



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Diseño de un Sistema Virtual 3D de una estación de control de presión
enfocado a la sintonía de controladores PI-PID**

Guano Bermeo, Andrés Rodrigo

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnológica

Centro de estudios de Posgrado

Maestría en Electrónica y Automatización Mención Redes Industriales

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electrónica y
Automatización, Mención Redes Industriales

Ing. Escobar Anchaguano, Ivón Patricia Mgs.

09 de Diciembre del 2021



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE DEPARTAMENTO DE
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES
INDUSTRIALES**

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "**Diseño de un sistema virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID.**" fue realizado por el señor **Guano Bermeo, Andrés Rodrigo** el mismo que ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente,

Latacunga, 09 de diciembre de 2021.



Firmado digitalmente por:
**IVÓN PATRICIA
ESCOBAR
ANCHAGUANO**

Escobar Anchaguano, Ivón Patricia

C.C.: 0502878135

DIRECTORA



Document Information

Analyzed document	Revisión Titulación v2,1 Andres Guano.pdf (D121772828)
Submitted	2021-12-09 T16:41:00.0000000
Submitted by	
Submitter email	luigi.freire@utc.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	luigi.freire.utc@analysis.arkund.com

Sources included in the report

Proyecto de titulación Liliana Cayo y Andrés Pilicita.pdf

Document Proyecto de titulación Liliana Cayo y Andrés Pilicita.pdf (D97660950) 2

URL: <https://www.cursosaula21.com/que-es-ethernet-industrial/>

Fetched: 2021-12-09T16:51:00.0000000 4

URL: <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-instrumentacion-industrial/>

Fetched: 2021-12-09T16:52:00.0000000 2

TesisPadillaPalomo.docx

Document TesisPadillaPalomo.docx (D98664670) 1

URL: <http://prod77ms.itesm.mx/podcast/EDTM/ID295.pdf>

Fetched: 2021-12-09T16:52:00.0000000 1

URL: <https://www.emerson.com/es-es/automation/valves-actuators-regulators/controllersinstruments/transducers>

Fetches: 2021-12-09T16:52:00.0000000	2
URL: https://www.wonderware.es/hmi-scada/que-es-hmi/	
Fetches: 2021-12-09T16:52:00.0000000	1
URL: https://www.lucidchart.com/pages/es/que-son-los-diagramas-de-tuberias-e-instrumentacion	
Fetches: 2021-12-09T16:52:00.0000000	1
URL: https://www.coursehero.com/file/42643065/MATH-345-Elementary-Differential-Equations-S64Q01bpdf/	
Fetches: 2020-11-05T01:27:02.5570000	1
URL: https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/metodo	
Fetches: 2021-12-09T16:51:00.0000000	2
Proyecto de investigación - Mauricio Rosero, Rai Pogo.pdf	
Document Proyecto de investigación - Mauricio Rosero, Rai Pogo.pdf (D40606124)	2
Proyecto de titulación Silvia Alpúsig.pdf	
Document Proyecto de titulación Silvia Alpúsig.pdf (D110292478)	1

Firma:



Escobar Anchaguano, Ivón Patricia

C.C.: 0502878135

DIRECTORA



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE DEPARTAMENTO DE
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES
INDUSTRIALES

Responsabilidad de Autoría

Yo **Guano Bermeo, Andrés Rodrigo**, con cédula de ciudadanía n° 050362398-5, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño de un sistema virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 09 de diciembre de 2021

Guano Bermeo, Andrés Rodrigo

C.C.: 0503623985



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE DEPARTAMENTO DE
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES
INDUSTRIALES

Autorización de Publicación

Yo **Guano Bermeo, Andrés Rodrigo** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño de un sistema virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 09 de diciembre de 2021

Guano Bermeo, Andrés Rodrigo

C.C.: 0503623985

Dedicatoria

“Lucha por tus sueños y nunca te olvides de tus seres queridos, yo estaré siempre aquí para ti apoyándote”

Manuel R. Guano

El presente trabajo de titulación está dedicado a la memoria del Señor Manuel Rodrigo Guano Vargas, mi padre quien fue el pilar fundamental en mi formación, quien con su ejemplo y trabajo me motivo a iniciar la Maestría y pese a no estar presente ahora junto a sus seres queridos siguió siendo la inspiración para no desmayar y poder culminar esta etapa más en mi formación académica.

Siempre estuvo pendiente de los avances de mi trabajo de titulación y talvez no pudo ver este logro en mi vida y, pero sé que estaría muy orgulloso de mi, gracias a tu apoyo incondicional eh logrado muchas metas y sueños, todo te la debo a ti y mi madre, hasta pronto querido Padre.

Andrés R. Guano B.

Agradecimiento

“Siempre hay que encontrar el tiempo para agradecer a las personas que hacen una diferencia en nuestras vidas”

John F. Kennedy

Quiero agradecer a toda mi familia por estar siempre presente apoyándome en todas las etapas de mi vida, a esas tres mujeres importantes en mi vida mi esposa Natali Pallo, mi madre Sonia Bermeo y mi hermana Ivonne Guano, en especial a mi esposa quien no me dejó caer pese a la difícil situación que vivimos y siempre tuvo una palabra de aliento para culminar este trabajo de titulación, gracias por soportarme las malas noches, el mal genio y la frustración de no terminar pronto

Un agradecimiento especial a mis mentores Ing. Edwin Pruna e Ing. Ivón Escobar quienes creyeron en mi para realizar el trabajo de titulación y tuvieron mucha paciencia para esperar que me recupere emocionalmente un poco y pueda culminarlo.

A Andrés R. Guano B.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Responsabilidad de Autoría	5
Autorización de Publicación.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento	8
Tabla de contenidos.....	9
Índice de figuras.....	14
Índice de tablas	19
Resumen	20
Abstract.....	21
Generalidades.....	22
Antecedentes	22
Planteamiento del problema	23
Justificación e importancia.....	23
Objetivo general del proyecto.....	24
Objetivos específicos del proyecto	24
Hipótesis de investigación.....	24
Categorización de las variables de investigación	24
Metodología de la investigación	25
Marco teórico referencial	27
Marco legal.....	27
Marco epistemológico	27
<i>Control de procesos</i>	<i>27</i>

<i>Modelo de proceso de primer orden con tiempo muerto</i>	29
<i>Controlador PID</i>	30
<i>Métodos de sintonización de controladores</i>	31
Método de Ziegler y Nichols	32
Método de Amigo	34
Método SIMC.....	35
Método de Cohen y Coon.....	35
Método de Haalman.....	37
Método de López, Miller, Smith y Murril.....	37
Método Kaya y Sheib.....	39
Método de Lambda.....	41
<i>Realidad virtual</i>	42
<i>Software AutoCAD Plant 3D</i>	43
<i>Software 3ds Max</i>	44
<i>Software Substance Painter</i>	45
<i>Software de Unity 3D</i>	46
<i>Software de MATLAB</i>	48
<i>Software de LabVIEW</i>	49
<i>Protocolo ethernet</i>	50
Marco conceptual	52
<i>Instrumentación</i>	52
<i>Automatismo</i>	52
<i>Planta</i>	52
<i>Proceso</i>	52
<i>Presión</i>	52
<i>Sistema de Control</i>	53

<i>Variable controlada</i>	53
<i>Variable manipulada</i>	53
<i>Set point</i>	53
<i>Perturbación</i>	53
<i>Error</i>	53
<i>Elemento primario de medida</i>	53
<i>Transmisor Industrial</i>	54
<i>Válvula de control</i>	54
<i>Transductor IP</i>	54
<i>Posicionador</i>	54
<i>Manifold</i>	55
<i>Flare</i>	55
<i>Controlador lógico programable (PLC)</i>	55
<i>Ganancia proporcional</i>	55
<i>Tiempo integral</i>	56
<i>Tiempo derivativo</i>	56
<i>Función de transferencia</i>	56
<i>Tiempo muerto</i>	56
<i>HMI</i>	56
<i>Diagramas P&ID</i>	57
Diseño e implementación del sistema virtual	58
Funcionalidad del sistema físico	58
Diagrama P&ID del sistema	60
Modelado matemático de proceso de primer orden más tiempo muerto ..	63
Arquitectura del proyecto	66
Desarrollo del sistema virtual 3D de la estación de control de presión	67

<i>Creación del entorno virtual</i>	67
<i>Programación del comportamiento dinámico</i>	74
<i>Algoritmo de modelo matemático y control con LabVIEW</i>	76
Diseño del entorno de la planta	80
Implementación de instrumentos	82
Diseño del proceso de presión	87
Selección de usuarios en el entorno	91
HMI en Unity3D	93
Función de Tablet	96
Desarrollo del HMI en LabVIEW	96
Creación de tramas de transmisión y recepción de datos	99
Comunicación TCP-IP	101
Resultados y pruebas experimentales.....	102
Descripción del sistema funcional	102
Verificación del funcionamiento de los equipos e instrumentos industriales en la planta de presión implementada.....	103
Implementación de la función de transferencia de la planta de presión .	111
<i>Selección de la función de transferencia de la planta de presión</i>	111
<i>Respuesta de la función de transferencia</i>	112
<i>Descripción de la planta de presión del laboratorio</i>	114
<i>Ingreso de la función de transferencia en Unity</i>	114
<i>Obtención del modelo matemático de la planta de presión en Unity con Matlab</i>	115
<i>Modelado de la planta de presión en MATLAB</i>	117
<i>Prueba del controlador y sintonización de la planta de presión</i>	

<i>con Lambda</i>	119
Pruebas de sintonización de controladores PI-PID	120
<i>Pruebas de sintonización con método de Ziegler y Nichols</i>	123
<i>Pruebas de sintonización con método de Cohen y Coon</i>	125
<i>Pruebas de sintonización con método de Amigo</i>	127
<i>Pruebas de sintonización con método SIMC</i>	129
<i>Pruebas de sintonización con método de Haalman</i>	131
<i>Pruebas de sintonización con método de López, Miller, Smith</i> <i>y Murril</i>	132
<i>Pruebas de sintonización con método de Lambda</i>	135
Análisis de los métodos de sintonía seleccionados	138
Prueba de controlador a una perturbación	139
Selección del mejor controlador	140
Validación de la hipótesis	141
Conclusiones y recomendaciones	142
Conclusiones	142
Recomendaciones	144
Bibliografía	145

Índice de figuras

Figura 1 <i>Diagrama de bloques de un sistema de control con realimentación para un controlador</i>	28
Figura 2 <i>Respuesta en escalón en lazo abierto</i>	29
Figura 3 <i>Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple</i>	31
Figura 4 <i>Curva de respuesta al escalón unitario</i>	33
Figura 5 <i>Dispositivos comunicativos propios de la realidad virtual</i>	43
Figura 6 <i>Icono AutoCAD Plant 3D</i>	44
Figura 7 <i>Ventana de trabajo de AutoCAD Plant 3D</i>	44
Figura 8 <i>Icono 3ds Max</i>	45
Figura 9 <i>Ventana de trabajo de 3ds Max</i>	45
Figura 10 <i>Icono de Substance Launcher</i>	46
Figura 11 <i>Ventana de trabajo de Substance Painter</i>	46
Figura 12 <i>Icono Unity 3D</i>	47
Figura 13 <i>Ventana de trabajo de Unity 3D</i>	47
Figura 14 <i>Icono MATLAB R18</i>	48
Figura 15 <i>Ventana de trabajo de MATLAB</i>	49
Figura 16 <i>Icono NI LabVIEW 2017</i>	49
Figura 17 <i>Ventana de trabajo de LabVIEW</i>	50
Figura 18 <i>Diagrama básico Ethernet Industrial</i>	51
Figura 19 <i>Separador trifásico horizontal</i>	59
Figura 20 <i>Diagrama P&ID del separador bifásico para el proyecto</i>	61
Figura 21 <i>Esquema 2D del proceso</i>	63
Figura 22 <i>Arquitectura de la estación de presión</i>	66
Figura 23 <i>Diagrama de bloques para desarrollo en Unity</i>	67
Figura 24 <i>Diagrama en 3D de las tuberías</i>	68

Figura 25	<i>Organización jerárquica de los elementos de la válvula</i>	69
Figura 26	<i>Asignación de puntos de pivote en la válvula</i>	69
Figura 27	<i>Edición de mallas de la válvula</i>	70
Figura 28	<i>Texturización de la válvula</i>	70
Figura 29	<i>Animación de objetos con el uso de animation</i>	71
Figura 30	<i>Animación de objetos a través de código</i>	71
Figura 31	<i>Ubicación de elementos en el campo</i>	72
Figura 32	<i>Ubicación de Iluminación del entorno</i>	73
Figura 33	<i>Creación y animación de avatar</i>	73
Figura 34	<i>Edición de ropa para avatar</i>	74
Figura 35	<i>Diagrama de bloques del comportamiento dinámico de los objetos</i>	75
Figura 36	<i>Diagrama de bloques para algoritmo de control y modelo matemático</i>	77
Figura 37	<i>Planta de presión 3D en Unity</i>	77
Figura 38	<i>Datos de prueba del modelo matemático</i>	78
Figura 39	<i>Entorno virtual de la planta al ingreso</i>	80
Figura 40	<i>Entorno virtual de la planta vista izquierda</i>	80
Figura 41	<i>Entorno virtual de la planta vista derecha</i>	81
Figura 42	<i>Botón de ajustes en entorno virtual</i>	82
Figura 43	<i>Funciones del botón de Ajustes</i>	82
Figura 44	<i>Manómetro analógico</i>	83
Figura 45	<i>Válvula tipo globo</i>	84
Figura 46	<i>Válvula tipo bola</i>	84
Figura 47	<i>Botones de panel view: A la izquierda, botón clásico de Unity, derecha botón modificado con apariencia LabVIEW</i>	85
Figura 48	<i>Switch de panel view y tipos de acciones mecánicas que un botón de LabVIEW puede tener</i>	86

Figura 49	<i>Slider de panel view: a la izquierda, slider clásico de Unity, derecha slider modificado con apariencia LabVIEW.....</i>	86
Figura 50	<i>Indicadores led de panel view.....</i>	87
Figura 51	<i>Separador trifásico y su instrumentación</i>	88
Figura 52	<i>Separador bifásico y su instrumentación.....</i>	89
Figura 53	<i>Tanque de venteo de alivio.....</i>	90
Figura 54	<i>Compresor con válvula para simulación de perturbaciones.</i>	90
Figura 55	<i>Quemador de gas y su instrumentación.....</i>	91
Figura 56	<i>Selección de usuario a ingreso de garita</i>	92
Figura 57	<i>Pantalla de representación gráfica del P&ID en Unity.....</i>	93
Figura 58	<i>Pantalla de tendencia del proceso en Unity</i>	94
Figura 59	<i>Pantalla del histórico del proceso en Unity.....</i>	94
Figura 60	<i>Pantalla del modelo matemático y constantes PID</i>	95
Figura 61	<i>Tecla para exportar datos</i>	95
Figura 62	<i>Función de Tablet.....</i>	96
Figura 63	<i>Pantalla de presentación en LabVIEW.....</i>	97
Figura 64	<i>Descripción del proceso en LabVIEW.....</i>	97
Figura 65	<i>Pantalla de representación gráfica del P&ID en LabVIEW</i>	98
Figura 66	<i>Tendencia y control desde LabVIEW</i>	98
Figura 67	<i>Tramas de transmisión y recepción de datos en LabVIEW</i>	99
Figura 68	<i>Trama de transmisión de datos desde Unity.....</i>	99
Figura 69	<i>Trama de transmisión de datos desde LabVIEW</i>	100
Figura 70	<i>Botón de conexión TCP/IP en Unity.....</i>	101
Figura 71	<i>Transmisor de flujo al ingreso del separador trifásico</i>	103
Figura 72	<i>Instrumentación de separador trifásico</i>	104
Figura 73	<i>Instrumentación separador bifásico</i>	105

Figura 74	<i>Instrumentación de presión en la parte superior del separador bifásico</i>	106
Figura 75	<i>Instrumentación de presión a la salida del separador bifásico</i>	107
Figura 76	<i>Animación de Instrumentación a diferentes valores</i>	108
Figura 77	<i>Válvula e Indicador para realizar perturbaciones en el proceso</i>	109
Figura 78	<i>Gráficas del cambio de process value frente al cambio de control value</i>	110
Figura 79	<i>Respuesta de la función de transferencia $F(S)$ en el dominio tiempo</i>	112
Figura 80	<i>Respuesta de la función de transferencia $G(S)$ en el dominio tiempo</i>	113
Figura 81	<i>Respuesta de la función de transferencia analizada en el dominio t y en el dominio s</i>	113
Figura 82	<i>Estación de presión Lab-Volt y su diagrama P&ID</i>	114
Figura 83	<i>Ingreso de la función de transferencia en la Pantalla F4 de la touch en Unity</i>	115
Figura 84	<i>Cambio de CV para obtención de datos del PV</i>	116
Figura 85	<i>Obtención de datos a Excel</i>	116
Figura 86	<i>Respuesta al escalón de la planta de presión de Unity</i>	117
Figura 87	<i>Ingreso de vectores con datos a MATLAB</i>	117
Figura 88	<i>Ingreso de datos a Ident de MATLAB</i>	118
Figura 89	<i>Respuesta de la estimación del modelo matemático en Matlab</i>	119
Figura 90	<i>Control de planta de presión por sintonización PI Lambda en Unity</i>	120
Figura 91	<i>Datos modificados obtenidos de una sintonización</i>	121
Figura 92	<i>Programa para gráfica de métodos de sintonización en MATLAB</i>	122
Figura 93	<i>Gráfica con parámetros a ser analizados en la sintonización de los controladores</i>	123
Figura 94	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Ziegler y Nichols PI - PID</i>	124
Figura 95	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Cohen y Coon</i>	126

Figura 96	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Amigo.....</i>	128
Figura 97	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía por SIMC.....</i>	130
Figura 98	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Haalman.....</i>	131
Figura 99	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía PI por López, Miller, Smith y Murril.....</i>	133
Figura 100	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía PID por López, Miller, Smith y Murril.....</i>	134
Figura 101	<i>Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Lambda.....</i>	136
Figura 102	<i>Gráfica de la respuesta de los métodos de sintonización.....</i>	139
Figura 103	<i>Respuesta del controlador frente a una perturbación.....</i>	139

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Operacionalización de las variables</i>	25
Tabla 2	<i>Diseño de la investigación</i>	26
Tabla 3	<i>Reglas de sintonía Ziegler- Nichols Primer método</i>	32
Tabla 4	<i>Reglas de sintonía de Cohen y Coon</i>	36
Tabla 5	<i>Constantes para controladores PI-PID</i>	38
Tabla 6	<i>Constantes para controladores PI-PID considerado disturbio en set point</i>	39
Tabla 7	<i>Constantes para controladores PID</i>	40
Tabla 8	<i>Funciones de usuarios</i>	92
Tabla 9	<i>Constantes para el método de Ziegler y Nichols</i>	123
Tabla 10	<i>Parámetros de selección de controlador para método de Ziegler y Nichols</i> .125	
Tabla 11	<i>Constantes para el método de Cohen y Coon</i>	125
Tabla 12	<i>Parámetros de selección de controlador para método de Cohen y Coon</i>	127
Tabla 13	<i>Constantes para el método de Amigo</i>	127
Tabla 14	<i>Parámetros de selección de controlador para método de Amigo</i>	129
Tabla 15	<i>Constantes para el método de SIMC</i>	129
Tabla 16	<i>Constantes para el método de Haalman</i>	131
Tabla 17	<i>Constantes para el método de López, Miller, Smith y Murril</i>	132
Tabla 18	<i>Parámetros de selección de controlador para método de López, Miller, Smith y Murril</i>	135
Tabla 19	<i>Constantes para el método de Lambda</i>	136
Tabla 20	<i>Parámetros de selección de controlador PI para el método de Lambda</i>	137
Tabla 21	<i>Parámetros de selección del método de sintonía</i>	138

Resumen

El control automático de procesos industriales permite que las plantas aumenten la productividad y mejoren la calidad de sus productos, en este contexto el conocimiento sobre sintonía de controladores es de fundamental importancia para el correcto funcionamiento de los procesos, en la actualidad con la evolución de la tecnología existen varios softwares de desarrollo virtual que permite un entrenamiento en varias áreas del control automático, por lo que el proyecto del sistema virtual 3D de una estación de control de presión enfocada en el diseño de algoritmos de control PI-PID es una herramienta de gran utilidad, desarrollado en el software Unity 3D y controlado desde el software de LabVIEW a través del protocolo de comunicación TCP-IP. El sistema permite realizar el diseño y sintonización de algoritmos de control PI-PID, todo ello con el realismo que proporcionará el ambiente virtual creado.

Palabras clave:

- **ENTORNO VIRTUAL**
- **CONTROL PI-PID**
- **ESTACIÓN DE PRESIÓN**
- **ALGORITMOS DE CONTROL**
- **MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN**

Abstract

Automatic control of industrial processes allows plants to increase productivity and improve the quality of their products, in this context, knowledge about controllers tuning is of fundamental importance for the correct operation of processes, nowadays with the evolution of the technology, there are several virtual development softwares that allow training in various areas of automatic control, so the 3D virtual system project of a pressure control station focused on the design of PI-PID control algorithms is a great tool. utility, developed in Unity 3D software and controlled from LabVIEW software through the TCP-IP communication protocol. The system allows the design and tuning of PI-PID control algorithms, all with the realism that the virtual environment created will provide.

Key words:

- **VIRTUAL ENVIRONMENT**
- **PI-PID CONTROL**
- **PRESSURE STATION**
- **CONTROL ALGORITHMS**
- **TUNING METHODS**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

En las industrias modernas el control de los diferentes procesos es parte fundamental ya que busca de reducir sus costos de fabricación, mientras que simultáneamente mejoran su calidad, la fiabilidad, la modernidad y la durabilidad de los productos. El control PID es muy utilizado en la mayoría de procesos que se van a controlar, además es un sistema robusto que produce una señal correctiva ante cualquier perturbación (Kinoshita & Yamamoto, 2016).

Para poder tener un buen control hay que realizar una buena sintonización para seguir el cambio en el valor deseado, es importante determinar los requisitos de funcionamiento del lazo de control para seleccionar el procedimiento de sintonización más adecuado (Alfaro Ruiz, 2002).

Dentro de la industria la medición y el control de la variable presión se hacen indispensables para lograr obtener una producción continua y contar con condiciones de operación seguras. Cualquier recipiente o tubería tiene una presión máxima de operación y sobrepasarla puede ocasionar graves accidentes materiales y de personal, principalmente cuando están implícitos fluidos inflamables o corrosivos. Para tales aplicaciones, el control y la medición con gran precisión para la variable presión son tan importantes como la seguridad extrema (Charre-Ibarra, Alcalá-Rodríguez, & López-Luiz, 2014) .

La simulación en ambientes virtuales puede convertirse en una herramienta poderosa para situar a los estudiantes en escenarios “prácticos” a los que difícilmente podrían acceder en la realidad, permitiendo establecer un mayor grado de equidad en el proceso de enseñanza (Fredes, Hernández, & Díaz, 2012).

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente algunos profesionales de libre ejercicio en el área de control de procesos, no disponen de sistemas didácticos virtuales 3D en donde se pueda evaluar los controladores PI-PID en una estación de presión, considerando que estos controladores siguen aún en vigencia y son muy utilizados en las industrias.

Los conocimientos teóricos se refuerzan con las prácticas y al necesitar estaciones físicas para poder probar los controladores conlleva a gastos económicos representativos, a esto se le suma la actual pandemia que impide estar presentes en los laboratorios o lugares con muchas personas. En este contexto ha pensado diseñar un sistema virtual 3D de una estación de presión en la cual se pueda implementar los controladores PI-PID con diferentes métodos de sintonización para ver su funcionamiento y poder reforzar los conocimientos teóricos.

1.3. Justificación e importancia

Debido a la gran aceptación de los controladores PI-PID, es muy útil disponer de reglas de sintonía simples que puedan ser aplicadas a un amplio rango de procesos. Este hecho justifica la longevidad de reglas de sintonización y su importancia para ser utilizados en los controladores. El análisis de controladores sobre el conjunto de ensayo ha permitido aumentar la comprensión sobre los controladores PI y PID, los cuales son de vital importancia para tener un proceso funcionando en óptimas condiciones.

Es por ello que se propone diseñar un sistema virtual 3D de una estación de control de presión que ayuden a realizar prácticas enfocadas a la sintonía de controladores PI-PID reforzando los conocimientos teóricos y pueda ser utilizado desde cualquier lugar.

Teniendo un entorno virtual inmersivo que se asemeja a los procesos industriales de la variable presión se conseguirá adquirir un mejor conocimiento práctico sobre sintonización de controladores PI-PID.

Tomando en cuenta la actual situación mundial de la pandemia y el acceso restringido a los laboratorios, este proyecto es una muy buena alternativa para implementarlo ya que integra conocimientos teóricos y tecnológicos que servirán como herramienta para realizar capacitaciones o cursos, llegando a ser un emprendimiento en la actualidad.

El alcance del proyecto se limita a la implementación del modelo matemático de la estación de presión y a la sintonización para controladores PI-PID. Se tiene programado utilizar recursos como computador portátil y software de diseño.

1.4. Objetivo general del proyecto

Diseñar un sistema virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID.

1.5. Objetivos específicos del proyecto

- Investigar los métodos de sintonización de controladores PI-PID.
- Implementar el modelo matemático de la estación de presión.
- Diseñar un entorno virtual 3D con Unity que conste con la planta de presión y un HMI para interactuar con las variables del proceso.
- Implementar los controladores PI-PID y probar los métodos de sintonización.
- Realizar las pruebas funcionales del sistema y analizar los resultados obtenidos.

1.6. Hipótesis de investigación

Es posible sintonizar controladores PI-PID de una estación de control de presión mediante un sistema virtual 3D.

1.7. Categorización de las variables de investigación

- Variable Independiente: Sistema Virtual 3D
- Variable Dependiente: Sintonización de controladores PI-PID

La operacionalización de las variables se muestra en la Tabla1:

Tabla 1*Operacionalización de las variables*

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Sintonización de controladores PI-PID	Dependiente	Determinación del ajuste de sus parámetros (K_c , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido.	Métodos que permiten funcionar a los controladores de forma óptima.	-Métodos de sintonía	- Disminución del sobre impulso - Disminución del tiempo de estabilización - Disminución del porcentaje de error en estado estable
Sistema Virtual 3D	Independiente	Es un entorno de escenas u objetos de apariencia real. La acepción más común refiere a un entorno generado mediante tecnología informática, que crea en el usuario la sensación de estar inmerso en él.	Sistema virtual 3D de una estación de presión que sea completamente inmersivo para probar controladores.	-Facilidad de implementación -Calidad de Diseño	- Disminución de costos - Facilidad de diseño - Robustez del diseño

1.8. Metodología de la investigación

Para realizar el proyecto de investigación se realizará una investigación de los métodos de sintonización de controladores y el software Unity para poder implementar el entorno virtual 3D deseado de la estación presión.

Se implementará el modelo matemático de la estación para luego vincular sus variables y proceder a probar los métodos de sintonización para los controladores PI-PID.

Tabla 2

Diseño de la investigación

OBJETIVO ESPECÍFICO	TÉCNICA	INSTRUMENTOS / MEDIOS	VARIABLES
Investigar los métodos de sintonización de controladores PI-PID.	Investigación Bibliográfica	Computador, Internet	Métodos de sintonización de controladores
Implementar el modelo matemático de la estación de presión.	Desarrollo de programas y comprobación de funcionamiento	Computadora, Software de desarrollo	Modelo Matemático de la Estación de presión
Diseñar un entorno virtual 3D utilizando Unity que conste con la planta de presión y un HMI para interactuar con las variables del proceso.	Desarrollo de programas y comprobación de funcionamiento	Computadora, Software de desarrollo, Unity 3D	Calidad de diseño Facilidad de implementación
Implementar los controladores PI-PID y probar los métodos de sintonización.	Desarrollo de programas y comprobación de funcionamiento	Computadora, Software de aplicación LabVIEW-Unity 3D	Métodos de sintonización de controladores Facilidad de implementación
Realizar las pruebas funcionales del sistema y analizar los resultados obtenidos.	Comparación de curvas de respuesta	Computador, HMI LabVIEW-Unity 3D	Resultados del sistema Eficiencia del sistema

Capítulo II

2. Marco teórico referencial

2.1. Marco legal

El Marco legal para el desarrollo del presente proyecto se detalla a continuación:

- Reglamento del Régimen académico RPC-SO-08-No. III-2019.
- Código Orgánico de Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación. Decreto Ejecutivo 1425.
- Ley Orgánica de Educación Superior (LOES).
- Ley orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública (LOTAIP)
- Reglamento de régimen académico del Consejo de Educación Superior.
- Reglamento de régimen académico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
- Estatuto de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

2.2. Marco epistemológico

2.2.1. Control de procesos

Según Lab-Volt y su guía de Fundamentos de control de procesos, un sistema característico del control de procesos debe tener un controlador, un proceso con al menos una variable, un elemento de control final que manipula a la variable del proceso y al menos un sensor que produce una señal proporcional a la variable controlada. La Figura 1 ilustra el sistema. El controlador puede estar en modo manual o automático

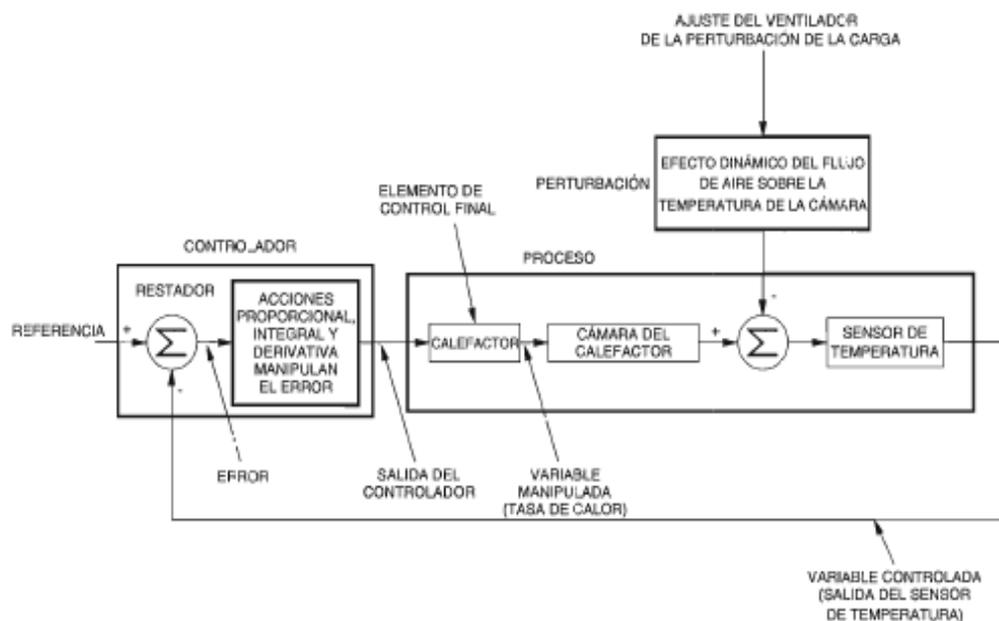
El Modo Automático es en lazo de realimentación cerrado, cuando la variable controlada se envía al controlador, generando una diferencia entre el set point o valor deseado y la variable controlada, a esta diferencia se le conoce como error. El error es maniobrado por las componentes proporcional, integral y derivativa del controlador, en

donde se reduce este error y se llega a la señal del set point ajustando la variable manipulada.

El modo manual en lazo de realimentación abierto o desconectado y los cambios en la variable controlada no afectan la salida del controlador. La salida del controlador sólo puede ser variada manualmente por un operador. Si el proceso tuviera perturbaciones de carga, se necesitaría la intervención del operador para mantener la variable controlada en la señal deseada (Lab-Volt, 2004).

Figura 1

Diagrama de bloques de un sistema de control con realimentación para un controlador



Nota. En la figura se observa el diagrama en bloques de un controlador. Recuperado de Fundamentos del Control de Procesos usando el programa LVPROSIM, p (1-2), por LabVolt, 2004, Instrumentación y control de procesos.

2.2.2. Modelo de proceso de primer orden con tiempo muerto

La mayoría de procesos en la industria tienen dinámicas relativamente simples, por lo que los procesos se diseñan de tal forma que sean fáciles de controlar y en el caso de utilizar un control PID es natural que se empleen modelos de procesos sencillos que vienen caracterizados solamente por unos pocos parámetros. (Åström & Häggglund, 2009)

Uno de los modelos más comunes es el FOTD o llamada Modelo de primer orden con tiempo muerto cuya función de transferencia se la muestra en la ecuación (2.1) y cuya curva característica se la puede observar en la Figura 2.

$$F(S) = K * \frac{e^{-L*s}}{T * s + 1} \quad (2.1)$$

Donde:

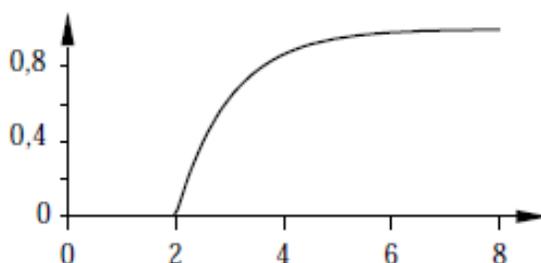
K= Ganancia del sistema

L= Tiempo muerto

T= Constante de tiempo del sistema

Figura 2

Respuesta en escalón en lazo abierto



Nota. Respuesta de un sistema auto regulado de primer orden con tiempo muerto a una señal escalón. Recuperado de Control PID Avanzado, p (16), por Åström, K., & Häggglund, T., 2009, Pearson Educación.

2.2.3. Controlador PID

Según Åström, el controlador PID es con mucho el algoritmo de control más común y utilizado en los lazos de retroalimentación en la mayor parte de procesos. Se lo puede implementar de varias formas ya sea como un controlador único o como parte de un paquete DDC (Control Digital Directo) o un sistema de control de procesos distribuido jerárquico. El algoritmo PID se puede ver como un dispositivo que puede operarse con unas pocas reglas heurísticas, pero que también puede estudiarse analíticamente (Åström & Hägglund, 2009). La ecuación 2.2 describe matemáticamente la acción del controlador PID ideal, mientras que la Figura 3 indica cómo va ubicado el controlador en el lazo del proceso y la señal de entrada y salida que este tiene.

$$u(t) = Kp \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

$e(t)$ = Error

Kp = Ganancia proporcional

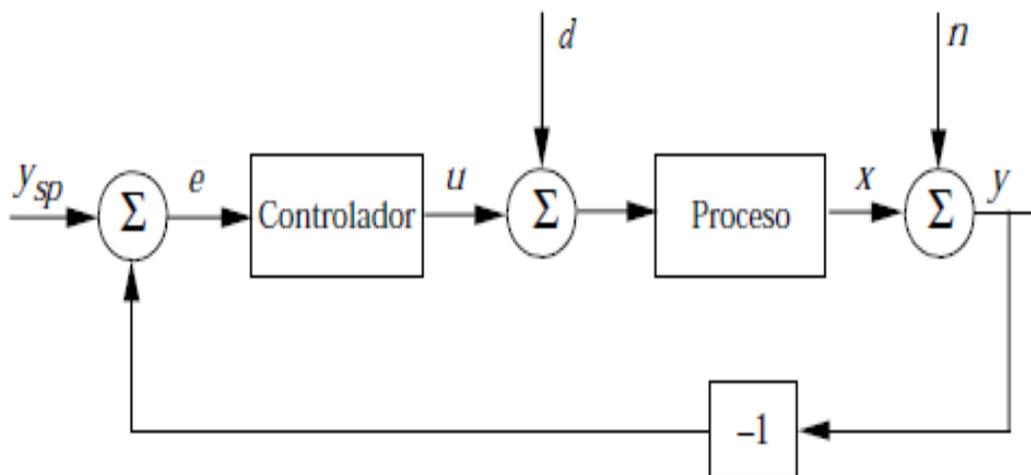
T_i = Tiempo integral

T_d = Tiempo derivativo

Por lo tanto, la señal de control es la suma de tres parámetros: la acción proporcional P (que es proporcional al error) reduce las oscilaciones de la variable controlada, la acción integral T_i (que es proporcional a la integral del error) corrige el error en estado estable y la acción derivativa T_d (que es proporcional a la derivada del error) reduce el error cuando existe un cambio en el proceso.

Figura 3

Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple



Nota. Lazo de control retroalimentado simple de un proceso. Recuperado de Control PID Avanzado, p (68), por Åström, K., & Hägglund, T., 2009, Pearson Educación.

El control PI es un controlador muy común y usado industrialmente en procesos con dinámicas de primer orden, la acción proporcional da una mejora adicional de comportamiento, el control PI se puede utilizar también con procesos que poseen acción integral.

2.2.4. Métodos de sintonización de controladores

Existen varios métodos para sintonización de controladores tipo PI y PID, la sintonización consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros. K_p , T_i y T_d , mediante los cuales se logra un comportamiento del sistema aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño.

2.2.4.1. Método de Ziegler y Nichols

Según (Ogata K. , 2010), Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en la caracterización del proceso y se los muestra en la Tabla 3.

Propusieron dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero a través de la respuesta del sistema a un escalón en lazo abierto y el segundo método llevando al sistema a ser oscilatorio con la ganancia K_p en lazo cerrado y luego aplicar las fórmulas.

Tabla 3

Reglas de sintonía Ziegler- Nichols Primer método

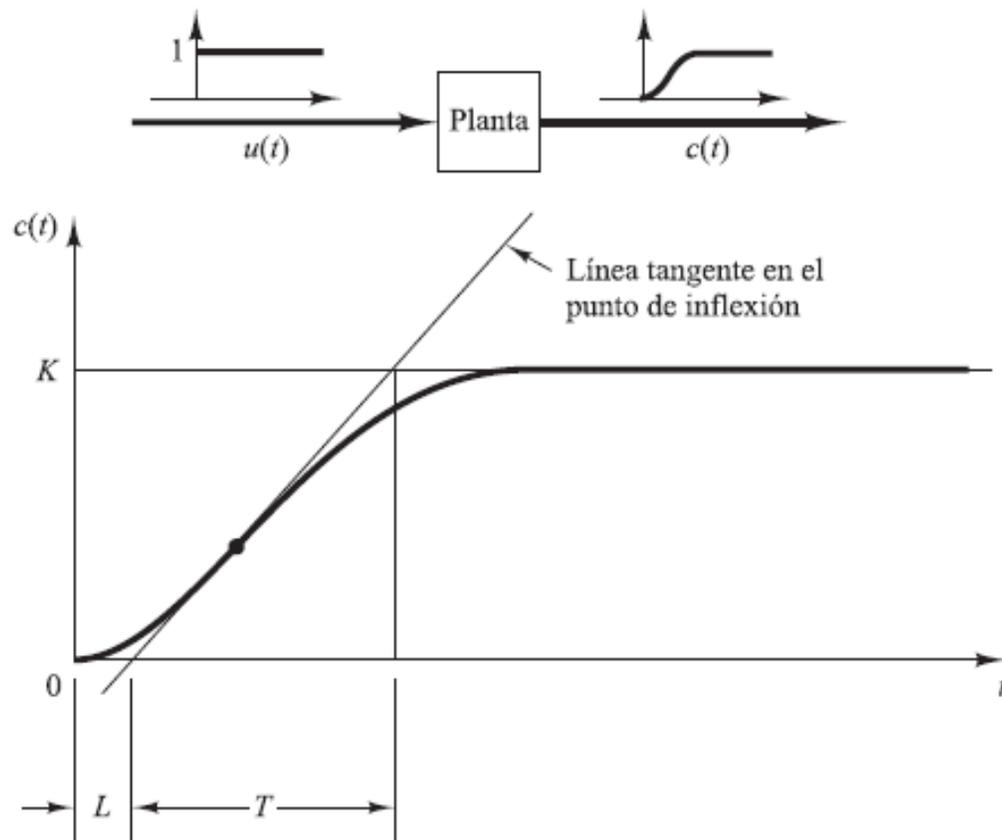
TIPO DE CONTROLADOR	K_p	T_i	T_d
PI	$0.9 \left(\frac{T}{L} \right)$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \left(\frac{T}{L} \right)$	$2L$	$0.5L$

Nota. Parámetros de sintonización de Ziegler-Nichols del primer método de sintonía. Recuperado de Ingeniería de control moderna (Quinta ed.), p (570), por (Ogata K. , 2010), Limusa.

El primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la Figura 4. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S (Ogata K. , 2010).

Figura 4

Curva de respuesta al escalón unitario



Nota. Lazo de control retroalimentado simple de un proceso. Recuperado de Ingeniería de control moderna (Quinta ed.), p (569), por Ogata, K., 2010, Limusa.

Según (Smith & Corripio, 1991), se realiza una actualización para la Tabla 3 en donde se considera el valor del parámetro K de la función de transferencia obteniendo como reglas para control PI la ecuación (2.3) para la ganancia proporcional y la ecuación (2.4) para el tiempo integral.

$$K_p = 0.9 \left(\frac{T}{KL} \right) \quad (2.3)$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} \quad (2.4)$$

Para un controlador PID se tiene la ecuación (2.5), ecuación (2.6) y ecuación (2.7) para determinar la ganancia proporcional y los tiempos integral y derivativo respectivamente.

$$K_p = 1.2 \left(\frac{T}{KL} \right) \quad (2.5)$$

$$T_i = 2L \quad (2.6)$$

$$T_d = 0.5L \quad (2.7)$$

2.2.4.2. Método de Amigo

Método de sintonía aproximado de MIGO, este método de sintonía es una sustitución para Ziegler y Nichols en donde se tiene que tomar en cuenta a los tres parámetros del proceso para un modelo FOTD (K, L, T) (Åström & Hägglund, 2009).

Para control PI es posible obtener reglas de sintonía cercanas a reglas óptimas para el conjunto de prueba al completo como se indica en la ecuación (2.13) y (2.14).

$$K_p = \frac{0.15}{K} + \left(0.35 - \frac{LT}{(L+T)^2} \right) \left(\frac{T}{KL} \right) \quad (2.13)$$

$$T_i = 0.35L + \frac{13LT^2}{T^2 + 12LT + 7L^2} \quad (2.14)$$

En el caso de las reglas para control PID, se pueden obtener reglas óptimas para procesos balanceados y con retardo dominante como se indican en la ecuación (2.15), ecuación (2.16) y ecuación (2.17).

$$K_p = \frac{1}{K} + \left(0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right) \quad (2.15)$$

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8T}{L + 0.1T} L \quad (2.16)$$

$$T_d = \frac{0.5LT}{0.3L + T} \quad (2.17)$$

Las reglas de sintonía anteriormente indicadas en las ecuaciones son de tipo conservadoras, tiene la misma estructura que el método Cohen- Coon, pero los parámetros difieren significativamente. Para tener una mayor robustez en las ecuaciones se puede aumentar la acción derivativa o disminuir la ganancia en un 15 por ciento.

2.2.4.3. Método SIMC

(Åström & Hägglund, 2009) Presenta al método de SIMC conocido como Controlador con modelo interno de Skogestad, el cual ha desarrollado una versión del método de sintonía del control con modelo interno para control PID. El método comienza con un modelo FOTD para control PI. Se requiere que el sistema en lazo cerrado debería tener la función de transferencia que se indica en la ecuación (2.18).

$$G(S) = \frac{1}{1 + sT_{cl}} e^{-sL} \quad (2.18)$$

Para control PI se presentan las reglas de sintonía como se indica en la ecuación (2.19) y (2.20).

$$K_p = \frac{T}{2KL} \quad (2.19)$$

$$T_i = \text{mín}(T, 8L) \quad (2.20)$$

2.2.4.4. Método de Cohen y Coon

(Åström & Hägglund, 2009) Indica que el criterio principal de diseño es el rechazo de las perturbaciones de carga. Para control PI y PID se maximiza la ganancia integral, esto corresponde a la minimización de la integral del error. Como el proceso se caracteriza por tres parámetros (K_p , L , y T), es posible dar fórmulas de sintonía donde las constantes del controlador se expresan en términos de estos parámetros como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4

Reglas de sintonía de Cohen y Coon

TIPO DE CONTROLADOR	a K _p	T _i /L	T _d /L
PI	$0.9 \left(1 + \frac{0.092 \tau}{1 - \tau}\right)$	$\frac{3.3 - 3 \tau}{1 + 1.2 \tau}$	0
PID	$1.35 \left(1 + \frac{0.18 \tau}{1 - \tau}\right)$	$\frac{2.5 - 2 \tau}{1 + 0.39 \tau}$	$\frac{0.37 - 0.37 \tau}{1 - 0.81 \tau}$

Nota. Parámetros de sintonización de Cohen y Coon. Recuperado de Control PID Avanzado, p (178), por (Aström & Häggglund, 2009), Pearson Educación.

En la Tabla 4 se dan las fórmulas en función de los parámetros a y τ , y son usados para facilitar la comparación con la sintonía de Ziegler-Nichols. En donde los parámetros a y τ se muestran a continuación:

$$a = K \frac{L}{T}$$

$$\tau = \frac{L}{L + T}$$

Reemplazando los valores de a y τ para un control PI se obtienen la ecuación (2.8) y (2.9).

$$K_p = \left(\frac{0.9 T}{K L}\right) \left(1 + \frac{0.092 \left(\frac{L}{L+T}\right)}{1 - \left(\frac{L}{L+T}\right)}\right) \quad (2.8)$$

$$T_i = \frac{3.3 - 3 \left(\frac{L}{L+T}\right)}{1 + 1.2 \left(\frac{L}{L+T}\right)} \quad (2.9)$$

En el caso de reglas para control PID, se obtiene la ecuación (2.10), ecuación (2.11) y ecuación (2.12).

$$K_p = \left(\frac{1.35 T}{K L} \right) \left(1 + \frac{0.18 \left(\frac{L}{L+T} \right)}{1 - \left(\frac{L}{L+T} \right)} \right) \quad (2.10)$$

$$T_i = \frac{2.5 - 2 \left(\frac{L}{L+T} \right)}{1 + 0.39 \left(\frac{L}{L+T} \right)} \quad (2.11)$$

$$T_d = \frac{0.37 - 0.37 \left(\frac{L}{L+T} \right)}{1 - 0.81 \left(\frac{L}{L+T} \right)} \quad (2.12)$$

2.2.4.5. Método de Haalman

El método Haalman de sintonización se usa para procesos cuyo tiempo de retardo L es grande como se mencionan en (Åström & Hägglund, 2009), una característica es que los polos y ceros del proceso se cancelan por polos y ceros en el controlador lo que produciría modos no controlables en el sistema en lazo cerrado.

Para control PI se tiene las ecuaciones (2.21) y (2.22).

$$K_p = \frac{2T}{3KL} \quad (2.21)$$

$$T_i = T \quad (2.22)$$

2.2.4.6. Método de López, Miller, Smith y Murril

(Alfaro Ruiz, 2002) Menciona que: “es el primer método para el modelo de primer orden más tiempo muerto para lazos de control que funcionan para reguladores con controladores PID ideal, basado en criterios integrales que presentó ecuaciones para el cálculo de los parámetros del controlador y los criterios de desempeño empleados

fueron: Integral del error absoluto (IAE), Integral del error absoluto por el tiempo (ITAE) e Integral del error cuadrático (ISE)".

En el caso de ecuaciones de sintonización para control PI-PID, se indican en la ecuación (2.23), ecuación (2.24) y ecuación (2.25).

$$K_p = \frac{A}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^B \quad (2.23)$$

$$T_i = \frac{T}{C} \left(\frac{1}{\left(\frac{L}{T}\right)^D}\right) \quad (2.24)$$

$$T_d = T E \left(\frac{L}{T}\right)^F \quad (2.25)$$

Los valores de las letras de la A hasta la F se indican en la Tabla 5.

Tabla 5

Constantes para controladores PI-PID

Controlador	Criterio	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0,984	-0,986	0,608	-0,707	-	-
PI	ITAE	0,859	-0,977	0,674	-0,680	-	-
PID	IAE	1,435	-0,921	0,878	-0,749	0,482	1,137
PID	ITAE	1,357	-0,947	0,842	-0,738	0,381	0,995

Nota. Constantes para sintonización López, Miller, Smith y Murril. Recuperado de Control Automático Educación. Obtenido de Método de la Integral del Error Sintonia Controlador PID, por (Castaño Giraldo, s.f.)

(Castaño, s.f.) Indica que se puede “considerar un disturbio en el set point, y de la misma forma se resuelve un problema de optimización numéricamente, donde solo la ecuación para el cálculo del tiempo integral es diferente”.

Para la constante T_i se tiene un cambio como se indica en la ecuación (2.26), los demás parámetros de K_p y T_d se los calculan con las ecuaciones (2.23) y (2.25) respectivamente.

$$T_i = \left(\frac{T}{C + D \left(\frac{L}{T} \right)} \right) \quad (2.26)$$

Para los valores de las letras de la A hasta la F se tienen las siguientes constantes que se indican en la Tabla 6.

Tabla 6

Constantes para controladores PI-PID considerado disturbio en set point

Controlador	Criterio	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0,758	-0,861	1,020	-0,323		
PI	ITAE	0,586	-0,916	1,030	-0,165		
PID	IAE	1,086	-0,087	0,740	-0,130	0,348	0,914
PID	ITAE	0,965	-0,850	0,796	-0,147	0,308	0,929

Nota. Constantes para sintonización López, Miller, Smith y Murril, considerando un disturbio en el set point. Recuperado de Control Automático Educación. Obtenido de Método de la Integral del Error Sintonia Controlador, por (Castaño Giraldo, s.f.)

2.2.4.7. Método Kaya y Sheib

(Alfaro Ruiz, 2002) Menciona que: “mientras López desarrolló el método de sintonización para un controlador PID-Ideal, Kaya y Sheib realizaron controladores que denominaron PID-Clásico (PID-Serie), PID No Interactuante (una variación del PID-Paralelo) y PID-Industrial, el cual está basado en el mejor modelo de primer orden más tiempo muerto y su criterio de desempeño corresponde a la minimización de alguno de los criterios integrales”.

Para el cálculo se utiliza la ecuación (2.23), ecuación (2.24) y ecuación (2.25) del modelo de López y para las constantes de las letras de la A hasta la F se utilizan las de la Tabla 7.

Tabla 7

Constantes para controladores PID

Clásico Regulador							
Controlador	Criterio	A	B	C	D	E	F
PID	IAE	0,98089	-0,76167	0,91032	-1,05211	0,59974	0,89819
PID	ITAE	0,77902	-1,06401	1,14311	-0,70949	0,57137	1,03826
PID	ISE	1,11907	-0,89711	0,79870	-0,95480	0,54766	0,87798
No interactuante Regulador							
PID	IAE	1,31509	-0,88260	1,25870	-1,37560	0,56550	0,45760
PID	ITAE	1,31760	-0,79370	1,12499	-1,42603	0,49547	0,41932
PID	ISE	1,34660	-0,93080	1,65850	-1,25738	0,79715	0,41941
Industrial Regulador							
PID	IAE	0,91000	-0,79380	1,10150	-1,00403	0,54140	0,78480
PID	ITAE	0,70580	-0,88720	1,03326	-0,99138	0,60006	0,97100
PID	ISE	1,11470	-0,88992	0,93240	-0,87530	0,56508	0,91107

Nota. Constantes para sintonización Kaya y Sheib. Recuperado de *Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores*, p (25), por (Alfaro, 2002), Revista de la Universidad de Costa Rica.

2.2.4.8. Método de Lambda

(Åström & Hägglund, 2009) Menciona que: “la sintonía lambda es un caso especial de asignación de polos que se utiliza con frecuencia en la industria de procesos”, esto para un modelo FOTD. Es un método sencillo que puede dar buenos resultados en ciertas circunstancias a condición de que el parámetro de diseño se escoge adecuadamente.

Para control PI se tiene las ecuaciones (2.27) y (2.28).

$$K_p = \frac{1}{K} \frac{T}{L + T_{CL}} \quad (2.27)$$

$$T_i = T \quad (2.28)$$

En el caso de las reglas para control PID, se tienen la ecuación (2.29), ecuación (2.30) y ecuación (2.31).

$$K_p = \frac{1}{K} + \left(\frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + T_{CL}} \right) \quad (2.29)$$

$$T_i = T + \frac{L}{2} \quad (2.30)$$

$$T_d = \frac{TL}{L + 2T} \quad (2.31)$$

La elección de T_{cl} es crítica, para tener un control robusto $T_{cl} = 3T$ y para una sintonía agresiva $T_{cl} = T$, las dos opciones conducen a controladores con ganancia cero y tiempo integral cero para sistemas con retardo de tiempo puro. En procesos dominados por el retardo es recomendable escoger T_i como el valor más grande de T y $3L$ (Åström & Hägglund, 2009).

2.2.5. Realidad virtual

(Ortega, Vera, & Burgos, 2003) Indican que: “La Realidad Virtual es una simulación tridimensional dinámica en la que el usuario se siente introducido en un ambiente artificial que percibe como real en base a estímulos a los órganos sensoriales”, a partir de este concepto se tienen que satisfacer tres requisitos:

Simulación: Es la capacidad para crear un sistema lo suficientemente parecido a la realidad, para persuadir al usuario de que constituye una situación paralela a aquella y que puede estar ligado a las reglas del mundo real o no.

Interacción: Mantener el control del sistema diseñado para que las interacciones del usuario produzcan cambios en el mundo artificial, usando diversas interfaces hombre-máquina, como pueden ser teclado y ratón hasta otros más avanzados como guantes o trajes sensoriales.

Percepción: El factor más crítico en los sistemas de Realidad Virtual ya que se administran a los sentidos (vista, oído, tacto) mediante elementos externos (cascos de visualización HMD, guantes de datos, etc.), pero es posible que en el futuro traten de llegar directamente al cerebro, evitando así los interfaces sensoriales externos (Ortega, Vera, & Burgos, 2003).

La Figura 5 muestra una perspectiva de como los dispositivos se interconectan entre ellos para lograr tener entornos virtuales que lleven a los usuarios a tener una mejor experiencia, cumpliendo los requisitos mencionados.

Figura 5

Dispositivos comunicativos propios de la realidad virtual



Nota. Lazo de control retroalimentado simple de un proceso. Recuperado de La realidad virtual y sus posibilidades. Etic@net, p (5), por Ortega, J., Vera, G., & Burgos, Á., 2003, Editorial Board.

2.2.6. Software AutoCAD Plant 3D

“Crea y edita P&ID, modelos en 3D y extrae vistas isométricas y ortográficas de tuberías con el conjunto de herramientas específico de la industria para el diseño de plantas. Plant 3D impulsa la productividad hasta en un 74 %, lo que proporcionó un ahorro de tiempo considerable en las tareas habituales de diseño de plantas” (AUTODESK-Inc, 2021).

El ícono de la presentación de AutoCAD Plant 3D y la ventana de trabajo se muestran en las Figuras 6 y la Figura 7 respectivamente

Figura 6

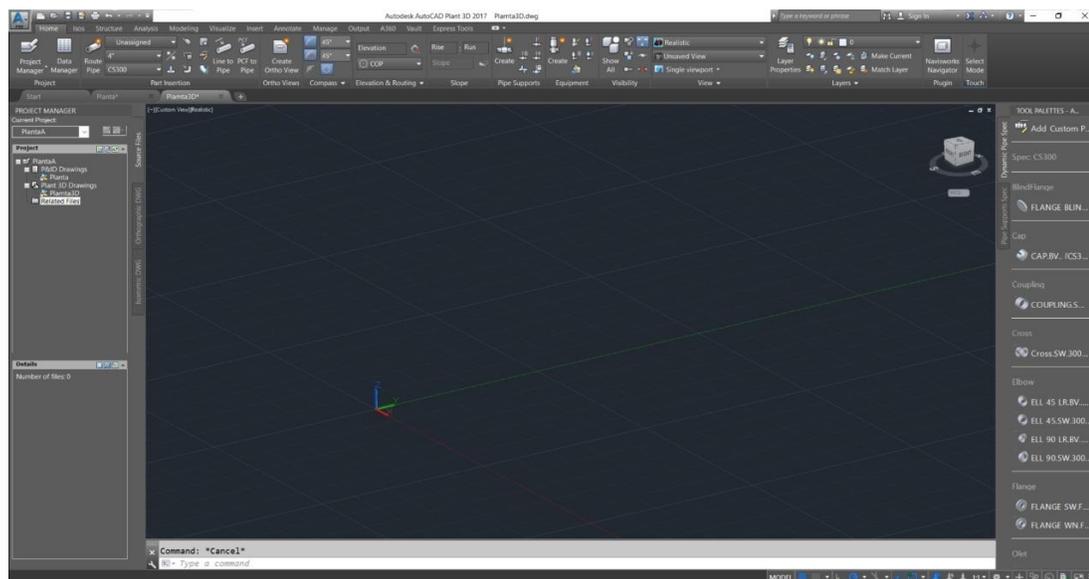
Icono AutoCAD Plant 3D



Nota. Icono de inicio para ejecutar AutoCAD Plant 3D.

Figura 7

Ventana de trabajo de AutoCAD Plant 3D



Nota. Ventana en donde se trabaja los proyectos de AutoCad Plant 3D.

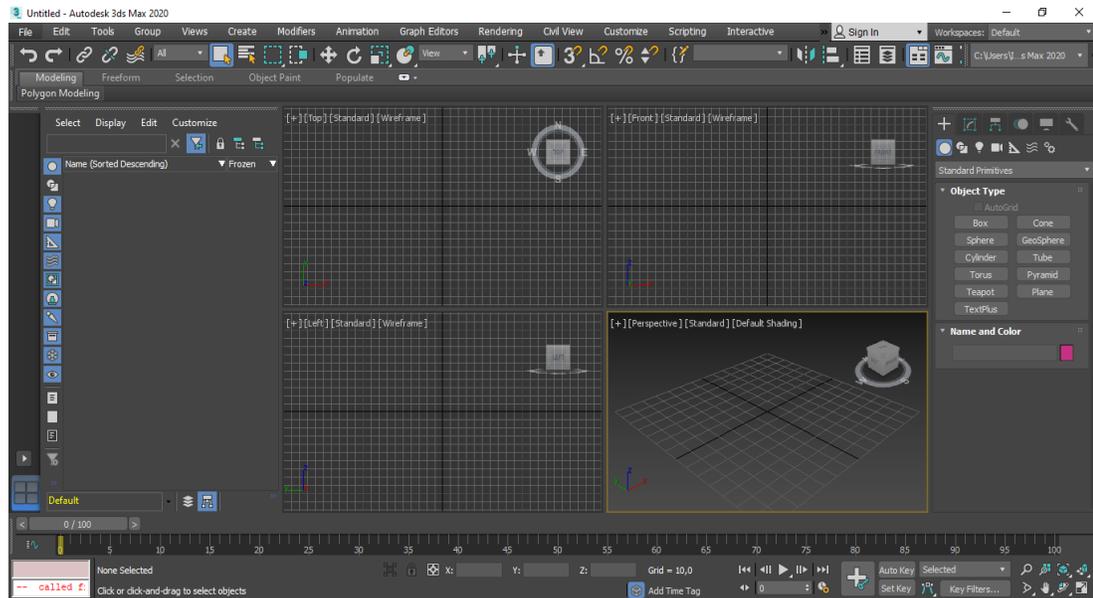
2.2.7. Software 3ds Max

“Software de modelado, renderización y animación 3ds Max de calidad profesional. Un conjunto de herramientas eficaz y flexible que te ayuda a crear contenido 3D mejor en menos tiempo, 3ds Max automatiza gran parte del flujo de trabajo y le permite dedicar más tiempo a la creatividad” (AUTODESK, 2021).

El ícono de la presentación de 3ds Max y la ventana de trabajo se muestran en las Figuras 8 y la Figura 9 respectivamente

Figura 8*Icono 3ds Max*

Nota. Icono de inicio para ejecutar 3ds Max.

Figura 9*Ventana de trabajo de 3ds Max*

Nota. Ventana en donde se trabaja los proyectos de 3ds Max.

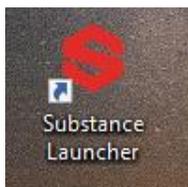
2.2.8. Software Substance Painter

“Substance 3D Painter dispone de las herramientas que se necesitan para aplicar texturas en activos en 3D, desde pinceles avanzados hasta materiales inteligentes que se adaptan automáticamente al modelo. Se trata de una aplicación de texturas en 3D a la que recurren profesionales creativos de todo el mundo, de forma generalizada en la producción de juegos y películas, así como en la arquitectura, la moda y el diseño de productos” (Adobe, 2021).

El ícono de la presentación de Substance Launcher y la ventana de trabajo se muestran en las Figuras 10 y la Figura 11 respectivamente.

Figura 10

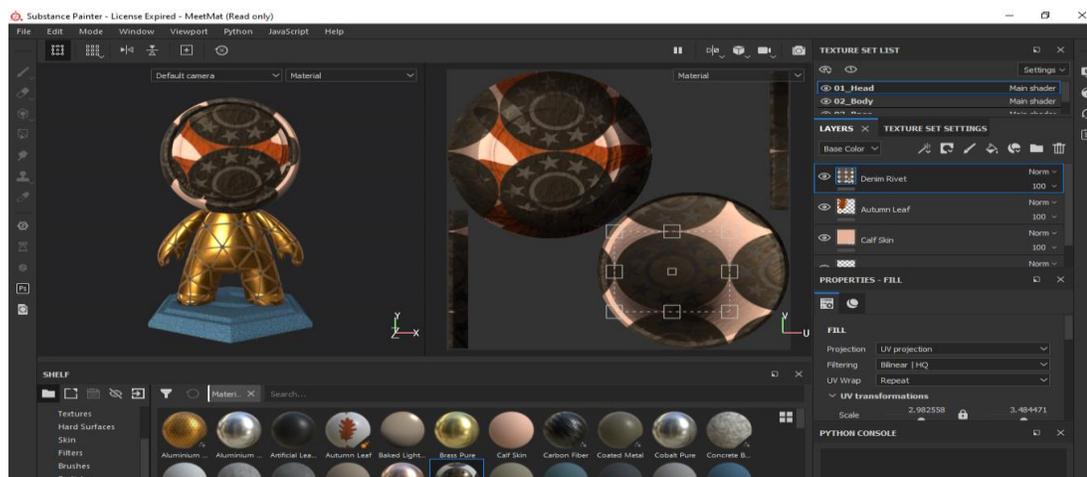
Icono de Substance Launcher



Nota. Icono de inicio para ejecutar Substance Launcher, para acceso a Substance Painter.

Figura 11

Ventana de trabajo de Substance Painter



Nota. Ventana en donde se trabaja los proyectos de Substance Launcher.

2.2.9. Software de Unity 3D

(Erosa, 2019) Indica que Unity es una herramienta de desarrollo de videojuegos creada por la empresa Unity Technologies. Software se ha utilizado para crear multitud de juegos, crear experiencias de Realidad Virtual interactivas e incluso miniseries, juegos para móvil.

Unity es una herramienta que no engloba únicamente motores para el renderizado de imágenes, de físicas de 2D/3D, de audio, de animaciones y otros motores, sino que engloba además herramientas de networking para multijugador, herramientas de navegación NavMesh para Inteligencia Artificial o soporte de Realidad Virtual (Erosa, 2019).

El ícono de la presentación de Unity Hub y la ventana de trabajo se muestran en las Figuras 12 y 13 respectivamente.

Figura 12

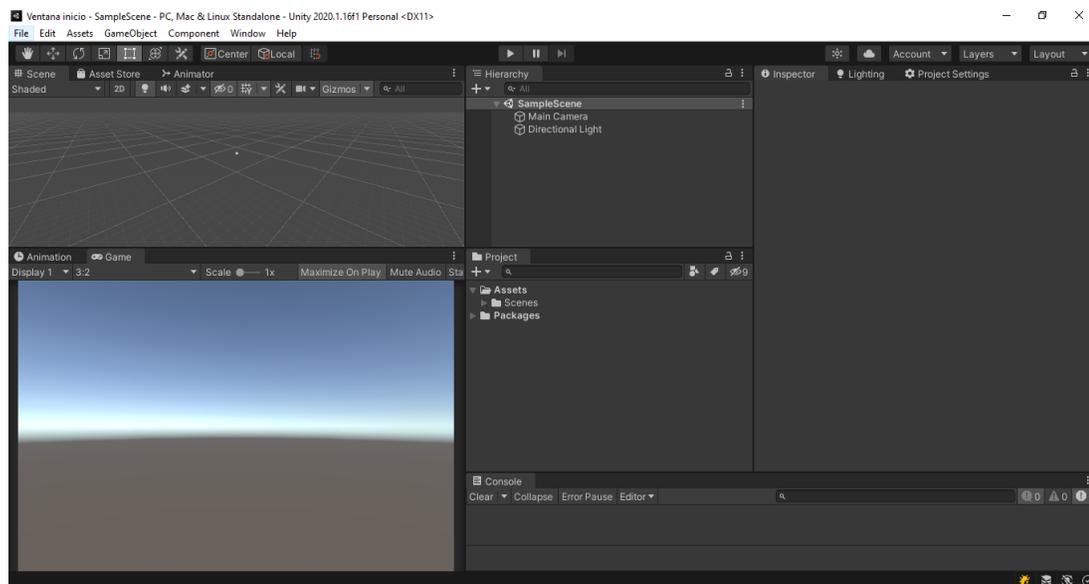
Icono Unity 3D



Nota. Icono de inicio para ejecutar Unity Hub para acceso a Unity 3D.

Figura 13

Ventana de trabajo de Unity 3D



Nota. Ventana en donde se trabaja los proyectos de Unity 3D.

2.2.10. Software de MATLAB

“MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico usado para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos, combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación” (MathWorks, 2021).

Algunas de las Características principales según (MathWorks-Inc, 2021) son:

- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería
- Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas.
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados.
- Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales, ajustar sistemas de control y muchas otras tareas
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®

El ícono de la presentación de MATLAB y la ventana de trabajo se muestran en las Figuras 14 y la Figura 15 respectivamente

Figura 14

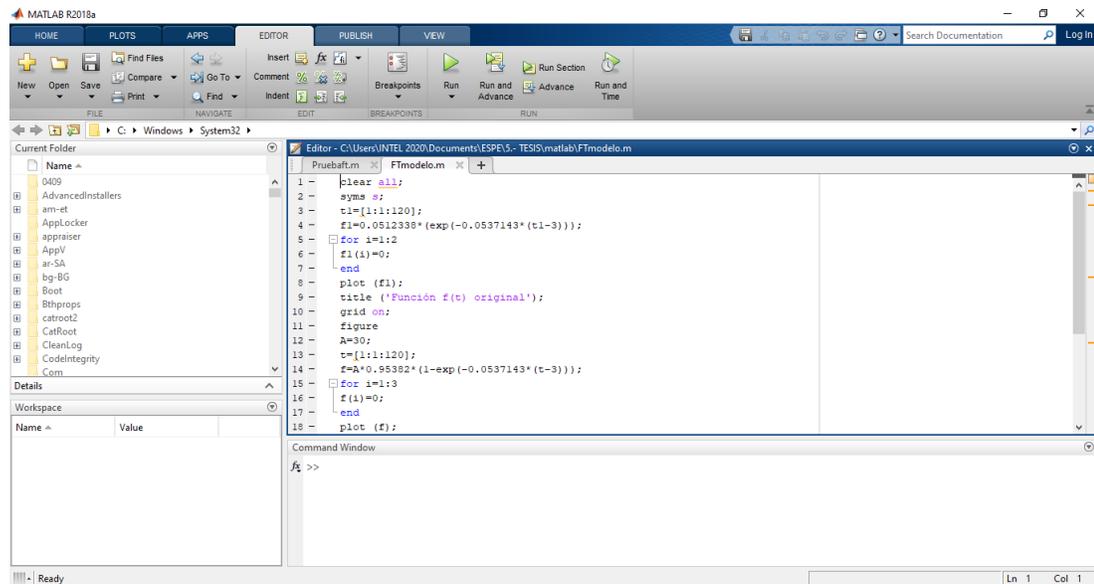
Icono MATLAB R18



Nota. Icono de inicio para ejecutar MATLAB R18.

Figura 15

Ventana de trabajo de MATLAB



Nota. Ventana en donde se trabaja los proyectos de MATLAB R18.

2.2.11. Software de LabVIEW

El ícono de la presentación de LabVIEW y la ventana de trabajo se muestran en las Figuras 16 y la Figura 17 respectivamente

Figura 16

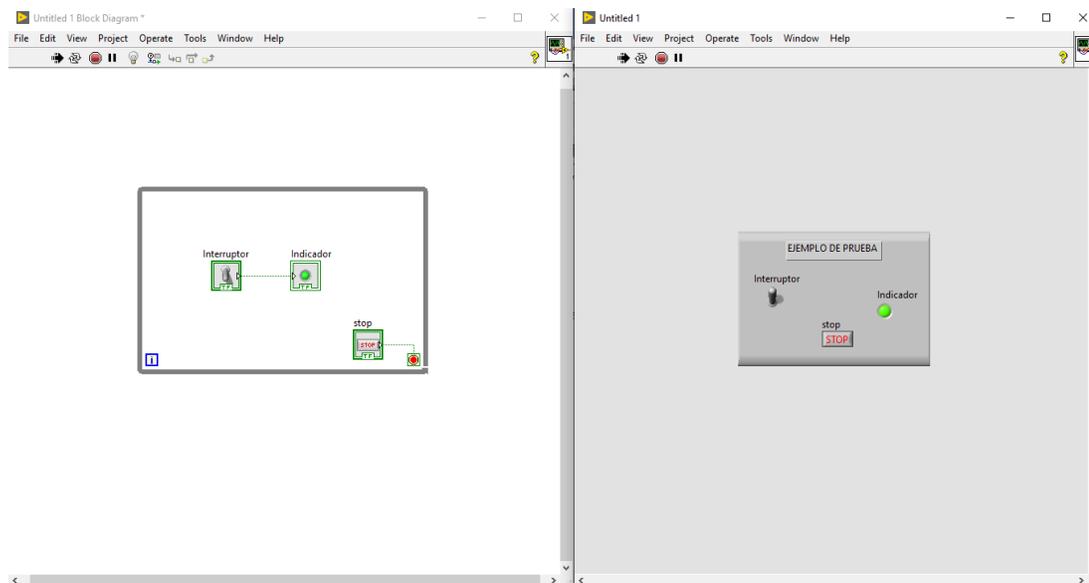
Icono NI LabVIEW 2017



Nota. Icono de inicio para ejecutar LabVIEW 2017.

Figura 17

Ventana de trabajo de LabVIEW



Nota. Ventana en donde se trabaja los proyectos de LabVIEW 2017.

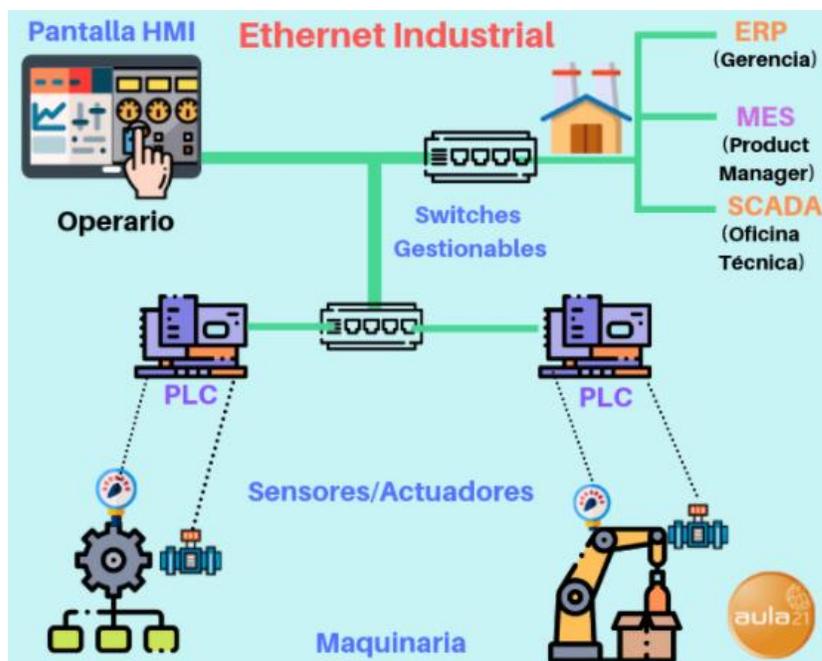
2.2.12. Protocolo ethernet

(Aula21, 2020) Define al protocolo Ethernet/IP (Ethernet Industrial Protocol) como un “estándar de red de comunicación capaz de manejar grandes cantidades de datos a velocidades de 10 Mbps o 100 Mbps, y hasta 1500 bytes por paquete”.

En definitiva, este tipo de red es fácil de configurar, operar, mantener y ampliar, debido a su fiabilidad, rendimiento e interoperabilidad inherentes, Ethernet se ha infiltrado en la planta de producción como el protocolo de comunicación preferido para los sistemas de automatización y control.

Figura 18

Diagrama básico Ethernet Industrial



Nota. Ejemplo de un Diagrama básico de Ethernet Industrial. Recuperado de Centro de Formación Técnica para la Industria, Obtenido de Qué es el protocolo Ethernet Industrial por (Aula21, 2020).

Esta tecnología se utiliza con ordenadores personales, mainframes, robots, dispositivos y adaptadores de entrada/salida (E/S), controladores lógicos programables (PLC) y otros dispositivos. La especificación está respaldada por la Industrial Ethernet Association (IEA), ControlNet International (CI) y la Open DeviceNet Vendor Association (ODVA) (Aula21, 2020).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Instrumentación

“Es el proceso en el que el conjunto de varios instrumentos eléctricos, de medición y control interconectados para medir, analizar y controlar las magnitudes físicas eléctricas y no eléctricas” (Aula.21, 2020).

2.3.2. Automatismo

“Se define un sistema (máquina o proceso) automatizado como aquel capaz de reaccionar de forma automática (sin la intervención del operario) ante los cambios que se producen en el mismo, realizando las acciones adecuadas para cumplir la función para la que ha sido diseñado” (Sanchis, Ariño, & Romero, 2010).

2.3.3. Planta

“Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular” (Ogata K. , 2010).

2.3.4. Proceso

“Un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado” (Ogata K. , 2010).

2.3.5. Presión

“Es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi” (Creus, 2010).

2.3.6. Sistema de Control

“Es el que produce de forma automática las acciones sobre el proceso a partir de la información captada por los sensores” (Sanchis, Ariño, & Romero, 2010).

2.3.7. Variable controlada

“Es la variable que se debe mantener o controlar dentro de algún valor deseado” (Smith & Corripio, 1991).

2.3.8. Variable manipulada

“Es la variable que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de control (punto de fijación o de régimen)” (Smith & Corripio, 1991).

2.3.9. Set point

“Conocido como punto de control, es el valor que se desea tenga la variable controlada” (Smith & Corripio, 1991).

2.3.10. Perturbación

“Se define como cualquier variable que ocasiona que la variable de control se desvíe del punto de control” (Smith & Corripio, 1991).

2.3.11. Error

“En un sistema de lazo cerrado, el error es una de las señales más importantes a considerar. Los controladores se diseñan para cancelar dicho error o reducirlo a lo menos posible, en el caso de una retroalimentación negativa unitaria” (Morales & Ramirez, 2013), también se lo puede considerar como “una diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida” (Creus, 2010).

2.3.12. Elemento primario de medida

“Conocido como sensor es en donde se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable de proceso que se mide” (Smith & Corripio, 1991).

2.3.13. Transmisor Industrial

Convierte la señal del sensor en una señal eléctrica estándar que se puede transmitir a distancia, por lo tanto, ésta tiene relación con la variable del proceso (Smith & Corripio, 1991).

2.3.14. Válvula de control

“Las válvulas de control son los elementos finales de control más usuales y se les encuentra en las plantas de proceso, donde manejan los flujos para mantener en los puntos de control las variables que se deben controlar. La válvula de control actúa como una resistencia variable en la línea de proceso; mediante el cambio de su apertura” (Smith & Corripio, 1991).

2.3.15. Transductor IP

“Los transductores electro neumáticos (I/P) convierten una entrada de corriente de 4-20 mA en una salida de presión proporcional. I/P es una abreviatura de la corriente a presión (I a P). También proporciona una operación estable y precisa cuando su salida se transmite a las cámaras de volumen pequeño, como un posicionador neumático u otro instrumento neumático” (Emerson, 2021).

2.3.16. Posicionador

“Compara la señal de entrada con la posición del vástago y, si ésta no es correcta, envía aire al servomotor o bien lo elimina en el grado necesario para que la posición del vástago corresponda exactamente, o bien sea proporcional, a la señal neumática recibida” (Creus, 2010).

“Un posicionador inteligente dispone de una interfaz con protocolos de comunicaciones y de un microprocesador, lo que le permite realizar diversas funciones, aparte de la propia del posicionador que es la de posicionar el obturador de la válvula y convertir la señal de intensidad 4-20 mA c.c. a una señal neumática de salida hacia el servomotor neumático de la válvula” (Creus, 2010).

2.3.17. Manifold

“El by-pass o manifold formado por un conjunto de válvulas auxiliares, tuberías y accesorios, que permite derivar el caudal de paso a una tubería en paralelo dotado de una válvula manual de control, adecuada para que el operario pueda realizar el control del proceso” (Creus, 2010).

2.3.18. Flare

“Conocido como quemador o antorcha, el cuál quema gas no deseado a través de un tubo. La quema es un medio de eliminación utilizado cuando no hay modo de transportar el gas al mercado y el operador no puede usar el gas para otro fin. La estructura consta de una torre vertical y quemadores utilizados para quemar vapores de combustible” (schulumberger, 2021).

2.3.19. Controlador lógico programable (PLC)

“Conocido también como autómatas programables industriales (API) es un equipo electrónico, programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente de tipo industrial de procesos secuenciales, es un computador especial, en el software, porque se programa en un lenguaje especial que implementa el algoritmo de control en tiempo real, en el hardware utiliza componentes robustos que soportan condiciones de trabajo adversas, como las que se dan en ambientes industriales (polvo, temperatura, vibraciones, etc.), y porque su constitución física incluye los circuitos de interfaz necesarios para conectarlo de forma directa a los sensores y actuadores del proceso” (Sanchis, Ariño, & Romero, 2010).

2.3.20. Ganancia proporcional

“La acción proporcional cambia a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. Un aumento de la ganancia conduce a una mayor acción proporcional y un control más rápido” (Creus, 2010).

2.3.21. Tiempo integral

“Mueve a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna. La señal I (integral) va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el punto de consigna, repitiendo la señal proporcional según su τ_i (minutos/repetición).” (Creus, 2010).

2.3.22. Tiempo derivativo

“Equivale al tiempo en minutos con que la acción derivada se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control” (Creus, 2010).

2.3.23. Función de transferencia

“La función de transferencia proporciona un mecanismo útil para el análisis del comportamiento dinámico y el diseño de sistemas de control” (Smith & Corripio, 1991), es una representación matemática de la respuesta del sistema.

2.3.24. Tiempo muerto

La salida del sistema es así simplemente la entrada retardada. Este sistema se llama por lo tanto un retardo de tiempo o un retardo de transporte (Åström & Hägglund, 2009).

2.3.25. HMI

“El Interfaz Hombre-Máquina (HMI) es el interfaz entre el proceso y los operarios. Es la principal herramienta utilizada por operarios y supervisores de línea para coordinar y controlar procesos industriales y de fabricación. La función de los HMI consiste en mostrar información operativa en tiempo real, proporcionando gráficos de procesos visuales que aportan significado y contexto al estado del motor y de la válvula, niveles de depósitos y otros parámetros del proceso. Suministran información operativa al proceso, y permiten el control y la optimización al regular los objetivos de producción y de proceso” (Wonderware, 2021).

2.3.26. Diagramas P&ID

“Es un diagrama de tuberías e instrumentación que indica las tuberías y los componentes relacionados del flujo de un proceso físico. Los P&IDs son fundamentales para el mantenimiento y modificación del proceso que representan gráficamente. En la etapa de diseño, el diagrama también ofrece la base para el desarrollo de esquemas de control del sistema, como el Análisis de Riesgos y Operabilidad” (Lucidchart, 2021).

En el caso de las instalaciones de procesamiento, se trata de una representación gráfica de:

- Los detalles clave de las tuberías e instrumentación
- Los esquemas de control y apagado
- Los requisitos de seguridad y normativa
- La información básica de arranque y operación (Lucidchart, 2021)

Capítulo III

3. Diseño e implementación del sistema virtual

Para el desarrollo del entorno virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID, se realizó una investigación de campo con profesionales del área de automatización y control, en donde se describe verbalmente el funcionamiento de los pozos petroleros, ya que no se puede enviar videos y fotos de los procesos en funcionamiento, y específicamente el proceso de Presión, además se revisa artículos, libros y páginas de petroleras de renombre para sustentar lo descrito, una vez conocido el proceso y con ayuda de planos P&ID del proceso de Separador Bifásico de Gas, se procede a analizar el proceso de presión a ser utilizado en el presente proyecto, editando algunas partes del diagrama para que sea funcional a la sintonización de los controladores que es el eje principal de la presente investigación y de la misma forma se revisa bibliografías de artículos científicos, libros, revistas y páginas web que aporten para lograr el objetivo de la investigación. Además, se tomará como herramienta fundamental para comprobar el modelo matemático de la planta de presión al “ident” de MATLAB, para luego realizar las pruebas del funcionamiento del modelo matemático y sintonía del controlador con UNITY y LabVIEW.

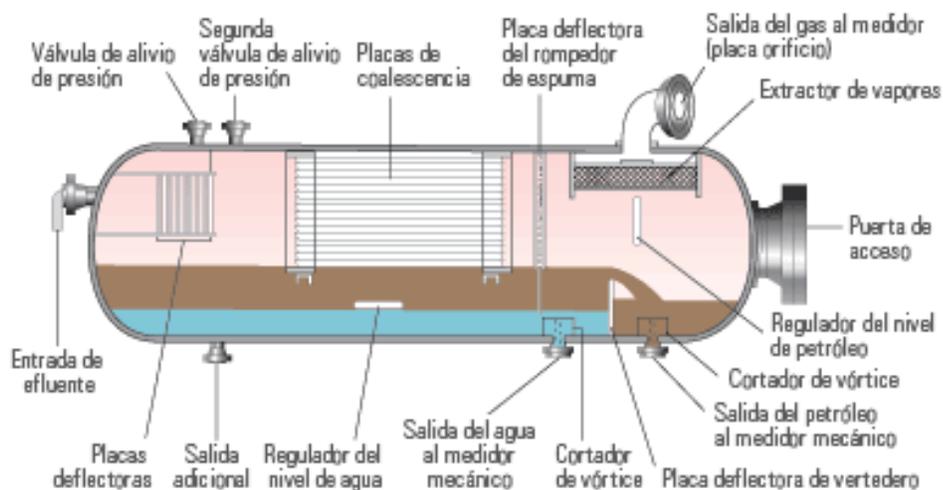
3.1. Funcionalidad del sistema físico

La obtención del crudo en los pozos de producción de la industria petrolera es lo que conlleva uno de los mayores ingresos económicos a nivel mundial, para la obtención de petróleo se realiza una perforación en el subsuelo en los cimientos de crudo, se ingresan tuberías y una bomba electro sumergible para poder sacar el petróleo, esta bomba se la puede omitir cuando existe la presión suficiente en la expulsión natural del crudo, una vez que el petróleo se encuentra en la superficie llega a

un área de manifold que es un arreglo de tuberías que recoge todo el petróleo de diferentes pozos productores y los lleva a la línea principal de crudo el cual sale con muchas impurezas por lo que se requiere ingresar a un separador trifásico o bifásico para tener un producto más puro, en el proceso de separadores trifásicos se separa el petróleo, el agua y el gas como se indica en la Figura 19, el separador calienta al petróleo para poder separar en la parte inferior el crudo en la mitad el agua y en la parte superior el gas, ahí se procede a transportar el crudo para una línea a otro separador acorde al nivel de pureza que este tenga, el agua de formación se almacena en tanques y como está contaminada se reinyecta al suelo para que ejerza presión en el subsuelo y los pozos cercanos puedan sacar todo el crudo, por último el gas se lo envía a los Flare para ser quemado y no contaminar mucho al medio ambiente con la emisión de los gases (Metano Propano y Butano) o para ser utilizado como combustible para el tema de generación eléctrica como un aporte a la generación pública y consumo en planta.

Figura 19

Separador trifásico horizontal



Nota. Separador Trifásico horizontal con todas sus partes. Recuperado de *Oilfield Glossary en Español*, Obtenido de separador horizontal por (Schlumberger, 2021).

Para el proyecto el punto de interés es en la parte del gas en donde se tiene un control en la presión del mismo y específicamente en la etapa a la salida del separador trifásico en donde todo el gas se va en un conjunto de manifold a una tubería principal de gas el cual se convertirá en la fuente de entrada del proceso, continúan el proceso de separadores para filtrar al gas y poder condensarlo, así lograr que sea más puro, esto con la ayuda de un separador bifásico, a la salida de este separador y acorde a la presión del gas, la válvula va actuar para enviar el gas al siguiente proceso, ya sea para enviar el gas a la generación o a los quemadores.

En Unity se va a replicar el control SISO de la presión de salida del gas del separador Bifásico a un Flare, el proceso del separador Trifásico solo queda como parte complementaria para indicar que es la fuente de presión del separador Bifásico.

3.2. Diagrama P&ID del sistema

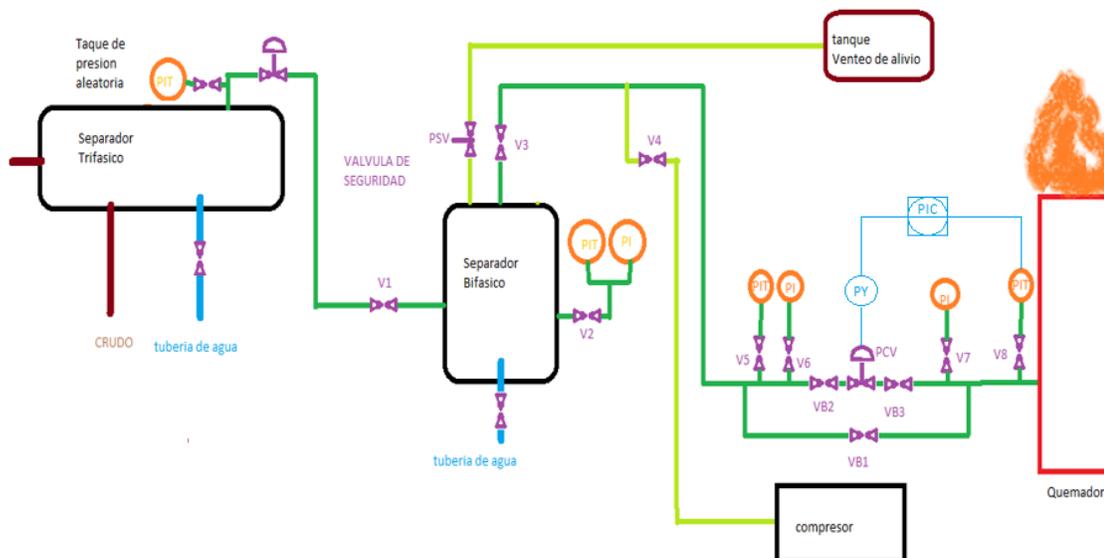
Se tiene el tanque V-3031 del separador bifásico con su instrumentación de presión, la entrada de gas proveniente del separador trifásico y a su salida se tiene tanto la válvula de seguridad como la tubería para el control de la presión del gas, la válvula normalmente cerrada que se dirige a los compresores se la toma como una válvula de carga. Se cumple con el proceso para el control de presión necesaria para que el gas llegue al quemador como se indica en la Figura 20.

- Ventesos a cabezal de alivio: Es el gas que se va cuando se excede la presión límite en el separador bifásico, este no se utiliza para el control solo va como referencia en la virtualización.
- Gas a compresor: es el gas que se utiliza para ser comprimido y luego ir a la etapa de generación, no tiene funcionalidad en la virtualización solo va como referencia
- Gas de Alivio a Antorcha: es el gas que se dirige al quemador a la salida del proceso de control.
- V1: Válvula tipo globo de ingreso del gas.
- V2, V5, V6, V7, V8: Válvulas tipo globo normalmente abiertas para salida de presión a instrumentos de medida.
- V3: Válvula tipo globo de salida del gas del separador
- V4: Válvula tipo globo normalmente cerrada para utilizarla como carga del sistema.
- VB1: Válvula tipo globo normalmente cerrada usada para bypass en caso de mantenimiento de la Válvula de control
- VB2, VB3: Válvula tipo globo normalmente abiertas usadas para bypass en caso de mantenimiento.
- PSV 3031A: Válvula de seguridad para alivio de presión.
- PCV 4001A: Válvula de control de presión.
- PIT 3031A, PIT 4001A, PIT 4001D: Transmisores indicadores de presión.
- PI 3031B, PI 4001B, PI 4001C: Indicadores de presión.
- PY 4001A: Conversor de Corriente a presión.
- PIC 4001A: Controlador de presión.

Una vez identificado cada parte del proceso se realiza un esquema en 2D como se indica en la Figura 21, esto servirá como guía de cómo se tiene que implementar tuberías e instrumentación en 3D.

Figura 21

Esquema 2D del proceso



3.3. Modelado matemático de proceso de primer orden más tiempo muerto

El proceso de presión cumple con la función matemática de primer orden más tiempo muerto por lo que se realiza un análisis a esta función. La función de transferencia en el dominio S (Laplace) de un proceso autorregulado de primer orden más tiempo muerto se lo presenta en la ecuación (3.1).

$$F(S) = K * \frac{e^{-L*s}}{T * s + 1} \quad (3.1)$$

Donde:

- K= Ganancia estática
- T= Variable del proceso al 63.2%
- L= Tiempo muerto

Para poder analizar la respuesta del proceso, la función se tiene que multiplicar por una función escalón como se indica en la ecuación (3.2):

$$G(S) = \frac{Cv}{s} * F(S)$$

$$G(S) = K * \frac{Cv}{s} * \frac{e^{-L*s}}{T * s + 1} \quad (3.2)$$

Donde

- K= Ganancia estática
- T= Variable del proceso al 63.2%
- L= Tiempo muerto
- Cv= Valor del escalón

Como la función obtenida se encuentra en el dominio S, se aplica la inversa de Laplace como se indica en la ecuación (3.3) para obtener la función en el dominio t como se indica en la ecuación (3.4).

$$f(t) = \mathcal{L}_s^{-1}(G(s)) \quad (3.3)$$

$$f(t) = \mathcal{L}_s^{-1}\left(K * \frac{Cv}{s} * \frac{e^{-L*s}}{T * s + 1}\right)$$

$$f(t) = \mathcal{L}_s^{-1}(K) * \mathcal{L}_s^{-1}(Cv) * \mathcal{L}_s^{-1}(e^{-L*s}) * \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right)$$

Para poder resolver de manera más fácil la transformada inversa de Laplace se tiene en cuenta el concepto de corrimiento en el tiempo el cual cumple para $\mathcal{L}_s^{-1}(e^{-L*s})$, se lo deja de lado por un momento para luego ser aplicado al final de la transformación.

$$f(t) = \mathcal{L}_s^{-1}(K) * \mathcal{L}_s^{-1}(Cv) * \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right)$$

$$f(t) = K * Cv * \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right)$$

Una vez que se encuentra en este punto se aplica fracciones parciales para sacar la inversa de Laplace de la función restante que está en forma de fracción.

$$\frac{1}{s * (T * s + 1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{Ts + 1}$$

$$1 = A * (Ts + 1) + Bs$$

$$1 = A * Ts + A + Bs$$

$$1 = A$$

$$0 = A * Ts + Bs$$

$$0 = Ts + Bs$$

$$B = -T$$

$$\mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right) = \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{A}{s} + \frac{B}{T * s + 1}\right)$$

$$\mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right) = \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s}\right) + \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{-T}{T * s + 1}\right)$$

$$\mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right) = \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s}\right) - \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{\frac{T}{T}}{\frac{T}{T} * s + \frac{1}{T}}\right)$$

$$\mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right) = \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s}\right) - \mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s + \frac{1}{T}}\right)$$

$$\mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right) = u(t) - e^{-\left(\frac{1}{T}\right) * (t)} u(t)$$

$$\mathcal{L}_s^{-1}\left(\frac{1}{s} * \frac{1}{T * s + 1}\right) = \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{T}\right) * (t)}\right) u(t)$$

Obtenida la transformada inversa de la fracción se procede a ingresar en la función f(t).

$$f(t) = K * Cv * \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{T}\right) * (t)}\right) * u(t)$$

Se aplica el corrimiento en el tiempo para obtener la función matemática de la respuesta de primer orden más tiempo muerto en el dominio t, y es la función matemática que se programa en Unity.

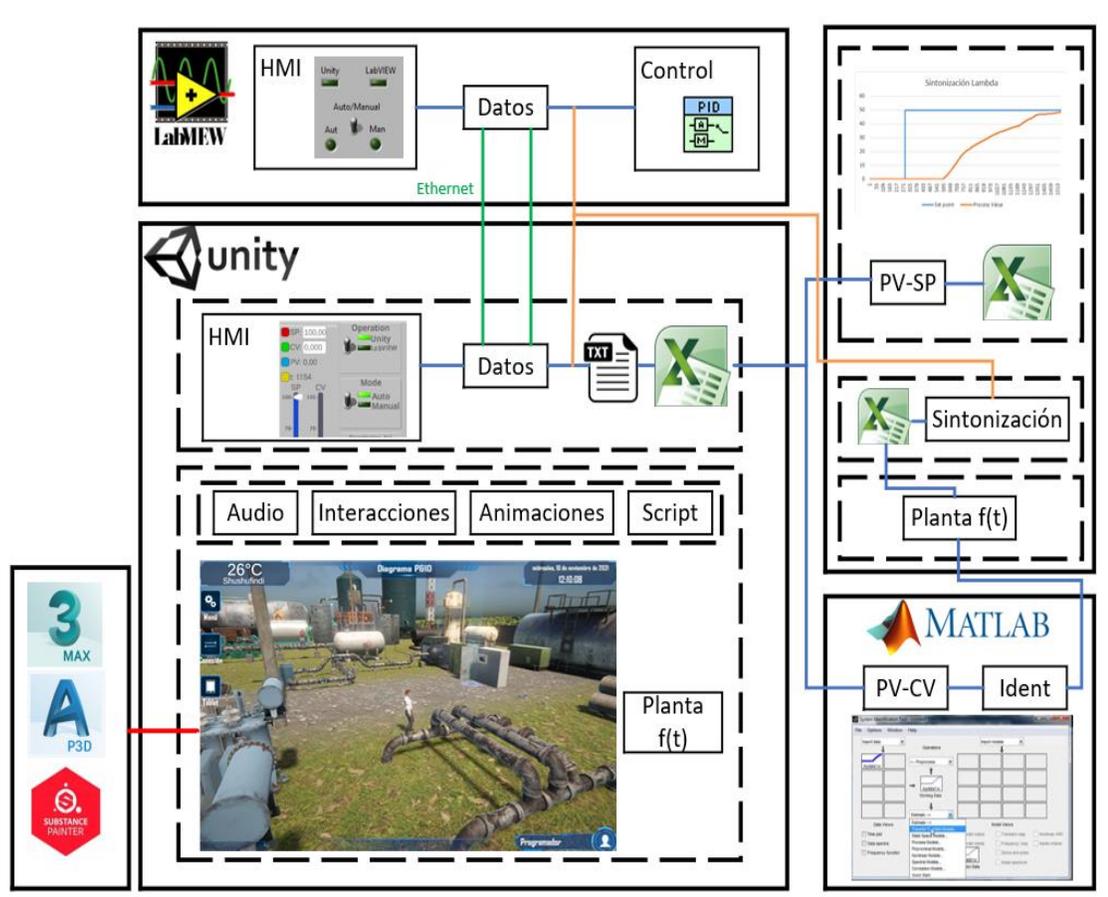
$$f(t) = K * Cv * \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{T}\right)*(t-L)} \right) * u(t - L) \quad (3.4)$$

3.4. Arquitectura del proyecto

La Arquitectura del Proyecto de forma general se muestra en la Figura 22, en donde se indica la interacción entre los diferentes Software empleados en el proyecto, así como la transmisión de datos entre LabVIEW – Unity para la obtención de las curvas de respuesta frente a los diferentes métodos de sintonización y finalmente la obtención del modelo matemático de la planta programada en Unity.

Figura 22

Arquitectura de la estación de presión



3.5. Desarrollo del sistema virtual 3D de la estación de control de presión

El desarrollo del sistema abarca 3 procesos principales:

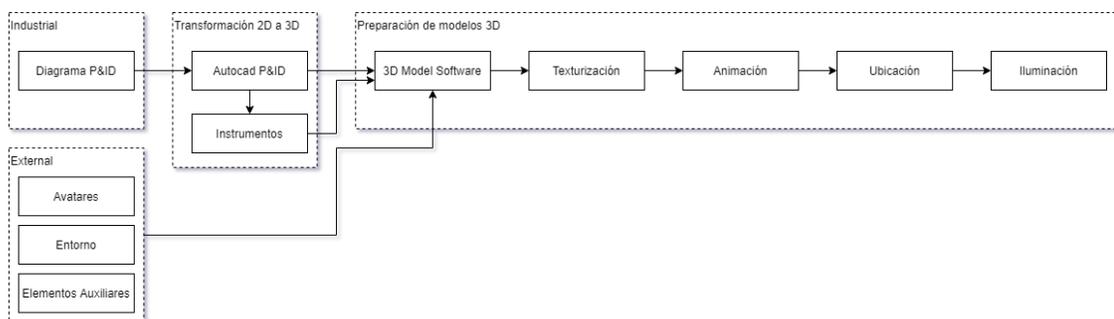
- Creación desde cero del entorno virtual
- Programación de los objetos dinámicos (instrumentos, gráficas, interfaz de usuario, etc.)
- Obtención, implementación y modificación en tiempo real del modelo matemático dentro del game-engine Unity.

3.5.1. Creación del entorno virtual

En este primer proceso, se representa las sub fases de desarrollo desde la obtención de modelos 3D directamente desde paquetes de software especializados y modelos prediseñados, que siguen un flujo de trabajo con objeto de ser perfectamente compatibles con el entorno de desarrollo de Unity como se lo puede observar en la Figura 23.

Figura 23

Diagrama de bloques para desarrollo en Unity

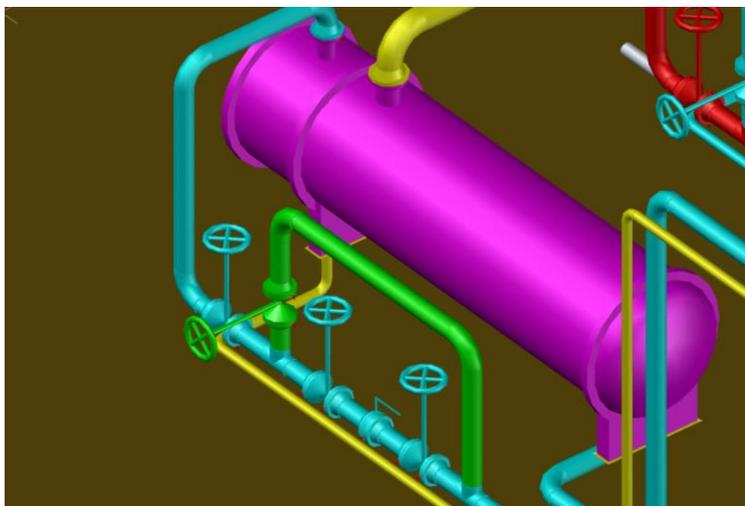


En el subproceso Industrial se ha tomado como base el uso del diagrama P&ID validado de la planta de una estación de control de presión (Figura 21). Este diagrama detalla la conexión de tuberías, instrumentos, sensores, visualizadores y controladores que permiten el funcionamiento de la estación de control de presión.

Utilizando el paquete de software AutoCAD P&ID se pretende la Transformación 2D a 3D de los elementos del diagrama para lo cual se dibuja en 2D el diagrama P&ID utilizando la amplia biblioteca de elementos e instrumentos (ISO, ANSI, etc.) disponibles en el software. Una de las principales funcionalidades de este programa es la capacidad de transformar el diagrama en 2D a una representación de modelos 3D de cada instrumento, tubería, tanques, etc. Como se puede observar en la Figura 24.

Figura 24

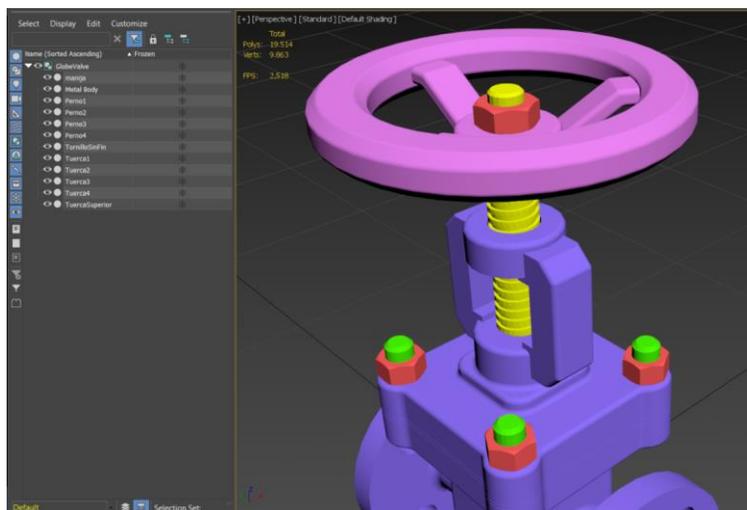
Diagrama en 3D de las tuberías



La colección de modelos 3D se pueden exportar con el formato *.DWG a un Software de Modelado 3D para su edición. Este paso es fundamental dado que el formato de archivo no es compatible para usarlo dentro de Unity, además de que se necesita texturizarlo para que su visualización sea lo más apegada a un instrumento funcional de uso real en campo. La edición estándar incluye la organización en jerarquía de los elementos individuales en elementos grupales con el fin de organización, fácil identificación y optimización de recursos Figura 25.

Figura 25

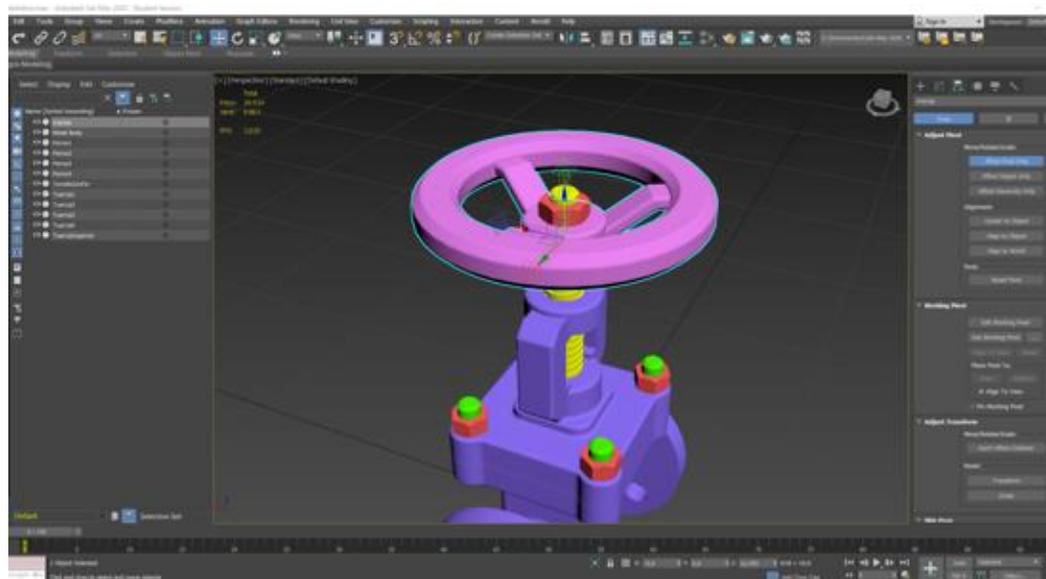
Organización jerárquica de los elementos de la válvula



Para los elementos que tienen movimiento mecánico como válvulas e indicadores analógicos es necesario aislar la pieza móvil y designar su punto de pivote ideal para el movimiento Figura 26.

Figura 26

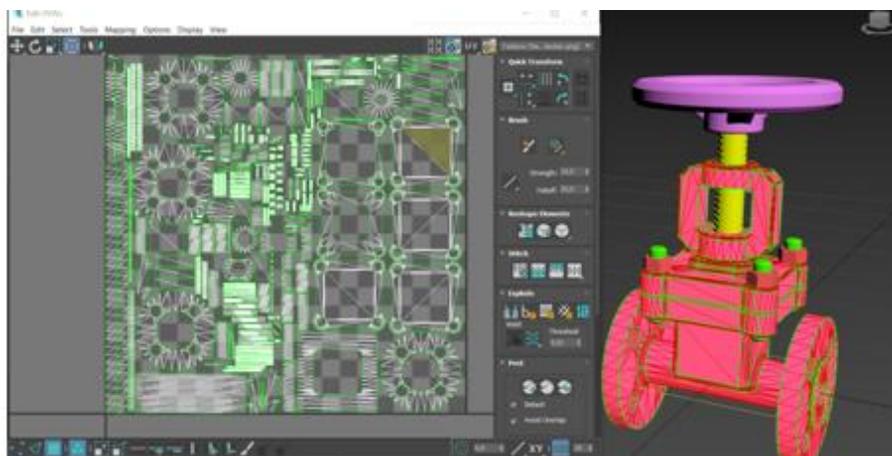
Asignación de puntos de pivote en la válvula



La edición de mapas UV (malla) y separación de materiales por piezas o secciones como se indica en la Figura 27, es mandatorio en virtud del siguiente proceso, la texturización.

Figura 27

Edición de mallas de la válvula



En el subproceso de Texturización se importa el modelo 3D en formato *.FBX hacia el editor Substance Painter el cual permite la texturización de modelos 3D acorde a sus materiales y orientación de mapas UV. Una vez concluida las tareas de pintura 3D se procede a la exportación de las texturas para los canales albedo, metallic y normal utilizando los perfiles prediseñados para Unity en el menú de exportación Figura 28.

Figura 28

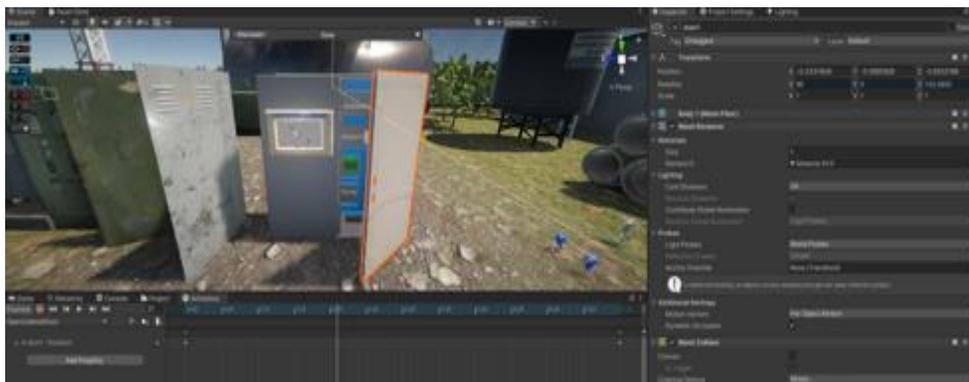
Texturización de la válvula



Con los modelos texturizados se importan al entorno de Unity para los subprocesos de Animación y Ubicación. Para los modelos que cuentan con movimiento mecánico no preciso como puertas de paneles de control, barras de acceso al complejo, se usa la herramienta de animación estándar de Unity. Y con el uso de una variable trigger para activar y restablecer su movimiento Figura 29.

Figura 29

Animación de objetos con el uso de animation



Para los modelos 3D que requieran movimiento preciso como: la apertura y cierre de válvulas y la visualización de presión en indicadores analógicos, se realizará el movimiento por código dependiendo del rango de movimiento de la pieza móvil y la magnitud a expresarse en ese movimiento Figura 30.

Figura 30

Animación de objetos a través de código



En caso de que los modelos sean estáticos como tuberías, tanques y/o paneles de control y no requieren animación, se realiza el subproceso de ubicación dentro del entorno, siguiendo las normativas de seguridad de una planta en el terreno real como se indica en la Figura 31.

Figura 31

Ubicación de elementos en el campo



Como paso final se realiza la Iluminación del entorno en lugares donde la luz direccional ambiental no sea suficiente. El baking se lo realiza únicamente cuando todos los objetos se encuentran en la ubicación deseada. En zonas en las cuales la luz ambiente no se refleja correctamente se puede utilizar ProbeLights para optimizar y redirigir las luces del entorno como se indica en la Figura 32.

Figura 32

Ubicación de Iluminación del entorno

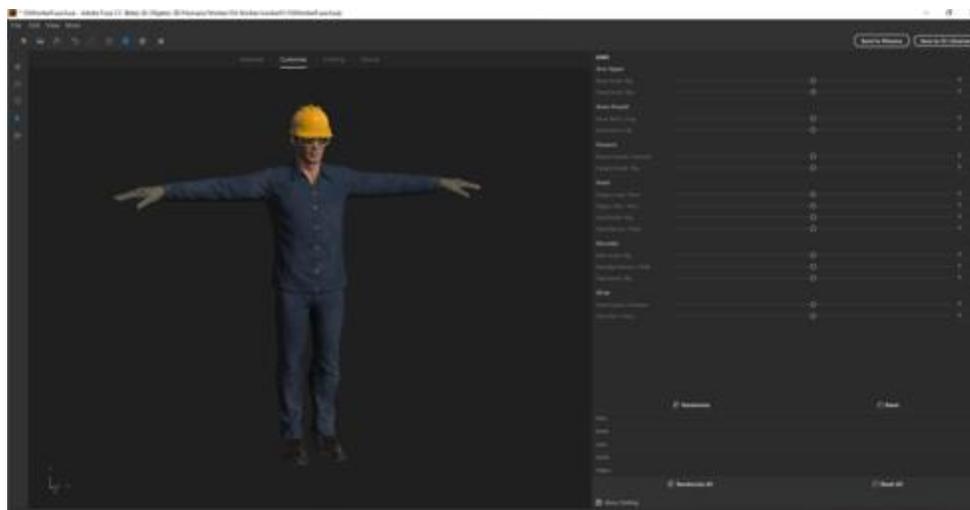


El proceso Preparación de Modelos 3D tiene que ser utilizado de manera obligatoria para cualquier Asset externo que se requiera dentro del entorno como avatares, modelos 3D para el entorno como árboles, rocas, suelo, etc.

Los avatares para el rol de visitante, ingeniero, supervisor y programador se crearon utilizando el paquete de software Adobe Fuse por su facilidad de creación y exportación de modelos en formato FBX y de tamaño liviano. Para la animación de locomoción se usó mixamo por su compatibilidad con los modelos de Adobe Fuse y su tamaño pequeño en clips de animación Figura 33.

Figura 33

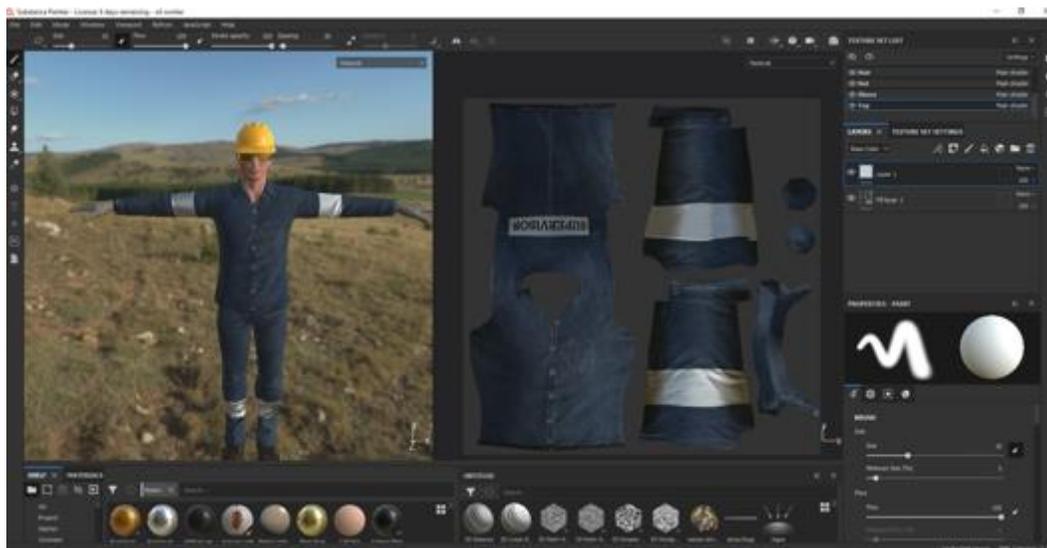
Creación y animación de avatar



En caso de cambios y edición en las texturas de la ropa de los avatares es muy útil las brochas presentes en Substance Painter Figura 34.

Figura 34

Edición de ropa para avatar

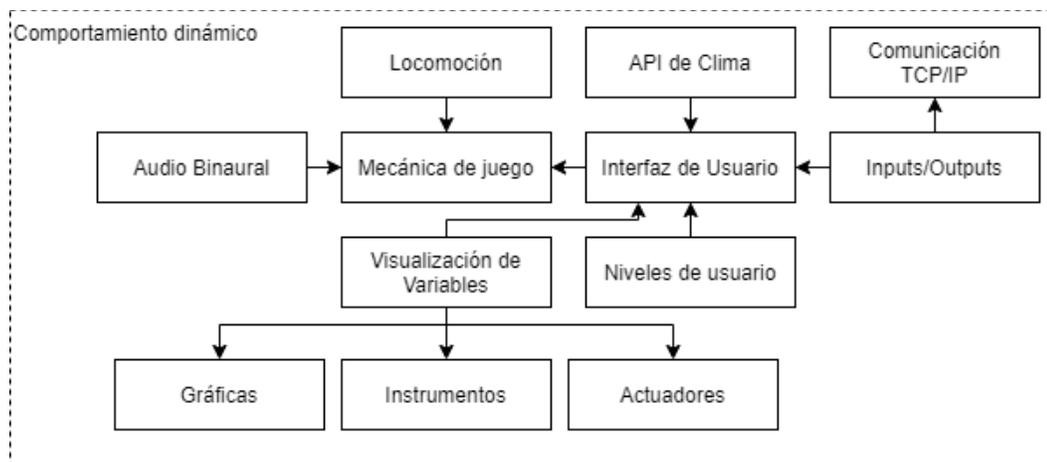


3.5.2. Programación del comportamiento dinámico

Con los objetos estáticos y dinámicos en la ubicación deseada es necesario programar el comportamiento que tendrá el usuario, variables y procesos dentro del entorno virtual. Las funciones que abarcan los comportamientos a implementar en el entorno se visualizan como bloques interconectados en la Figura 35. Cabe recalcar que para el funcionamiento de cada bloque puede requerir entre 1 y varios scripts organizados en clases, controladores, y visualizadores de datos.

Figura 35

Diagrama de bloques del comportamiento dinámico de los objetos



- **Interacción por proximidad con el objeto.** - Ejecuta una acción cuando el avatar se acerca a un punto de interés. Por ejemplo, cuando el avatar quiere visualizar los datos en el Panel View, se acerca al panel y se maximiza la visualización para que el usuario pueda interactuar con los controles del Panel View.
- **Locomoción.** - que refiere a la forma de traslado de un lugar a otro dentro del entorno, que en este caso se lo realiza caminando y subiendo escaleras para alcanzar las tareas predeterminadas.
- **Audio Binaural.** - trata acerca de la reproducción de efectos de sonido en 3D que produce el entorno natural, máquinas en funcionamiento, alarmas, etc. Al escuchar uno de estos efectos el usuario puede identificar la dirección de origen del ruido, esta característica es muy útil para tener un acercamiento al entorno real.
- **Interfaz de Usuario.** - permite al usuario interactuar de forma inmediata con la aplicación ingresando datos, manipulando sliders, vitalizando gráficas, cambiar el sentido de control entre Unity y LabVIEW, etc.
- **API de Clima.** - se encarga de consultar la información climática de un lugar en especial por ejemplo de Shushufindi, lugar donde se ubican las plantas en campo. Esta

información se despliega en la UI como parte de la información básica presentada al usuario.

- **Comunicación TCP/IP.** - Este bloque permite el envío y recepción de variables de entrada y salida a través de un canal bidireccional TCP/IP con LabVIEW donde se ha implementado el controlador de la planta.
- **Inputs/Outputs.** - Toma el funcionamiento de un Hub de datos para que los scripts que desean obtener datos los lean y los que deseen enviar puedan hacerlo sin tocar ningún componente del bloque de comunicación TCP/IP
- **Niveles de usuario.** – Administra los privilegios que cada usuario tiene acorde a su elección entre Ingeniero, Supervisor y Programador. Dependiendo cada nivel de seguridad se puede bloquear el acceso al cambio de variables, SP, formas de control, etc.
- **Visualización de variables.** – Este módulo se encarga de expresar las variables numéricas en indicadores textuales (labels), indicadores mecánicos (válvulas, actuadores), y utilizando gráficas en tiempo real/históricas.

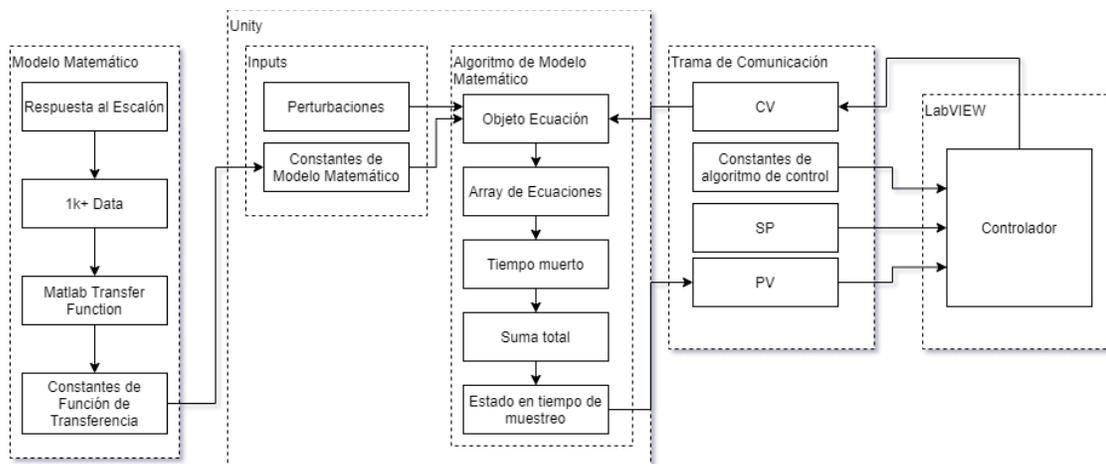
Todos los bloques que comprenden el comportamiento dinámico logran que la interacción, obtención y manipulación de datos provoquen un entorno en el cual varios escenarios son posibles. Escenarios de entrenamiento para un nuevo operador y/o estudiante en situaciones de control ideal, desbordamiento de variables, peligro inminente, etc.

3.5.3. Algoritmo de modelo matemático y control con LabVIEW

La obtención del modelo matemático en Matlab, la implementación del modelo como un algoritmo en C# y la comunicación con el control implementado en LabVIEW. Los dos últimos como un proceso en lazo de ejecución infinita para el control de presión como se indica en la Figura 36.

Figura 36

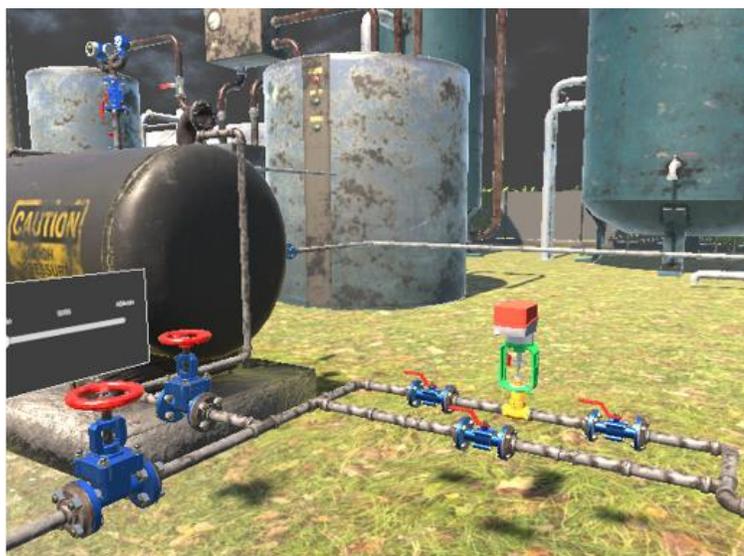
Diagrama de bloques para algoritmo de control y modelo matemático



Dado que el modelo matemático se ejecuta en Unity y el controlador en LabVIEW representa un avance de consideración de elementos “vivos” dentro de entornos virtuales, dado que el control reacciona a perturbaciones generadas en el entorno virtual las cuales pueden ser deliberadamente concebidas o son resultado de escenarios adversos como desbordamiento de la variable de control, ruptura de tuberías, etc.

Figura 37

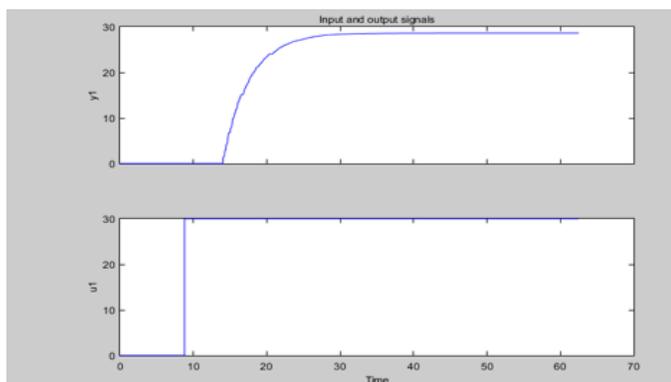
Planta de presión 3D en Unity



En el subproceso de Modelo Matemático se pretende utilizar el software matemático MATLAB para obtener el modelo matemático de la planta de presión utilizando datos de SP y PV captados directamente desde el proceso como respuesta al escalón. Se tomaron 2000 datos para una mejor resolución de las gráficas SP/PV como se indica en la Figura 38.

Figura 38

Datos de prueba del modelo matemático



Se usó la función `ident` de MATLAB la cual se especifica de mejor manera en el Capítulo IV y es para obtener un modelo matemático de la forma: función de primer orden más tiempo muerto.

Con esta forma de función de transferencia en el dominio s típica de un proceso de presión se tiene en consideración 3 constantes que tan solo con su reemplazo cambian el comportamiento del modelo matemático ante el mismo SP.

El reto para implementar esta TF en C# consiste en cambiarla al dominio del tiempo para lo cual se utiliza la transformada inversa de Laplace y se relacionan las constantes del dominio S con las del dominio t , dando como resultado una ecuación manipulable desde Unity.

En comparación con la TF en dominio S se observa que las constantes han cambiado de lugar de operador y que se mantienen en su valor inicial. Lo cual muestra una forma de cambiar el valor de las variables sin necesidad de calcular nuevamente la

Transformada Inversa de Laplace lo cual evita el consumo de recursos de CPU en cada cambio de variables.

Para la Implementación de la TF en dominio t dentro del entorno de Unity se necesita tomar en cuenta varios aspectos del comportamiento de esta TF cuando sus inputs se modifican y el controlador responde:

- **Cambio de SP.**- El cambio de SP representa la entrada de la función de transferencia que difiere del valor que se calcula en una única ejecución para lo cual se realiza la resta del valor actual de SP con el nuevo valor de SP y se toma en cuenta como input la diferencia de estos valores. Cada resta se la realiza en cada tiempo de muestreo que en este caso es cada 100ms.
- **Instancia de TF.** - En cada tiempo de muestreo es necesario crear una instancia de la ecuación para que su comportamiento se ejecute sin importar cambios del SP.
- **Sumatoria de las Instancias.** - Para obtener el resultado total es necesario crear una sumatoria de todas las instancias sin importar si la instancia ya ha llegado a la estabilidad. La suma de todas las instancias dará como resultado el status actual de la planta.
- **Compatibilidad con perturbaciones.** - Los valores de perturbación se pueden restar directamente al valor total de la sumatoria en la cual se verificará el comportamiento del controlador.

Dentro de la trama de comunicación se diferencia la trama de envío y de recepción donde se envían las variables SP, PV, CV, Kc, Ti, Td, Control desde, Tipo de control, esta trama se envía por el canal de comunicación TCP/IP abierto desde Unity y recibido en LabVIEW y el controlador se encuentra programado en LabVIEW y recibe el dato de PV proveniente del modelo matemático, reacciona al nivel de SP y envía como respuesta un valor de CV el cual afectará directamente al modelo matemático creando un lazo cerrado de control.

3.6. Diseño del entorno de la planta

El entorno virtual está diseñado en un ambiente selvático petrolero, que ayuda al usuario a enrolarse más con el entorno real. Teniendo una perspectiva del lugar de trabajo y ubicación de la instrumentación. El entorno creado se lo puede observar en las Figuras 39, 40 y 41 que son: vista frontal, vista izquierda y vista derecha de la planta.

Figura 39

Entorno virtual de la planta al ingreso



Figura 40

Entorno virtual de la planta vista izquierda



Figura 41

Entorno virtual de la planta vista derecha



En la pantalla del entorno virtual se dispone de un botón de Ajustes como se indica en la Figura 42, el cual despliega algunas funciones que se indican en la Figura 43 y son:

- **FPS.** – Muestra la cantidad de cuadros por segundo a la cual se está renderizando en tiempo real el escenario virtual y la interacción del usuario con las funcionalidades del entorno. Idealmente se requiere 60 fps para observar fluidez en la interacción con los objetos del entorno.
- **Nature.** – Muestra u oculta la Naturaleza existente en el entorno virtual.
- **Instrumentation.** – Muestra u oculta la instrumentación existente en el entorno virtual.
- **Buildings.** – Muestra u oculta las construcciones existentes en el entorno virtual.
- **Industry.** – Muestra u oculta los equipos industriales existentes en el entorno virtual.
- **Reset.** – Reinicia todos los cambios realizados en el entorno virtual.
- **Guardar.** – Guarda los cambios realizados en el entorno virtual.

Figura 42

Botón de ajustes en entorno virtual

**Figura 43**

Funciones del botón de Ajustes



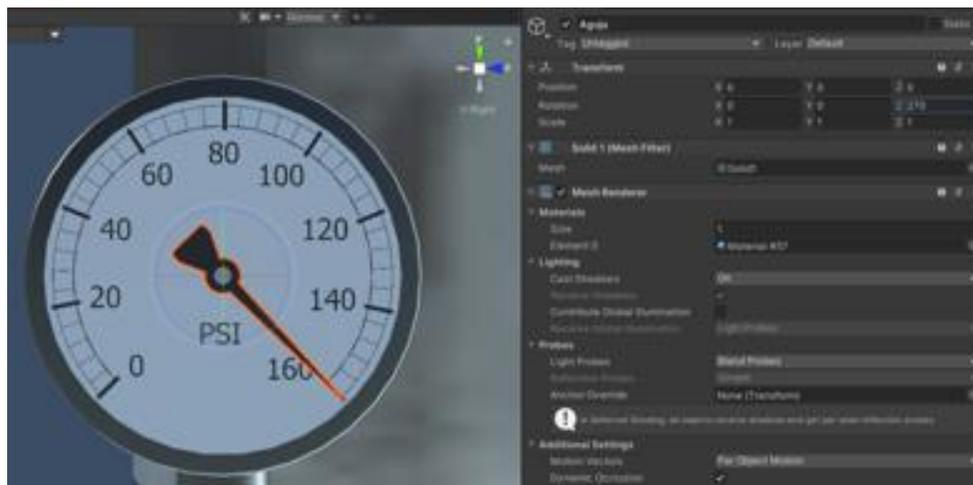
3.7. Implementación de instrumentos

La etapa de programación de instrumentos permite que el dispositivo pueda emular las funcionalidades de su par en el campo real. En este desarrollo se ha tenido en cuenta: instrumentos de visualización mecánicos: manómetros; actuadores manuales: válvulas de globo y de manija; además de dispositivos más complejos como pantallas touch: Panel View Plus 600.

Manómetro. - El funcionamiento de este medidor de presión comprende una aguja que marca la presión que circula por una tubería mediante una escala circular en sentido horario como se indica en la Figura 44. La programación se enfoca en la rotación de la aguja a lo largo de la escala graduada linealmente. El trayecto entre el inicio y el fin de la escala comprende 270° y el algoritmo de movimiento rige que la totalidad de la escala graduada se divida para 270° de recorrido angular. Dando como lugar a un valor de rotación por cada unidad de PSI que ingrese al algoritmo.

Figura 44

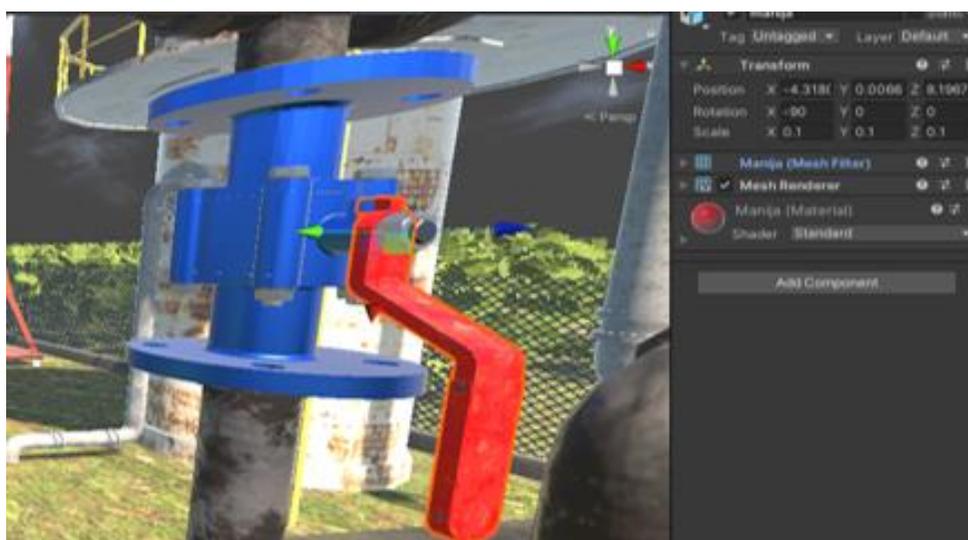
Manómetro analógico



Válvulas de Globo. – En el caso de este instrumento, el usuario interactúa con la válvula para modificar una variable determinada, en este caso específico la presión, accionando de forma circular el volante en sentido horario para cerrar y en sentido anti horario para abrir el paso de presión en la tubería como se indica en la Figura 45. Para lograr un control lineal del movimiento se usa un elemento slider para linealizar la escala de 0-100% donde 0 se asocia con cerrado y 100 con abierto. Para afectar la variable de presión en este caso la escala se traduce al 0-10% del CV y a su vez restar del valor original de CV, dando como lugar a representar la perturbación del sistema.

Figura 45*Válvula tipo globo*

Válvulas de Bola (Manija). – Esta válvula es muy similar a la válvula de globo dado que se usa para permitir y bloquear el paso de la variable por la tubería. La manija cambia de posición entre 0-90° y abierto-cerrado respectivamente la cual se indica en la Figura 46. Para afectar la variable es necesario realizar la operación de multiplicación a la variable antes de la válvula y que la variable afectada salga después de la posición de la válvula.

Figura 46*Válvula tipo bola*

Panel View Plus 600. – El dispositivo pantalla touch cumple su funcionamiento como graficador de las variables controladas y a controlar. En este entorno se utiliza para mostrar varias pantallas de información, visualización y control de variables. Utilizando un Canvas en Coordenadas Globales se pueden añadir varios paneles como contenedores de pantallas. Utilizando botones se puede lograr el control de screens. Para el control se utilizan sliders e inputtext. Pero la interfaz por default que utiliza Unity no tiene el estilo gráfico que se utiliza en aplicaciones industriales de campo.

LabVIEW es el software profesional utilizado para enseñanza y en el campo industrial final; como objeto se tiene la finalidad de asimilar el estilo gráfico dentro del Panel View en el entorno virtual para lo cual se debe modificar los assets de interfaz de usuario con los assets de LabVIEW. Los assets utilizados son: botones, switch, sliders, indicadores led y gráficas.

Para los botones, se necesita editar el elemento original de UI, button. Se necesita editar el apartado gráfico o sprite asociado al botón. Se obtiene el sprite desde una captura del botón desde la interfaz de LabVIEW.

Figura 47

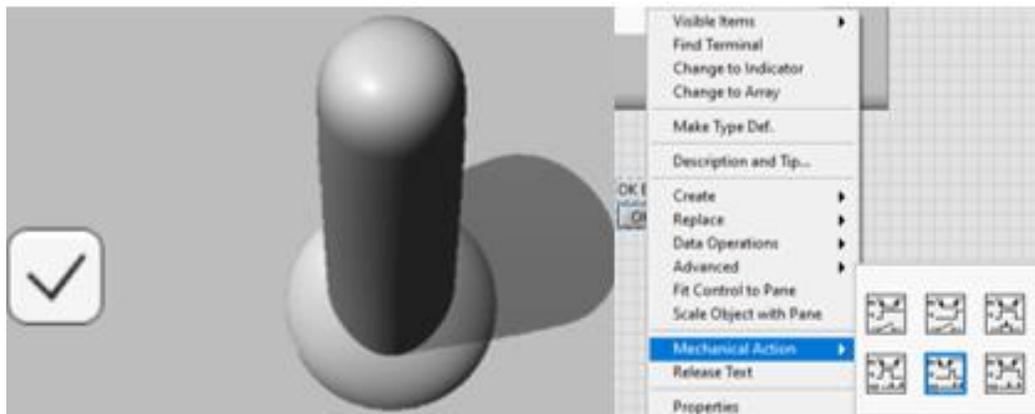
Botones de panel view: A la izquierda, botón clásico de Unity, derecha botón modificado con apariencia LabVIEW



En este caso se utilizará un botón de switch que al presionarlo se activa un evento, en caso de cambiar la funcionalidad, es necesario implementar por código la acción mecánica seleccionada en LabVIEW.

Figura 48

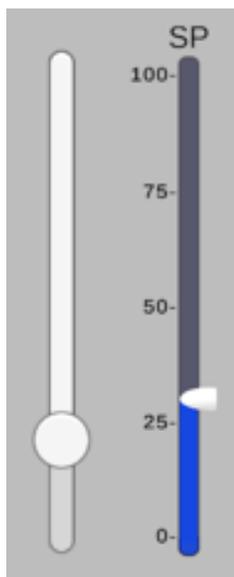
Switch de panel view y tipos de acciones mecánicas que un botón de LabVIEW puede tener



Los sliders o selector lineales por default de Unity contienen un diseño sin visualización de escala y con un selector ambiguo para seleccionar con exactitud un valor. Por tanto, es necesario implementar la escala y un selector más preciso de la misma forma que ofrece LabVIEW.

Figura 49

Slider de panel view: a la izquierda, slider clásico de Unity, derecha slider modificado con apariencia LabVIEW



Los Indicadores se obtienen a partir del componente Image del canvas, es necesario realizar una captura del botón en LabVIEW con el color deseado en los dos estados: encendido y apagado.

Figura 50

Indicadores led de panel view



Las gráficas se han configurado a modo de ubicar punto a punto el valor de cada variable en función del tiempo en el cual ha sido calculada formando así una línea que varía en función del tiempo. También se tiene la configuración de historial de las gráficas, la cual consiste en imprimir todos los valores calculados desde el primer dato con el fin de visualizar el comportamiento global de cada una de las variables.

3.8. Diseño del proceso de presión

El proceso de presión 3D que se encuentra diseñado acorde al modelo 2D de la Figura 21, y para una visualización de cada etapa del proceso de presión se lo dividido en 5 partes:

- Separador trifásico, alimentador de presión (Figura 51), consta con su instrumentación y acceso por gradas para su visualización.

Figura 51

Separador trifásico y su instrumentación



- Separador bifásico (Figura 52), consta con su instrumentación y acceso por gradas para su visualización.

Figura 52

Separador bifásico y su instrumentación



- Tanque de venteo de alivio (Figura 53), con su válvula de seguridad.

Figura 53

Tanque de venteo de alivio



- Compresor (Figura 54)

Figura 54

Compresor con válvula para simulación de perturbaciones.



- Quemador de gas (Figura 55)

Figura 55

Quemador de gas y su instrumentación.



3.9. Selección de usuarios en el entorno

Para movilizarse dentro del entorno virtual existe la posibilidad de seleccionar 4 tipos de usuarios como se indica en la Figura 56, cada usuario desempeña funciones diferentes las cuales se especifican en la Tabla 8.

Tabla 8

Funciones de usuarios

Nivel de usuario/ Funciones	Visualizar Variables	Cambios					
		SP	CV	Kp Ti Td	Constantes del Modelo matemático	Control (manual- automático)	Operación (Unity- MATLAB)
Visitante	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Ingeniero	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Supervisor	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Programador	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 56

Selección de usuario a ingreso de garita



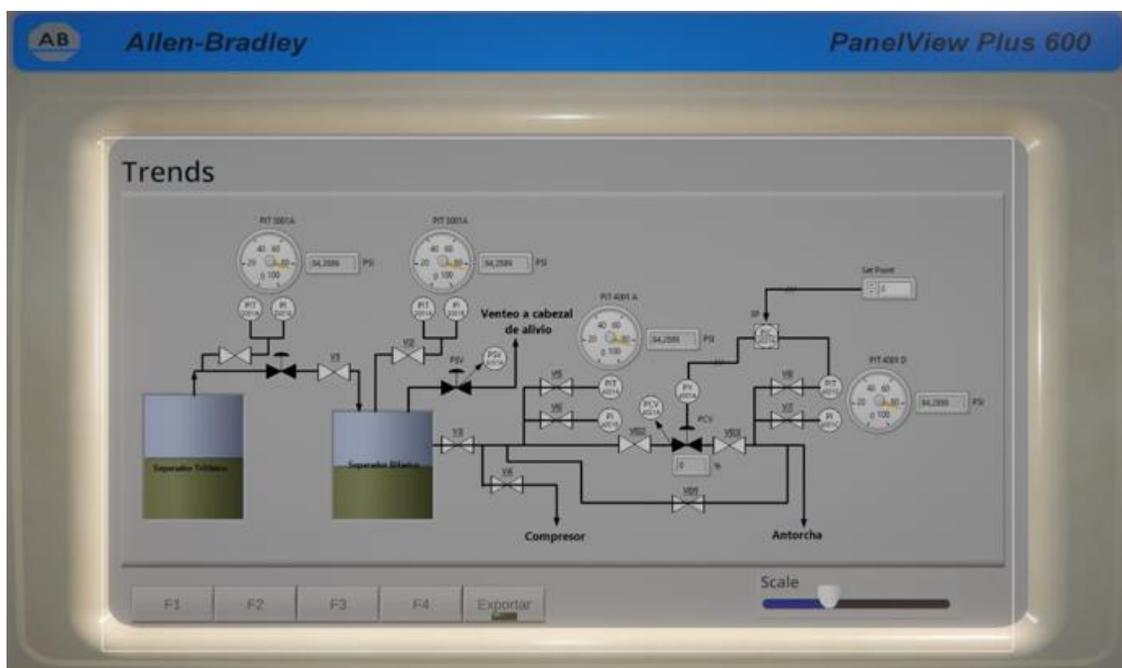
3.10. HMI en Unity3D

El HMI de Unity diseñado para simular una pantalla Allen Bradley Panel View Plus 600, consta de 5 ventanas las cuales se indican a continuación:

- Tecla F1. – Permite visualizar una representación gráfica del P&ID del proceso de presión como se indica en la Figura 57, aquí se observa la interacción de las variables en el proceso.

Figura 57

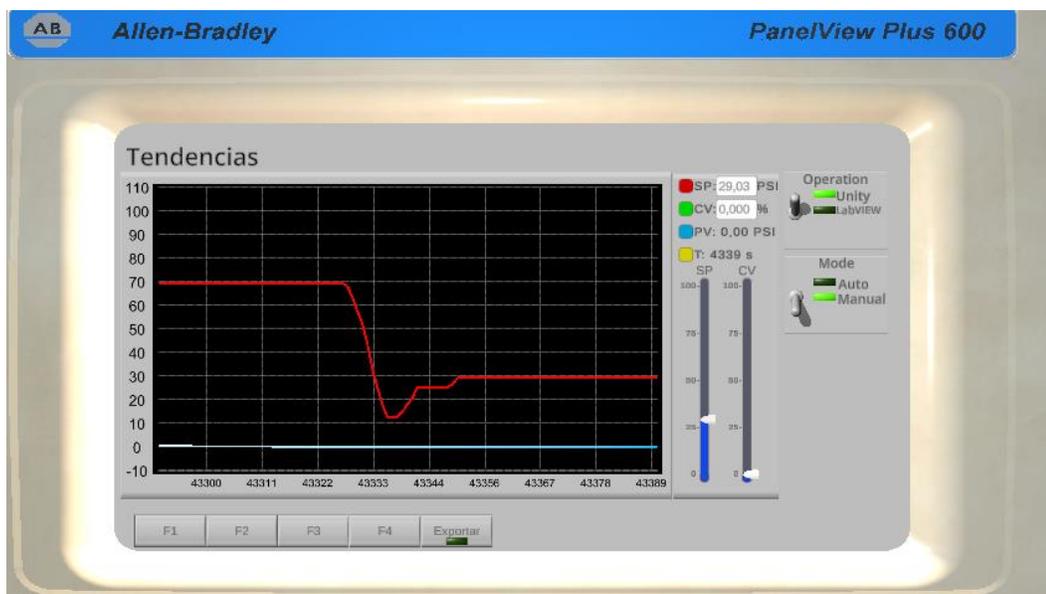
Pantalla de representación gráfica del P&ID en Unity



- Tecla F2. – Permite visualizar la tendencia del proceso y el control de la variable como se indica en la Figura 58, aquí se puede variar el control ya sea desde Unity o LabVIEW el modo de control automático o manual, variación de SP – CV y el ingreso de las constantes del PID.

Figura 58

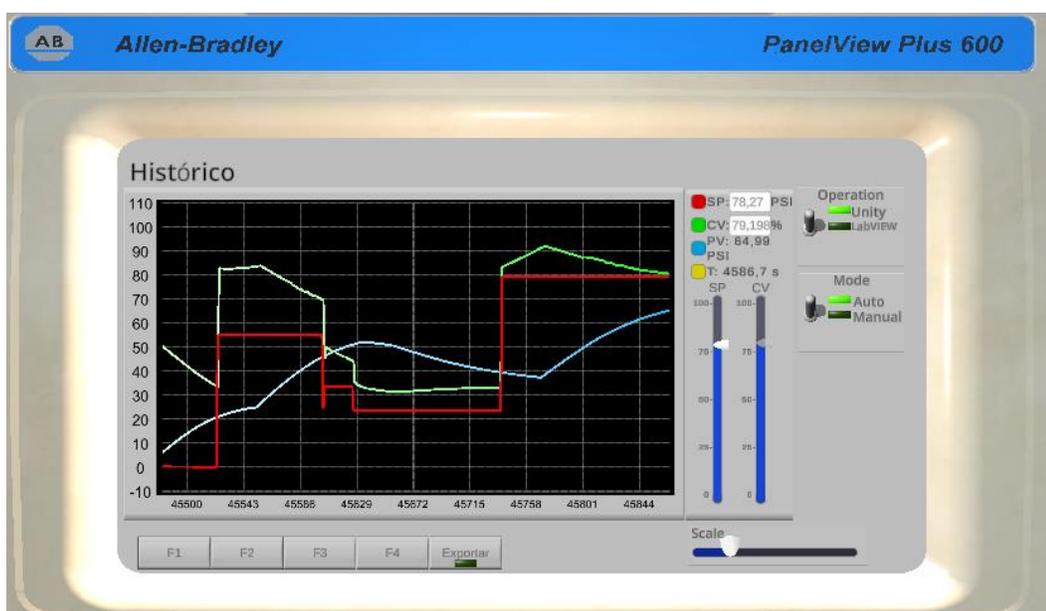
Pantalla de tendencia del proceso en Unity



- Tecla F3. – Permite visualizar el Histórico del proceso como se indica en la Figura 59, aquí se puede variar la cantidad de datos mostrados en pantalla a través de un slider.

Figura 59

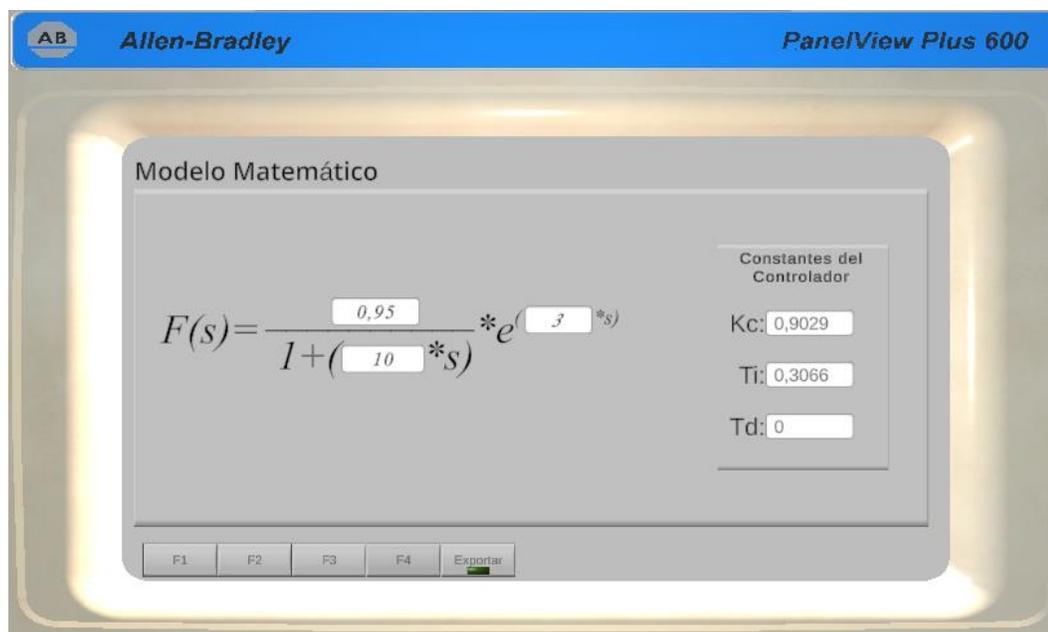
Pantalla del histórico del proceso en Unity



- Tecla F4. – Permite visualizar y editar el modelo matemático de la planta, así como el ingreso de las constantes del controlador como se indica en la Figura 60, se puede ingresar otros parámetros de la función de transferencia.

Figura 60

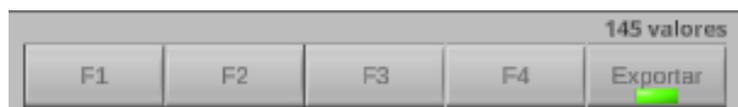
Pantalla del modelo matemático y constantes PID



- Tecla Exportar. – Permite exportar los datos de SP, PV y CV a un formato tipo .txt como se indica en la Figura 61, los datos son grabados en la dirección: Diagrama P&ID_Data\StreamingAssets, carpeta en donde se encuentra el proyecto ejecutable

Figura 61

Tecla para exportar datos



3.11. Función de Tablet

En el entorno existe un botón con la funcionalidad de Tablet, el cual permite tener las mismas pantallas que tiene la Touch y se lo puede abrir desde cualquier lugar en el entorno, fue creado para tener una mejor visualización cuando se encuentre cerca de los instrumentos y poder notar el cambio de variables o de set point en el proceso, en la vida real se lo puede relacionar como un servidor web que permite el acceso de la Tablet al proceso.

Figura 62

Función de Tablet



3.12. Desarrollo del HMI en LabVIEW

En el Software de LabVIEW también se recrean algunas pantallas similares al proceso de simulación que tiene como ejemplo el propio Software y se lo describe a continuación:

- **Pantalla de Presentación.** – Es solo de visualización del tema del proyecto y ejecutor del mismo como se indica en la Figura 63.

Figura 63

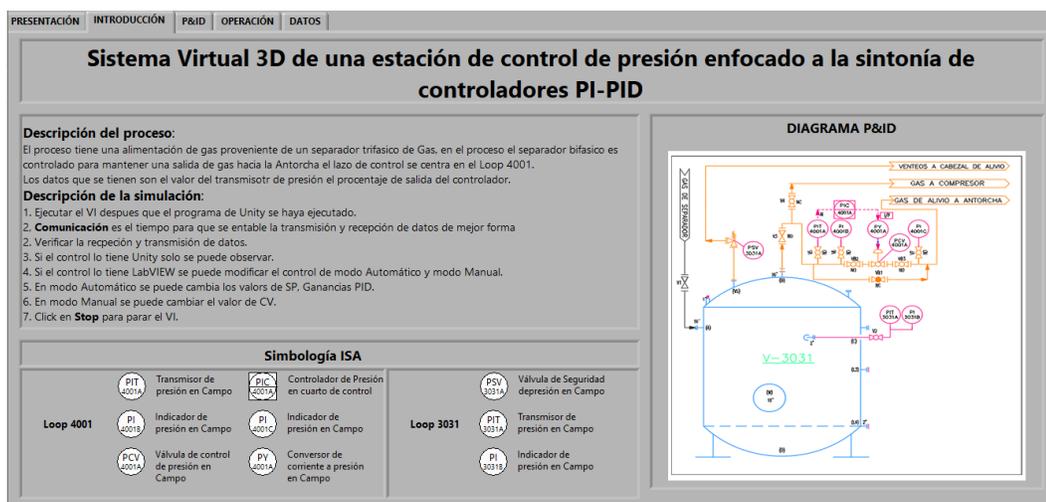
Pantalla de presentación en LabVIEW



- **Pantalla de Introducción.** – Se presenta una breve descripción del proceso e instrumentación que existe en el mismo como se indica en la Figura 64.

Figura 64

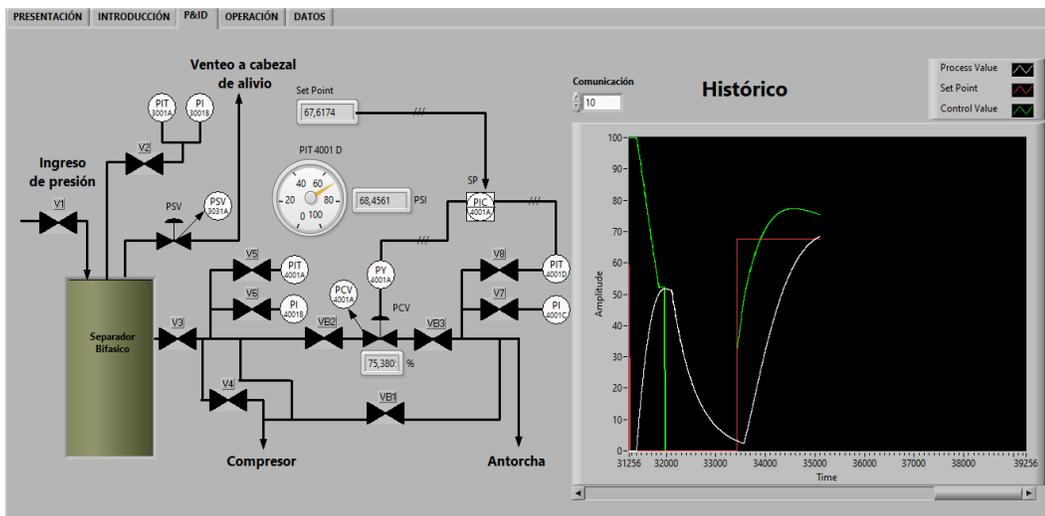
Descripción del proceso en LabVIEW



- **Pantalla P&ID.** – Se tiene una representación gráfica del P&ID del proceso de presión como se indica en la Figura 65, aquí se observa la interacción de las variables en el proceso.

Figura 65

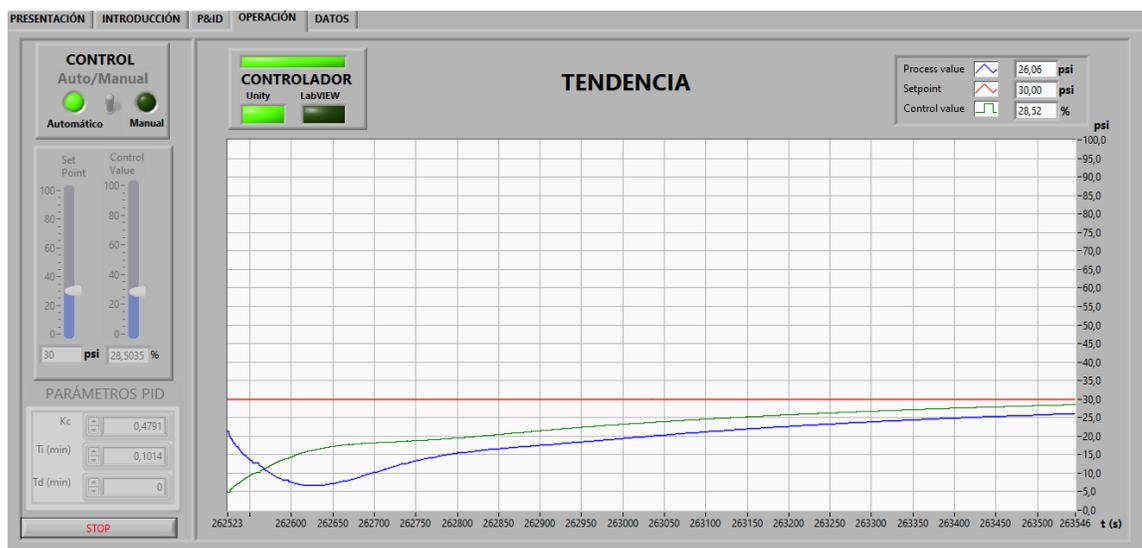
Pantalla de representación gráfica del P&ID en LabVIEW



- Pantalla de Operación.** – Permite visualizar la tendencia del proceso y el control de la variable como se indica en la Figura 66, aquí se puede variar el modo de control automático o manual, variación de SP – CV y el ingreso de las constantes del PID, siempre y cuando Unity seda el control a LabVIEW.

Figura 66

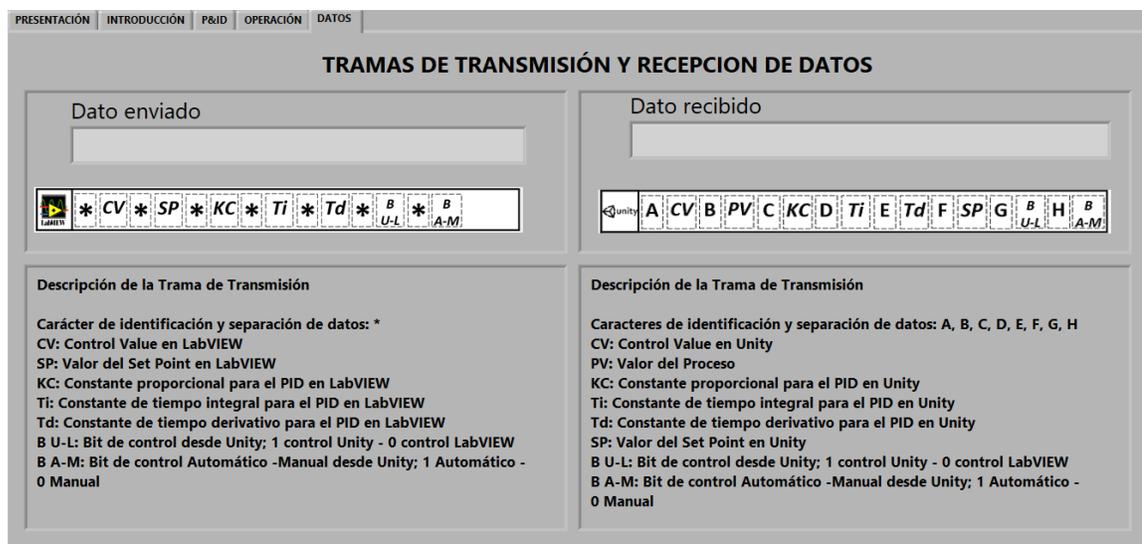
Tendencia y control desde LabVIEW



- **Pantalla de Datos.** – Aquí se puede observar las tramas de transmisión y recepción de datos en tiempo real como se indica en la Figura 67, además posee una breve descripción de cómo está conformada la trama.

Figura 67

Tramas de transmisión y recepción de datos en LabVIEW



3.13. Creación de tramas de transmisión y recepción de datos

Un aspecto muy fundamental son las tramas de transmisión y recepción de los datos, ya que es aquí donde se encuentra toda la información del proceso la cual es utilizada para graficar y controlar el proceso de presión.

La trama de transmisión de Unity se encuentra conformada de la siguiente forma:

Figura 68

Trama de transmisión de datos desde Unity



- Caracteres de identificación y separación de datos: A, B, C, D, E, F, G, H
- CV: Control value en Unity

- PV: Valor del Proceso
- KC: Constante proporcional para el PID en Unity
- Ti: Constante de tiempo integral para el PID en Unity
- Td: Constante de tiempo derivativo para el PID en Unity
- SP: Valor del set point en Unity
- B U-L: Bit de control desde Unity; 1 control Unity – 0 control LabVIEW
- B A-M: Bit de control Automático -Manual desde Unity; 1 Automático - 0 Manual

La trama de Recepción de Unity que es enviada desde LabVIEW se encuentra conformada de la siguiente forma:

Figura 69

Trama de transmisión de datos desde LabVIEW



- Carácter de identificación y separación de datos: *
- CV: Control value en LabVIEW
- SP: Valor del set point en LabVIEW
- KC: Constante proporcional para el PID en LabVIEW
- Ti: Constante de tiempo integral para el PID en LabVIEW
- Td: Constante de tiempo derivativo para el PID en LabVIEW
- B U-L: Bit de control desde Unity; 1 control Unity – 0 control LabVIEW
- B A-M: Bit de control Automático -Manual desde Unity; 1 Automático - 0 Manual

Unity tiene el control sobre las tramas y gestiona los controles para que se controle ya sea desde Unity o desde LabVIEW.

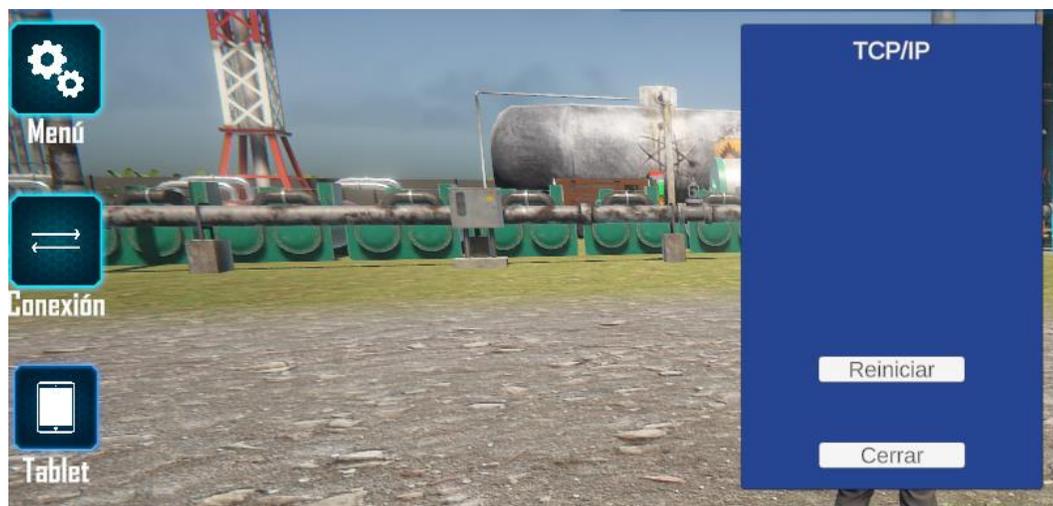
3.14. Comunicación TCP-IP

La comunicación empleada en el proyecto es una comunicación TCP-IP en donde se asigna un puerto y una dirección IP para poder entablar la comunicación entre LabVIEW - Unity y que se puedan enviar mensajes bidireccionalmente. El puerto configurado es el: 50505 y la dirección IP es: 127.0.0.1.

El entorno virtual posee un botón de conexión como se indica en la Figura 70, el cual permite reiniciar la comunicación en caso que existan conflictos con el envío y recepción de los mismos.

Figura 70

Botón de conexión TCP/IP en Unity



Capítulo IV

4. Resultados y pruebas experimentales

Las pruebas experimentales y resultados obtenidos se muestran en el presente capítulo, mediante las cuales se va a demostrar que la hipótesis del proyecto es o no realizable y ejecutable.

4.1. Descripción del sistema funcional

El sistema virtual 3D de una estación de presión se desarrolla como una planta de entrenamiento elaborada en un entorno virtual que ejecuta el modelo matemático “inside”, dentro del mismo entorno lo cual permite interactuar con el sistema y recibir la acción de control. Con énfasis en esta funcionalidad los resultados de cada ejecución son únicos y congruentes con el modelo matemático que responde al algoritmo de control. El usuario inicia su viaje al ingresar a la planta donde deberá elegir el nivel de usuario, a continuación, obtendrá la ubicación de puntos de interés marcados con un halo de luz que va desde la posición deseada hacia el cielo para mejor visualización del usuario. En cada punto de interés el usuario podrá observar los datos que registran los visualizadores y transmisores, además de interactuar con válvulas. El objetivo principal es realizar variaciones en el set point y visualizar la respuesta del controlador que a su vez modifica el comportamiento de la planta. Este comportamiento se registra en las gráficas de tendencia e históricos alojados en el Panel View 600 y con opción de exportación de datos para su posterior uso en Excel, MATLAB, etc. Se puede realizar también la verificación de las variables de control en los actuadores y sensores utilizando la vista de tablet como mirror de los datos mostrados en el Panel View 600.

4.2. Verificación del funcionamiento de los equipos e instrumentos industriales en la planta de presión implementada

Los instrumentos en el proyecto tienen animaciones e indicaciones de medidas que se pueden observar en el campo y dan un toque de realismo al entorno, además se fijó cámaras en cada instrumento para poder apreciar de mejor manera a continuación, se muestra un collage de imágenes en donde se observa lo indicado.

El instrumento que está a la entrada del separador trifásico es un transmisor de Flujo que mide en galones por minuto el ingreso de crudo al proceso.

Figura 71

Transmisor de flujo al ingreso del separador trifásico



En la parte superior del tanque del separador trifásico se encuentra un transmisor de presión, un indicador de presión y una válvula de control con valores aleatorios en la indicación.

Figura 72

Instrumentación de separador trifásico



El tanque de separador bifásico es el que mayor instrumentación posee, se tiene transmisores de presión, indicadores de presión, válvulas de control, válvulas tipo manija y válvula tipo globo con animaciones de apertura y cierre de las mismas.

Figura 73

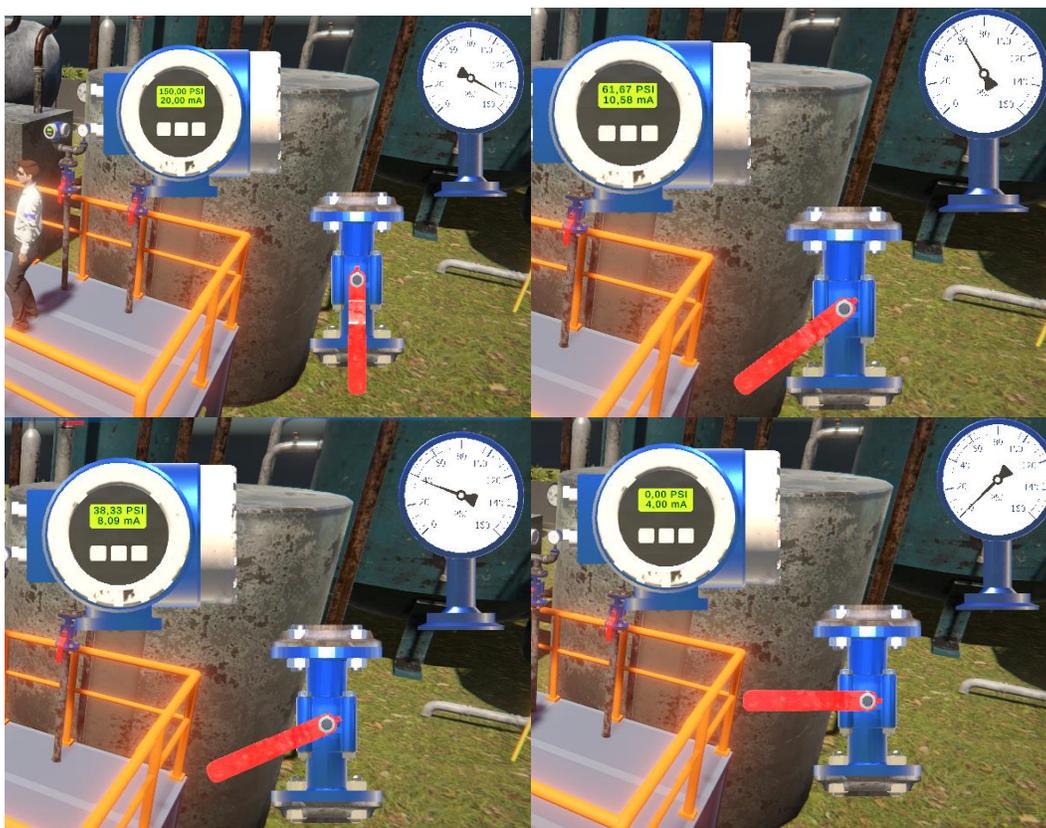
Instrumentación separador bifásico



Las animaciones en la parte superior del Separador Bifásico del indicador de presión, transmisor de presión y válvula, se las realiza mediante apertura de la válvula y se visualiza conforme se va cerrando la válvula al cambio de presión, sin afectar al proceso.

Figura 74

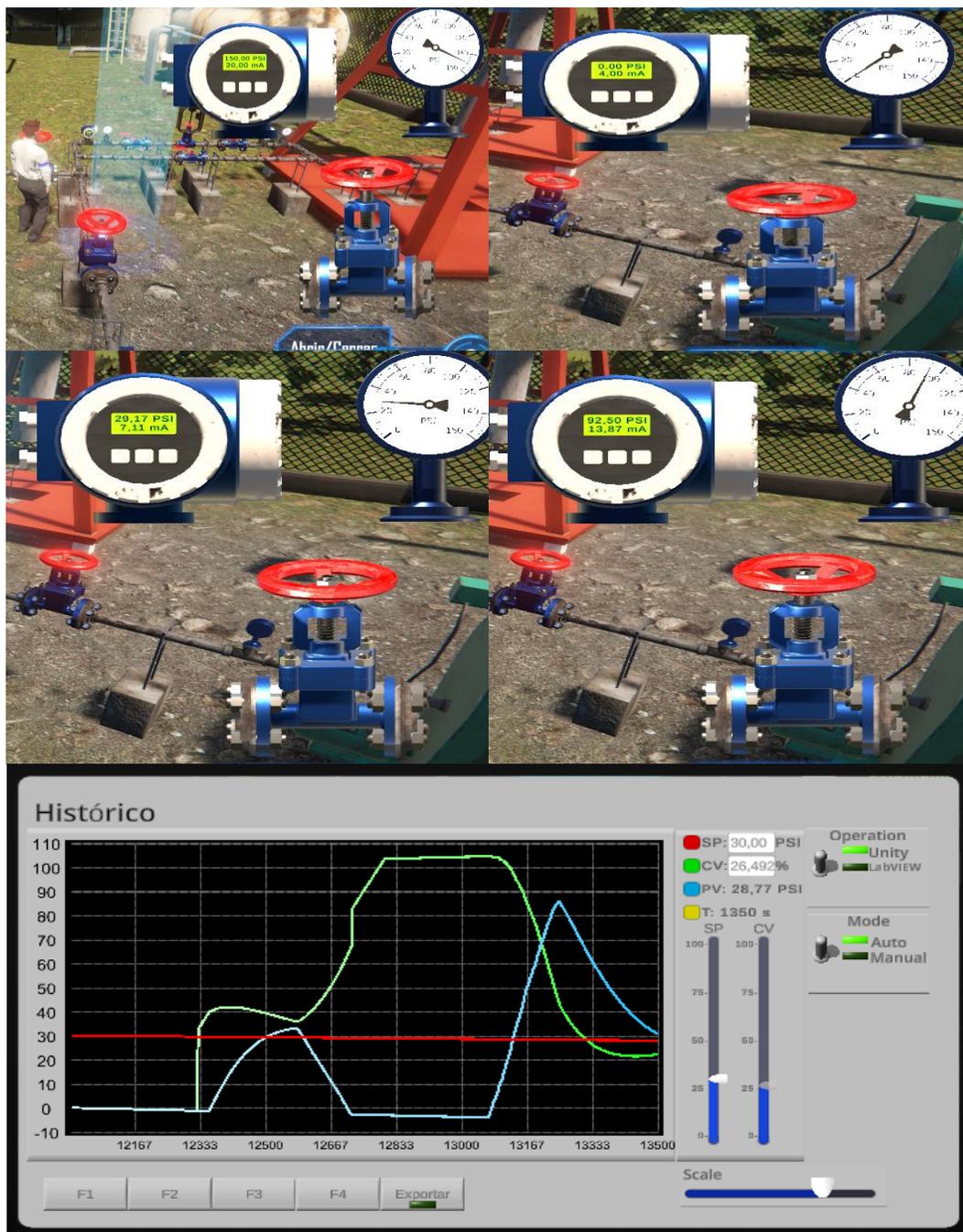
Instrumentación de presión en la parte superior del separador bifásico



Las animaciones en la parte del proceso del separador bifásico empiezan desde la válvula V3 la cual deja pasar o no el paso de la presión si esta válvula se cierra y se está realizando un control el control value se dispara al máximo y el proces value se mantiene en cero.

Figura 75

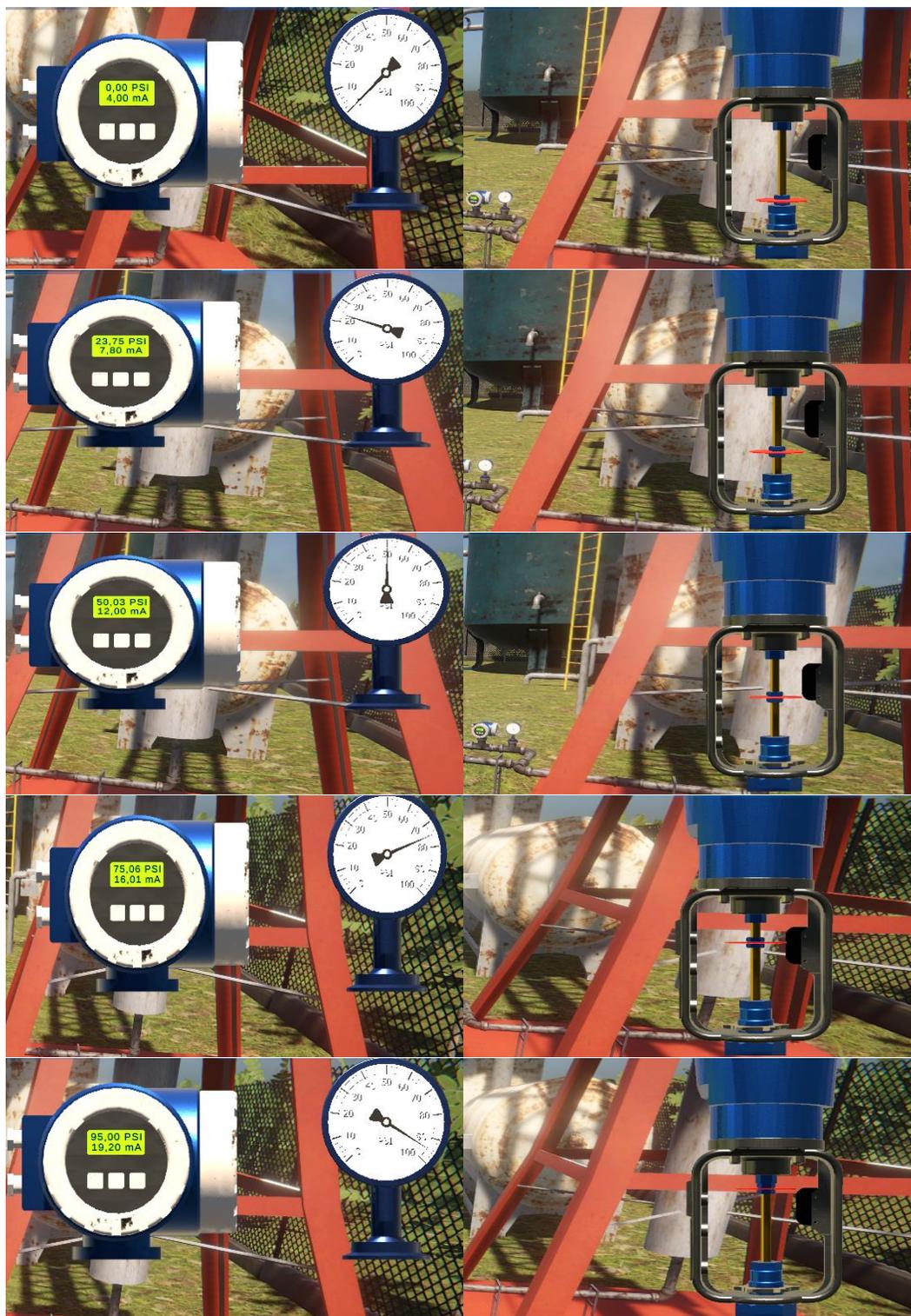
Instrumentación de presión a la salida del separador bifásico



Las animaciones en la parte del proceso del separador bifásico para la válvula de control, el indicador de presión y el transmisor de presión toman los valores del control value y el process value respectivamente.

Figura 76

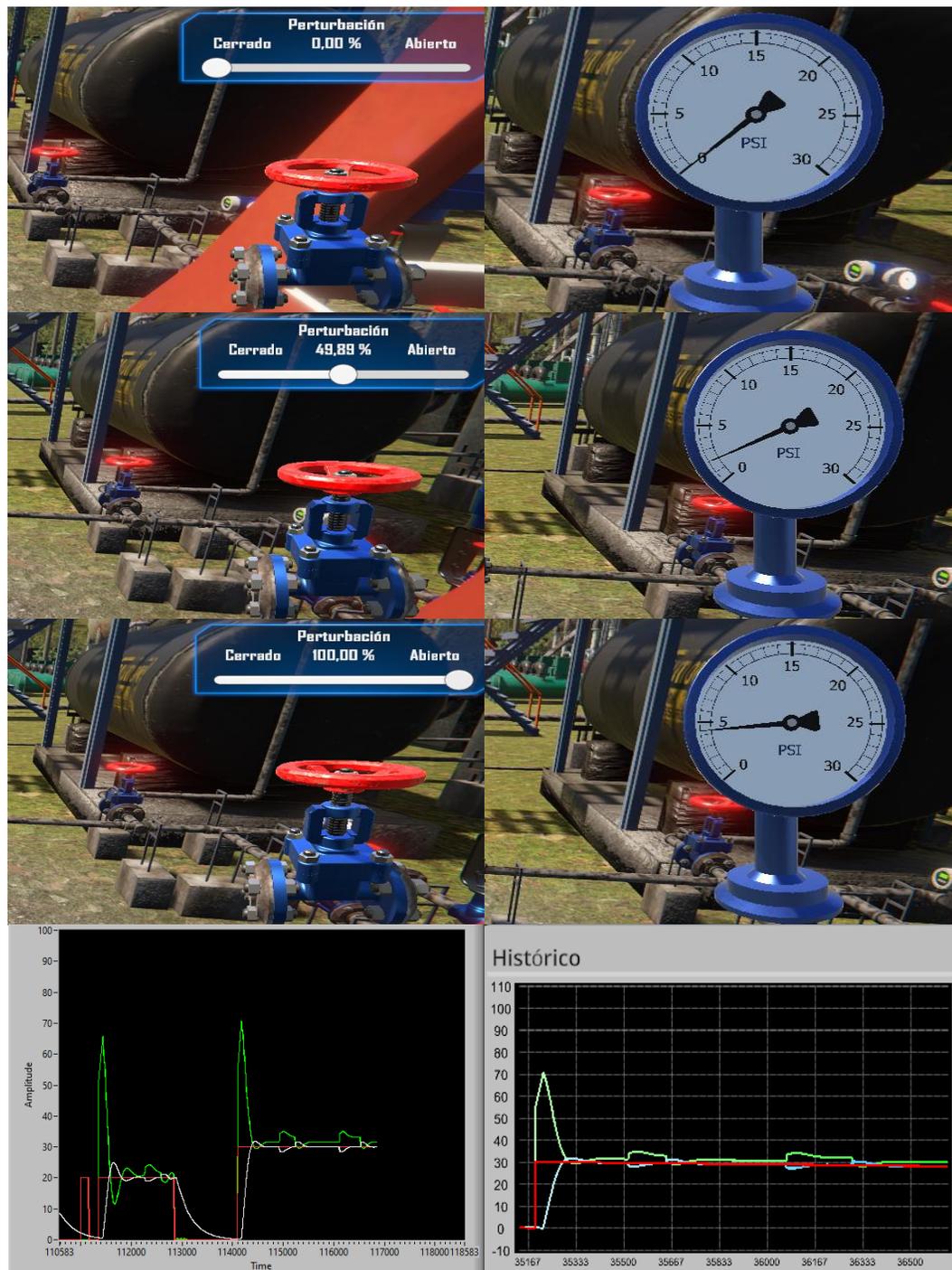
Animación de Instrumentación a diferentes valores



Las animaciones para las perturbaciones se las hacen mediante un slider y mueve la posición de la válvula, permite ver si el control responde frente a este cambio.

Figura 77

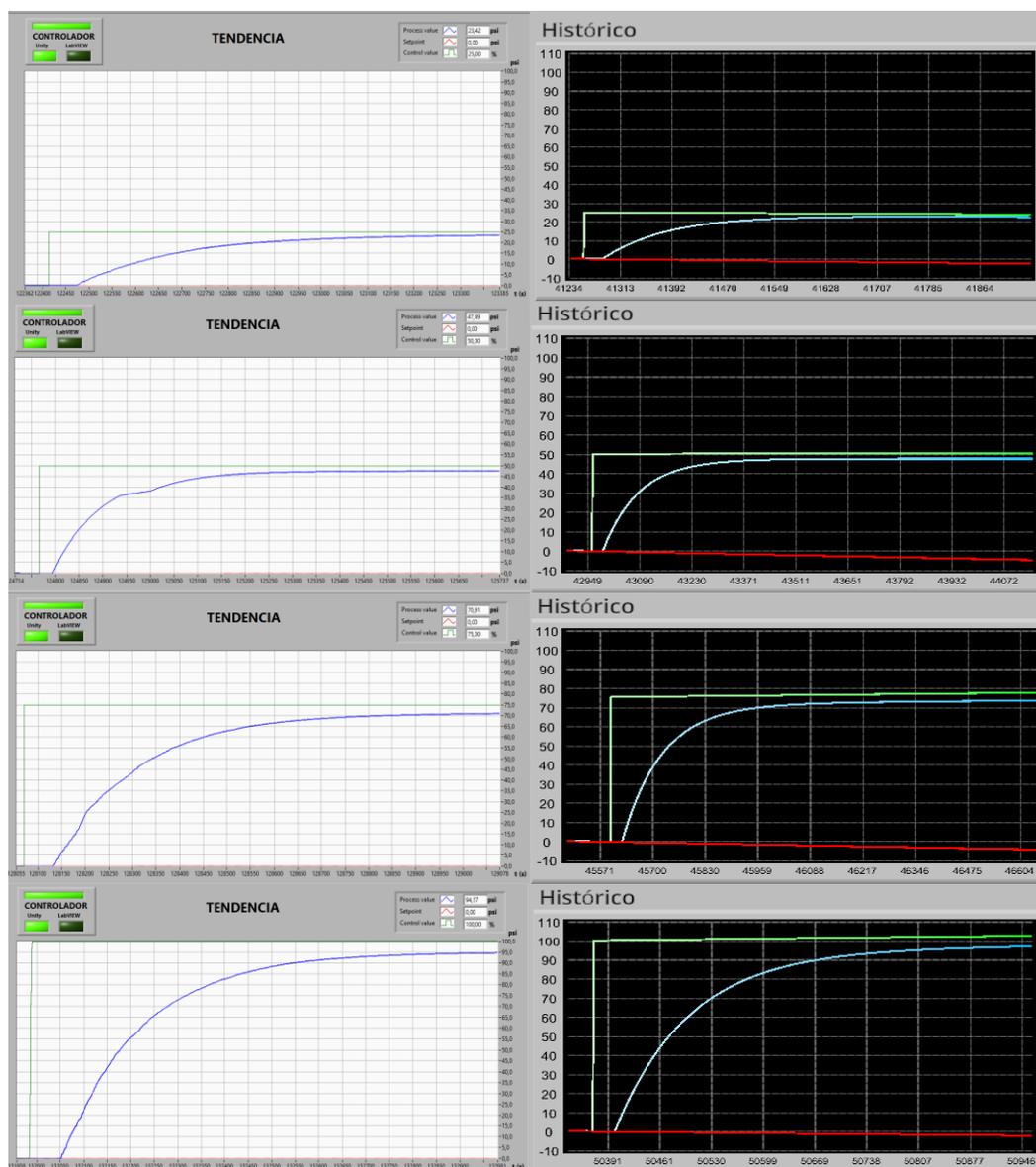
Válvula e Indicador para realizar perturbaciones en el proceso



Para la validación del modelo matemático se le dio varios escalones dentro de todo el rango de operación y se verifica que el modelo matemático cumple con un sistema de primer orden más retardo que cumple con la saturación que va de 0 a 100 psi y se puede observar en la Figura 78, las gráficas de la respuesta del process value cuando existe un cambio de escalón en el control value, para ello el controlador se encuentra en modo manual.

Figura 78

Gráficas del cambio de process value frente al cambio de control value



4.3. Implementación de la función de transferencia de la planta de presión

La validación de la programación realizada en Unity se hizo mediante una prueba muy importante, que consiste en verificar que el modelo matemático de la planta de presión de primer orden más tiempo muerto programada en Unity sea el adecuado, y esto se lo realiza con ayuda de “ident” de MATLAB.

4.3.1. Selección de la función de transferencia de la planta de presión

La identificación y selección de la planta de presión a ser controlada es muy importante en el desarrollo del presente trabajo, para lo cual se realizó una investigación de campo en el Laboratorio de Control de Procesos específicamente a la estación de presión, en la cual se han realizado muchas prácticas por los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, acorde a la experticia creada en todos los años en prácticas se genera un modelo matemático de primer orden más tiempo muerto.

El modelo matemático generado de la estación de presión el cuál se indica en la ecuación (4.1), se lo obtuvo en las constantes prácticas realizadas por los estudiantes y docente con la ayuda del ident de Matlab, tomando como una caja negra a la estación y proceder a dar una señal de excitación manual, generando una respuesta del proceso, estos dos datos conocidos como control value y process value son los que van a ser ingresados en los vectores de Matlab y poder recrear un modelo matemático muy similar al funcionamiento dinámico de la estación.

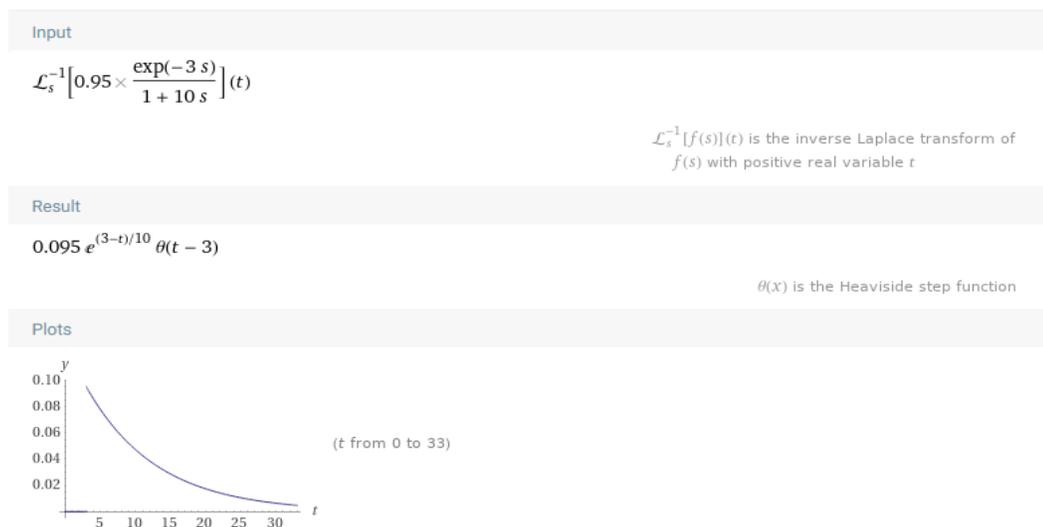
$$F(S) = 0.95 * \frac{e^{-3*s}}{10 * s + 1} \quad (4.1)$$

4.3.2. Respuesta de la función de transferencia

La respuesta de la función de transferencia de la ecuación (4.1) transformada al dominio tiempo (con ayuda de la transformada inversa de la Laplace) se puede observar en la Figura 79, esto se lo realiza con la ayuda de (WolframAlpha, 2021), una página web que ayuda a realizar transformaciones y a graficar las funciones.

Figura 79

Respuesta de la función de transferencia $F(S)$ en el dominio tiempo



Nota. Gráfica de la Función de transferencia $F(S)$. Recuperado de *WolframAlpha Computational Intelligence*, Obtenido de (Wolframalpha, 2021).

Para analizar la función de transferencia de respuesta a un escalón como se indica en la Figura 80 se tiene que emplear la ecuación (4.2) y el (WolframAlpha, 2021) la transforma en el dominio tiempo.

$$G(S) = \frac{1}{s} * 0.95 * \frac{e^{-3*s}}{10 * s + 1} \quad (4.2)$$

Figura 80

Respuesta de la función de transferencia $G(S)$ en el dominio tiempo

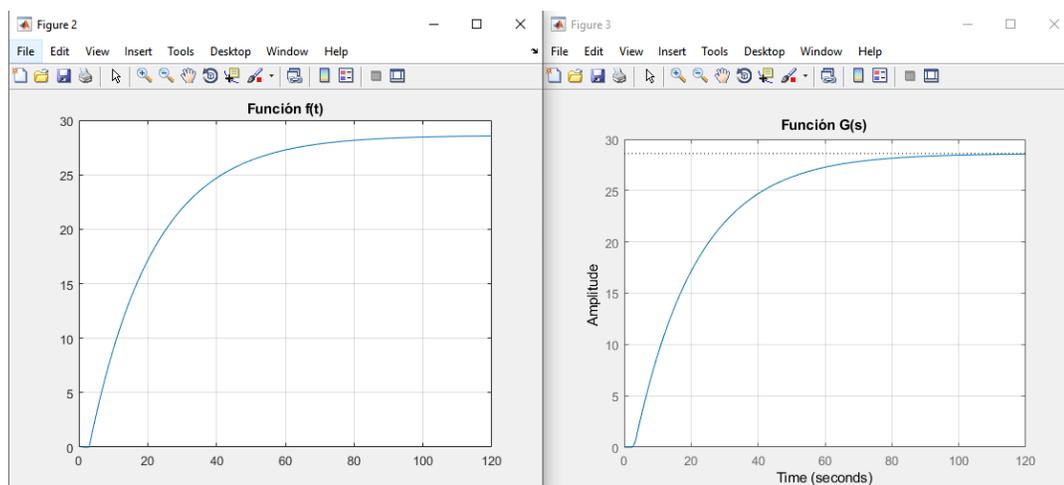


Nota. Gráfica de la función de transferencia $F(S)$. Recuperado de *WolframAlpha Computational Intelligence*, Obtenido de (Wolframalpha, 2021).

También se puede realizar el análisis de la ecuación (4.2) en Matlab, ya sea en el dominio tiempo o en directamente en el dominio S como se indica en la Figura 81.

Figura 81

Respuesta de la función de transferencia analizada en el dominio t y en el dominio s

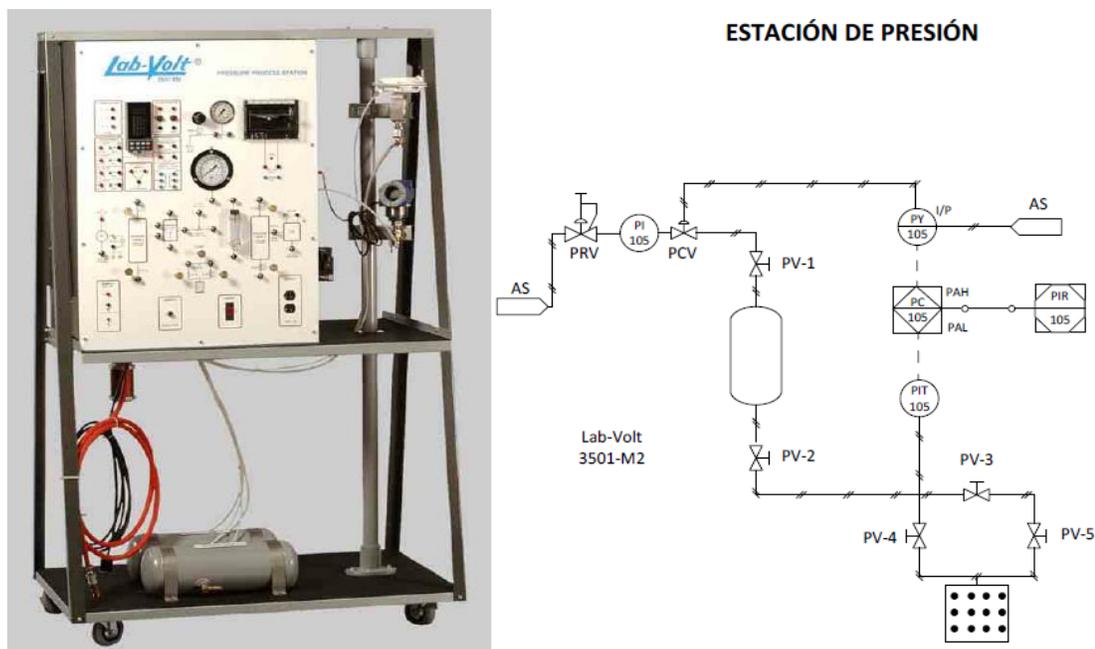


4.3.3. Descripción de la planta de presión del laboratorio

La estación de Presión Lab-Volt del Laboratorio y su Diagrama P&ID se indica en la Figura 82, en la cual se puede describir como un proceso SISO en donde se tiene el control de la presión de un tanque a través de una válvula de control PCV que actúa con la señal enviada desde el controlador a un convertor de corriente a presión PY 105 para su apertura o cierre, la señal de presión en el sistema es dada por el Transmisor indicador de Presión PIT 105. Es un proceso muy similar al descrito en el presente proyecto del control de gas a la salida de un separador Bifásico.

Figura 82

Estación de presión Lab-Volt y su diagrama P&ID



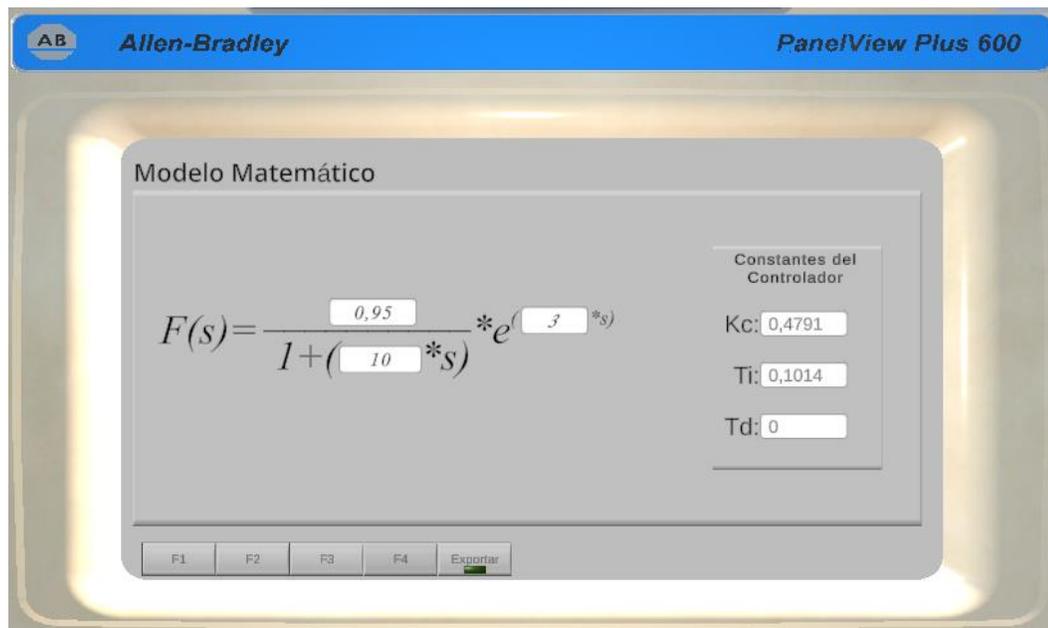
4.3.4. Ingreso de la función de transferencia en Unity

La función de transferencia se la puede modificar como usuario programador y se ingresan 3 parámetros que son: $k_p = 0.95$, $T_p = 10$ y $T_d = 3$ como se indica en la Figura 83, y gráficamente se ve cómo está constituida la función de transferencia. Los

parámetros ingresados se cargan en la programación realizada para que se vaya ejecutando en función del tiempo.

Figura 83

Ingreso de la función de transferencia en la Pantalla F4 de la touch en Unity



4.3.5. Obtención del modelo matemático de la planta de presión en Unity con Matlab

Para obtener el modelo matemático del proceso de presión en Unity hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones y secuencia:

- Control desde Unity
- Control en modo Manual
- Utilizar el botón de Exportar para que se empiecen a guardar los datos
- Cambiar el slider de control value desde Unity, para tener datos del process value como se indica en la Figura 84.
- Al finalizar se guardan los 2000 datos necesarios para obtener el modelo, desactivar el botón de exportar.

- Los datos se encuentran en formato txt, estos se los lleva a Excel, solo tomar en cuenta los datos de CV y PV como se indica en la Figura 85.

Figura 84

Cambio de CV para obtención de datos del PV

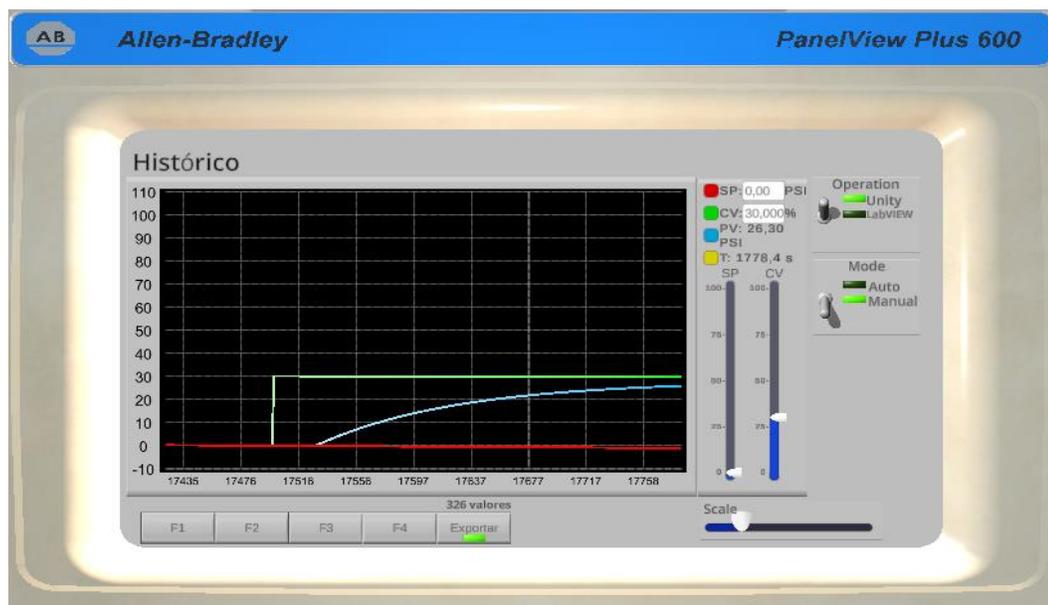
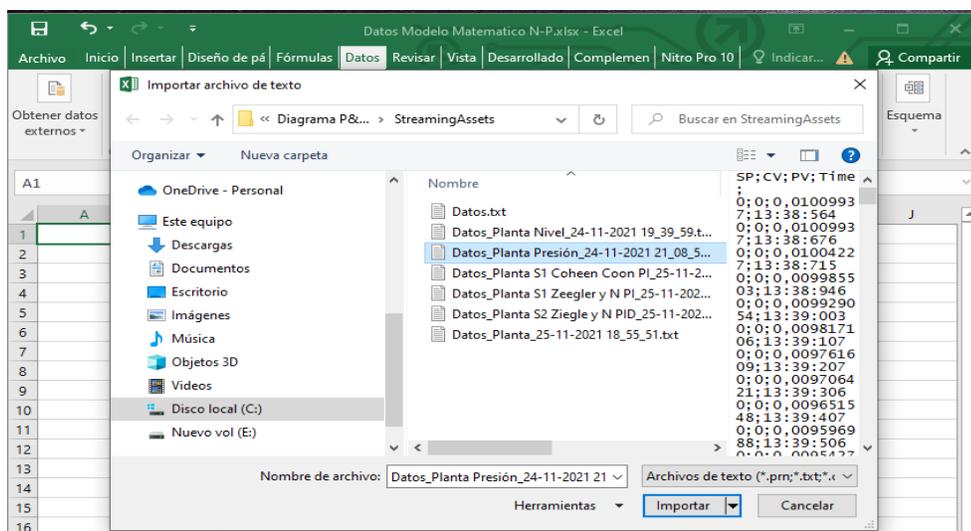


Figura 85

Obtención de datos a Excel

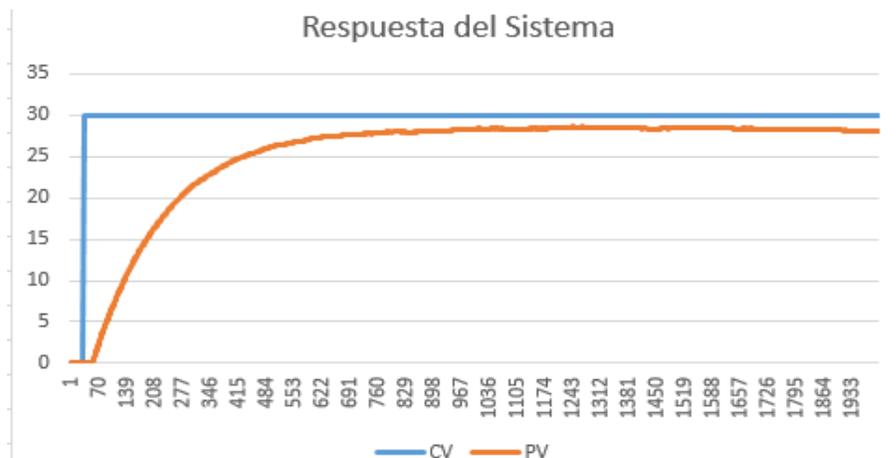


Los datos obtenidos se los puede llevar a otra hoja de Excel para su procesamiento, y se puede graficar la respuesta del sistema al cambio de control value

como se indica en la Figura 86, aquí se observa la curva característica de un proceso de primer orden más tiempo muerto.

Figura 86

Respuesta al escalón de la planta de presión de Unity

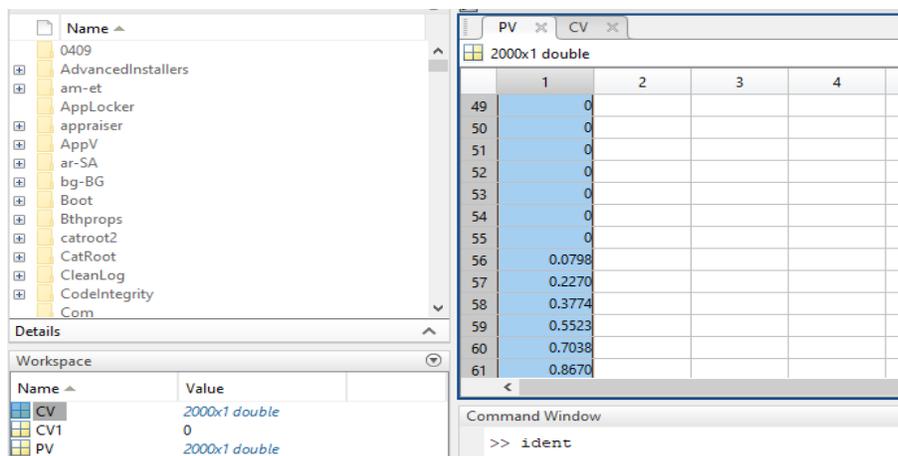


4.3.6. Modelado de la planta de presión en MATLAB

Para poder obtener el modelo matemático se requiere llevar los datos obtenidos en el Excel a Matlab, por lo que se crean dos vectores de CV y PV. Los datos del Excel se copian a estas variables teniendo en cuenta que tengan la misma cantidad de datos como se indica en la Figura 87.

Figura 87

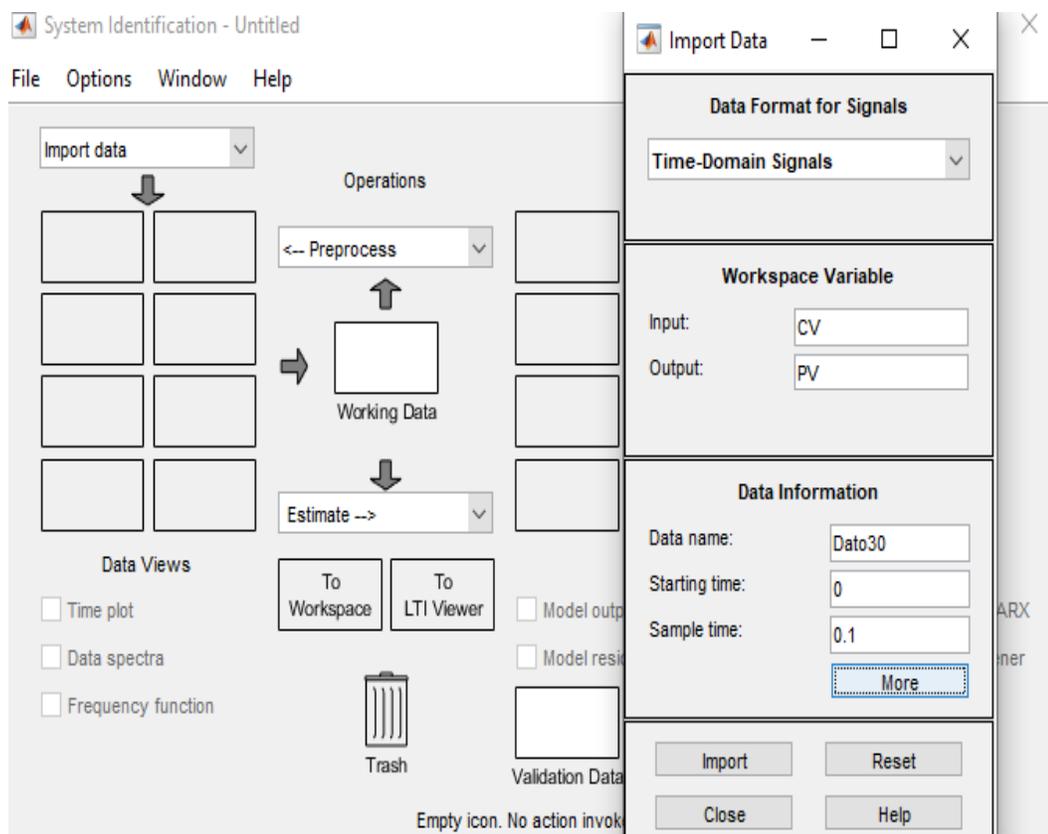
Ingreso de vectores con datos a MATLAB



Se procede a utilizar la herramienta de ident, mediante la cual se va a determinar el modelo matemático de la planta de presión, aquí se van a cargar los vectores de CV y PV creados anteriormente como se indica en la Figura 88.

Figura 88

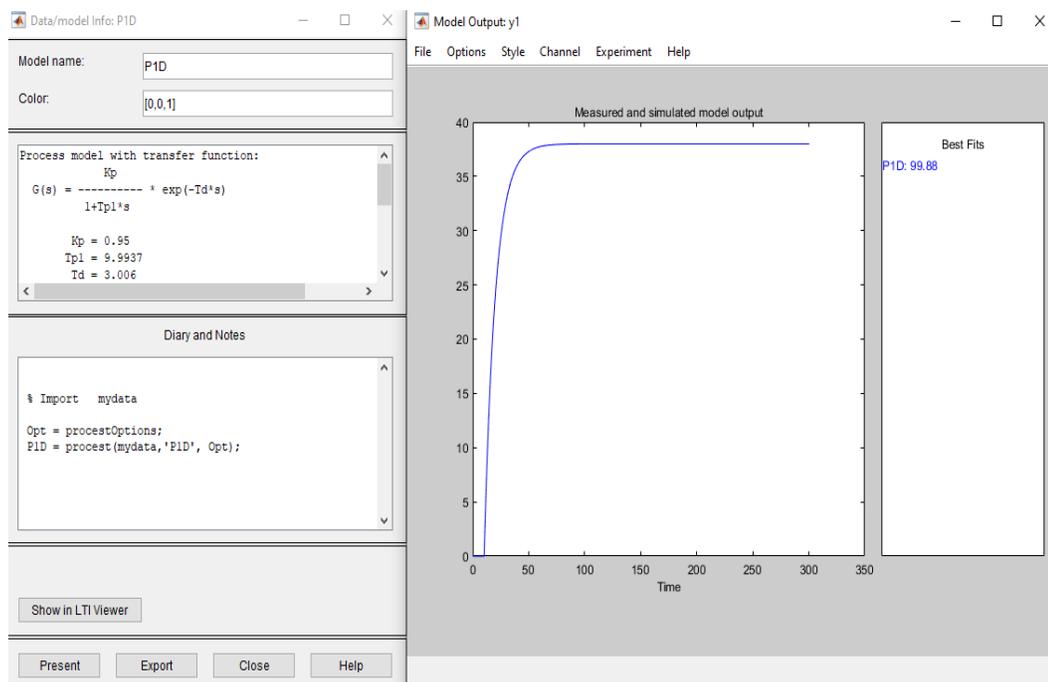
Ingreso de datos a Ident de MATLAB



Una vez cargados los datos se procede a estimar el modelo matemático de primer orden más tiempo muerto, tomando en cuenta siempre el tiempo de muestreo utilizado que fueron 100 ms y que la función tenga un retardo, el resultado de la estimación tiene un porcentaje del 99.88% al modelo real como se indica en la Figura 89, lo cual garantiza una eficiencia muy buena en la estimación realizada.

Figura 89

Respuesta de la estimación del modelo matemático en Matlab



La Función de transferencia del modelo matemático obtenida se muestra en la ecuación (4.3)

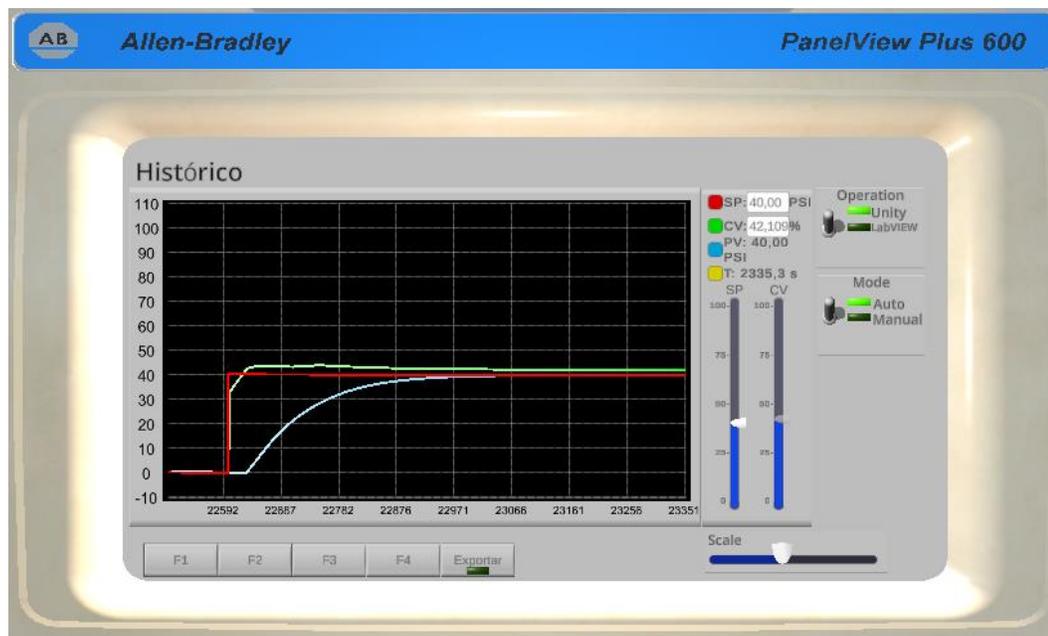
$$F(S) = 0.95 * \frac{e^{-3.006*s}}{9.9937 * s + 1} \quad (4.3)$$

4.3.7. Prueba del controlador y sintonización de la planta de presión con Lambda

Se realiza una prueba rápida con un método de sintonización, en este caso se selecciona Lambda. Con la ayuda de la función de transferencia obtenida de la planta de presión se puede encontrar las constantes de sintonización para el método de Lambda y acorde a las ecuaciones (2.27) y (2.28), se obtienen los valores de $K_p=0.8092$ y $T_i=0.1666$ minutos para un Lambda de 1. Se procede a probar el controlador como se indica en la Figura 90, en donde se puede observar que la planta está siendo controlada.

Figura 90

Control de planta de presión por sintonización PI Lambda en Unity



4.4. Pruebas de sintonización de controladores PI-PID

Para realizar las pruebas de todos los métodos de sintonización se va a seguir el siguiente proceso:

- Control desde Unity.
- Colocar el selector de control en modo automático.
- Ingresar las constantes de sintonización K_p , T_i y T_d acorde al método de sintonía en el recuadro de constantes PID de Unity
- Presionar el botón de exportar para la toma de datos.
- Ingresar después del dato 100 un Set Point fijo en este caso va a ser 40 Psi para todos los métodos de sintonía.
- Una vez terminada la toma de 2100 datos se presiona el botón de exportar para dejar de tomar datos.

- Los datos que se encuentra en formato txt, llevarlos a formato Excel los datos de PV y SP, realizando una pequeña edición en los mismos para poder tener luego una comparación entre los métodos de sintonización, la edición se la hace en cuanto al tiempo de inicio al cambiar el set point a todos se los debe realizar en el dato 101 como se indica en la Figura 91, el resto de datos del 0 a 100 se pone al PV en 0 y finalmente ajustar el total de datos tomados a 2000 si es mayor borrar los últimos datos.

Figura 91

Datos modificados obtenidos de una sintonización

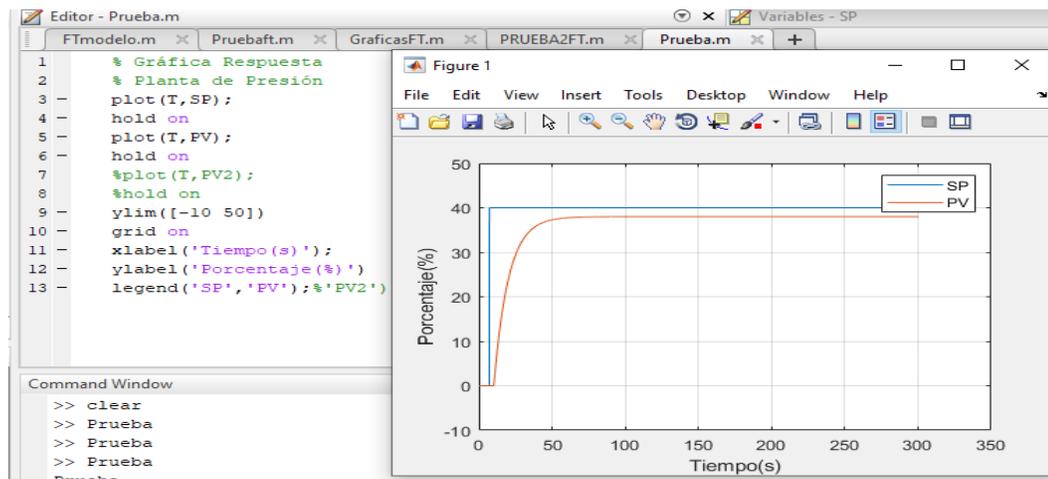
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
PI				PID				SP		PV (PI)		
	SF	CV	PV	Time		SF	CV	PV	Time			
1	0	0	0	15:06:915		0	0	0	31:58:612		0	0
2	0	0	0	15:07:031		0	0	0	31:58:710		0	0
3	0	0	0	15:07:115		0	0	0	31:58:811		0	0
4	0	0	0	15:07:233		0	0	0	31:58:911		0	0
5	0	0	0	15:07:315		0	0	0	31:59:012		0	0
6	0	0	0	15:07:415		0	0	0	31:59:128		0	0
7	0	0	0	15:07:515		0	0	0	31:59:211		0	0
8	0	0	0	15:07:615		0	0	0	31:59:328		0	0
9	0	0	0	15:07:715		0	0	0	31:59:411		0	0
24	0	0	0	15:09:215		0	0	0	32:00:932		0	0
25	0	0	0	15:09:314		0	0	0	32:01:016		0	0
95	0	0	0	15:16:331		0	0	0	32:08:014		0	0
96	0	0	0	15:16:412		0	0	0	32:08:131		0	0
97	0	0	0	15:16:530		0	0	0	32:08:213		0	0
98	0	0	0	15:16:612		0	0	0	32:08:314		0	0
99	0	0	0	15:16:713		0	0	0	32:08:432		0	0
100	0	0	0	15:16:813		0	0	0	32:08:513		0	0
101	#	100	#####	15:17:412		#	100	4,65E-07	32:09:513		40	-5E-08
102	#	100	#####	15:17:512		#	100	4,64E-07	32:09:615		40	-5E-08
103	#	100	#####	15:17:612		#	100	4,63E-07	32:09:714		40	-5E-08
104	#	100	#####	15:17:713		#	100	4,63E-07	32:09:813		40	-5E-08
105	#	100	#####	15:17:812		#	100	4,62E-07	32:09:914		40	-5E-08
106	#	100	#####	15:17:913		#	100	4,61E-07	32:10:014		40	-5E-08
107	#	100	#####	15:18:012		#	100	4,61E-07	32:10:113		40	-5E-08
108	#	100	#####	15:18:112		#	100	4,60E-07	32:10:230		40	-5E-08
109	#	100	#####	15:18:212		#	100	4,60E-07	32:10:313		40	-5E-08
110	#	100	#####	15:18:313		#	100	4,59E-07	32:10:413		40	-5E-08
111	#	100	#####	15:18:412		#	100	4,58E-07	32:10:530		40	-5E-08
112	#	100	#####	15:18:513		#	100	4,58E-07	32:10:630		40	-5E-08

- Para generar las gráficas correspondientes a cada método de sintonía se van a copiar a MATLAB los vectores de PV, SP y añadir un vector de tiempo T el cual contiene datos en segundos del muestreo, muy similar a la obtención del modelo

matemático previamente realizado, pero se ejecuta un programa para graficar los datos el cuál se indica en la Figura 92.

Figura 92

Programa para gráfica de métodos de sintonización en MATLAB



- Repetir el proceso para cada método de sintonía

También se lo podría realizar desde LabVIEW poniendo desde Unity operación en LabVIEW, control en modo automático desde LabVIEW, ingresara las constantes PID en LabVIEW y exportar los datos desde Unity, tomar mucho en cuenta la cantidad de datos que se están exportando al formato txt.

Se aplican tres aspectos para analizar las curvas obtenidas que son: el sobre impulso, tiempo de asentamiento y el tiempo de reacción como se indica en la Figura 93.

El sobre impulso M_p : en porcentaje, se lo considera desde el valor del set point hasta el pico más alto generado por la curva se calcula con la ecuación (4.4), tomando en cuenta que siempre el set point será 40 para poder comparar las curvas.

$$M_p = \frac{M_p PV - SP}{SP} * 100\%$$

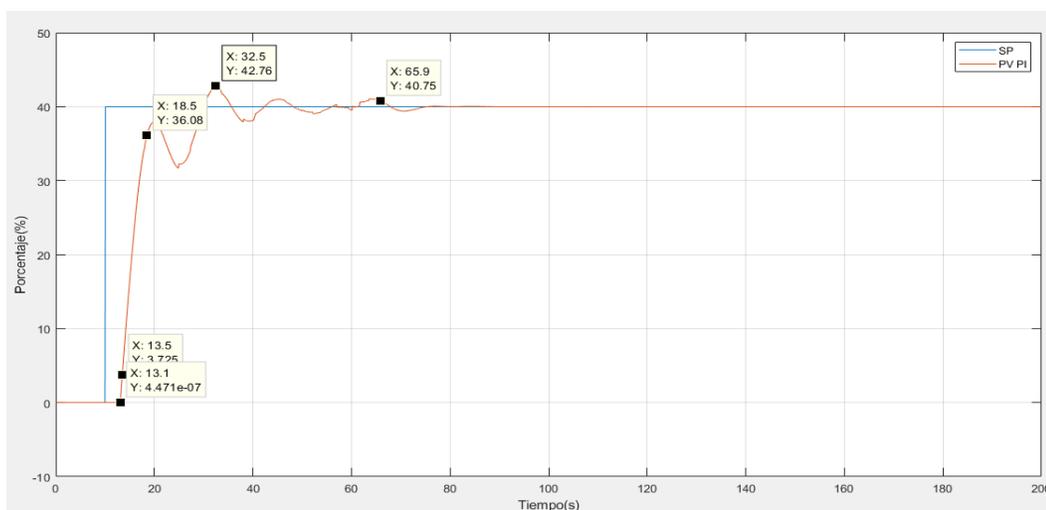
$$M_p = \frac{M_p PV - 40}{40} * 100\% \quad (4.4) \quad (4.4)$$

El tiempo de asentamiento t_s : se lo toma dando una histéresis entre el 2% al 5% del valor del set point, en este caso se toma del 2% del set point teniendo un valor de histéresis de ± 0.8 psi, es decir de 39.2 psi a 40.8 psi.

El tiempo de levantamiento t_r : se lo considera como el tiempo tomado desde el valor del 10% hasta el 90 % del set point, es decir desde 4 psi hasta 36 psi que va a tomar el Process Value.

Figura 93

Gráfica con parámetros a ser analizados en la sintonización de los controladores



4.4.1. Pruebas de sintonización con método de Ziegler y Nichols

Para poder realizar pruebas con el método de Ziegler y Nichols se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.1, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 9.

Tabla 9

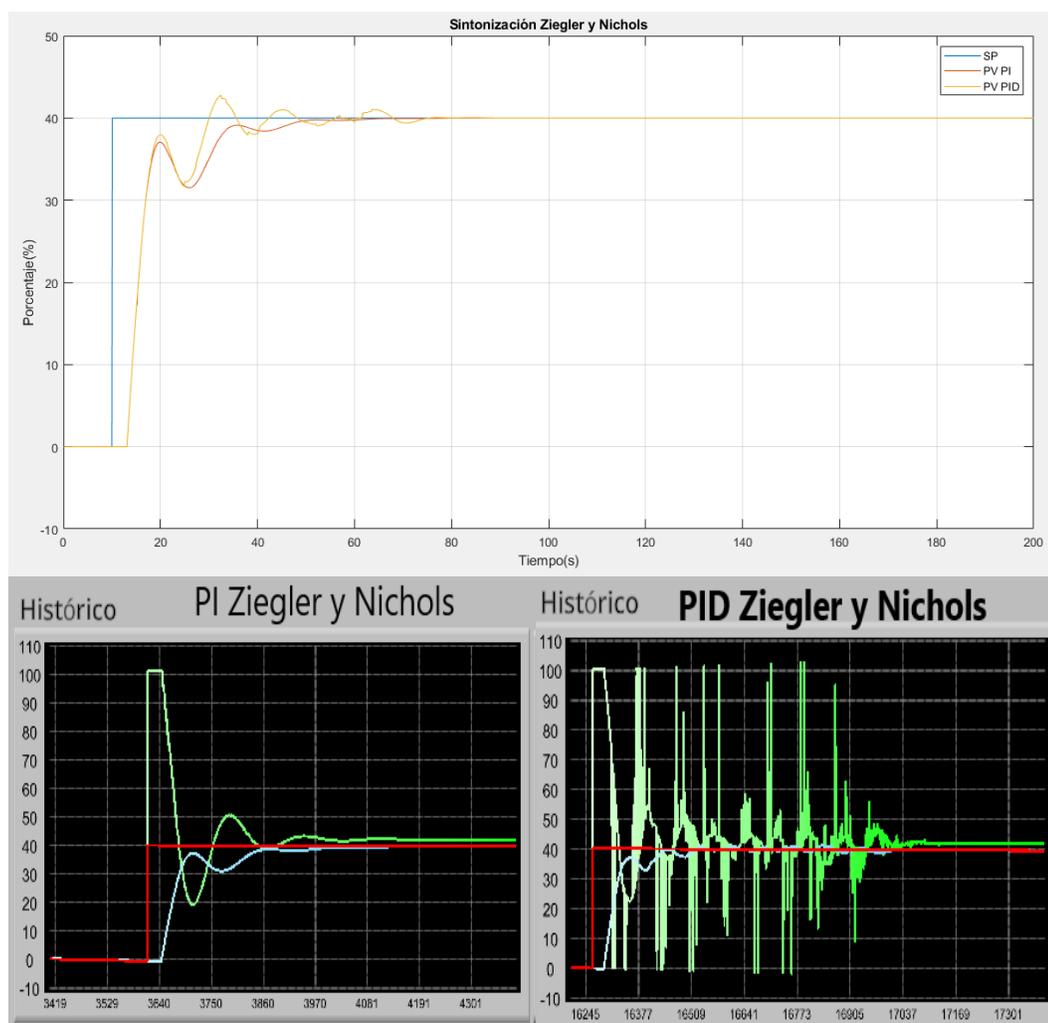
Constantes para el método de Ziegler y Nichols

Controlador	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	2,9921	0,1670	0,0000
PID	3,9895	0,1002	0,0251

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 94.

Figura 94

Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Ziegler y Nichols PI - PID



Para seleccionar uno de los dos métodos de sintonía gráficamente se observa que con el PID se tiene muchas oscilaciones en el control value, y analizando los parámetros de la Tabla 10, se selecciona al controlador PI, ya que no tiene sobre impulso y el tiempo de asentamiento es menor.

Tabla 10

Parámetros de selección de controlador para método de Ziegler y Nichols

Parámetros					
Método de sintonización	Tipo de Control	Sobre impulso %Mp	Tiempo de Levantamiento Tr (s)	Tiempo de asentamiento Ts (s)	Estabilidad en CV
Ziegler y Nichols	PI	-	5,20	33,40	✓
Ziegler y Nichols	PID	6,90%	5,00	52,80	✗

4.4.2. Pruebas de sintonización con método de Cohen y Coon

Para poder realizar pruebas con el método de Cohen y Coon se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.2, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 11.

Tabla 11

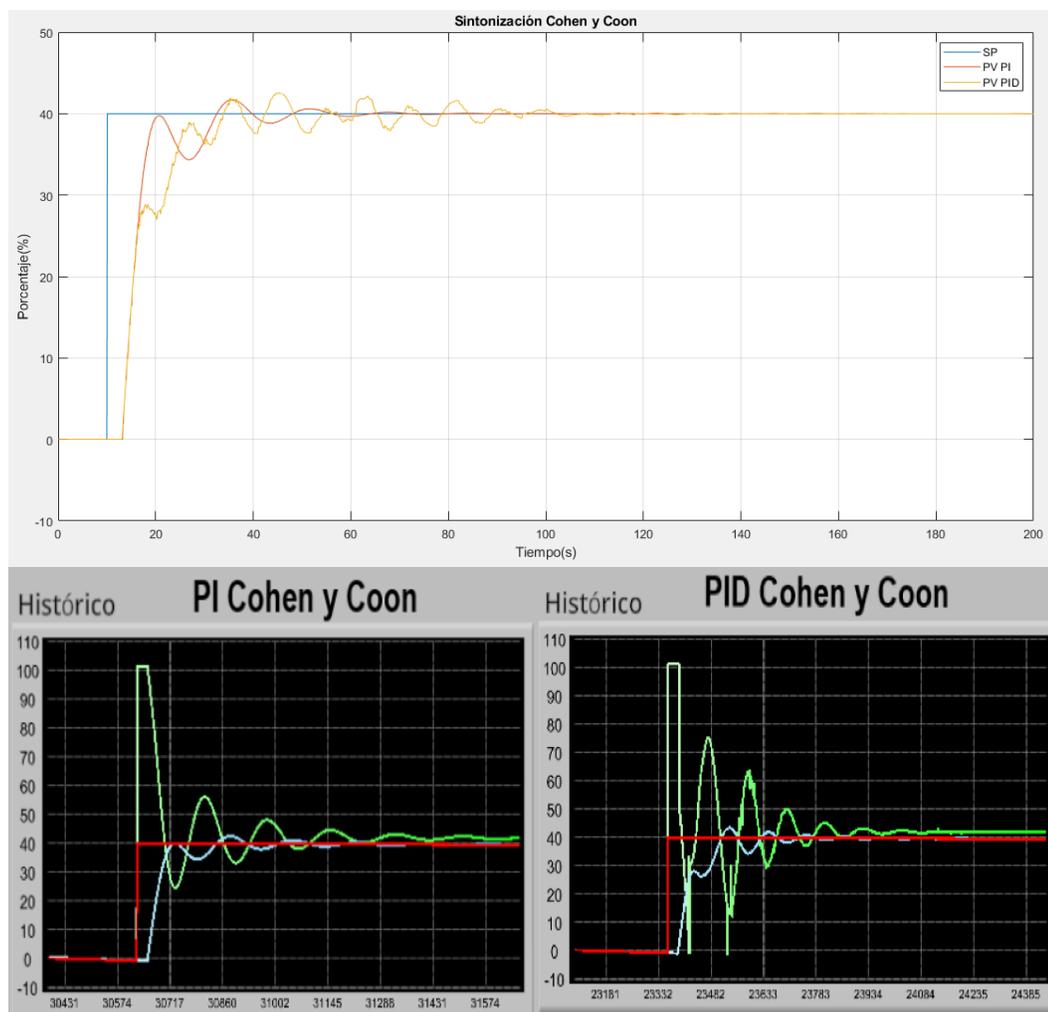
Constantes para el método de Cohen y Coon

Controlador	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	3,2368	0,1022	0,0000
PID	4,9802	0,1122	0,0175

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 95.

Figura 95

Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Cohen y Coon



Para seleccionar uno de los dos métodos de sintonía gráficamente se observa que con el PID se tiene más oscilaciones en el control value, y analizando los parámetros de la Tabla 12, se selecciona al controlador PI ya que tiene menor sobre impulso, los tiempos de levantamiento y asentamiento son más pequeños.

Tabla 12

Parámetros de selección de controlador para método de Cohen y Coon

Método de sintonización	Parámetros				
	Tipo de Control	Sobre impulso %Mp	Tiempo de Levantamiento Tr (s)	Tiempo de asentamiento Ts (s)	Estabilidad en CV
	Cohen y Coon	PI	4,28%	4,90	32,50
Cohen y Coon	PID	6,15%	11,20	74,60	✗

4.4.3. Pruebas de sintonización con método de Amigo

Para poder realizar pruebas con el método de Amigo se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.3, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 13.

Tabla 13

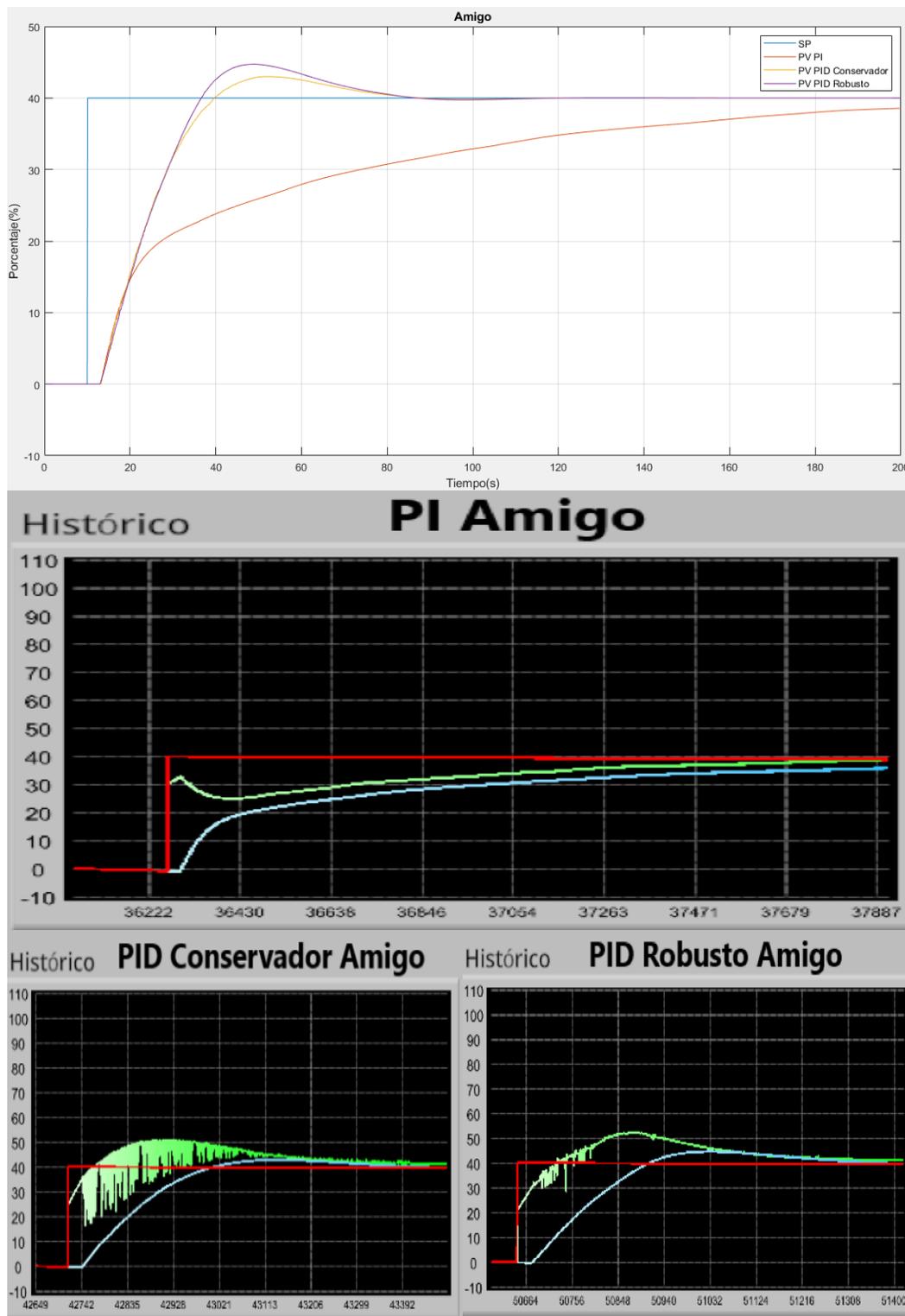
Constantes para el método de Amigo

Controlador	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	0,7606	0,0448	0,0000
PID	0,6206	0,1150	0,0230
Conservador			
PID Robusto	0,5275	0,1150	0,0230

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 96.

Figura 96

Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Amigo



Para seleccionar uno de los dos métodos de sintonía gráficamente se observa que con el PI es muy lento y no se estabiliza pronto, el PID conservador genera más oscilaciones en el control value, y analizando los parámetros de la Tabla 14, se selecciona al controlador PID robusto a pesar de estar muy similar al conservador las oscilaciones del control value son menores.

Tabla 14

Parámetros de selección de controlador para método de Amigo

Método de sintonización	Parámetros				
	Tipo de Control	Sobre impulso %Mp	Tiempo de Levantamiento Tr (s)	Tiempo de asentamiento Ts (s)	Estabilidad en CV
	Amigo	PI	-	126,00	>200
Amigo conservador	PID	7,48%	19,40	62,00	✗
Amigo Robusto	PID	11,80%	18,40	64,00	✓

4.4.4. Pruebas de sintonización con método SIMC

Para poder realizar pruebas con el método de SIMC se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.4, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 15.

Tabla 15

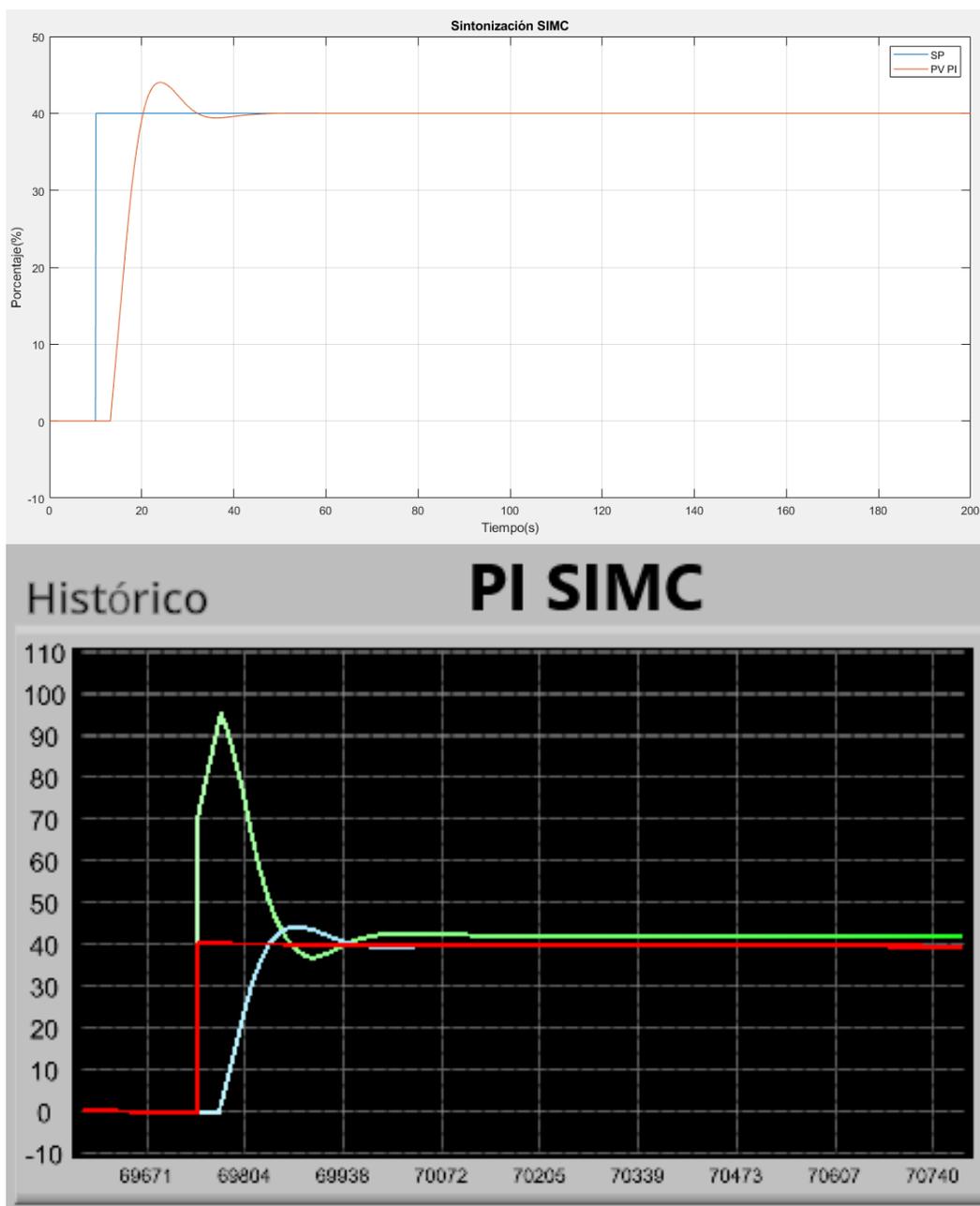
Constantes para el método de SIMC

Controlador	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	1,7498	0,1666	0,0000

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 97.

Figura 97

Respuesta de la planta de presión a la sintonía por SIMC



4.4.5. Pruebas de sintonización con método de Haalman

Para poder realizar pruebas con el método de Haalman se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.5, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 16.

Tabla 16

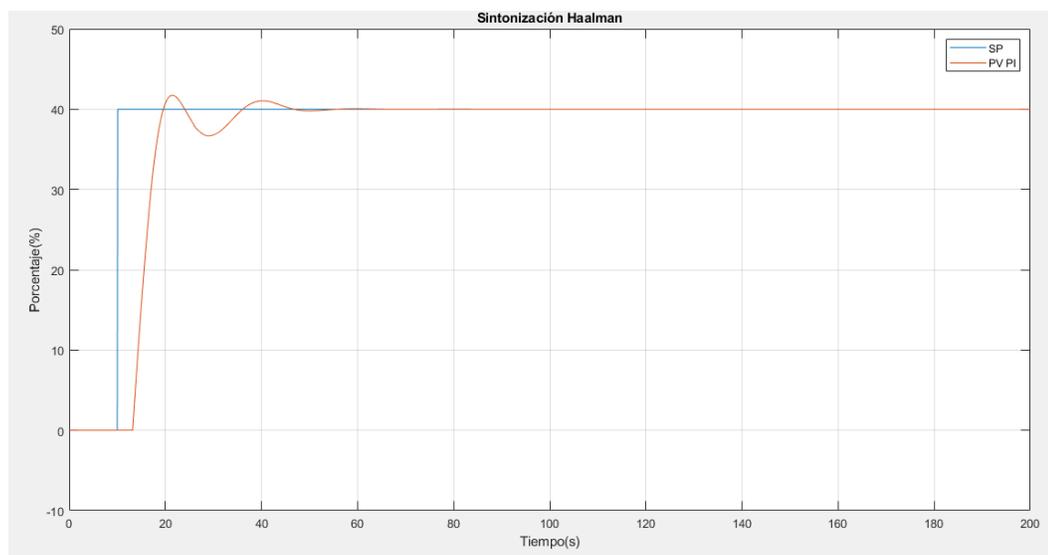
Constantes para el método de Haalman

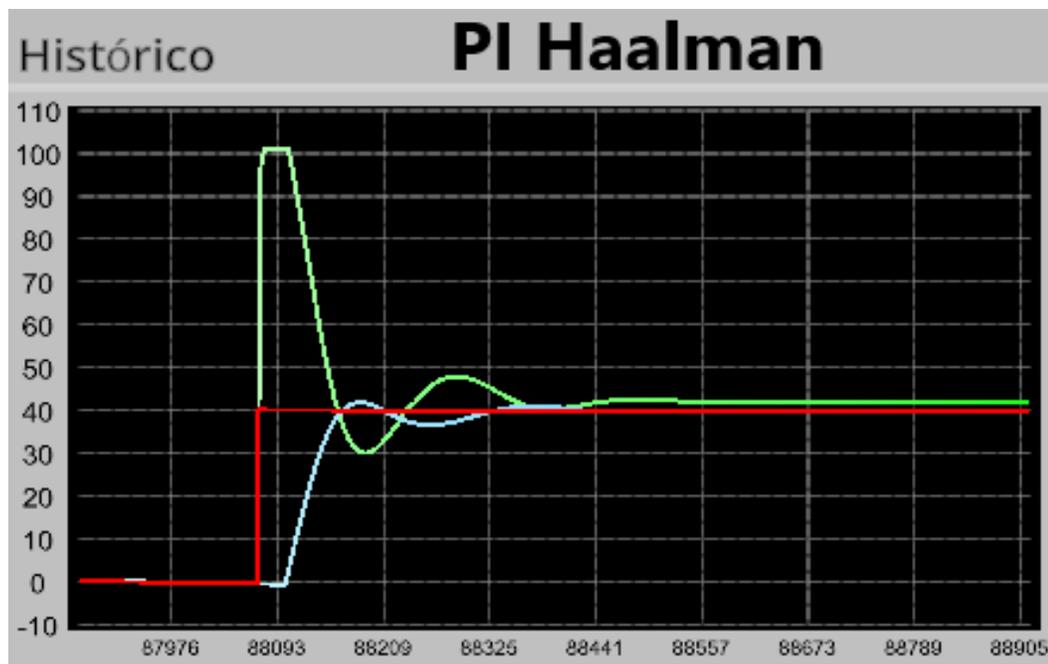
Controlador	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	2,3330	0,1666	0,0000

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 98.

Figura 98

Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Haalman





4.4.6. Pruebas de sintonización con método de López, Miller, Smith y Murril

Para poder realizar pruebas con el método de López, Miller, Smith y Murril se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.6, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 17.

Tabla 17

Constantes para el método de López, Miller, Smith y Murril

Controlador	Método	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	Normal IAE	3,3861	0,1172	0,0000
	Normal ITAE	2,9242	0,1092	0,0000
	Modificado IAE	2,2447	0,1805	0,0000
	Modificado ITAE	1,8539	0,1699	0,0000
PID	Normal IAE	4,5672	0,0771	0,0205
	Normal ITAE	4,4560	0,0815	0,0192
	Modificado IAE	1,2690	0,2376	0,0193
	Modificado ITAE	2,8202	0,2216	0,0168

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 99 y Figura 100.

Figura 99

Respuesta de la planta de presión a la sintonía PI por López, Miller, Smith y Murril

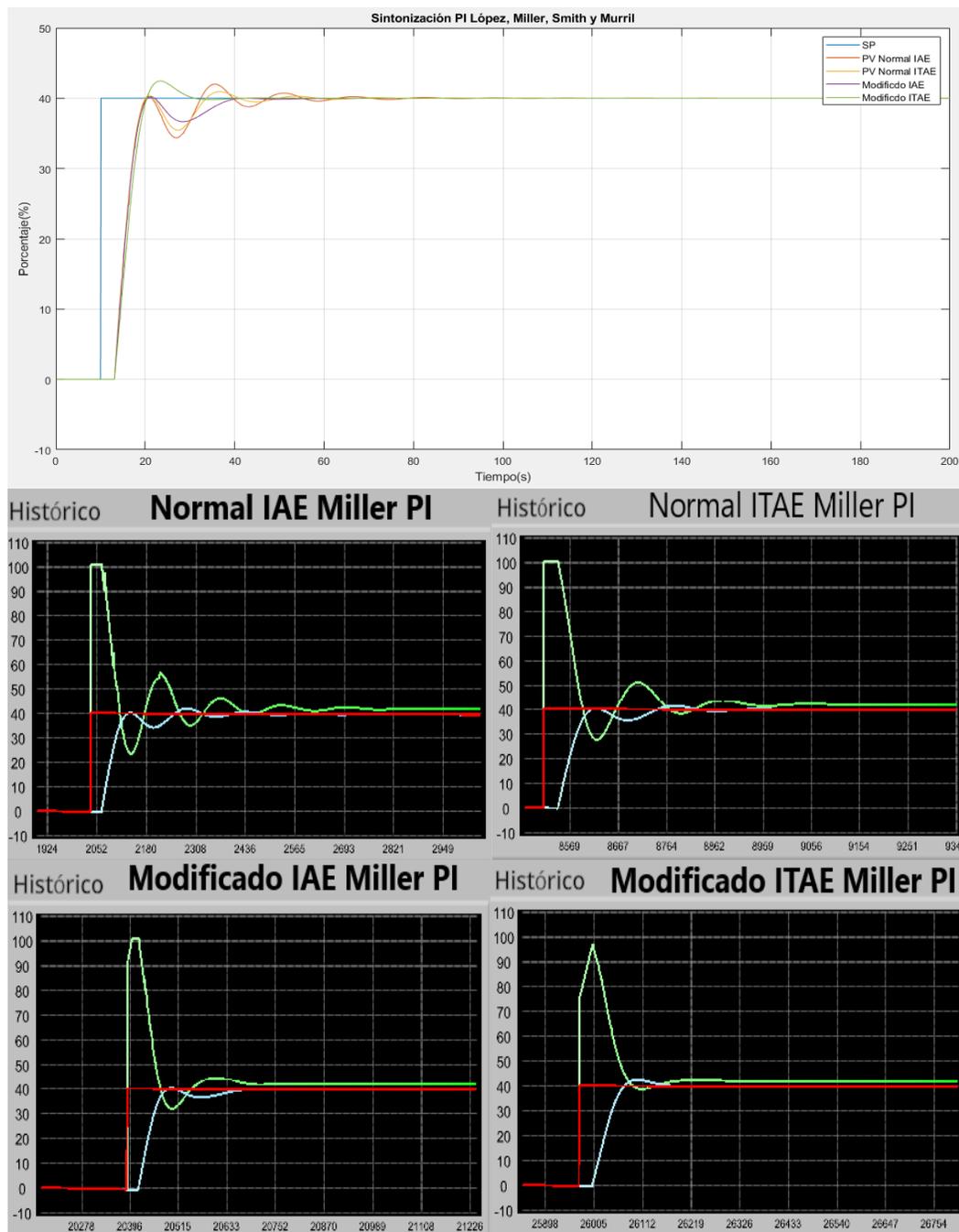
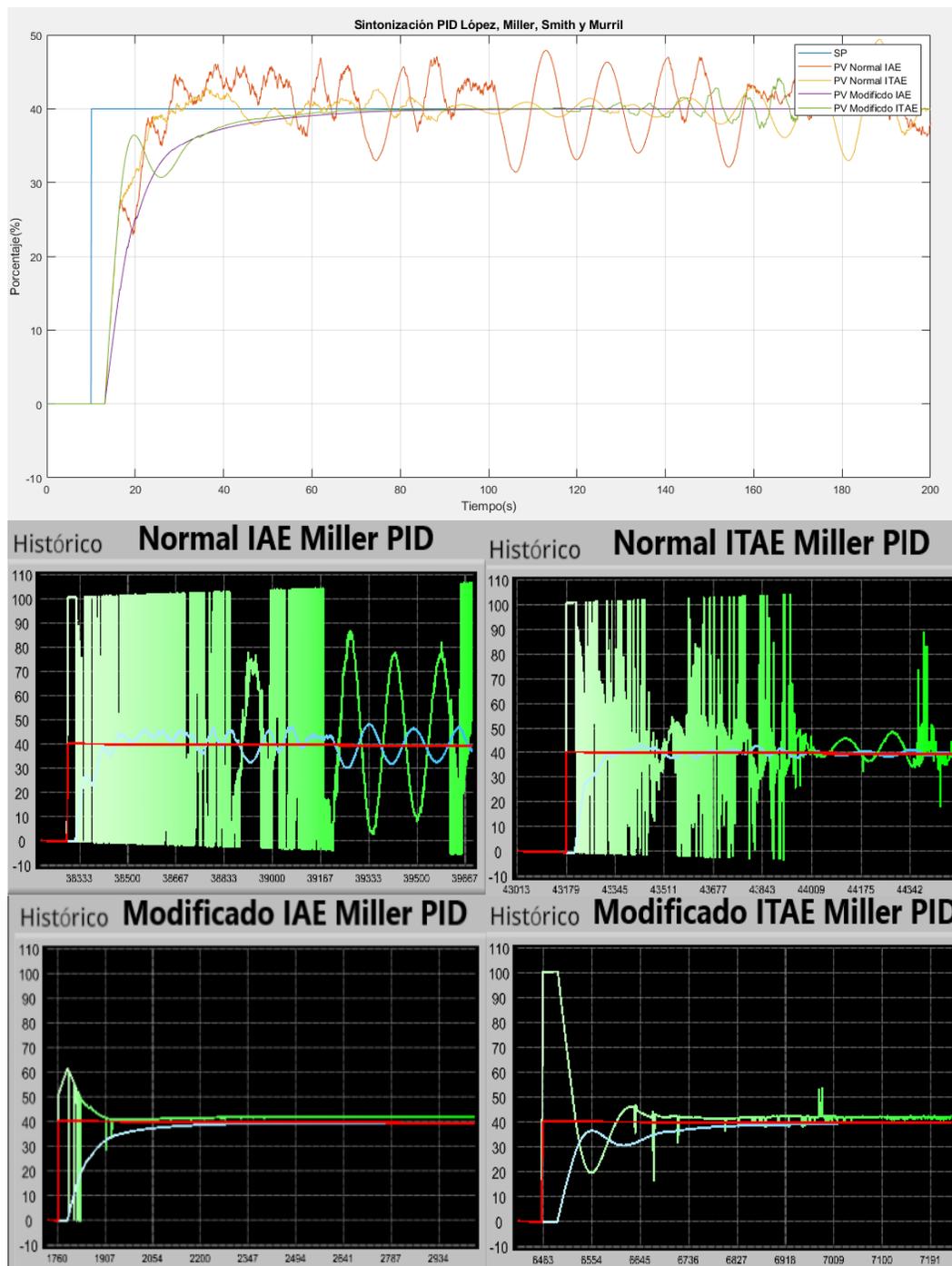


Figura 100

Respuesta de la planta de presión a la sintonía PID por López, Miller, Smith y Murril



Gráficamente se descartan los métodos PID ya que generan muchas oscilaciones en control value, se analiza a los PI y los modificados poseen menos oscilaciones de control value, y analizando los parámetros de la Tabla 18, se selecciona al PI modificado ITAE que a pesar de tener un mayor porcentaje de sobre impulso que el PI modificado IAE, el tiempo de establecimiento es menor.

Tabla 18

Parámetros de selección de controlador para método de López, Miller, Smith y Murril

Método de sintonización	Parámetros				
	Tipo de Control	Sobre impulso %Mp	Tiempo de Levantamiento Tr (s)	Tiempo de asentamiento Ts (s)	Estabilidad en CV
	Miller Normal	PI	4,98%	4,70	32,40
IAE					
Miller Normal	PI	2,33%	4,80	24,40	✓
ITAE					
Miller	PI	0,47%	4,80	23,70	✓
Modificado IAE					
Miller	PI	6,08%	5,20	14,60	✓
Modificado ITAE					

4.4.7. Pruebas de sintonización con método de Lambda

Para poder realizar pruebas con el método de Lambda se requiere de las ecuaciones de la sección 2.2.4.8, para el cálculo de las constantes que se indican en la Tabla 19.

Tabla 19

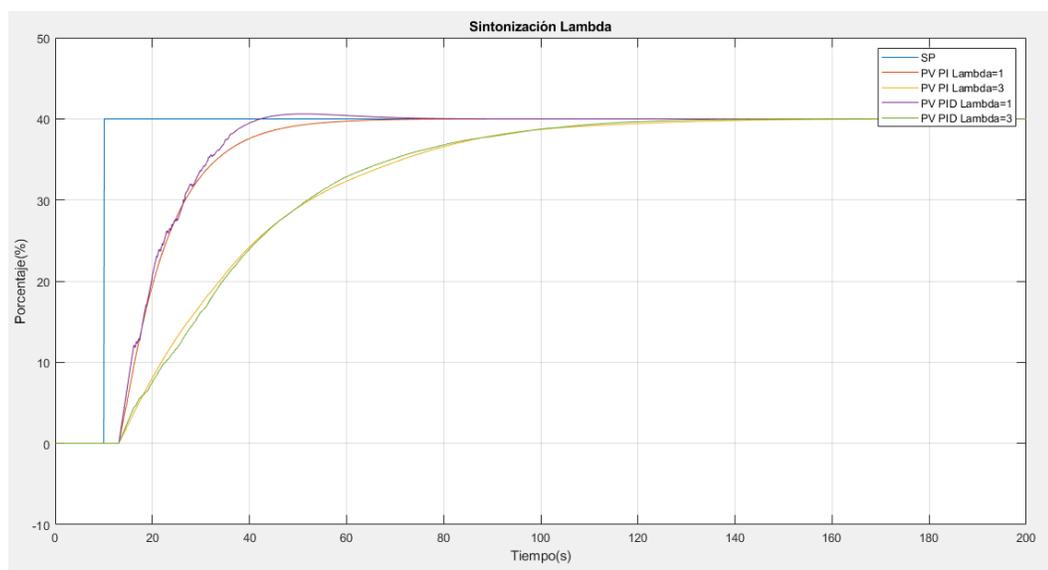
Constantes para el método de Lambda

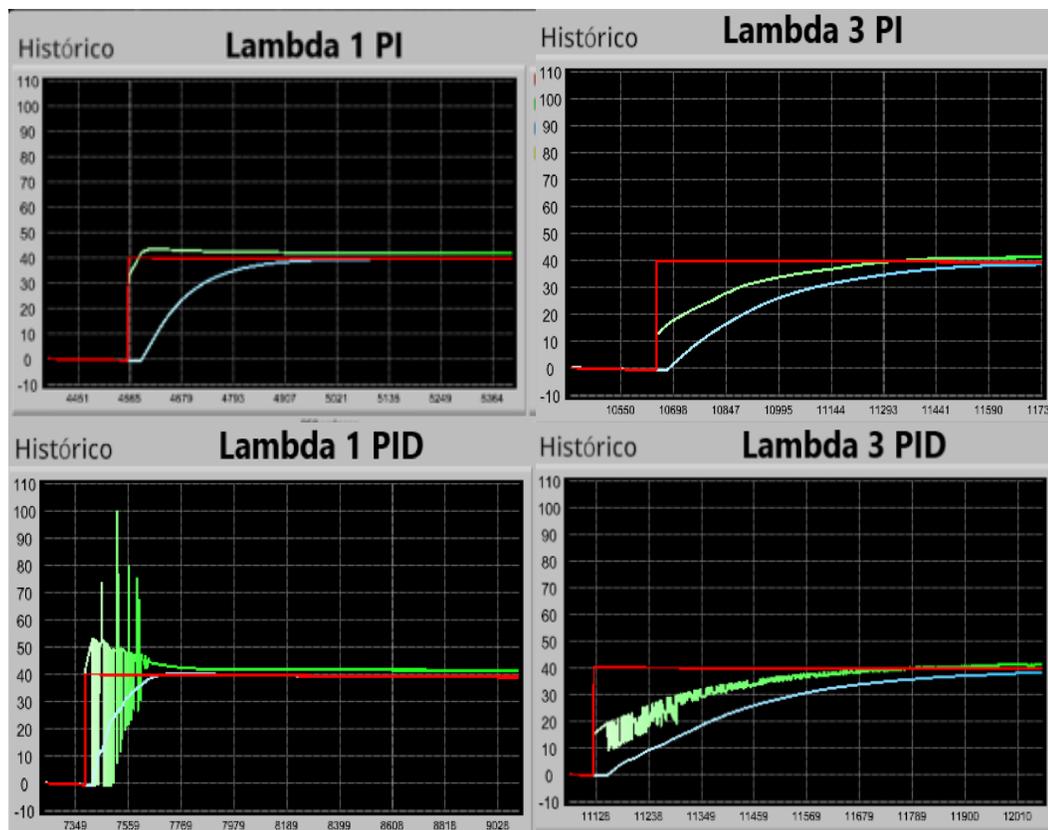
Controlador	Lambda	Kp	Ti (min)	Td (min)
PI	1	0,8092	0,1666	0,0000
PI	3	0,3189	0,1666	0,0000
PID	1	1,0526	0,1916	0,0218
PID	3	0,3844	0,1916	0,0218

Una vez ingresadas las constantes y siguiendo los pasos de la sección 4.2 se obtiene la gráfica del comportamiento de la planta de presión con la sintonía del controlador como se indica en la Figura 101.

Figura 101

Respuesta de la planta de presión a la sintonía por Lambda





Para seleccionar uno de los dos métodos de sintonía gráficamente se observa que con el control PID en cuanto al control value es más inestable y genera una curva similar a la del control PI, y solo se analiza las curvas para el PI en los parámetros de la Tabla 20, se selecciona al controlador PI con $\Lambda = 1$ ya que es más rápido que el de $\Lambda = 3$.

Tabla 20

Parámetros de selección de controlador PI para el método de Lambda

Método de sintonización	Parámetros				
	Tipo de Control	Sobre impulso	Tiempo de Levantamiento	Tiempo de asentamiento	Estabilidad en CV
		%Mp	Tr (s)	Ts (s)	
Lambda Tao=1	PI	-	21,00	37,00	✓
Lambda Tao=3	PI	-	60,40	98,90	✓

4.5. Análisis de los métodos de sintonía seleccionados

El análisis de los métodos de sintonía se realiza mediante la evaluación de cuatro aspectos para analizarlos que son: el sobre impulso, tiempo de asentamiento, el tiempo de reacción y el comportamiento del control value y se resume en la Tabla 21.

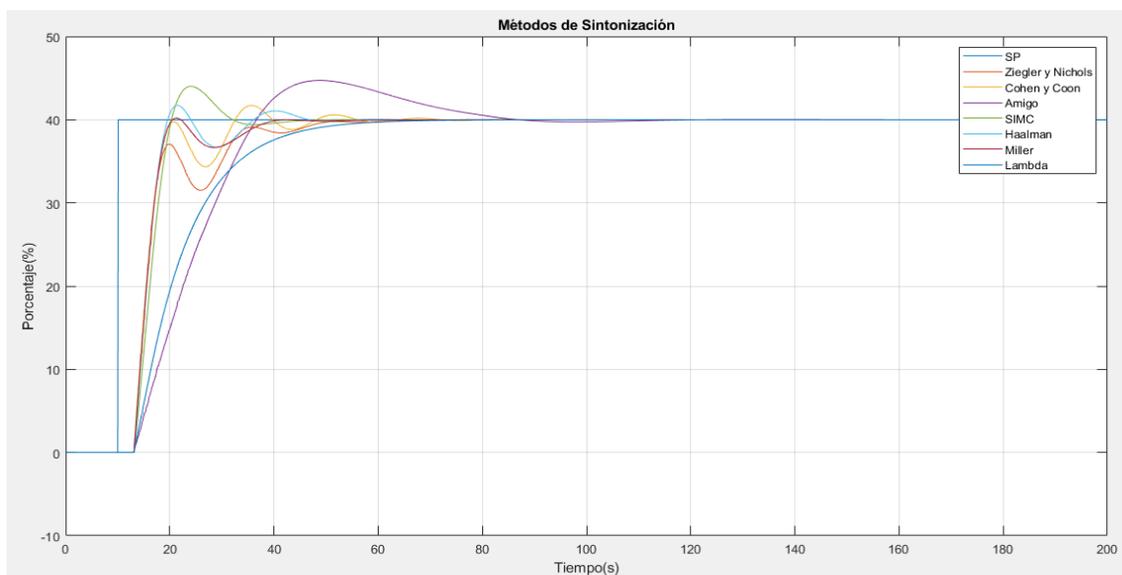
Tabla 21

Parámetros de selección del método de sintonía

Método de sintonización	Parámetros					
	Tipo de Control	Sobre impulso %Mp	Tiempo de Levantamiento Tr (s)	Tiempo de asentamiento Ts (s)	Estabilidad en CV	Selección
Ziegler y Nichols	PI	-	5,20	33,40	✓	✓
Ziegler y Nichols	PID	6,90%	5,00	52,80	✗	✗
Cohen y Coon	PI	4,28%	4,90	32,50	✓	✓
Cohen y Coon	PID	6,15%	11,20	74,60	✗	✗
Amigo	PI	-	126,00	>200	✓	✗
Amigo conservador	PID	7,48%	19,40	62,00	✗	✗
Amigo Robusto	PID	11,80%	18,40	64,00	✓	✓
SIMC	PI	10,05%	5,30	17,10	✓	✓
Haalman	PI	4,32%	4,70	29,40	✓	✓
Miller Normal IAE	PI	4,98%	4,70	32,40	✓	✗
Miller Normal ITAE	PI	2,33%	4,80	24,40	✓	✗
Miller Modificado IAE	PI	0,47%	4,80	23,70	✓	✗
Miller Modificado ITAE	PI	6,08%	5,20	14,60	✓	✓
Lambda Tao=1	PI	-	21,00	37,00	✓	✓
Lambda Tao=3	PI	-	60,40	98,90	✓	✗

Figura 102

Gráfica de la respuesta de los métodos de sintonización

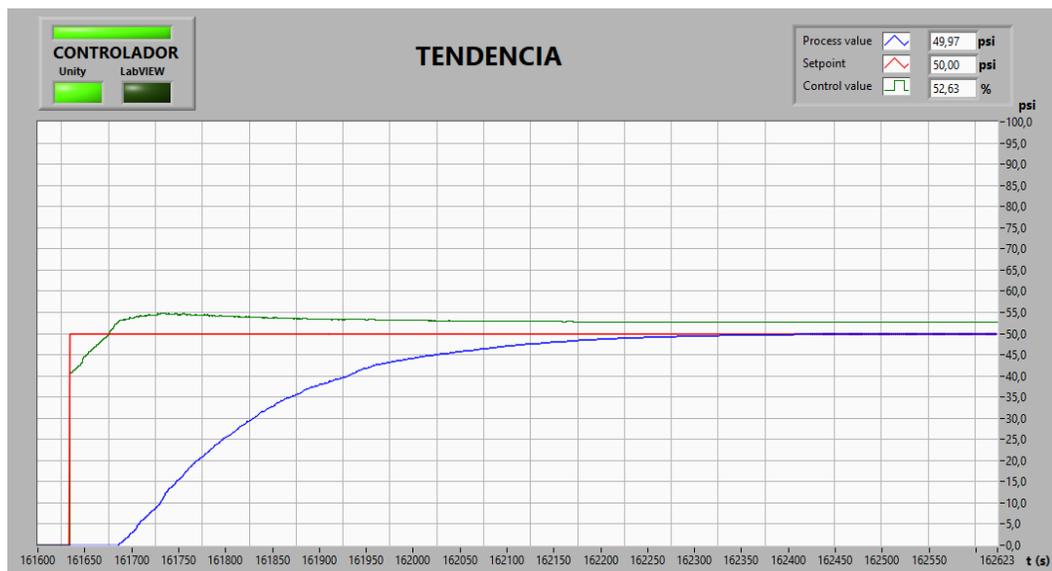


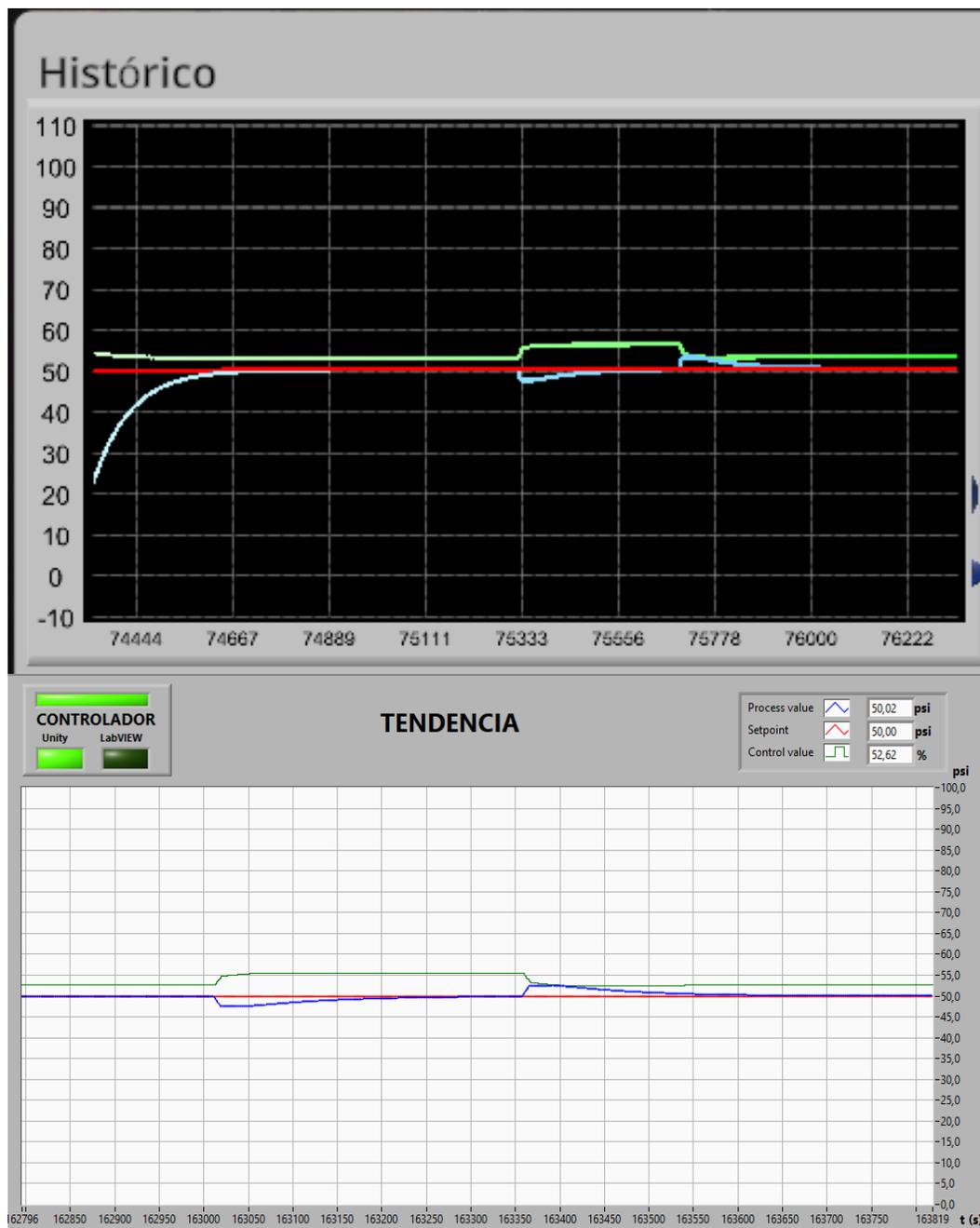
4.6. Prueba de controlador a una perturbación

La prueba de la perturbación se la realiza con el método de sintonización Lambda, se requiere abrir la válvula V4 y ver cómo reacciona el sistema cuando se encuentra controlando al proceso de presión.

Figura 103

Respuesta del controlador frente a una perturbación





4.7. Selección del mejor controlador

Todos los métodos de sintonización con los que se realizaron las pruebas tienen control sobre la planta de presión programada, variando en cuanto a los parámetros de selección para la obtención del mejor método de sintonización del proceso.

Para la selección del mejor controlador se toma en cuenta los criterios: menor sobre impulso, menor de tiempo de asentamiento y estabilidad de la señal del control value, considerando todos estos parámetros se verifica que el método de respuesta de Lambda agresivo ($\Lambda = 1$) cumple que no tiene sobre impulso, su tiempo de asentamiento es de 33 segundos y la respuesta del control value es estable.

4.8. Validación de la hipótesis

La hipótesis propuesta dice: *“Es posible sintonizar controladores PI-PID de una estación de control de presión mediante un sistema virtual 3D”*.

Como primer punto de la validación de la hipótesis se realizó las pruebas con el modelo matemático de Unity con una eficiencia del 99.88% de lo programado, y al aplicar el método de sintonía Lambda, se tiene un control sobre la misma, validando de esta forma que el modelo matemático funciona desde Unity y a su vez que si se puede sintonizar controladores desde un sistema virtual 3D.

Como punto final para la validación se aplican varios métodos de sintonía mediante los cuales se controló a la planta de presión unos más eficientes que otros, pero teniendo un resultado final de controladores sintonizados y controlando el proceso de presión, por lo que la hipótesis es afirmativa y se cumple con la hipótesis de la investigación.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se implementó un sistema virtual 3D de una estación de presión, emulando un ambiente petrolero con instrumentación y dispositivos industriales para el control del proceso, el entorno virtual 3D se encuentra programado en Unity y su dinámica de funcionamiento responde a un sistema de primer orden más retardo, característica de los procesos industriales de presión.
- El sistema virtual 3D fue desarrollado en base al diagrama P&ID de un separador bifásico de presión, en el diseño se consideran todos los detalles y características de los instrumentos, tuberías, equipos, etc., lo que proporciona un ambiente virtual con un alto nivel de similitud en la apariencia y funcionamiento, proporcionando al usuario gran nivel de realismo.
- Se validó la función de transferencia del proceso de presión, para ello se generó varios escalones a diferentes valores y se verificó que el modelo matemático cumple con un sistema de primer orden más retardo (autorregulado) y trabaja en el rango de 0 a 100 psi.
- La comunicación entre los software Unity 3D y LabVIEW es en tiempo real y sin retardo, esto gracias al uso del protocolo de comunicación ethernet, que fue verificado en el intercambio de datos entre aplicaciones.
- Se diseñaron varios controladores PI-PID utilizados en el control del proceso presión, mediante los métodos de diseño analítico, estos controladores responden de forma eficiente ante perturbaciones, así como presentan estabilidad, y se verifica el funcionamiento correcto tanto del proceso industrial simulado y del controlador.
- Del diseño e implementación de varios algoritmos (PI-PID) se determina que el controlador más eficiente para el sistema de presión es el control PI Lambda

agresivo ($\Lambda = 1$), ya que no presenta sobre impulso, su tiempo de asentamiento es de 33 segundos y la respuesta del control value es estable.

- El parámetro de sobre impulso es importante tomarlo en cuenta en el diseño de controladores, ya que ello puede activar las alarmas de los sistemas SCADA provocando un funcionamiento incorrecto.

5.2. Recomendaciones

- Para la obtención del modelo matemático con la ayuda del Ident de MATLAB considerar significativamente el tiempo de muestreo para la obtención de datos, ya que de ello depende mucho la función de transferencia que MATLAB entregue.
- Para los datos de T_i y T_d que LabVIEW maneja, considerar como punto importante que las unidades son en minutos, al momento de aplicar las fórmulas lo tenemos en segundos y esto puede provocar que el controlador no se sintonice.
- Verificar que los datos de los parámetros PID se carguen de forma correcta en LabVIEW, puede que exista que un dato que no esté cargado y esto provocará que no se sintonice el controlador.
- Tomar en cuenta que la válvula V3 se encuentre abierta ya que si no es así no se puede realizar ninguna prueba de control en el proceso.
- Para poder comparar las curvas de sintonización del controlador se tiene que tener los mismos datos en cuanto al valor del set point y el tiempo en que se da el set point.
- Tomar en cuenta el formato que maneja la computadora de coma o punto decimal, para no tener problemas en la transmisión de datos.

Bibliografía

- Adobe. (2021). *Substance 3D*. Recuperado el 10 de 9 de 2021, de Substance Painter:
<https://www.adobe.com/la/products/substance3d-painter.html>
- Alfaro Ruiz, V. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Ingeniería, Revista de la Universidad de Costa Rica Vol 12 (1-2)*, 21-36.
- Alfaro, V. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Ingeniería, Revista de la Universidad de Costa Rica Vol 12 (1-2)*, 21-36.
- Aström, K., & Hägglund, T. (2009). *Control PID Avanzado*. Madrid, España: Pearson, [Tabla], 17 de Septiembre de 2021 Recuperado de Control PID Avanzado.
- Åström, K., & Hägglund, T. (2009). *Control PID Avanzado*. Madrid: Pearson Educación.
- Aula21. (2020). *Centro de Formación Técnica para la Industria*. Recuperado el 15 de 10 de 2021, de Instrumentación Industrial: todo lo que necesitas saber:
<https://www.cursosaula21.com/que-es-la-instrumentacion-industrial/>
- Aula21. (2020). *Centro de Formación Técnica para la Industria*. Recuperado el 2021 de 10 de 15, de Qué es el protocolo Ethernet Industrial:
<https://www.cursosaula21.com/que-es-ethernet-industrial/>
- AUTODESK. (2021). *AUTODESK*. Recuperado el 10 de 09 de 2021, de 3ds mAX:
<https://latinoamerica.autodesk.com/products/3ds-max/features>
- AUTODESK-Inc. (2021). *AUTODESK*. Recuperado el 10 de 9 de 2021, de AutoCAD Plant 3D: https://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-plant-3d?us_oa=dotcom-us&us_si=01a5081b-ea00-4496-9878-8b5c20643f85&us_st=AUTOCAD%20PLANT%203D&us_pt=PLNT3D
- Castaño Giraldo, S. A. (s.f.). *Control Automatico Educación*. Recuperado el 25 de 07 de

- 2021, de Método de la Integral del Error Sintonia Controlador PID:
<https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/metodo-de-la-integral-del-error-sintonia-controlador-pid/> , [Tabla].
- Castaño, S. (s.f.). *Control Automático Educación*. Recuperado el 25 de 09 de 2021, de Método de la Integral del Error Sintonia Controlador PID:
<https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/metodo-de-la-integral-del-error-sintonia-controlador-pid/>
- Charre-Ibarra, S., Alcalá-Rodríguez, J., & López-Luiz, N. (2014). Sistema didáctico de control de presión. *Formación Universitaria*, vol. 7, 33-40.
- Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial* (Vol. Octava). México: Alfaomega.
- Emerson. (2021). *Emerson*. Recuperado el 3 de 10 de 2021, de Qué son los transductores?: <https://www.emerson.com/es-es/automation/valves-actuators-regulators/controllers-instruments/transducers>
- Erosa, D. (10 de Junio de 2019). *OpenWebinars*. Recuperado el 05 de 10 de 2021, de Que es Unity?: <https://openwebinars.net/blog/que-es-unity/>
- Fredes, C. A., Hernández, J. P., & Díaz, D. A. (2012). Potencial y Problemas de la Simulación en Ambientes Virtuales para el Aprendizaje. *Formación universitaria*, 5(1), 45-56.
- Kinoshita, T., & Yamamoto, T. (2016). Design of a Data-Oriented Cascade Control System. *IEEJ Transactions On Electronics*, 703-709.
- Lab-Volt. (2004). Fundamentos del Control de Procesos usando el programa LVPROSIM. *Instrumentación y control de procesos*, 1-1,1-2. doi:ISBN 2-89289-711-4
- Lucidchart. (2021). *Lucidchart*. Recuperado el 06 de 10 de 2021, de Que son los diagramas de tuberías e instrumentación:
<https://www.lucidchart.com/pages/es/que-son-los-diagramas-de-tuberias-e->

instrumentacion

MathWorks. (2021). *MATLAB*. Recuperado el 11 de 9 de 2021, de Matemáticas.

Gráficas. Programación.: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

MathWorks-Inc. (2021). *Centro de Ayuda*. Recuperado el 11 de 9 de 2021, de

Descripción del producto MATLAB:

https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

Morales, R., & Ramirez, R. (2013). *Sistemas de Control Moderno: VOLUMEN I:*

Sistemas de control continuo. Editorial Digital tecnológico de Monterrey, 29.

Obtenido de <http://prod77ms.itesm.mx/podcast/EDTM/ID295.pdf>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson, 17 de Septiembre de

2021[Tabla] Recuperado de : Ingeniería de control moderna.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (Quinta ed.). Madrid: Pearson.

Ortega, J., Vera, G., & Burgos, Á. (2003). *La realidad virtual y sus posibilidades.*

Etic@net, 1-17. Obtenido de

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6871642>

Sanchis, R., Ariño, C., & Romero, J. (2010). *Automatización industrial. Universitat*

Jaume ISBN: 978-84-693-0994-0, 111.

Schlumberger. (2021). *Oilfield Glossary en Español*. Recuperado el 18 de 10 de 2021,

de separador horizontal:

https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/h/horizontal_separator

schulumberger. (2021). *Oilfield Glossary en Español*. Recuperado el 18 de 10 de 2021,

de quemador: <https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/f/flare>

Smith, C., & Corripio, A. (1991). *Control Automático de Procesos Teoría y Práctica.*

México: Limusa.

Wolframalpha. (2021). *WolframAlpha Computational Intelligence*. Recuperado el 28 de

10 de 2021, de

https://www.wolframalpha.com/input/?i2d=true&i=inverse+Laplace+transform+0.94726*%5C%2840%29Divide%5Bexp%5C%2840%29-2.3372s%5C%2841%29%2C1%2B17.636s%5D%5C%2841%29

WolframAlpha. (2021). *WolframAlpha Computational Intelligence*. Recuperado el 28 de 10 de 2021, de

https://www.wolframalpha.com/input/?i2d=true&i=inverse+Laplace+transform+0.94726*%5C%2840%29Divide%5Bexp%5C%2840%29-2.3372s%5C%2841%29%2C1%2B17.636s%5D%5C%2841%29

Wonderware. (2021). *Wonderware*. Recuperado el 28 de 10 de 2021, de Interfaz

Hombre-Máquina (HMI): <https://www.wonderware.es/hmi-scada/que-es-hmi/>