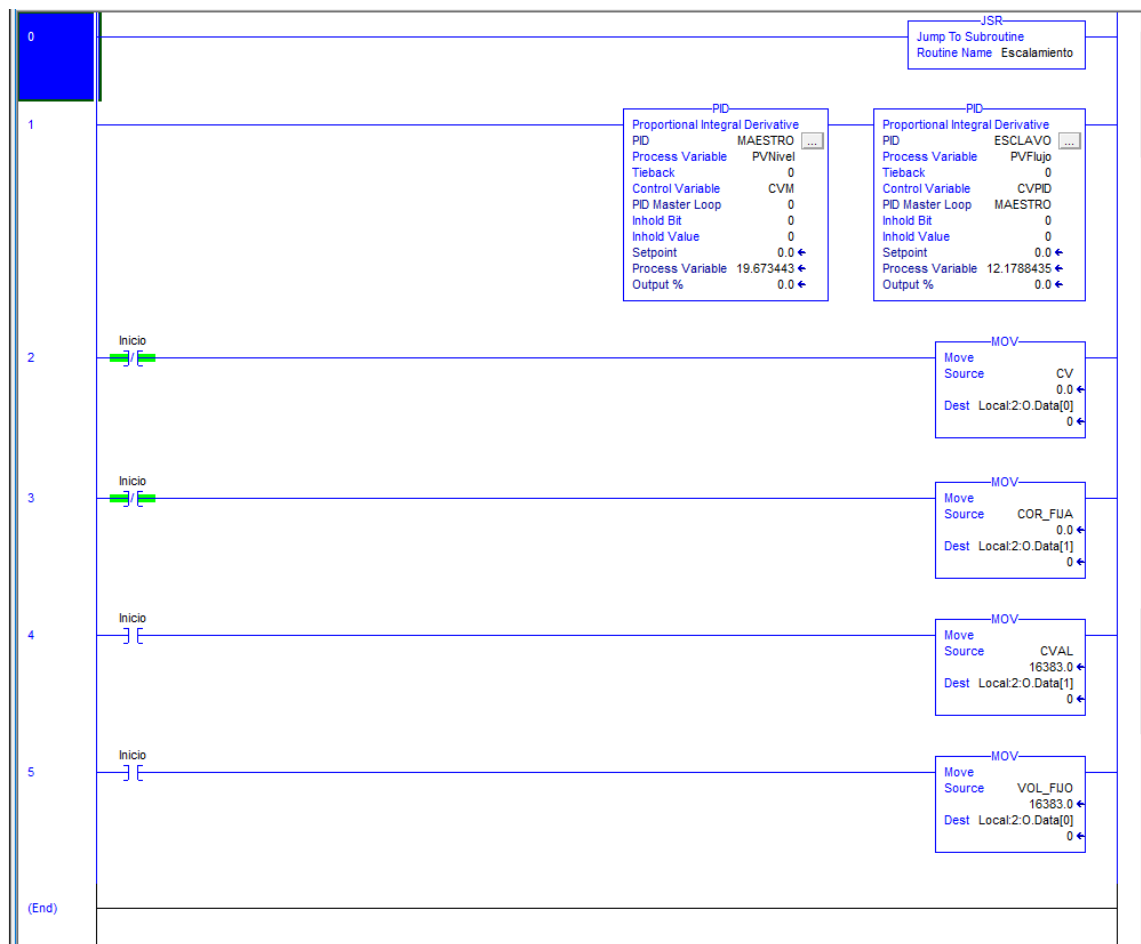


Figura 35. Rutina principal

JSR (Jump To Subroutine) se usa para ordenar al PLC que ejecute primero la subrutina en donde se está escalamiento de los datos del proceso y luego regrese a la instrucción que sigue en la programación.

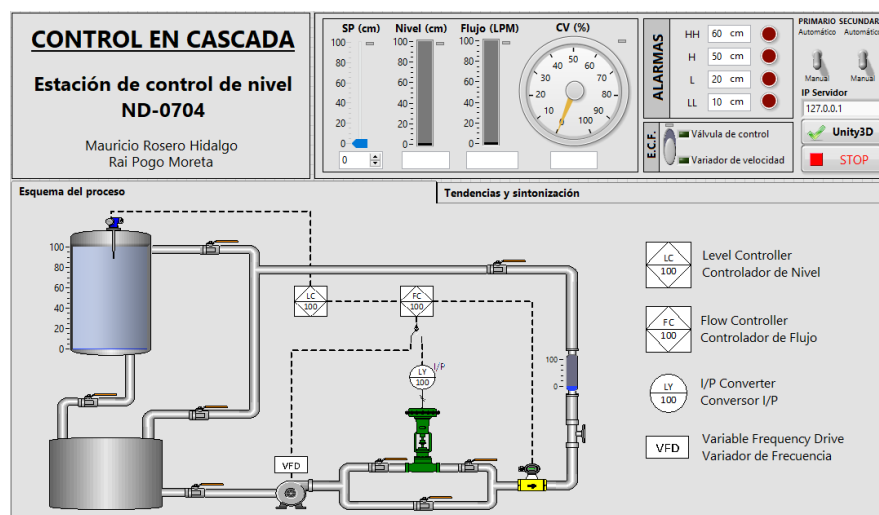
PID (Maestro) Controla el estado de la variable primaria envía una señal de control en unidades de ingeniería al bloque PID (esclavo) para que este emita una acción de control en la variable secundaria de acuerdo al comportamiento de la variable primaria.

Inicio es una variable booleana que permite realizar el cambio de control con variador de frecuencia a control con válvula.

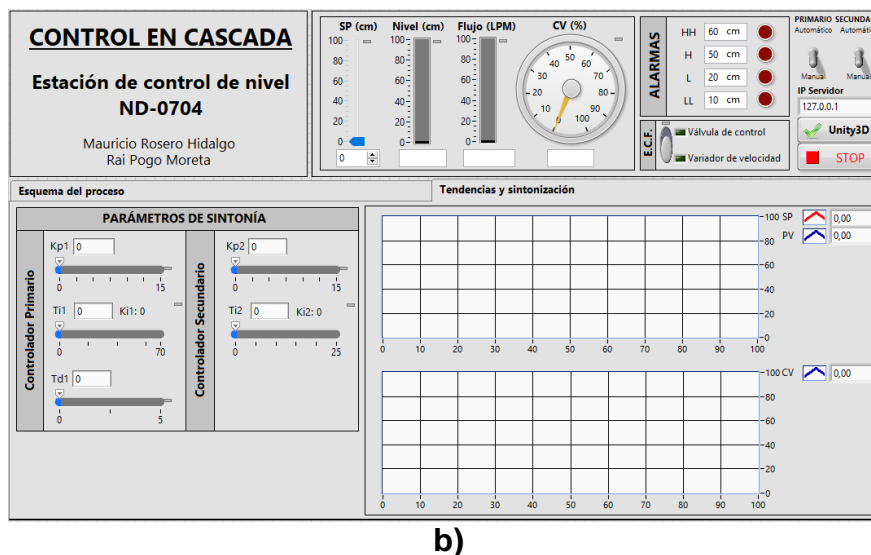
Mov permite mover los valores escalados en la subrutina de escalamiento hacia los registros correspondientes a los contactos del módulo genérico de salidas analógicas 1769.

3.1.6 Diseño del HMI en Labview para el monitoreo y control del proceso

La Figura 36 muestra el panel frontal del HMI realizado en Labview en el cual se observa el esquema del proceso, las tendencias y la sintonización del controlador primario y secundario, tiene indicadores en los cuales se encuentran los valores de las variables del proceso como son el PV de variable primaria y secundaria, CV y set point, aparecen indicadores de las principales alarmas del proceso, dos switches que permiten realizar el cambio de control automático a manual en los dos controlares y dos botones que permiten la comunicación con Unity3D y el paro general de la interfaz.



a)



b)

Figura 36. HMI para el monitoreo y control: a) Esquema del proceso, b) Panel de sintonía y tendencias

3.2 Implementación del entorno virtual

Para la creación del entorno virtual se ha utilizado la herramienta CAD Autocad Plant 3D la cual permite el diseño de plantas industriales en forma tridimensional, y el motor gráfico Unity3D en donde se animan y caracterizan los componentes del ambiente virtual. Para el diseño de la planta virtual se ha tomado como base el diagrama P&ID de la estación de control de nivel ND-0704 del laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos, misma que se verá sometida al control en cascada antes descrito. Además, se ha diseñado un HMI (Interfaz Humano-Máquina) para el monitoreo y control del proceso, sea en la estación de control o en una simulación.

3.2.1 Diseño de la planta en Autocad Plant 3D

Autocad Plant 3D permite el diseño de plantas 3D brindando muchas facilidades de uso para lograr el modelo deseado. Posee modelos básicos para representar válvulas, tanques, bombas y accesorios de tuberías comunes en industrias. Para esto cuenta con un amplio catálogo de tuberías capaz de satisfacer las necesidades básicas de un diseño industrial casi en su totalidad.

El ruteo de tuberías es una de las principales características por la cual se ha utilizado esta herramienta. Puede hacerse a partir de un punto de inicio o nodo abierto hasta un punto final, teniendo como referencia por defecto los puntos del eje central de la tubería, además, ofrece opciones de ruteo dependiendo de los objetos existentes en el modelo y la orientación de los puntos de conexión, tal como se muestra en la Figura 37.

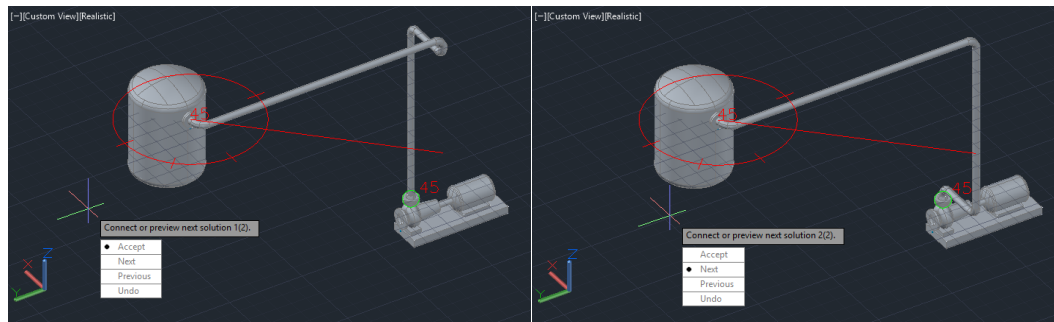


Figura 37. Ruteo de tuberías en Autocad Plant 3D

El diseño de la planta virtual propuesta requiere de equipos e instrumentos que no se encuentran dentro del catálogo de Autocad Plant 3D. Estos equipos pueden modelarse en otras herramientas CAD e importarse en Autocad Plant 3D para convertirlos en equipos personalizados que cuenten con nodos de conexión. Para esto, con el objeto seleccionado, se utiliza la opción “Convert Equipment” y se selecciona el tipo de equipo al cual pertenece el modelo, ver Figura 38.

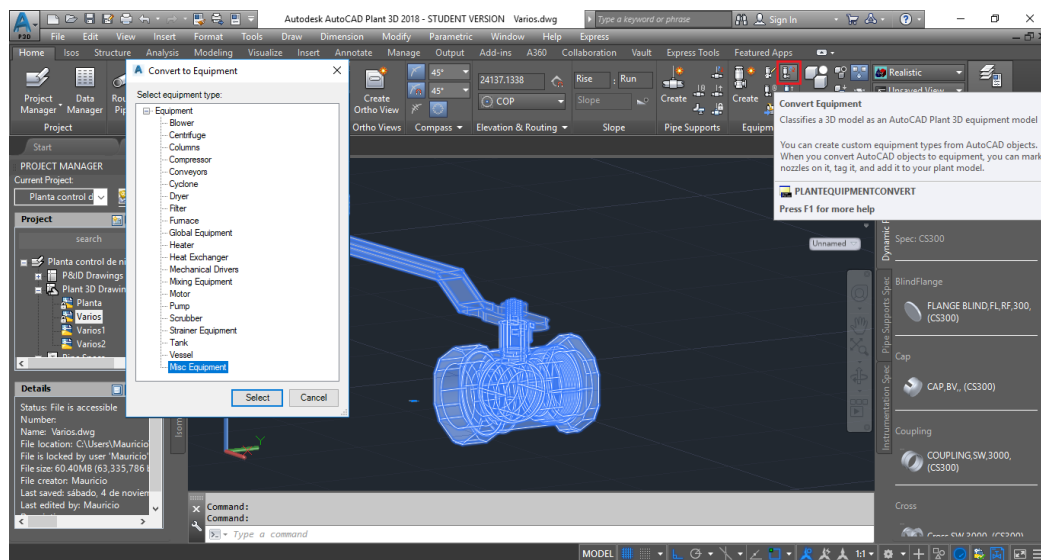


Figura 38. Creación de instrumento personalizado en Autocad Plant 3D

Luego se añade una descripción al equipo en caso de ser necesaria. Ahora se tiene un objeto al cual se le pueden añadir nodos de conexión o boquillas como se muestra en la Figura 39. El proceso de creación de boquillas es muy simple e intuitivo, únicamente se debe seleccionar el punto central de esta, su dirección y tamaño, características que pueden editarse posteriormente.

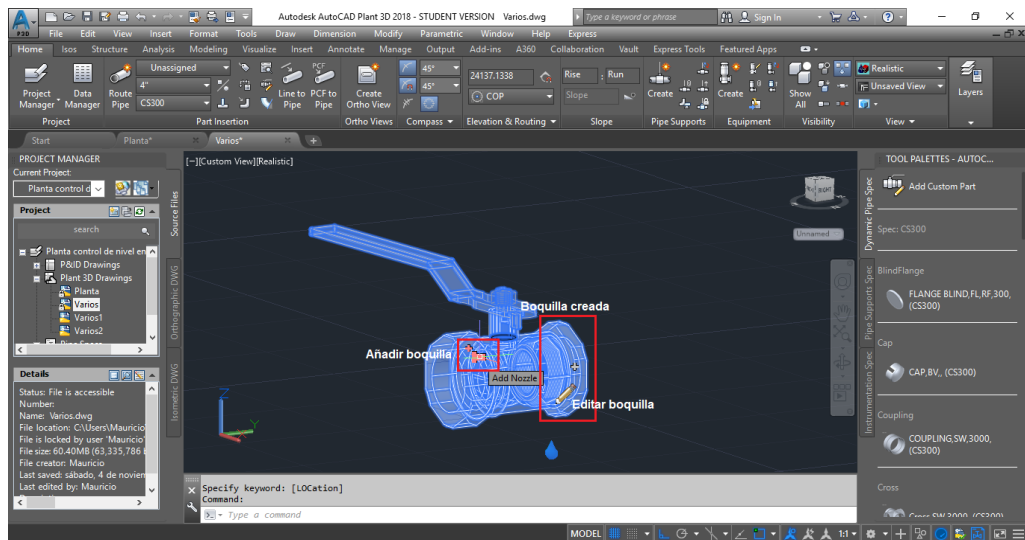


Figura 39. Instrumento personalizado para creación de nodos de conexión

Para el diseño de la planta se han utilizado modelos ya existentes en catálogos web de acceso libre y gratuito. El diseño preliminar realizado en Autocad Plant 3D se muestra en la Figura 40.

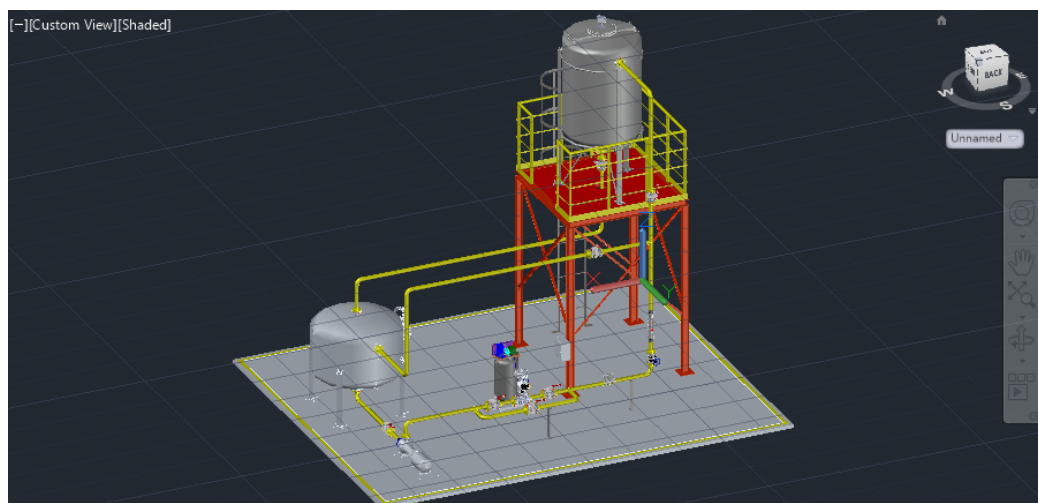


Figura 40. Diseño preliminar de la planta en Autocad Plant 3D

La planta creada está sujeta a cambios de diseño que se detallarán en la sección posterior. El siguiente paso es exportar el modelo en formato *.fbx, compatible con Unity3D, para importarlo en el mismo.

3.2.2 Diseño del ambiente virtual en Unity3D

El modelo 3D diseñado en Autocad Plant 3D se importa en Unity3D con el formato *.fbx, donde se deben añadir texturas a todos los objetos para obtener un entorno virtual realista. En este punto se vio la necesidad de hacer cambios en el diseño de la planta para una mejor experiencia del usuario, entre los cuales está la reubicación de tanques y por consiguiente de algunas tuberías. Además, se añadieron varios objetos que contribuyen al realismo y comodidad para el usuario, pero no interfieren en la funcionalidad del entorno. El entorno virtual con todas sus texturas se muestra en la Figura 41.



Figura 41. Entorno virtual con texturas en cada objeto

El HMI se ha creado utilizando objetos UI (User Interface) que son objetos bidimensionales como botones, sliders, textos, etc. Se han creado 3 pantallas que contienen toda la información relevante del proceso como el nivel del tanque, el flujo en la tubería, alarmas, entre otros. También se crearon gráficas de tendencias para visualizar las variables de proceso y de control. Las pantallas con las que cuenta el HMI se muestran en la Figura 42.

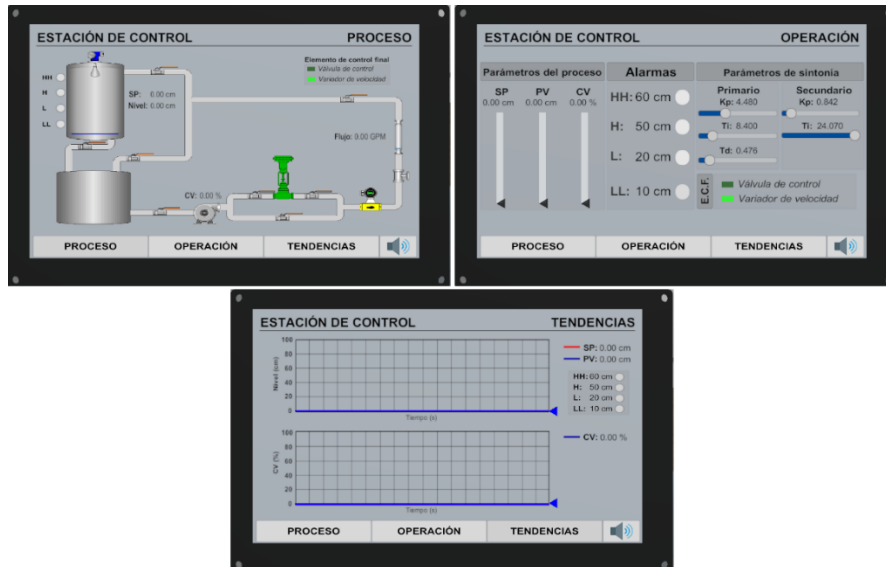


Figura 42. Pantallas del HMI virtual

El siguiente paso es crear un objeto que funcione como jugador en primera persona. Para esto se añade un objeto vacío el cual debe contar con un script¹ que permita su movimiento, además de contener al objeto “MainCamera” (objeto que contiene el componente Camera para visualización de modelos 3D y el componente AudioListener para escuchar sonidos en el entorno) que servirá como medio único de visualización. El objeto, con el nombre “Player”, que cuenta con estos atributos para poder desplazarse a través del entorno se muestra en la Figura 43.

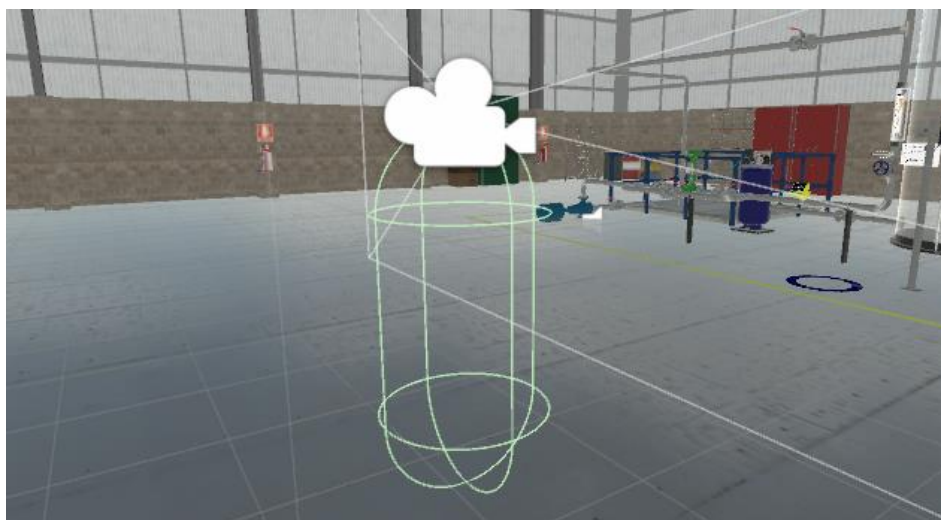


Figura 43. Objeto “Player” para el desplazamiento dentro del entorno

¹ Archivo con código de programación

3.2.3 Integración del dispositivo Leap Motion en Unity3D

Leap Motion es un dispositivo de reconocimiento y rastreo gestual, específicamente para las manos, que se conecta vía usb al computador. Este dispositivo permite la interacción del usuario con los componentes de un entorno virtual de una manera amigable y sencilla, omitiendo así el uso de controles o joysticks tradicionales para realidad virtual. El reconocimiento de las manos es óptimo al colocarlas a 10-20 cm del dispositivo, como se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Reconocimiento de manos con Leap Motion

Antes de poder utilizar el dispositivo se requiere de la instalación de la aplicación Orion Beta que se puede descargar desde la página oficial de Leap Motion. Este programa gestiona las características del dispositivo y su configuración. En la Figura 45 se muestra la aplicación.

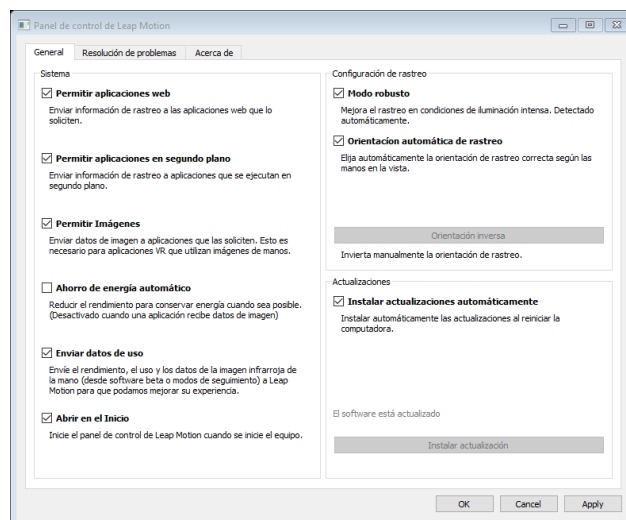


Figura 45. Aplicación Orion Beta de Leap Motion

Para utilizar el dispositivo en el editor de Unity3D se requiere de un paquete que contiene scripts, modelos 3D, etc, que servirán para ejecutar los servicios del dispositivo. El paquete puede ser descargado desde la web oficial de Leap Motion y puede importarse en Unity3D desde el menú Assets>Import Package>Custom Package como se indica en la Figura 46. Se localiza el paquete a importar y este será añadido al proyecto.

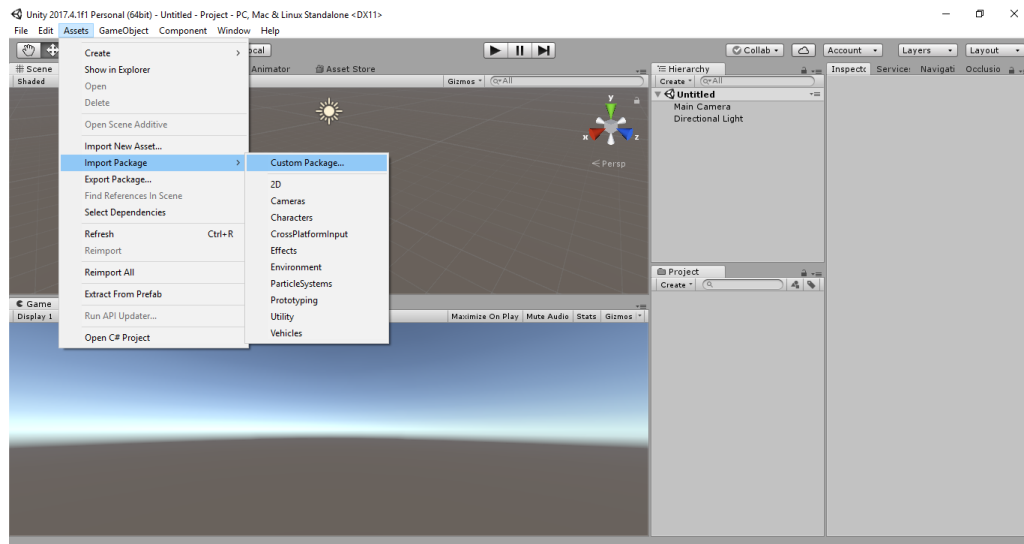


Figura 46. Importación de paquetes en Unity3D

El Leap Motion es usado para la navegación a través de las diferentes pantallas del HMI, selección del set-point y otras tareas que serán detalladas en subsecciones posteriores, para lo cual es necesario haber ubicado el controlador de Leap Motion (LeapHandsController) y los modelos de las manos virtuales (HandsModels), disponibles en el paquete importado anteriormente, como parte del objeto "MainCamera" que se encuentra en el objeto "Player". Además, haciendo uso de los scripts del paquete de Leap Motion, se implementa el movimiento del usuario en el entorno a través de gestos con las manos. Los scripts utilizados son: Extended Finger Detector y Finger Direction Detector. Estos scripts requieren de una configuración muy básica e intuitiva, además de un script que determine las acciones que tendrán lugar cuando se cumplan las condiciones definidas anteriormente. Los parámetros de configuración de los scripts mencionados anteriormente se muestran en la Figura 47.

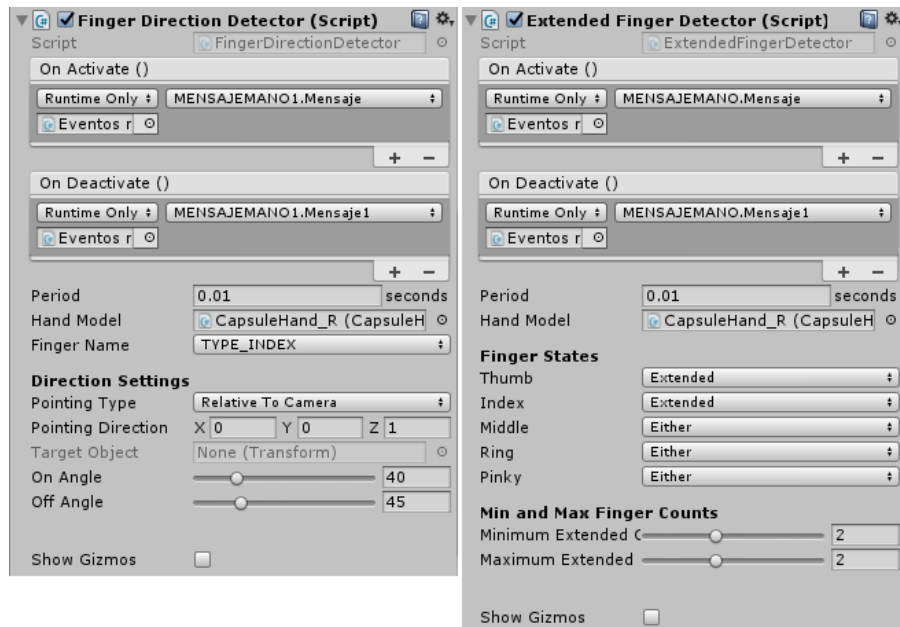


Figura 47. Parámetros de configuración de los scripts utilizados para el movimiento del jugador

Estos scripts se han utilizado convenientemente para el desplazamiento del jugador en primera persona “Player” hacia adelante y hacia atrás a través de dos gestos con referencia a la cámara, mismos que se muestran en la Figuras 48 y 49.

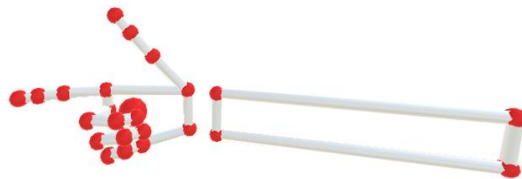


Figura 48. Gesto para movimiento del jugador hacia adelante



Figura 49. Gesto para movimiento del jugador hacia atrás

3.2.4 Integración del dispositivo Oculus Rift en Unity3D

Oculus Rift es un dispositivo para realidad virtual capaz de proveer una alta inmersión en entornos virtuales. Este reconoce los movimientos de la cabeza del usuario para cambiar su punto de vista dentro del ambiente virtual, lo cual brinda una sensación de presencia en dicho ambiente. El dispositivo Oculus Rift se muestra en la Figura 50.



Figura 50. Oculus Rift

Para poder utilizar Oculus Rift es necesario descargar e instalar la aplicación para la gestión y configuración del dispositivo desde su web oficial. Dicha aplicación se muestra en la Figura 51.

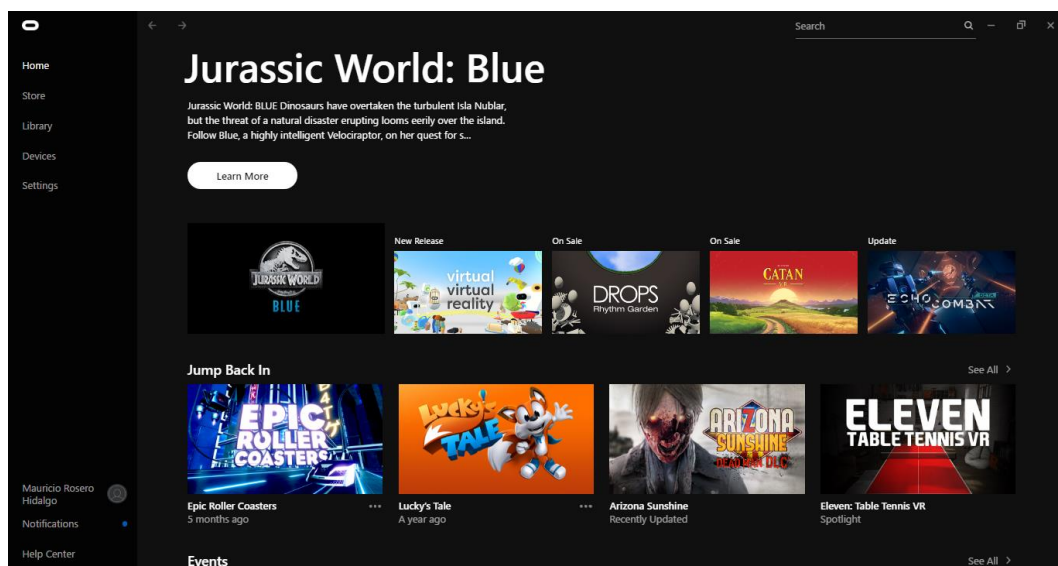


Figura 51. Aplicación Oculus Rift

Para poder utilizar Oculus Rift en Unity3D se debe habilitar la opción “Unknown Sources” en el menú Settings>General como se muestra en la Figura 52. Al habilitar esta opción Oculus Rift puede empezar a funcionar en aplicaciones externas.

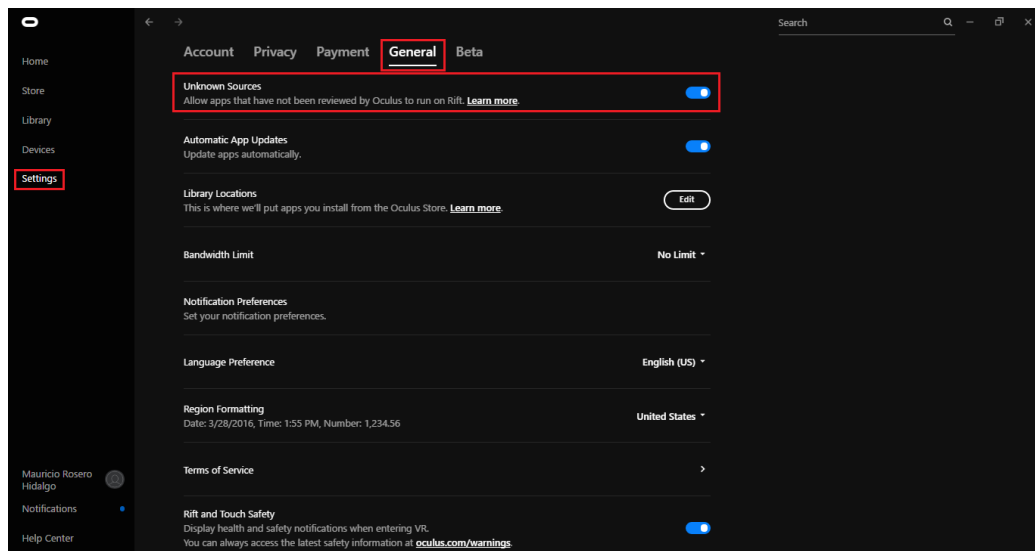


Figura 52. Habilitación de Oculus Rift para utilizarlo en aplicaciones externas

Unity3D, a partir de su versión 5.1, integra a Oculus Rift de forma nativa, es decir, no necesita de paquetes adicionales. El soporte para realidad virtual y Oculus Rift se habilita desde el menú Edit>Project Settings>Player, como se muestra en la Figura 53.

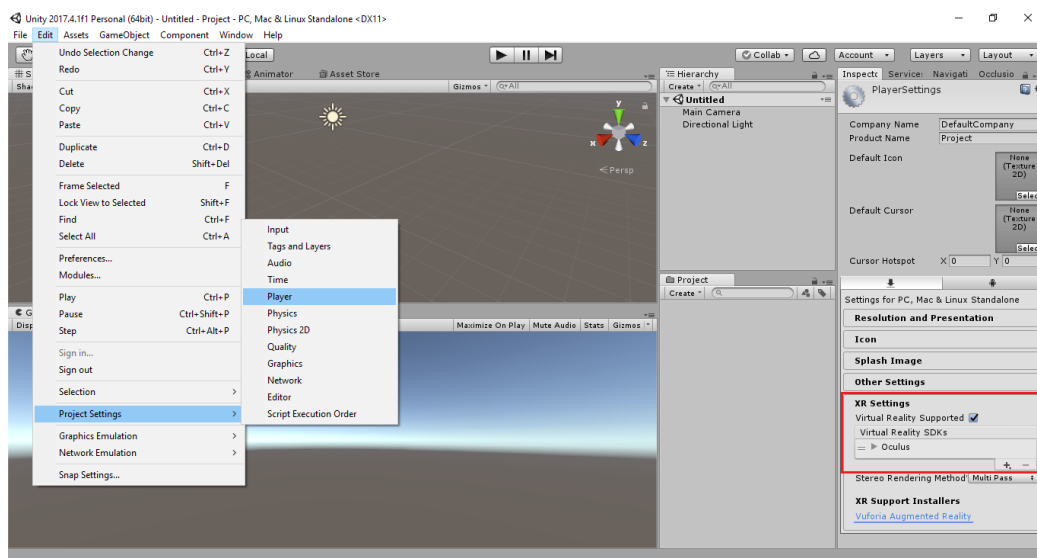


Figura 53. Activación del soporte para realidad virtual en Unity3D

La orientación del usuario dentro del entorno estará determinada por la rotación del objeto “MainCamera”, mismo que rota según la orientación de Oculus Rift, una vez habilitado el soporte para realidad virtual. Con esto y la programación desarrollada con el Leap Motion para el movimiento, el usuario puede desplazarse libremente a través del entorno virtual en su totalidad.

3.2.5 Desarrollo de la comunicación entre Unity3D y Labview

El intercambio de datos entre Unity3D y Labview ha sido implementado haciendo uso del protocolo de comunicación TCP/IP con una arquitectura cliente-servidor, donde Unity3D actuará como servidor y Labview como cliente. Este método de comunicación utiliza varias capas del modelo OSI, como se muestra en la Figura 54, y permite un envío-recepción de datos fiable y en tiempo real a través de códigos que han sido optimizados para un mejor rendimiento del sistema.

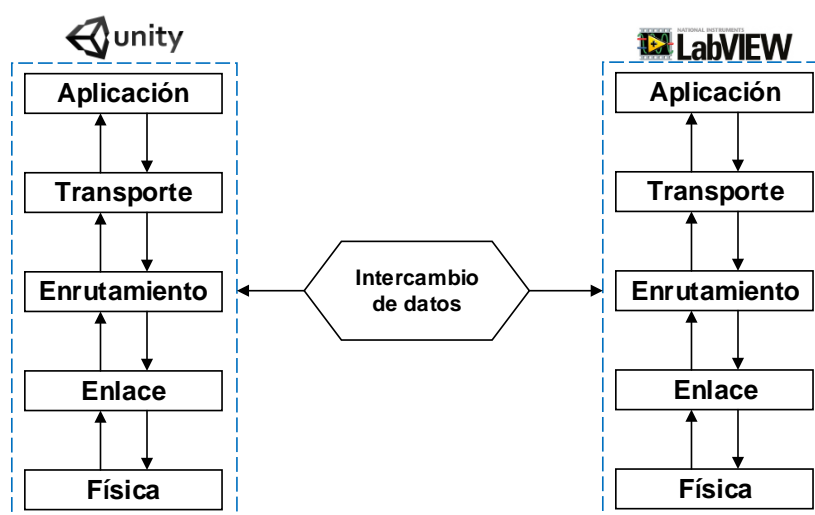


Figura 54. Intercambio de datos entre aplicaciones a través del protocolo TCP/IP

El flujo de datos es constante cuando el cliente se ha conectado al servidor, además la conexión puede hacerse en el mismo ordenador o a través de una red de área local (LAN). Los datos se envían constantemente en una sola trama en formato string² separados por un caracter alfanumérico, misma

² Formato de datos tipo texto o cadena de caracteres

que puede ser separada en la recepción en todos los datos antes concatenados haciendo uso del caracter de separación, para luego convertir dichos datos en números reales nuevamente. Este proceso se describe en la Figura 55.

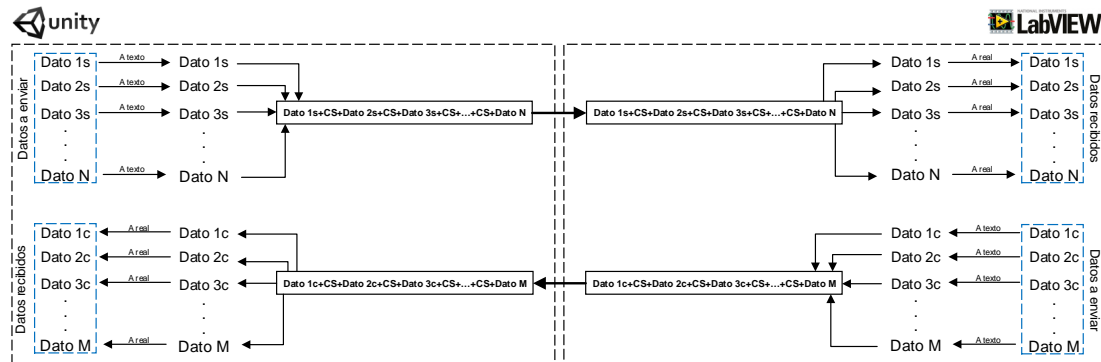


Figura 55. Formato de envío y recepción de datos

Los datos enviados desde Unity3D hacia Labview son: set-point, constantes de sintonía de los controladores PID y porcentaje de perturbación (en modo simulación); los datos enviados desde Labview hacia Unity3D son: nivel del tanque, flujo en la tubería de entrada al tanque, variable de control, niveles de alarmas, indicador de modo (simulación o estación de control) e indicador de elemento de control final utilizado (variador de frecuencia o válvula de control).

Los datos recibidos en Unity3D son colocados coherentemente en el HMI virtual implementado y utilizados para programar las animaciones de ciertos componentes de la planta.

3.2.6 Animación de los componentes de la planta

Se han agregado animaciones a las válvulas manuales, rotámetro y al tanque para obtener un mayor realismo e inmersión para el usuario. Las válvulas manuales que conforman el bypass de la válvula de control se abren o cierran según el elemento de control final utilizado. Esto se da lugar a través de un dato booleano recibido desde Labview, como se muestra en la Figuras 56 y 57.

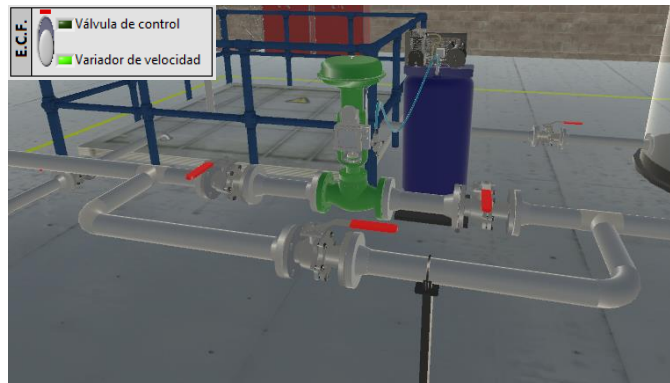


Figura 56. Animación de válvulas manuales para el variador de velocidad como E.C.F.

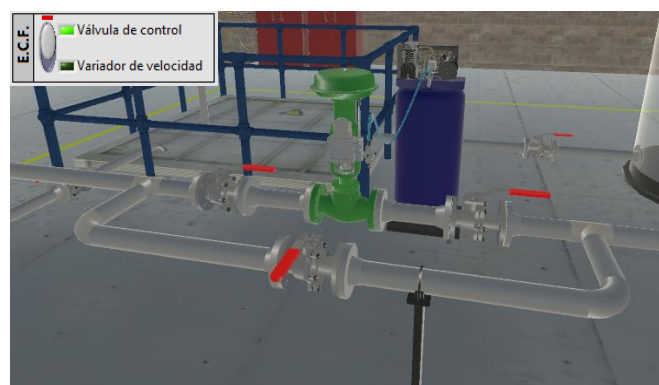


Figura 57. Animación de válvulas manuales para la válvula de control como E.C.F.

El flotador del rotámetro ha sido animado para indicar la medición de flujo en un rango de 0 a 100 LPM. Para esto se ha escalado el dato recibido de caudal desde Labview según los límites del eje del rotámetro virtual, como se indica en la Figura 58.

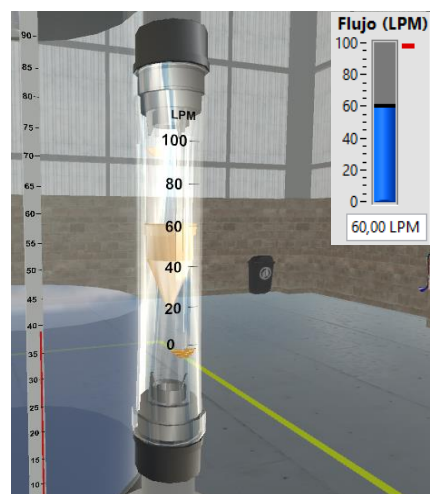


Figura 58. Animación del flotador del rotámetro virtual

Finalmente, se ha añadido un efecto para el llenado del tanque junto a un indicador externo. El llenado del tanque se realiza acorde al dato de nivel recibido desde Labview tal como se indica en la Figura 59.

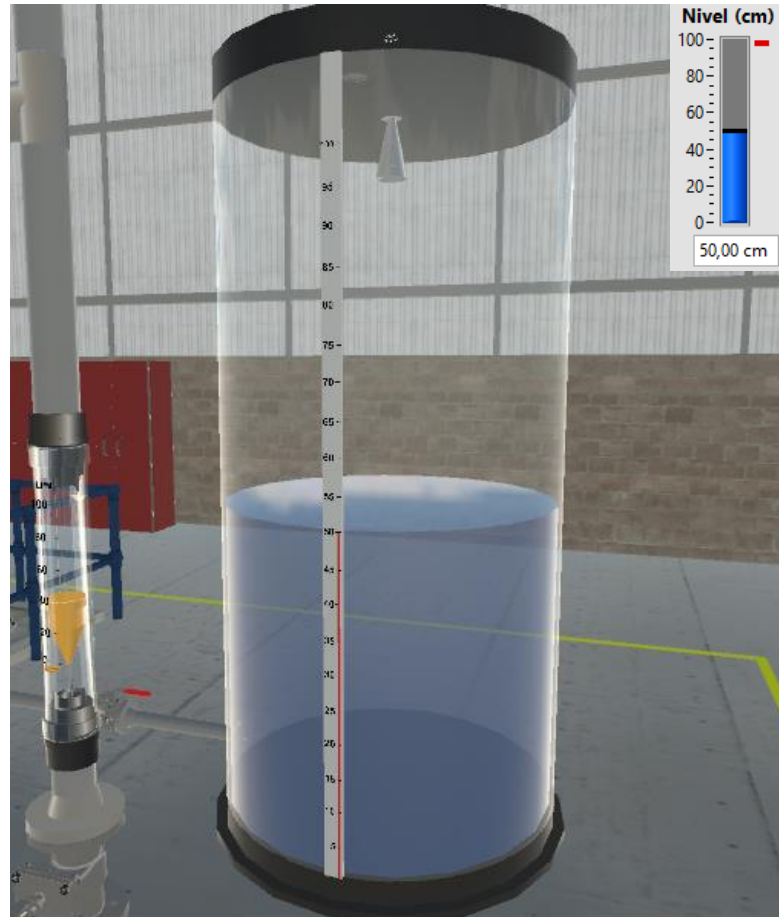
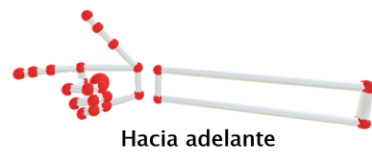


Figura 59. Animación para llenado del tanque

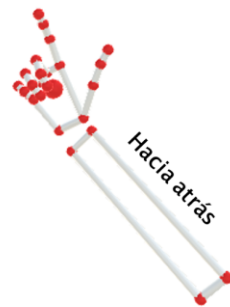
3.2.7 Características interactivas adicionales

Se han añadido características interactivas adicionales que mejoran la experiencia del usuario y contribuyen a facilitar el proceso de aprendizaje. Una de las características añadidas es el reconocimiento de voz para visualizar el diagrama P&ID del proceso, una ventana de instrucciones, etiquetas para cada componente del sistema y el transmisor de nivel frente al usuario. En la Figura 60 se muestra la pantalla de instrucciones que aparece al pronunciar la palabra “ayuda”.

Utiliza tu mano derecha para desplazarte

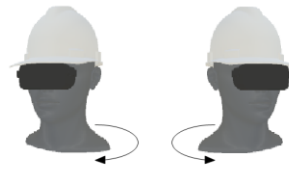


Hacia adelante



Hacia atrás

Tu orientación depende de las gafas de realidad virtual



Los comandos de voz proporcionan información importante:

- **DIAGRAMA**: P&ID de la planta
- **NIVEL**: Transmisor de nivel
- **AYUDA**: Instrucciones generales
- **ETIQUETAS**: Etiquetas de instrumentos
- **SALIR**: Cierra esta ventana



Figura 60. Ventana de instrucciones generales

Se implementó también una pantalla informativa que muestra el P&ID del sistema con información adicional y el diagrama de bloques del sistema de control en cascada. Para navegar en esta pantalla se utilizan gestos implementados para el Leap Motion utilizando la técnica descrita en la subsección 3.2.3. En la Figura 61 se muestra dicha pantalla.

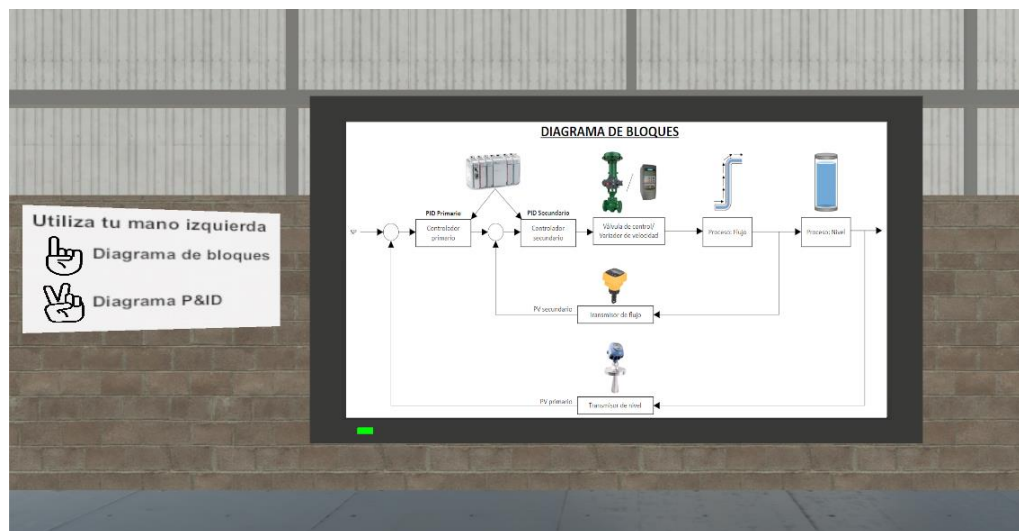


Figura 61. Pantalla informativa

Además, en el modo simulación es posible la manipulación de una válvula de carga, permitiendo el paso, en mayor o menor proporción, del flujo entrante en el tanque. En la Figura 62 se muestra la válvula de carga para el modo simulación.



Figura 62. Válvula de carga para el modo simulación

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar el funcionamiento del sistema, primero se presentan los resultados obtenidos al aplicar la estrategia de control en cascada en la estación de control ND-0704, para luego demostrar el funcionamiento del sistema didáctico completo.

4.1 Características de la respuesta del sistema sometido al control en cascada

Para validar el sistema de control implementado se realizaron pruebas del con diferentes métodos de sintonía, se aplicó una perturbación al proceso en funcionamiento para verificar lo mencionado teóricamente. Los resultados se muestran a continuación.

4.1.1 Métodos de sintonía utilizados

Las curvas mostradas en la Figura 63 son las respuestas del control en cascada sometido a diferentes métodos de sintonía, estas fueron obtenidas bajo las mismas condiciones de funcionamiento y punto de consigna.

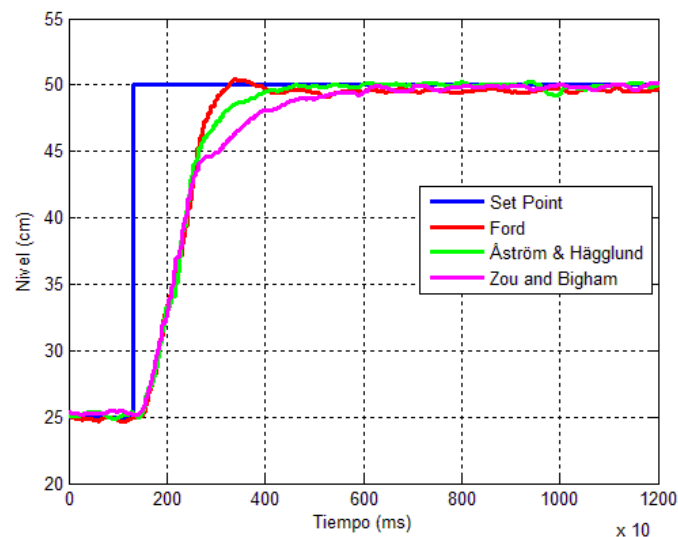


Figura 63. Respuesta del control en cascada

En Tabla 4 se muestra el análisis de los resultados del control en cascada, el parámetro IAE (Integral del Error Absoluto) no varía mucho entre los diferentes métodos de sintonía se observa claramente que la sintonización realizada por el método de Åström & Hägglund no presenta sobre impulso, su tiempo de establecimiento es mucho menor que los otros métodos al igual que el parámetro IAE.

Tabla 4

Análisis de resultados para control en cascada

Método	% OS	Tiempo de establecimiento	IAE
Ford	0,82%	48.4 s	6239,446
Åström & Hägglund	0%	34.9 s	5994,432
Zou and Bigham	0%	66.9 s	6423,287

4.1.2 Aplicación de perturbaciones al sistema

Una de las principales características del método de control en cascada es la rapidez con la que actúa ante efectos causados por perturbaciones. Las gráficas mostradas a continuación muestran los resultados obtenidos al introducir perturbaciones al sistema sintonizado con diferentes métodos.

a) Método de Ford

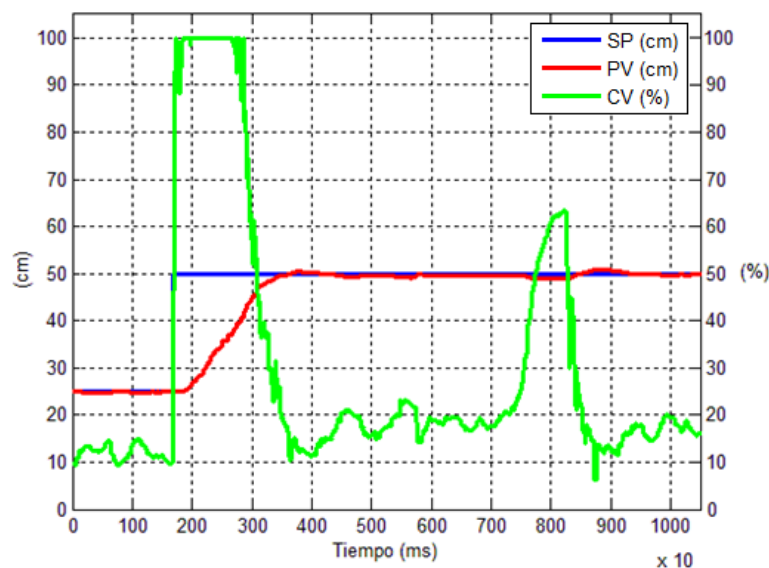


Figura 64. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Ford)

b) Método Åström & Hägglund

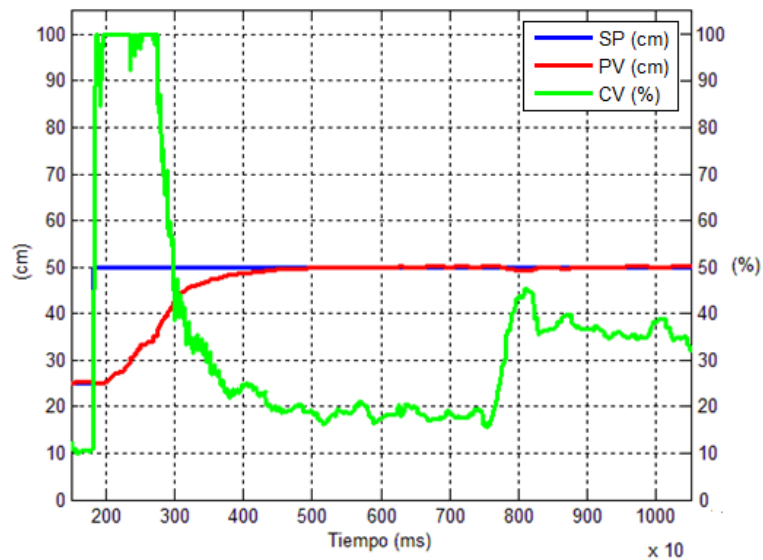


Figura 65. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Åström & Hägglund)

c) Método Zou and Bigham

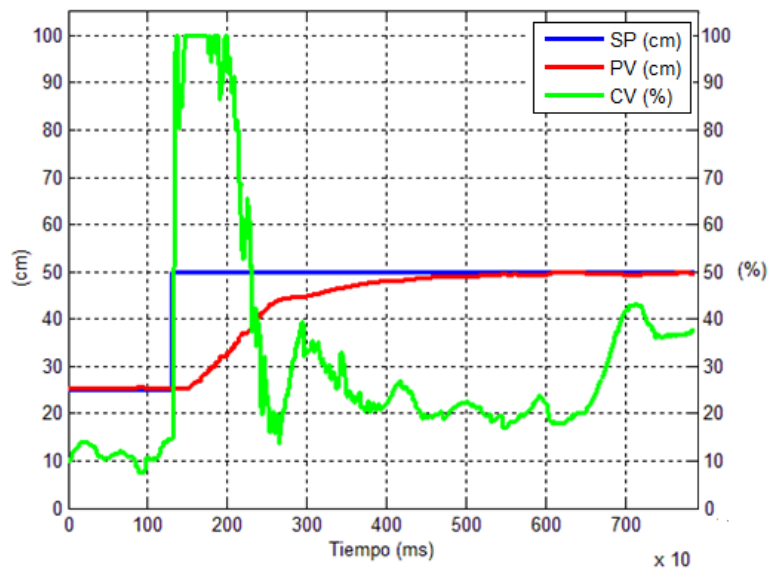


Figura 66. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Zou and Bigham)

Las Figuras 64, 65 y 66 muestran como al aplicarse una perturbación existe una rápida acción de control evitando que la variable primaria varíe en gran medida con respecto al punto de consigna demostrando.

4.1.3 Respuesta del sistema utilizando una válvula de control

Como se mencionó con anterioridad el control con válvula se sintonizó experimentalmente, la Figura 67 muestra la comparación del control con variador de frecuencia sintonizado matemáticamente por el método de Åström & Hägglund y la sintonización experimental del control con válvula. La gráfica muestra que el control con válvula presenta un sobre impulso lo que no sucede al momento de realizar el control con variador de velocidad.

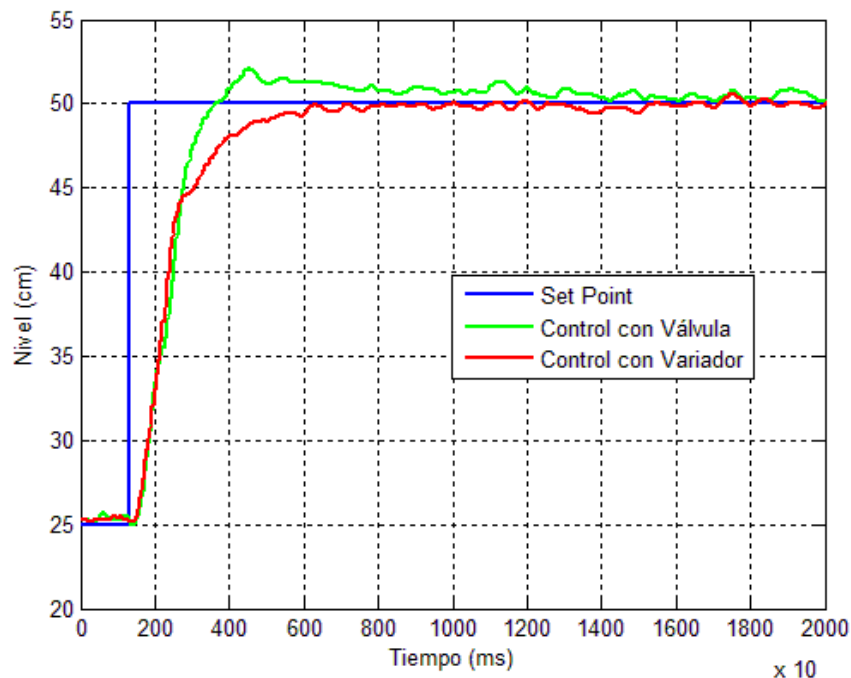


Figura 67. Control con variador vs Control con válvula

4.2 Comparación con el método de control clásico de lazo único

Para realizar esta comparación se obtuvo el modelo matemático del proceso sin que haya un control en la variable secundaria y así poder sintonizar el proceso de una forma analítica con los métodos que se utilizaron para la sintonía del control en cascada y comparar su respuesta. Los resultados se muestran a continuación.

a) Método de Ford

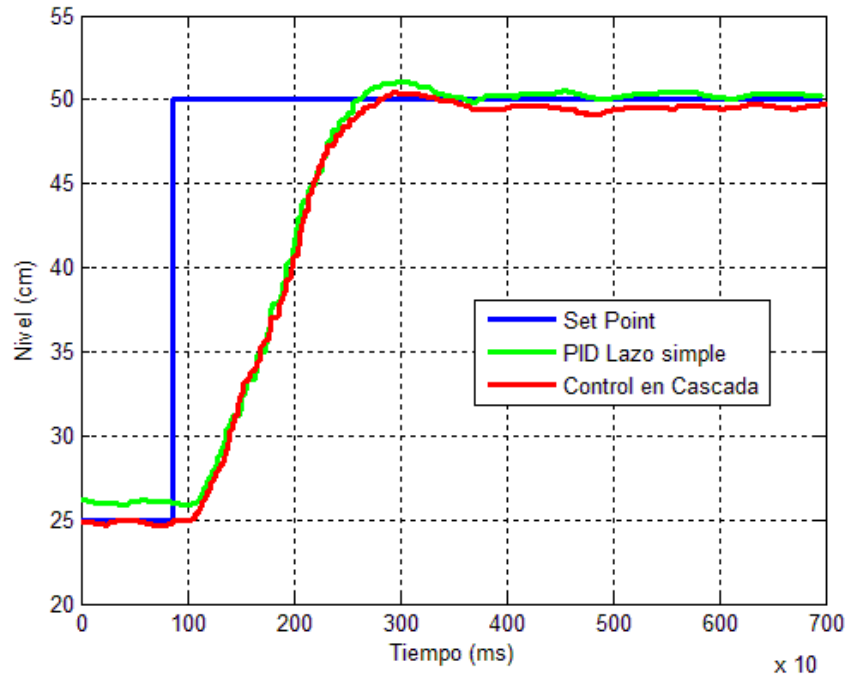


Figura 68. PID lazo simple vs Control en cascada (Ford)

En la Tabla 5 se observa que con este método de sintonía tanto el control en cascada como el PID de lazo simple tienen un porcentaje de sobreimpulso y sus tiempos de establecimiento son cercanos.

Tabla 5

Análisis de resultados PID vs Control en cascada (Método de sintonía de Ford)

Método	% OS	Tiempo de establecimiento	IAE
Control en cascada	0,82%	48.4 s	6239,446
PID Lazo Simple	2.14%	40.8s	4535,244

b) Método Åström & Hägglund

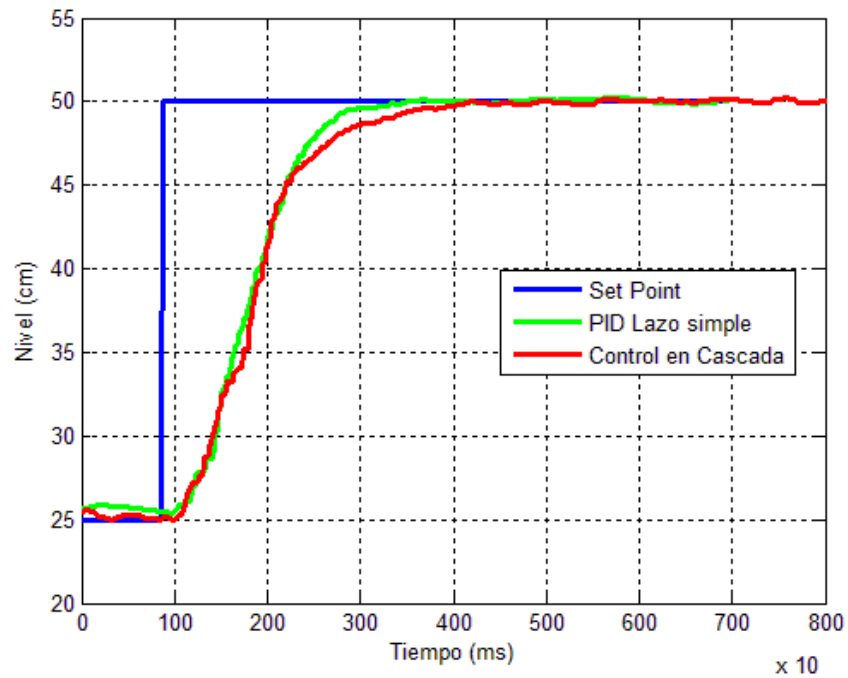


Figura 69. PID lazo simple vs Control en cascada (Åström & Hägglund)

En la Tabla 6 se observa que con este método de sintonía tanto el control en cascada como el PID de lazo simple no tienen porcentaje de sobre impulso y sus tiempos de establecimiento son cercanos y más cortos que los otros métodos analizados.

Tabla 6

Análisis de resultados PID vs Control en cascada (Método de sintonía de Åström & Hägglund)

Control	% OS	Tiempo de establecimiento	IAE
Control en cascada	0%	34.9 s	5994,432
PID Lazo Simple	0%	31.3 s	4469,426

c) Método Zou and Bigham

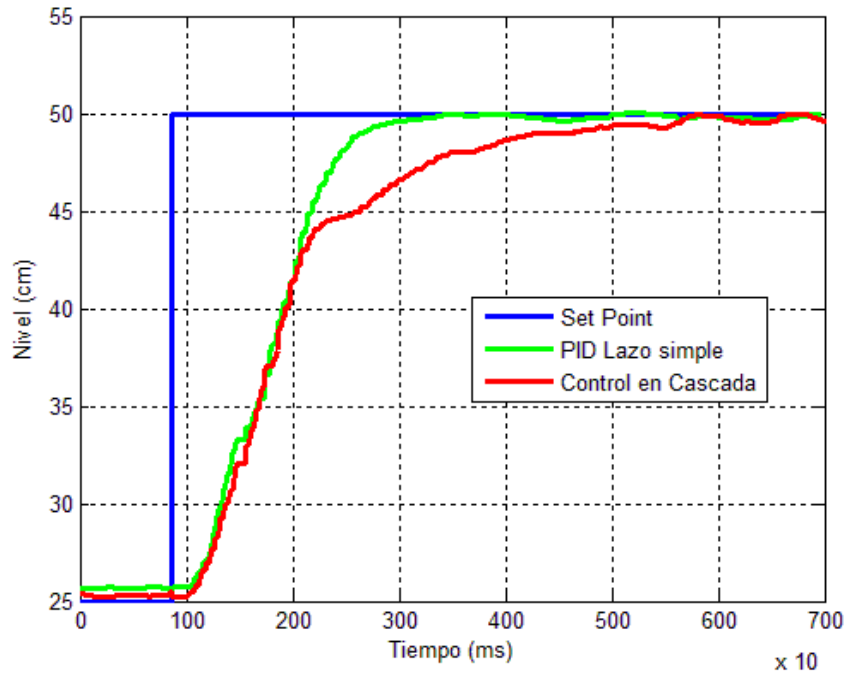


Figura 70. PID lazo simple vs Control en cascada (Zou and Bigham)

En la Tabla 7 se observa que con este método de sintonía tanto el control en cascada como el PID de lazo simple no tienen porcentaje de sobre impulso y sus tiempos de establecimiento varían en un cierto porcentaje, este método es el más lento comparado con los analizados anteriormente ya sea en el caso del control en cascada o en el PID de lazo simple.

Tabla 7

Análisis de resultados PID vs Control en cascada (Método de sintonía de Zou and Bigham)

Control	% OS	Tiempo de establecimiento	IAE
Control en cascada	0%	66.9 s	6423,187
PID Lazo Simple	0%	49.7 s	4469,426

Las Figuras 68, 69 y 70 muestran que el control clásico es más rápido al momento de llegar al punto de consigna, pero la principal diferencia entre el control clásico y el control en cascada se nota al momento de aplicar perturbaciones al sistema, se aplicó la misma perturbación del control en cascada al control clásico y se obtuvo los resultados mostrados a continuación.

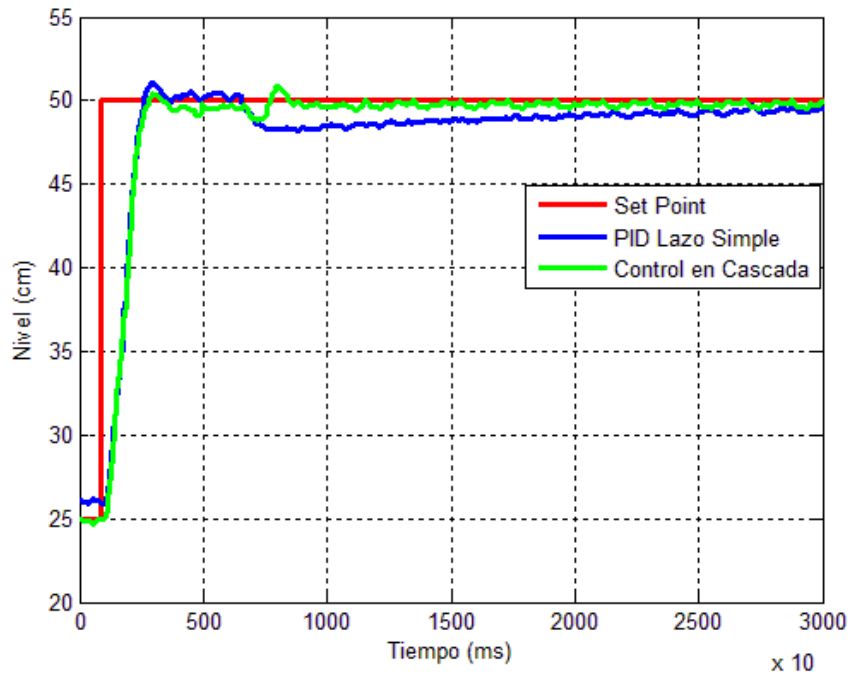


Figura 71. Respuesta ante perturbaciones: PID Lazo simple vs Control en Cascada (Ford)

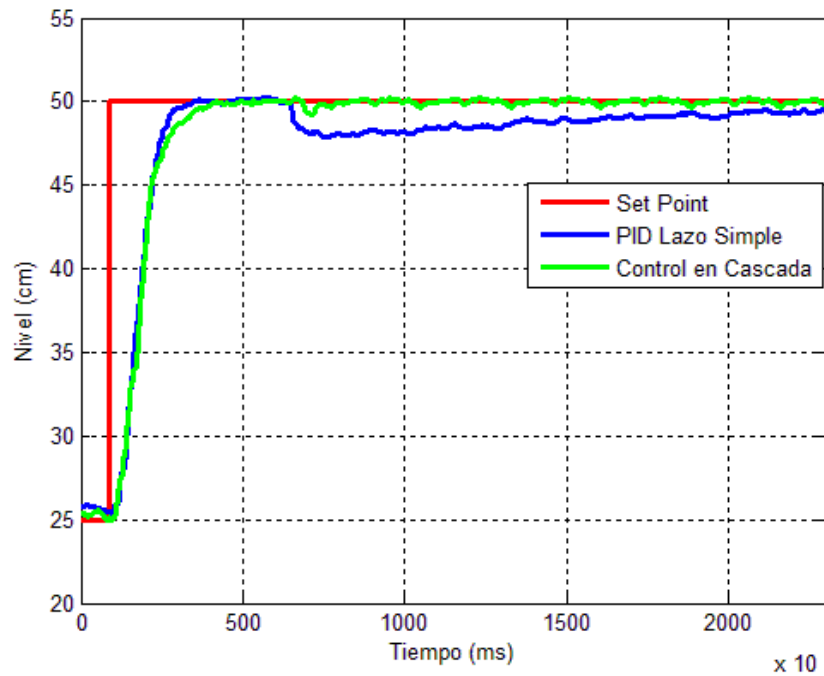


Figura 72. Respuesta ante perturbaciones: PID Lazo simple vs Control en Cascada (Åström & Hägglund)

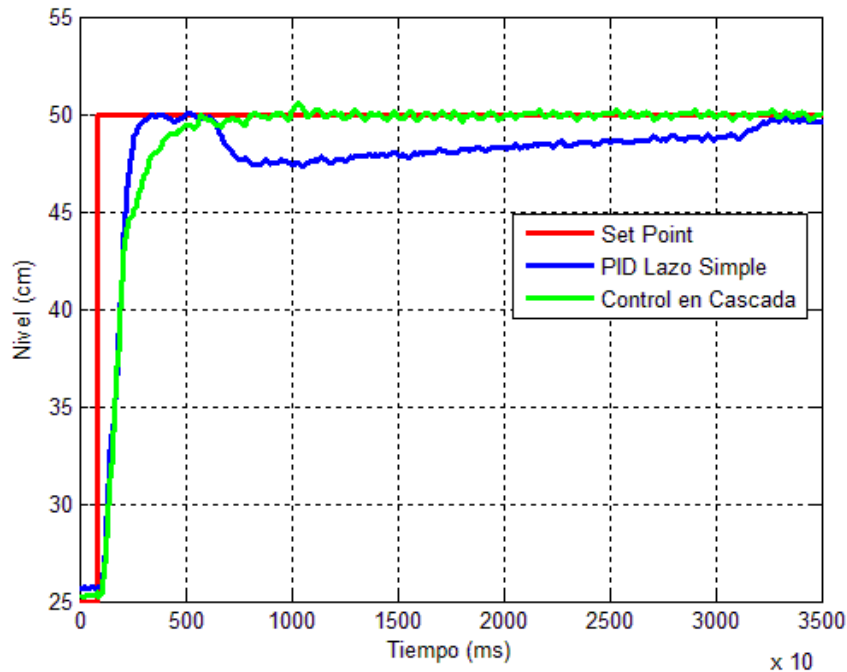


Figura 73. Respuesta ante perturbaciones: PID Lazo simple vs Control en Cascada (Zou and Bigham)

Los resultados mostrados en las Figuras 71, 72 y 73 indican que al momento de perturbar el sistema con un lazo simple de control hay un cambio notorio en la variable principal produciendo un error entre el punto de consigna y la variable medida, la velocidad de corrección de este error es lenta comparada con la respuesta del control en cascada y se puede notar la gran ventaja que se obtiene de esta estrategia de control.

4.3 Parámetros del proceso en el entorno virtual

El entorno virtual emula el funcionamiento de una planta industrial de control de nivel de un tanque. Los datos del sistema son adquiridos desde Labview. En Labview se ha desarrollado un HMI para el monitoreo y control en cascada en la estación de control ND-0704 y una simulación de un sistema de control en cascada para diversificar el proceso de aprendizaje.

El HMI desarrollado para el monitoreo y control en cascada de la estación de control obtiene los datos desde el PLC a través de un OPC (OLE for Process Control) y contiene un bloque de programación destinado a la comunicación con Unity3D por medio del protocolo TCP/IP. Luego, se ha

desarrollado una simulación utilizando el VI³ System Plant.vi del inventario de aplicaciones precargadas de Labview, que simula el comportamiento de una planta según sus parámetros de entrada. A esta planta se ha aplicado un control en cascada simulado a través del toolkit⁴ Control and Simulation Design. El HMI de la simulación es similar al utilizado para la estación de control.

En la Figura 74 se muestran las variables del proceso representadas en sus respectivos transmisores virtuales y las pantallas del HMI con los datos en un instante de tiempo para un set-point de 50 cm y con la válvula de control como elemento de control final.

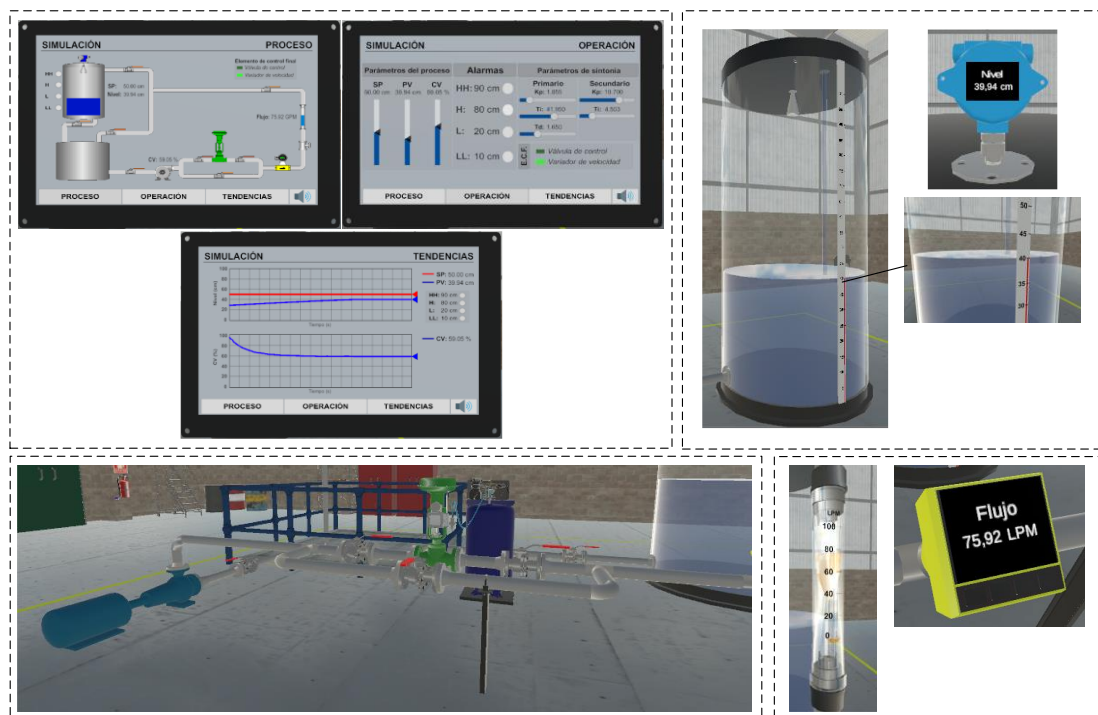


Figura 74. Datos del proceso en el entorno virtual

Los datos corresponden de manera coherente en el HMI, los indicadores y transmisores en tiempo real, con lo cual se obtiene un entorno de entrenamiento con una gran usabilidad y eficiencia.

³ Virtual Instrument. Extensión de las aplicaciones desarrolladas en Labview.

⁴ Conjunto de herramientas de programación.

4.4 Comprobación de la hipótesis

La hipótesis planteada ha sido comprobada con una encuesta realizada a los estudiantes del noveno nivel de la carrera de Electrónica e Instrumentación en el periodo Abril - Agosto 2018. Los estudiantes han utilizado el sistema haciendo de uso de todas sus características y han respondido a las preguntas planteadas en la encuesta. Los resultados de la encuesta demuestran que existe un 100% de aceptación como se muestra en las Figuras 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81.

1. ¿El sistema de entrenamiento resulta fácil de usar?



Figura 75. Resultado Pregunta 1

2. ¿El entorno virtual es intuitivo y amigable con el usuario?

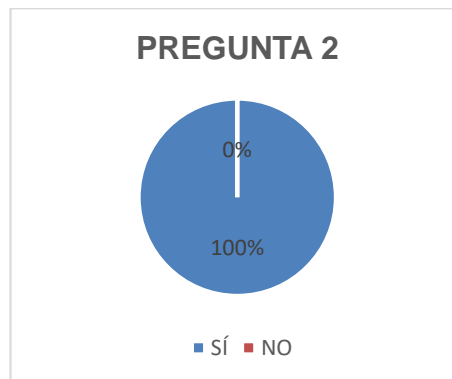


Figura 76. Resultado Pregunta 2

3. ¿La experiencia inmersiva en el entorno virtual ha sido satisfactoria?

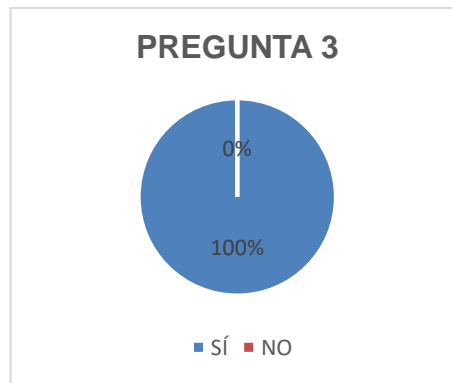


Figura 77. Resultado Pregunta 3

4. ¿El sistema permite el acercamiento al control de un proceso industrial de una manera realista?

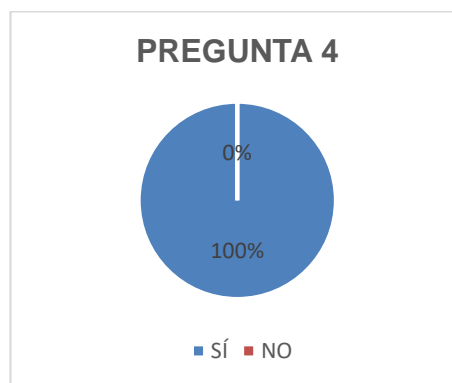


Figura 78. Resultado Pregunta 4

5. ¿El sistema aporta al aprendizaje del control de procesos de forma general?

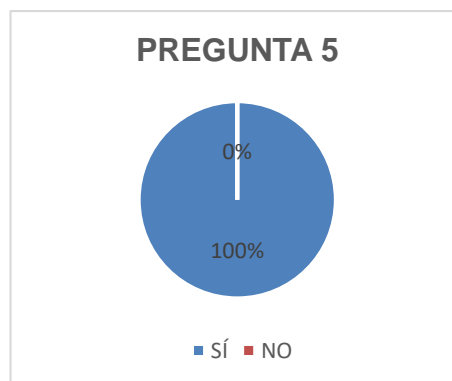


Figura 79. Resultado Pregunta 5

6. ¿El sistema le ha proporcionado conocimientos sobre el control en cascada?

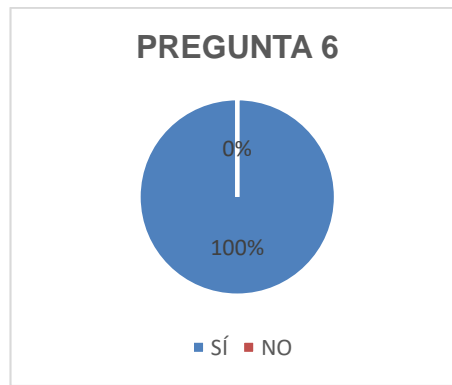


Figura 80. Resultado Pregunta 6

7. ¿Es capaz de diferenciar las etapas que componen una estructura de control en cascada?

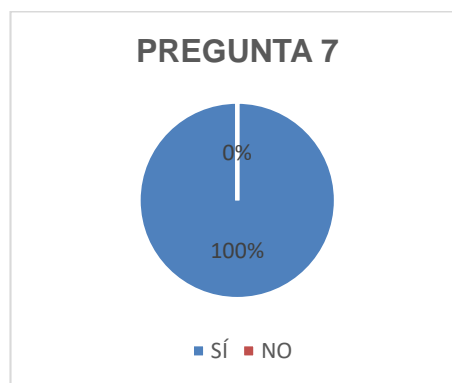


Figura 81. Resultado Pregunta 7

4.5 Alcances

- El sistema de control en cascada implementado es susceptible de experimentaciones en su sintonía según los requerimientos del usuario y deja ver las ventajas que tiene sobre un control clásico.
- El sistema de control puede hacer uso de dos elementos de control final diferentes: variador de frecuencia o válvula de control.
- El sistema didáctico permite el monitoreo y control de la estación de regulación de nivel desde el entorno virtual implementado, es decir, permite visualizar las variables relevantes del proceso y el cambio en la consigna y constantes de sintonía.
- El sistema didáctico permite también una simulación que no requiere de una estación de control y permite al usuario un acercamiento al

control de procesos industriales, además de un aprendizaje en este tema, esencialmente en el control en cascada.

- El sistema permite que el monitoreo y control del proceso pueda hacerse desde el entorno virtual o desde el HMI desarrollado en Labview sin ser estos excluyentes, es decir, mientras el usuario se encuentra haciendo uso del entorno virtual, otro operador puede monitorear el proceso en Labview, característica que provee el método de comunicación utilizado para interconectar Labview y Unity3D.
- Los datos del proceso se obtienen en tiempo real dentro del entorno virtual y no existe pérdida de información, lo cual aumenta la efectividad del sistema.

4.6 Limitaciones

- El sistema no permite la conexión de más de un usuario a la vez, dadas sus características actuales, por lo cual no es posible un trabajo cooperativo dentro del entorno virtual.
- El sistema requiere de un computador con una tarjeta de video dedicada para hacer uso de las gafas de realidad virtual y obtener un rendimiento óptimo de la aplicación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se desarrolló un sistema didáctico, utilizando la realidad virtual y dispositivos de inmersión e interacción, para el aprendizaje del control de procesos, tomando como base la implementación de una estrategia de control en cascada aplicada a una estación de entrenamiento para la regulación del nivel de un tanque.
- El sistema de control en cascada implementado tiene un funcionamiento óptimo y presenta un mejor desempeño que el control feedback clásico. Además, posee una respuesta anticipativa ante efectos causados por perturbaciones, particularidad dada por el lazo de control secundario anidado en su arquitectura, es decir, cuando se presenta una perturbación, la compensación se efectúa antes de que el efecto se presente en la variable de proceso primaria.
- El entorno virtual implementado provee una gran cantidad de información sobre el control de procesos ya que contiene equipos e instrumentos comunes en varias industrias. Esta característica se ve complementada con sonidos característicos de los equipos y alarmas sonoras que mejoran la experiencia del usuario.
- El HMI virtual implementado contiene todas las variables relevantes del proceso y las presenta de una forma clara y ordenada, además, la pantalla en la cual se presenta se asemeja a un touch-panel (panel táctil) común en la industria de procesos, lo cual contribuye al realismo de la aplicación.
- El entorno virtual brinda realismo y transparencia del proceso cuando el monitoreo y control es realizado desde el mismo, en forma local o remota, sin que la efectividad del control se vea afectada.

- La simulación del control en cascada implementada para el entorno virtual provee a los estudiantes un primer acercamiento a un sistema de control y permite un entrenamiento continuo y realista en ausencia de una estación didáctica.
- El sistema didáctico implementado permitirá un proceso de enseñanza-aprendizaje diversificado y eficiente en el control de procesos, ya que comprende varias temáticas concernientes a este ámbito de la carrera de Electrónica e Instrumentación. Además, la realidad virtual como medio educativo ha sido ampliamente extendida por su capacidad de generar un alto impacto en los estudiantes, con lo cual este sistema es idóneo para su uso en la educación de ingeniería, tal como lo indican los resultados de la encuesta descrita anteriormente.

5.2 Recomendaciones

- Para el control en cascada, la elección de la variable de proceso secundaria es primordial y debe hacerse a través de un análisis profundo de sus características tomando en cuenta que sobre ella se presenten efectos causados por perturbaciones importantes para el proceso, mismos que serán corregidos con la estrategia de control.
- Para un desempeño óptimo del sistema, es importante contar con un computador con una tarjeta de video dedicada (NVIDIA GTX970 o superior), de esta manera la experiencia del usuario es satisfactoria en cuanto a la realidad virtual se refiere.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acedo Sánchez, J. (2003). *Control avanzado de procesos (Teoría y práctica)*. Madrid (España): Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Andrades, F. (24 de Abril de 2013). *Leap Motion: la tecnología en los gestos*. Recuperado el: 05/07/2018. Obtenido de Diario Turing: https://www.eldiario.es/turing/Leap-Motion-interfaz-futurista_0_124937895.html
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid (España): Pearson Educación S. A.
- Bolton, W. (2006). *Programmable Logic Controllers*. Newnes.
- Cao, H., & Deng, N. (2016). Design of water tank level cascade control system based on siemens S7-200. *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*.
- Emerson. (Marzo de 2012). *Transmisor de nivel por radar sin contacto, de dos hilos y con las mejores prestaciones*. Recuperado el: 06/07/2018. Obtenido de Emerson: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0109-4026.pdf>
- Emerson. (Marzo de 2013). *Transmisor de nivel por radar sin contacto, de dos hilos y con las mejores prestaciones*. Recuperado el: 06/07/2018. Obtenido de Emerson: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00825-0109-4026.pdf>
- Emerson. (June de 2016). *Rosemount™ 5400 Level Transmitter*. Recuperado el: 09/07/2018. Obtenido de Emerson: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4026.pdf>
- Emerson. (Junio de 2016). *Rosemount™ 5400 Level Transmitter*. Recuperado el 09/07/2018. Obtenido de Emerson: <http://www.emerson.com/documents/automation/manual-rosemount-5400-level-transmitter-two-wire-non-contacting-radar-en-76170.pdf>

- EQUYSIS. (s.f.). *8550 Flow Transmitter*. Recuperado el: 09/07/2018.
 Obtenido de EQUYSIS: https://www.equysis.com/producto/8550-flow-transmitter_184
- Festo Didactic . (s.f.). *Cascade Control of a Level/Flow Process* . Reuperado el 09/07/2018. Obtenido de Festo Didactic :
http://www1.labvolt.com/publications/Exercises/86006-00_2-4.pdf
- Georg Fischer Piping Systems. (2012). *Signet 8550-1 Flow Transmitter*.
 Recuperado el: 10/07/2018. Obtenido de Georg Fischer Piping Systems:
http://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10005S/FR/fr/4942/download/document.html
- Kinoshita, T., & Yamamoto, T. (2016). Design of a Data-Oriented Cascade Control System. *IEEJ Transactions On Electronics, Information And Systems*, 703-709.
- Le, Q., Pedro, A., & Park, C. (2014). A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experiential Learning. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 487-506.
- Marlin, T. (1995). *Process control: Designing processes and control systems for dynamic performance* . Nueva York: McGraw-Hill.
- O'Dwyer, A. (2006). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Imperial College Press.
- Ogata, K. (2002). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Padhan, D., & Reddy, B. (2015). A new tuning rule of cascade control scheme for processes with time delay. *Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth*, 102-105.
- Pruna, E., Rosero, M., Pogo, R., Escobar, I., & Acosta, J. (2018). Didactic System for Process Control Learning: Case Study Flow Control. *Trends and Advances in Information Systems and Technologies* , 1397-1405.
- Raja, G., & Ali, A. (2015). Modified parallel cascade control structure for integrating processes. *International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*.

- Raja, G., & Ali, A. (2017). Series cascade control: An outline survey. *Indian Control Conference (ICC)*.
- Raposo, A., Santos, L., Soares, G., Wagner, E., Corseuil, & Gattass, M. (2009). Environ: Integrating VR and CAD in Engineering Projects. *IEEE Computer Graphics And Applications* 29, no. 6 , 91-95.
- Sánchez Vila, E., & Lama Penín, M. (2007). Monografía: Técnicas de la Inteligencia Artificial Aplicadas a la Educación. Inteligencia Artificial. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* , vol. 11, núm. 33, 7-12.
- SD Estudio Digital SAS. (02 de Septiembre de 2015). *Dispositivos para la realidad virtual que se pueden utilizar*. Reuperado el: 10/07/2018. Obtenido de SD Estudio Digital SAS: <https://www.sdestudioidigital.com/blog/dispositivos-para-la-realidad-virtual-vr>
- Smith, C., & Corripio, A. (1991). *Control Automático De Procesos Teoría Y Práctica*. México: Editorial Limusa.
- Solé, A. C. (2010). *Instrumentación Industrial*. México: Alfaomega.
- Unigarro Gutiérrez, M. A. (2004). *Educación Virtual: Encuentro formativo en el ciberespacio*. Bucaramanga (Colombia): Editorial UNAB.
- Unity3d. (2018). *El motor de creación de contenido líder en el mundo*. Obtenido de Unity3d: <https://unity3d.com/es/unity>
- Urretavizcaya, M. (2001). Monografía: Sistemas inteligentes en el ámbito de la educación. *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, vol. 5, núm. 12, 2-4.
- Zamojc, I. (Mayo de 2012). *Introduction to Unity3D*. Recuperado el: 10/07/2018. Obtenido de envatotuts+: <https://code.tutsplus.com/tutorials/introduction-to-unity3d--mobile-10752>

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA DE LA VARIABLE NIVEL PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS”** ha sido realizado por los señores, **MAURICIO GIOVANNY ROSERO HIDALGO Y RAI ALEXANDER POGO MORETA**, y el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

En la ciudad de Latacunga, a los 07 días del mes de agosto del 2018.

Ing. Edwin Pruna P.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Amparo Meythaler N.
DIRECTORA DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca C.
SECRETARIO ACADÉMICO