



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Desarrollo de un entorno virtual 3D que simule una estación de control de temperatura,
mediante la técnica de “Hardware in the Loop”, orientado al entrenamiento de Control
Automático, en la Universidad Técnica de Cotopaxi**

Corrales Bastidas, Byron Paúl

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría en Electrónica y Automatización Mención Redes Industriales

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

Ing. Escobar Anchaguano, Ivón Patricia Mgs.

23 de febrero del 2022



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**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, **“Desarrollo de un entorno virtual 3D que simule una estación de control de temperatura, mediante la técnica de “Hardware in the Loop”, orientado al entrenamiento de Control Automático, en la Universidad Técnica de Cotopaxi”** fue realizado por el señor **Corrales Bastidas, Byron Paúl**, 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, 23 febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
**IVON PATRICIA
ESCOBAR
ANCHAGUANO**

Ing. Escobar Anchaguano, Ivón Patricia Mgs.

C.C.: 0502878135

DIRECTORA



Proyecto Titulación_Paúl Corrales.pdf

Scanned on: 0:56 February 22, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	122
Words with Minor Changes	32
Paraphrased Words	69
Omitted Words	0



Escanea el código QR para
EVON PATRICIA
ESCOBAR
ANCHAGUANO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

Responsabilidad de autoría

Yo **Corrales Bastidas, Byron Paúl**, con cédula de ciudadanía N° **0502347768**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Desarrollo de un entorno virtual 3D que simule una estación de control de temperatura, mediante la técnica de “Hardware in the Loop”, orientado al entrenamiento de Control Automático, en la Universidad Técnica de Cotopaxi** es de mí 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, 23 febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
**BYRON PAUL
CORRALES
BASTIDAS**

.....
Corrales Bastidas, Byron Paúl

C.C.: 0502347768



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

Autorización de publicación

Yo **Corrales Bastidas, Byron Paúl**, con cédula de ciudadanía N° **0502347768**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Desarrollo de un entorno virtual 3D que simule una estación de control de temperatura, mediante la técnica de “Hardware in the Loop”, orientado al entrenamiento de Control Automático, en la Universidad Técnica de Cotopaxi en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.**

Latacunga, 23 febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
**BYRON PAUL
CORRALES
BASTIDAS**

.....
Corrales Bastidas, Byron Paúl

C.C.: 0502347768

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico a todas aquellas personas que de una u otra manera me han apoyado en el desarrollo del mismo, pero de manera muy especial a mis padres Carlos y Gladys, a mis hermanos Juan y Eddy quienes siempre están pendientes de mí, a mis sobrinos Lucianita y Estebitan por la ternura y alegría que han traído a mi vida y a mi novia María José por siempre motivarme a seguir adelante cada día.

Es justo también dedicar a todas aquellas personas que lamentablemente por la pandemia del COVID-19 no nos acompañan en forma presencial, pero desde el cielo están cuidándonos.

Byron Paúl Corrales Bastidas

Agradecimiento

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por cuidarme y brindarme la fortaleza necesaria en especial en estos tiempos difíciles que vive la humanidad.

A mi familia, compañeros de clase, compañeros de trabajo y amigos por su apoyo incondicional siempre.

A todas aquellas personas que colaboraron en el desarrollo del presente trabajo, en especial a mi tutora la Ing. Ivón Escobar por saber guiarme adecuadamente a la consecución del objetivo planteado. Al Ing. Edwin Pruna por todas las enseñanzas impartidas que han sido de gran ayuda para mi crecimiento profesional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a todos los Docentes y colaboradores por su gran aporte en el desarrollo de la Maestría.

Finalmente es justo agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi, en especial a la Carrera de Ingeniería Electromecánica por el apoyo y apertura brindada en todo momento.

Gracias a todos...

Byron Paúl Corrales Bastidas

Tabla de contenidos	
Carátula	1
Certificación.....	2
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos	8
Índice de figuras	12
Índice de tablas.....	15
Resumen	18
Abstract.....	19
Contenidos generales	20
Antecedentes	20
Problema	22
Objetivos	24

	9
<i>Objetivo General</i>	24
<i>Objetivos Específicos</i>	24
Justificación, importancia y alcance del proyecto	25
Hipótesis de investigación	25
<i>Categorización de las variables de investigación</i>	26
Marco teórico referencial	27
Marco Legal.....	27
Marco Conceptual.....	27
<i>Sistemas de Control</i>	27
<i>Clases de sistemas de control</i>	33
<i>Características de los sistemas de control</i>	34
<i>Respuesta de un sistema</i>	36
<i>Modelamiento matemático</i>	37
<i>Representación en Función de Transferencia</i>	38
<i>Sistema de Primer Orden</i>	40
<i>Tipos de procesos industriales</i>	43

	10
<i>Control Automático</i>	47
<i>Sintonización de Controladores</i>	51
<i>Entornos Virtuales</i>	54
<i>Blender</i>	55
<i>Unity 3D</i>	56
<i>Hardware in the Loop</i>	57
Metodología de la investigación	59
Diagrama P&ID del proceso	60
Descripción proceso real	61
Función de Transferencia del Sistema	63
Descripción del proceso virtual	70
Diseño del proceso virtual en Blender	71
Diseño del proceso virtual en Unity	74
Implementación del Algoritmo C#	79
Diseño de Controladores	83
Pruebas y resultados	90

	11
Funcionamiento del entorno virtual	90
Validación del entorno virtual	94
Validación del controlador	96
Validación del entrenamiento	101
Validación de la hipótesis	102
Alcances	103
Limitaciones	103
Conclusiones y recomendaciones	104
Conclusiones	104
Recomendaciones	105
Bibliografía	106
Anexos	110

Índice de figuras

Figura 1 <i>Funcionamiento básico de un Sistema de Control</i>	28
Figura 2 <i>Sistema de control de nivel de un tanque</i>	30
Figura 3 <i>Elementos de un sistema de control</i>	31
Figura 4 <i>Sistema de control en lazo abierto</i>	33
Figura 5 <i>Sistema de control retroalimentado</i>	34
Figura 6 <i>Sistema estable e inestable</i>	35
Figura 7 <i>Sistema exacto e inexacto</i>	35
Figura 8 <i>Velocidad de respuesta de un sistema</i>	36
Figura 9 <i>Respuesta de un sistema</i>	37
Figura 10 <i>Representación de un sistema</i>	38
Figura 11 <i>Respuesta de un sistema en el dominio de la frecuencia</i>	39
Figura 12 <i>Respuesta de un proceso autorregulado</i>	42
Figura 13 <i>Respuesta de un proceso de primer orden más tiempo muerto</i>	43
Figura 14 <i>Respuesta de un proceso autorregulado</i>	44
Figura 15 <i>Respuesta de un proceso integrante</i>	46
Figura 16 <i>Diagrama típico de un control automático</i>	47
Figura 17 <i>Relación de respuesta del control proporcional</i>	48
Figura 18 <i>Ambiente de trabajo en Blender</i>	55
Figura 19 <i>Ambiente de trabajo en Unity</i>	56
Figura 20 <i>Esquema general del proyecto</i>	59
Figura 21 <i>Diagrama P&ID para el control de un horno eléctrico</i>	60
Figura 22 <i>Horno eléctrico empleado</i>	61
Figura 23 <i>Circuito de Control de Fase</i>	62
Figura 24 <i>Respuesta del horno ante una entrada escalón</i>	63

	13
Figura 25 <i>Toolbox System Identification</i>	65
Figura 26 <i>Importación de los datos a estimar</i>	65
Figura 27 <i>Estimación en Modelo de Proceso</i>	66
Figura 28 <i>Validación y respuesta de la estimación ante una entrada escalón</i>	66
Figura 29 <i>Modelo obtenido</i>	67
Figura 30 <i>Determinación del tiempo muerto en forma gráfica</i>	69
Figura 31 <i>Proceso de pintura al horno</i>	71
Figura 32 <i>Ambiente industrial</i>	72
Figura 33 <i>Horno de pintura diseñado en Blender</i>	72
Figura 34 <i>Proceso virtual de pintura al horno diseñado en Blender</i>	73
Figura 35 <i>Diseño de los ventiladores en Blender</i>	73
Figura 36 <i>Proceso virtual de pintura al horno en Unity 3D</i>	74
Figura 37 <i>Módulo de control para las resistencias de calefacción en Unity 3D</i>	75
Figura 38 <i>Diagrama P&ID en la pantalla KTP700</i>	76
Figura 39 <i>Información de los controles en la pantalla KTP700</i>	76
Figura 40 <i>Información de los valores de CV y PV en la pantalla KTP700</i>	77
Figura 41 <i>Tendencias del proceso</i>	77
Figura 42 <i>Transmisor de Temperatura</i>	78
Figura 43 <i>Proceso en Unity</i>	78
Figura 44 <i>Representación en función de transferencia del proceso</i>	79
Figura 45 <i>Algoritmo implementado en Unity</i>	82
Figura 46 <i>Esquema de conexión en Lazo Abierto</i>	84
Figura 47 <i>Adquisición de datos en Lazo Abierto en LabVIEW</i>	85
Figura 48 <i>Programación Control en Lazo Abierto en LabVIEW</i>	85
Figura 49 <i>Programación para el registro de datos en LabVIEW</i>	86

Figura 50 <i>Sistema de Control de Temperatura en Lazo Cerrado en LabVIEW</i>	87
Figura 51 <i>Control PID realizado en LabVIEW</i>	87
Figura 52 <i>Control PID realizado en TIA PORTAL</i>	88
Figura 53 <i>Menú de Inicio</i>	90
Figura 54 <i>Opción Controles</i>	91
Figura 55 <i>Selección del color del vehículo</i>	91
Figura 56 <i>Selección del puerto de comunicación serial</i>	92
Figura 57 <i>Comunicación establecida</i>	93
Figura 58 <i>Ambiente de trabajo en Unity</i>	93
Figura 59 <i>Determinación de parámetros del modelo matemático</i>	94
Figura 60 <i>Respuesta del sistema a una entrada escalón</i>	95
Figura 61 <i>Respuesta real del sistema con los métodos de sintonización</i>	96
Figura 62 <i>Control del proceso real en LabVIEW</i>	97
Figura 63 <i>Control del proceso virtual en LabVIEW</i>	98
Figura 64 <i>Interacción del control del proceso virtual en LabVIEW</i>	98
Figura 65 <i>Control del proceso virtual con PLC S7-1200</i>	99
Figura 66 <i>Tendencias mostradas en TIA PORTAL</i>	99
Figura 67 <i>Tendencias mostradas en el proceso virtual</i>	100
Figura 68 <i>Calculadora para determinar las constantes del controlador PI</i>	100
Figura 69 <i>Encuesta de validación de resultados</i>	102

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de Variables</i>	26
Tabla 2 <i>Característica de las acciones de control</i>	51
Tabla 3 <i>Sintonización de un Controlador PI para un proceso autorregulado</i>	52
Tabla 4 <i>Sintonización de un Controlador PID para un proceso autorregulado</i>	52
Tabla 5 <i>Sintonización de un Controlador PI para un proceso integrante</i>	53
Tabla 6 <i>Sintonización de un Controlador PID para un proceso integrante</i>	54
Tabla 7 <i>Parámetros de desempeño de los Controladores PI</i>	97

Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1</i>	36
<i>Ecuación 2</i>	39
<i>Ecuación 3</i>	39
<i>Ecuación 4</i>	40
<i>Ecuación 5</i>	40
<i>Ecuación 6</i>	40
<i>Ecuación 7</i>	41
<i>Ecuación 8</i>	41
<i>Ecuación 9</i>	42
<i>Ecuación 10</i>	42
<i>Ecuación 11</i>	45
<i>Ecuación 12</i>	45
<i>Ecuación 13</i>	45
<i>Ecuación 14</i>	45
<i>Ecuación 15</i>	46
<i>Ecuación 16</i>	47
<i>Ecuación 17</i>	47
<i>Ecuación 18</i>	48
<i>Ecuación 19</i>	49
<i>Ecuación 20</i>	49
<i>Ecuación 21</i>	50
<i>Ecuación 22</i>	50
<i>Ecuación 23</i>	67
<i>Ecuación 24</i>	68
<i>Ecuación 25</i>	68

<i>Ecuación 26</i>	68
<i>Ecuación 27</i>	69
<i>Ecuación 28</i>	70
<i>Ecuación 29</i>	79
<i>Ecuación 30</i>	80
<i>Ecuación 31</i>	81
<i>Ecuación 32</i>	81

Resumen

El presente proyecto, abarca el estudio de sistemas de control automático en especial de un proceso de temperatura, esta implementación permite disponer de una planta simulada en un entorno virtual 3D desarrollado en la plataforma Unity el cual cumple las mismas características de un sistema real a fin de ser aplicado al entrenamiento del control de procesos en los Laboratorios de Automatización de la Universidad Técnica de Cotopaxi. El diseño del sistema contempla la obtención de la función de transferencia de un proceso de temperatura real, el análisis de la arquitectura a virtualizar, la implementación del algoritmo y las etapas de validación del sistema en tiempo real empleando el entorno virtual, para finalmente aplicar estrategias de control al proceso en donde se emplean diferentes métodos de sintonización y se obtienen las características relevantes de cada uno de ellos. Al emplear la técnica "Hardware in the Loop" se puede simular el comportamiento de sensores y actuadores que generan señales eléctricas, las mismas que son compatibles con cualquier controlador. La propuesta fue validada por alumnos en donde se muestra que el sistema supera el 90.5% de aceptación ayudando a la comprensión de las estrategias empleadas en control automático y permitiendo el análisis matemático del mismo.

Palabras Clave:

- **CONTROL AUTOMÁTICO**
- **MODELO MATEMÁTICO**
- **HARDWARE IN THE LOOP**
- **ENTORNO VIRTUAL 3D**

Abstract

This project covers the study of automatic control systems especially of a temperature process, this implementation allows to have a simulated process in a 3D virtual environment developed in the Unity platform which meets the same characteristics of a real system in order to be applied to the training of process control in the Automation Laboratories of the Technical University of Cotopaxi. The design of the system contemplates obtaining the transfer function of a real temperature process, the analysis of the architecture to be virtualized, the implementation of the algorithm and the stages of validation of the system in real time using the virtual environment, to finally apply control strategies to the process where different tuning methods are used and the relevant characteristics of each of them are obtained. By using the "Hardware in the Loop" technique, it is possible to simulate the behavior of sensors and actuators that generate electrical signals, which are compatible with any controller. The proposal was validated by students where it is shown that the system exceeds 90.5% of acceptance helping to understand the strategies used in automatic control and allowing the mathematical analysis of the same.

Key words:

- **AUTOMATIC CONTROL**
- **MATHEMATICAL MODEL**
- **HARDWARE IN THE LOOP**
- **3D VIRTUAL ENVIRONMENT**

Capítulo I

1. Contenidos generales

1.1. Antecedentes

El avance de la tecnología ha provocado que el análisis de los sistemas de control se los pueda llevar a cabo de una manera distinta a la convencional, al poder disponer de modelamientos matemáticos y mediante ello virtualizar los procesos a fin de que cumplan con los requerimientos del real.

En la actualidad, la difusión y empleo de realidad virtual en el estudio de ingeniería es algo que ha tomado gran importancia debido a su versatilidad y a la posibilidad de incursionar en diversas aplicaciones, las mismas que pueden ser simulaciones imitando el mundo real o por simulaciones de escenarios 3D en entornos interactivos. Se puede distinguir tres formas de realidad virtual: la de escritorio o no inmersiva, semi inmersiva y de inmersión total (Flores Cruz et al., 2014).

De acuerdo a (Ipanaqué et al., 2014) el proceso de aprendizaje en el ámbito de la ingeniería se complementa con la realización de prácticas experimentales, más aún en el campo de la automatización y control, es ahí donde toma una gran importancia los laboratorios virtuales y remotos, los primeros emulan una planta real conservando sus características y funciones mientras que los laboratorios remotos son aquellos en donde se puede controlar a distancia un proceso real.

Las formas de visualización se las realiza en entornos de realidad virtual o realidad aumentada tales como la visualización del modelamiento de procesos, identificación y

control de sistemas mecatrónicos complejos lo que permite a los estudiantes obtener una comprensión mucho más rápida y mejor del proceso estudiado en comparación con la educación convencional (Kucera et al., 2018).

Los beneficios de emplear el software Unity en comparación con otras plataformas de desarrollo virtual 3D son abordadas por (Craighead et al., 2008), además establecen diferentes componentes empleados en el desarrollo de una interfaz de realidad virtual. Por otro lado (Bharath & Patil, 2018) establecen la importancia de una interfaz de realidad virtual ya que esta es utilizada para una comunicación física entre el entorno genuino y el virtual con los parámetros dinámicos que el sistema lo demande.

En el trabajo de (Wazir & Annaz, 2014) se compara entre los entornos virtuales 2D y 3D enfocados en la orientación de objetos, en donde los entornos 2D son empleados para probar los algoritmos de navegación y examinar el rendimiento y eficiencia de los sistemas ya que proporcionaron una forma fiable de recopilar datos, monitorear y controlar los procesos. En cambio, los entornos virtuales 3D presentan grandes ventajas cuando se refiere a posicionamiento, orientación y efectos de visualización presentando inconvenientes en el costo y complejidad en su desarrollo. Además, a este análisis se indica las ventajas de emplear software comercial y de uso libre en el desarrollo de trabajos de ingeniería.

La técnica "hardware in the loop" es simulada y desarrollada en una planta de flujo empleando el software LabVIEW e implementado en una FPGA, de las pruebas realizadas se obtiene que el error absoluto es de 0.02 indicando que funciona adecuadamente en tiempo real (Pruna et al., 2020). Por otra parte (Caldas Flautero et al., 2013) realizan la implementación de una planta térmica en una FPGA emulando el comportamiento real por medio de la implementación del modelo matemático en el

sistema embebido para de este maneral identificar los alcances y beneficios del hardware in the loop.

El desarrollo de aplicaciones empleando entornos virtuales orientadas a la educación de procesos industriales se los realiza empleando software de diseño por computador y motores gráficos, junto a ello el empleo de dispositivos periféricos para interactuar con el medio (Pruna et al., 2018). La interactividad que se obtiene entre el alumno y el entorno virtual implementado reduciendo tiempo de operación en el sitio es mencionado por (Crespo et al., 2015), lo que permite una programación off-line, además de disponer a las instituciones educativas de ambientes reales en los casos que no se cuente con equipos físicos especialmente en áreas relacionadas con automatización industrial y simulación de robótica, permitiendo de esta manera la reducción de la curva de aprendizaje del estudiante al disponer de un entorno que reemplace en todas las funciones a un sistema real.

1.2. Problema

La Automatización Industrial y el Control de Procesos son asignaturas indispensables en la formación del Ingeniero Electromecánico, en este aspecto se hace indispensable disponer de medios que ayuden a acercar e incrementar el conocimiento al alumno a fin de que pueda poner en práctica lo aprendido en las aulas en sistemas reales y así de esta manera experimentar de una forma adecuada, sin riesgos e inclusive explotar su iniciativa y creatividad.

Por otra parte, hoy en día la humanidad vive momentos complejos debido a la presencia de la pandemia del COVID-19 la cual ha obligado que muchas de las actividades se desarrollen desde casa siendo una de ellas la educación. Dentro de este ámbito el estudio en áreas técnicas tiene gran dificultad ya que no se puede disponer de

los procesos y herramientas para ello, con lo cual se ha visto la necesidad de solventarla usando simuladores y empleando ambientes virtuales para poder orientar al alumno de una mejor manera.

En la actualidad en los laboratorios de Automatización y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi se dispone de tres módulos didácticos de temperatura para realizar prácticas de las asignaturas de PLCs, Sistemas de Control e Instrumentación Industrial, pero llegan a ser pocas estaciones para la cantidad de estudiantes que requieren utilizarlas. Por otro lado, el normal deterioro de los elementos que forman parte de los módulos en ciertas ocasiones provoca que salgan de servicio con lo cual se tiene un retraso en la planificación académica ya que no se puede experimentar adecuadamente con los alumnos lo aprendido en clases.

Los avances de la tecnología hacen imprescindible que se requiera disponer de módulos de entrenamiento con altas prestaciones acorde a las exigencias actuales para que la brecha entre el conocimiento adquirido en las aulas y el que se demanda en el campo laboral sea el menor posible siendo un aporte a las industrias y sociedad en general en el menor tiempo posible.

Los costos que implica el disponer de un laboratorio equipado con gran cantidad de dispositivos tecnológicos es otro factor a tomarse en cuenta ya que en los tiempos actuales se va convirtiendo en el mayor inconveniente a afrontar por parte del sector educativo del país.

Finalmente, la dificultad que se presenta para el alumno en lograr ingresar y realizar sus actividades de prácticas pre profesionales, pasantías y/o servicio a la comunidad en

industrias consolidadas con escenarios reales orientados a la automatización y control industrial provoca el desconocimiento de las nuevas tecnologías presentes hoy en día.

En conclusión, el problema del presente proyecto se basa en la falta de módulos didácticos para la realización de prácticas de laboratorio en el área de control automático.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Desarrollar un entorno virtual 3D que simule una estación de control de temperatura, mediante la técnica de “Hardware in the Loop”, orientado al entrenamiento de control automático, en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Investigar modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico de los procesos de temperatura.
- Realizar el entorno virtual 3D de simulación de un proceso de temperatura para el control en tiempo real.
- Implementar algoritmos de control para el entorno virtual de un proceso de temperatura.
- Validar el correcto funcionamiento del simulador HIL mediante técnicas de control convencional.

1.4. Justificación, importancia y alcance del proyecto

La presente investigación se enfocará en desarrollar entornos virtuales para el entrenamiento de control automático a ser implementado en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Al contemplarse la realización de un módulo virtual, en especial de un proceso de temperatura, se pretende diseñar un ambiente de trabajo similar al que se puede disponer en entornos reales de la industria empleando menos recursos tecnológicos, espacio físico e inversión económica que generalmente es uno de los grandes inconvenientes con los cuales se enfrenta el sector educativo hoy en día. Esto permitirá que los estudiantes puedan acceder sin inconvenientes y realizar sus prácticas experimentales referentes al control automático incentivando a la investigación y experimentación en métodos y técnicas de control además de contar con tecnología innovadora.

La utilización de la técnica “Hardware in the Loop” en el desarrollo del ambiente virtual permitirá involucrar al estudiante en el desarrollo del proceso ya que podrá obtener respuestas y además comandar el sistema como si estuviera en una planta real dándole la opción que se incluya en el control y toma de decisiones.

Por último, con la implementación del presente proyecto se garantizará que el alumno pueda acceder a la realización de prácticas de laboratorio de manera autónoma ya que el sistema puede ser portable de fácil interpretación.

1.5. Hipótesis de investigación

Un entorno de simulación virtual 3D de un proceso de temperatura empleando “Hardware in the Loop” permitirá el entrenamiento de Control Automático.

1.5.1. Categorización de las variables de investigación

En consecuencia, de la hipótesis planteada se identifican las siguientes variables:

Variable Independiente: Desarrollo de un entorno de simulación virtual 3D empleando hardware in the loop.

Variable Dependiente: Entrenamiento de Control Automático en procesos de temperatura.

La operacionalización de las variables se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de Variables

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Nivel de aprendizaje de Control Automático en procesos de temperatura.	Dependiente	Adquisición del conocimiento por medio del estudio, el ejercicio o la experiencia, en especial de los conocimientos necesarios para aprender algún arte u oficio	El nivel de conocimiento adquirido por el alumno al entrenarse en el Control Automático.	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de desarrollo y aplicación práctica. - Capacidad de desarrollo y aplicación teórica. - Capacidad de desarrollo de aplicación física y virtual. 	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de mejora de aprendizaje Control Automático en procesos de temperatura.
Desarrollo de un entorno de simulación virtual 3D empleando hardware in the loop	Independiente	Un entorno virtual de aprendizaje es un espacio educativo para poder enseñar de manera virtual.	Entorno virtual es la técnica que permite simular un proceso reuniendo las características reales	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicación de conceptos de Control Automático 	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de los parámetros de simulación - Grado de complejidad para el uso del entorno virtual

Capítulo II

2. Marco teórico referencial

2.1. Marco Legal

En el marco legal se encuentran bases para el desarrollo de proyectos de tesis de cuarto nivel en:

- Constitución de la República del Ecuador, (Registro Oficial No. 449, 20- octubre - 2008).
- Reglamento de régimen académico, aspectos relacionados a la formación de cuarto nivel.
- Norma ISA S5.1, S5.3. Permite construir diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID).
- Norma ISA101.- Diseño de HMI.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. *Sistemas de Control*

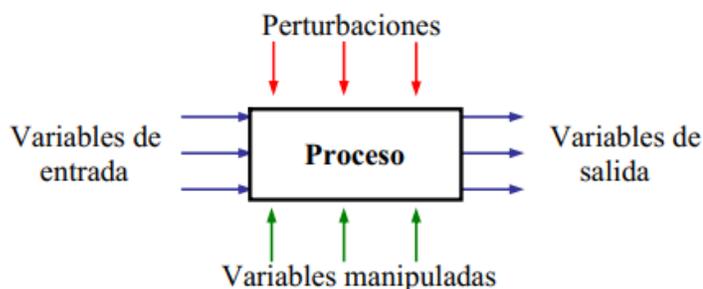
Se define a un sistema de control como un conjunto de elementos los mismos que se encuentran interconectados entre sí, constan de variables de entrada, así como también de variables de salida siendo estas la respuesta del sistema. Dicha conexión

es capaz de comandar, dirigir o regular al propio sistema o en su defecto a otro sistema (Dulhoste, 2006).

Un sistema de control tiene como objetivo mantener la variable de salida en el punto de control a pesar de la presencia de las perturbaciones, para ello utiliza la variable manipulada. (Smith & Corripio, 1991).

Figura 1

Funcionamiento básico de un Sistema de Control



Nota. Este gráfico representa el funcionamiento básico de un Sistema de Control.

Tomado de (Moncada Albitres, 2005).

La ciencia y la ingeniería han evolucionado notablemente en los últimos años, esto se debe en gran parte a los sistemas de control o control automático mismos que se han convertido en parte muy importante de las aplicaciones en los procesos industriales modernos ya que controlan variables físicas tales como temperatura, flujo, presión, nivel, densidad, viscosidad, etc. (Dulhoste, 2006; Ogata, 2010). En la Figura 2 se observa un sistema de control básico para un proceso de llenado de un tanque.

Las ventajas de un control automático son principalmente económicas, ya que permite:

- Mejorar la calidad de los productos.
- Disminuir los tiempos de operación.
- Reducir la dependencia de operarios para manejar procesos.
- Reducir costos de producción (Dulhoste, 2006).

En un Sistema de Control se distinguen los siguientes términos básicos, los mismos que se muestran en la Figura 2.

Planta: Una planta puede ser parte de un equipo o conjunto de elementos que efectúan una operación específica.

Proceso: Básicamente es la operación que se quiere controlar. Es una operación artificial o propia progresiva la misma que consta de varias acciones controladas, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado determinado.

Sistema: Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado (Ogata, 2010).

Además, en un Sistema de Control se presentan los siguientes elementos:

Variable controlada: Es aquella señal que se la controla manteniéndola en una condición específica deseada.

Variable manipulada: Es aquella señal sobre la cual se actúa o se modifica por acción del controlador con el fin de mantener la variable controlada en su valor. Esta señal cambia continuamente para hacer que la variable controlada vuelva al valor deseado.

Señal de referencia (set point): Es el valor en el cual se quiere mantener la variable controlada.

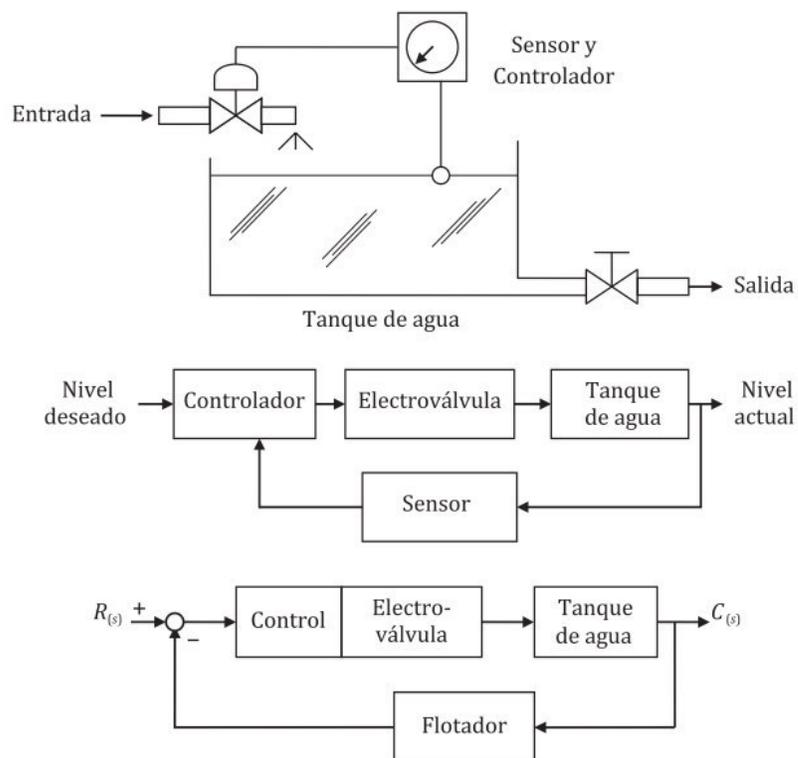
Error: Es la diferencia entre la señal de referencia y la variable controlada.

Perturbación: Es un agente indeseable que tiende a afectar adversamente el valor de la variable controlada.

Controlador: Es aquel que determina el error y determina qué tipo de acción realizar.

Figura 2

Sistema de control de nivel de un tanque



Nota. Representación de un sistema de control, proceso de nivel. Tomado de (Braschi, 2014).

Elemento de medición: Es aquel dispositivo encargado de determinar (medir) el valor de la variable controlada.

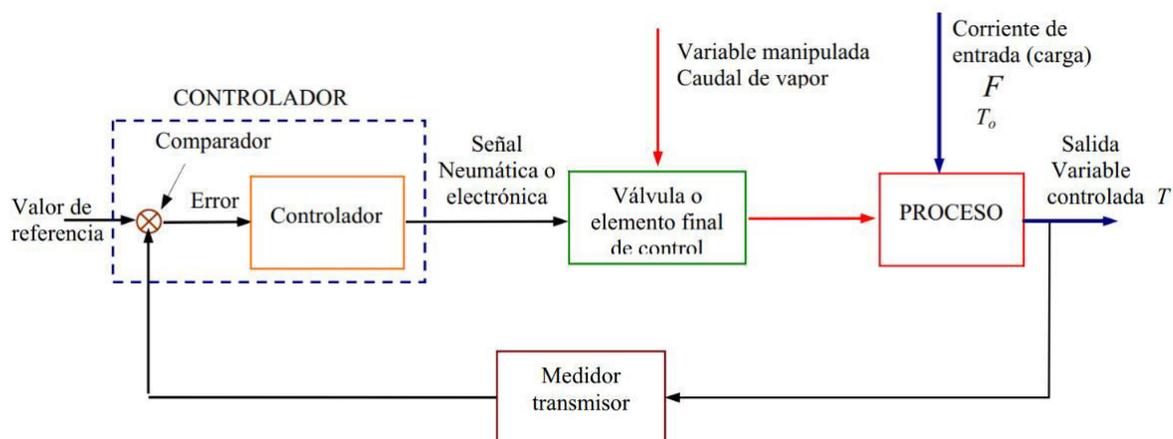
Elemento final de control: Realiza la acción de control para ello modifica la variable manipulada.

Entrada: Se define como el estímulo o excitación que se aplica a un sistema desde una fuente de energía externa, generalmente con el fin de producir, de parte del sistema, una respuesta específica.

Salida: Es la respuesta obtenida de parte del sistema (Dulhoste, 2006).

Figura 3

Elementos de un sistema de control



Nota. Sistema típico de control. Tomado de (Moncada Albitres, 2005).

Los elementos primordiales para realizar el control en todo proceso industrial son el transmisor (medidor o sensor), el controlador y la válvula o elemento de control final

(Moncada Albitres, 2005). Estos elementos cumplen funciones importantes ya que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control, las cuales son:

Medición: Realizada por el sensor en combinación con el transmisor a fin de disponer la medida en una señal estándar de voltaje (1V a 5V) o generalmente de corriente (4mA a 20mA).

Decisión: Es aquel que toma la decisión a fin de mantener la variable de proceso dentro del valor deseado tomando como información la lectura realizada en la medición.

Acción: El elemento de control final es el encargado de realizar la acción, la misma que será de acuerdo a la decisión que tome el controlador (Smith & Corripio, 1991).

En un caso concreto de control generalmente se presentan los siguientes aspectos:

Modelación: Se la define como la representación de la planta la misma que permite hacer un análisis de su comportamiento. La modelación depende de los usos y aplicaciones, así como también de la simplicidad y forma en su obtención.

Simplificación: El uso de suposiciones en ocasiones puede ayudar a simplificar las condiciones que intervienen en el proceso sin alterar los resultados deseados.

Simulación: Es una técnica que permite validar los modelos obtenidos, además ayudan a determinar de forma anticipada el comportamiento que tendrá un sistema, para ello hoy en día los softwares computacionales son de gran utilidad.

Estimación: Al conocer las entradas o salidas de un sistema se puede identificar algunos de sus parámetros internos.

Identificación: La estimación de los valores internos de un sistema ayuda a identificar ciertos rangos del mismo.

Regulación: Se refiere al hecho de fijar el sistema en un valor y que el mismo permanezca en dicho valor a pesar de que se presenten perturbaciones (Canales Ruiz & Barrera Rivera, 1976).

2.2.2. Clases de sistemas de control

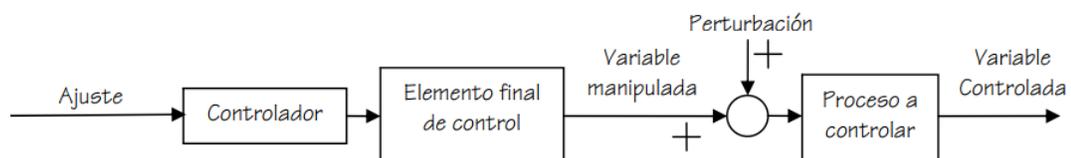
Existen varias formas de clasificar los sistemas de control, los mismos que se detallan a continuación:

Sistema de control de lazo abierto

Es aquel que utiliza la información de la entrada para realizar una acción de control, pero la salida no tiene efecto alguno sobre la acción de control.

Figura 4

Sistema de control en lazo abierto



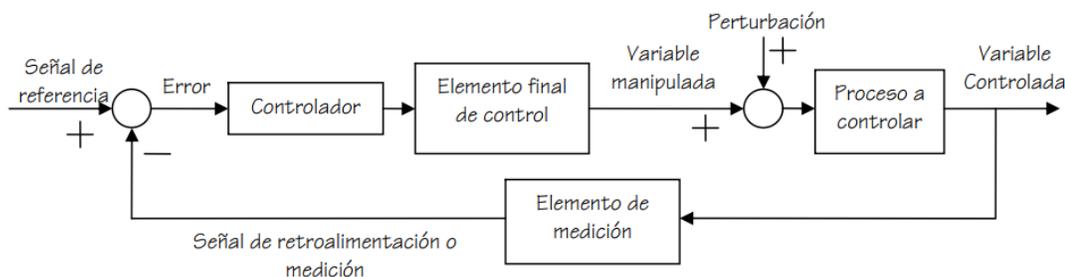
Nota. Gráfico que muestra la estructura de un control en lazo abierto. Tomado de (Dulhoste, 2006).

Sistema de control retroalimentado

Un sistema de control retroalimentado o control en lazo cerrado es cuando la señal de error (diferencia entre la variable controlada y la señal de referencia) ingresa al controlador produciendo una acción la misma que tiene como propósito reducir el error existente y llevar la señal de salida al valor deseado.

Figura 5

Sistema de control retroalimentado

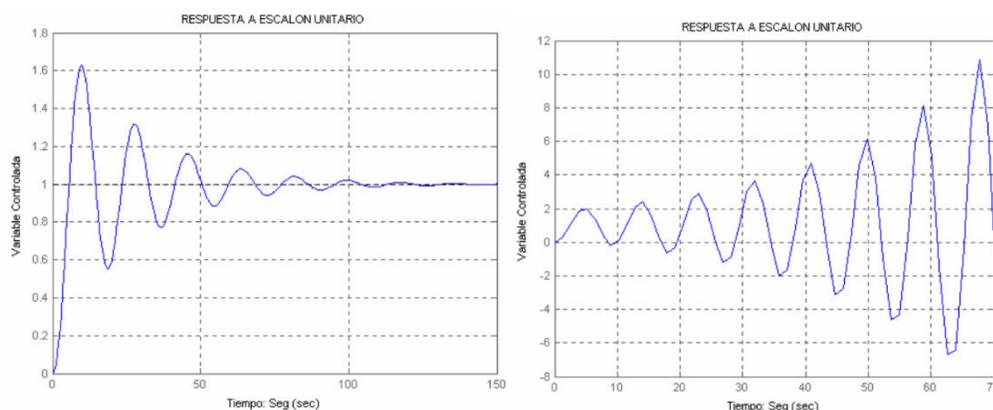


Nota. Estructura de un control en lazo cerrado. Tomado de (Dulhoste, 2006).

2.2.3. Características de los sistemas de control

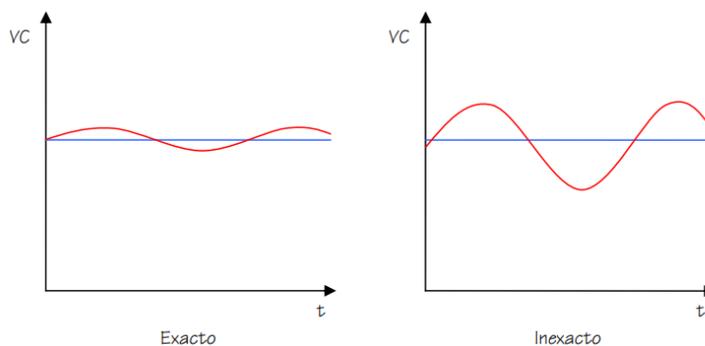
Dentro de las características que se analizan de manera primordial en un sistema de control se encuentran la estabilidad, exactitud y velocidad de respuesta.

Estabilidad: Se refiere a aquella característica en la cual un sistema tiene la capacidad de permanecer en un valor fijo luego que se ha provocado un cambio en la señal de referencia o que se ha producido alguna perturbación en el sistema. Caso contrario si el sistema presenta oscilaciones se dice que el sistema es inestable.

Figura 6*Sistema estable e inestable*

Nota. Respuesta de un sistema estable e inestable. Tomado de (Moncada Albitres, 2005).

Exactitud: Se la define como la capacidad de un sistema para mantener el error en un rango aceptable. Conseguir un sistema exacto depende de las condiciones y elementos del sistema por lo que se presenta una complejidad en conseguirlo

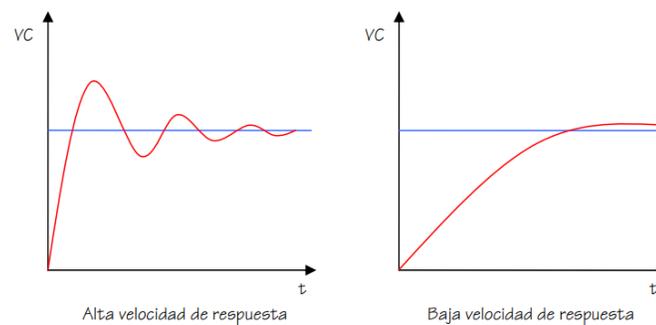
Figura 7*Sistema exacto e inexacto*

Nota. Respuesta de un sistema exacto e inexacto. Tomado de (Dulhoste, 2006).

Velocidad de Respuesta: Es la rapidez que presenta la variable del proceso en llegar al punto de referencia. Este parámetro depende de la dinámica propia del proceso a controlar. Cuando la velocidad de respuesta es demasiado alta afecta a la estabilidad del sistema.

Figura 8

Velocidad de respuesta de un sistema



Tomado de (Dulhoste, 2006).

2.2.4. Respuesta de un sistema

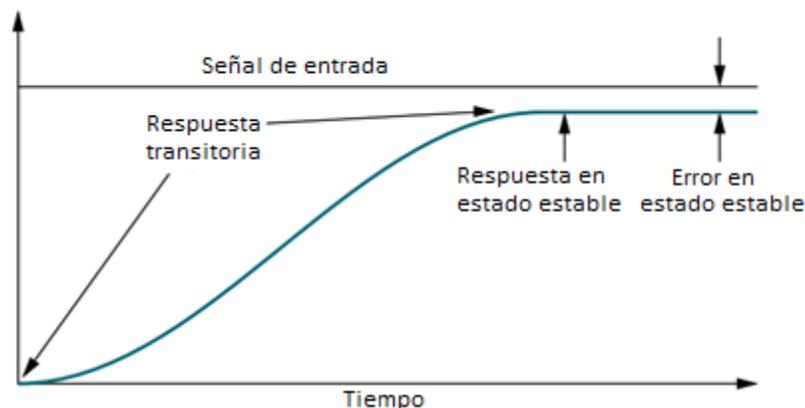
En los sistemas de control se distinguen dos tipos respuestas ante una entrada, la respuesta transitoria que es aquella que se produce desde el inicio hasta llegar a una respuesta en estado estable la misma que generalmente se asemeja a la entrada. De acuerdo a esto se tiene:

$$\text{Respuesta} = \text{Respuesta transitoria} + \text{Respuesta en estado estable}$$

Ecuación 1

Respuesta de un sistema de control

Nota. (Nise, 2011)

Figura 9*Respuesta de un sistema*

Tomado de (Nise, 2011).

2.2.5. Modelamiento matemático

El modelamiento de un sistema cuando se lo hace empleando la teoría de control clásica se lo realiza en base a la función de transferencia, siendo analizado en el dominio s de la frecuencia haciendo uso de la Transformada de Laplace. En cambio, cuando se lo hace empleando la teoría de control moderna se utiliza el concepto del espacio de estado, empleando el análisis vectorial tomando en cuenta que el análisis y el diseño se realizan en el dominio del tiempo.

Dentro de las características primordiales de la teoría de control clásica está que se obtiene buenos resultados para sistemas de control SISO (una entrada y una salida). Sin embargo, no puede manejar los sistemas de control MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas).

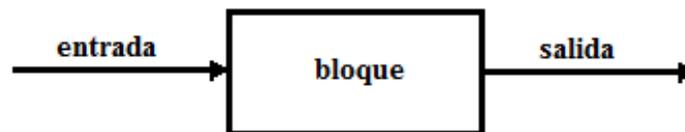
Como se mencionó anteriormente dentro de los aspectos primordiales de un sistema de control está el obtener un modelo matemático que se ajuste a la dinámica de los procesos que pueden ser electromecánicos, hidráulicos, neumáticos, electrónicos, etc. Para la obtención de este modelo matemático se puede emplear técnicas que utilicen procedimientos simples o complicados, de acuerdo a ello la estimación será mejor o no, lo que se debe garantizar es que las predicciones del comportamiento del sistema tengan una precisión elevada (Moncada Albitres, 2005).

2.2.6. Representación en Función de Transferencia

Un sistema es aquel que tiene una señal de entrada y de acuerdo a su dinámica tendrá una salida. En la Figura 10 se indica la relación de una señal de entrada y su salida que es representada gráficamente mediante un diagrama de bloques (Distefano et al., 1992).

Figura 10

Representación de un sistema



La función de transferencia es una expresión algebraica que relaciona la transformada de Laplace de salida y la entrada de un sistema, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen iguales a cero. Al considerar un sistema lineal e invariante en el tiempo descrito mediante la ecuación diferencial (Dorf & Bishop, 2005; Ogata, 2010):

$$a_0 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 \ddot{x} + b_1 \dot{x} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x$$

Ecuación 2

Ecuación diferencial de un sistema de control

Nota. (Ogata, 2010)

Donde:

y es la salida del sistema, y

x es la entrada, entonces

La función de transferencia de un sistema es:

$$FT = G(s) = \frac{L\{salida\}}{L\{entrada\}} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}$$

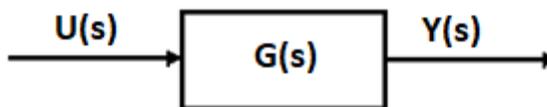
Ecuación 3

Función de Transferencia de un sistema de control

Nota. (Ogata, 2010)

Figura 11

Respuesta de un sistema en el dominio de la frecuencia



2.2.7. Sistema de Primer Orden

Un sistema de primer orden sin ceros es aquel que se muestra en la Ecuación 4:

$$G(s) = \frac{a}{a + s}$$

Ecuación 4

Sistema de Primer Orden

Nota. (Nise, 2011)

En donde:

a = pendiente inicial

Tomando como referencia la representación básica de un sistema mostrado en la Figura 11, en donde la entrada es una señal escalón se tendrá la siguiente respuesta a la salida:

$$C(s) = R(s) G(s) = \left(\frac{1}{s}\right) \left(\frac{a}{a + s}\right)$$

Ecuación 5

Nota. (Nise, 2011)

La respuesta en función del tiempo será:

$$c(t) = c_f(t) - c_n(t) = (1 - e^{-at}) U(t)$$

Ecuación 6

Nota. (Nise, 2011)

En donde:

$c_f(t)$ = Respuesta forzada o en estado estable

$c_n(t)$ = Respuesta natural o transitoria

En la respuesta de un sistema de primer orden el término $1/a$ es denominado constante de tiempo y es aquel que se produce al 63.2% del valor final de la variable, a este término generalmente se lo conoce como τ , siendo:

$$\tau = \frac{1}{a}$$

Ecuación 7

Nota. (Nise, 2011)

A la Ecuación 4 si se la divide para el valor de a , quedará de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{a}s} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

Ecuación 8

Nota. (Nise, 2011)

En la Figura 12 se muestra la respuesta de un sistema de primero orden, en donde se disponen parámetros como T_r (tiempo de levantamiento) que es el tiempo que transcurre desde el 10% al 90% del valor final, el T_s (tiempo de asentamiento) que es el tiempo en llegar al 98% del valor final.

$$T_r = \frac{2.2}{a} = 2.2 \tau$$

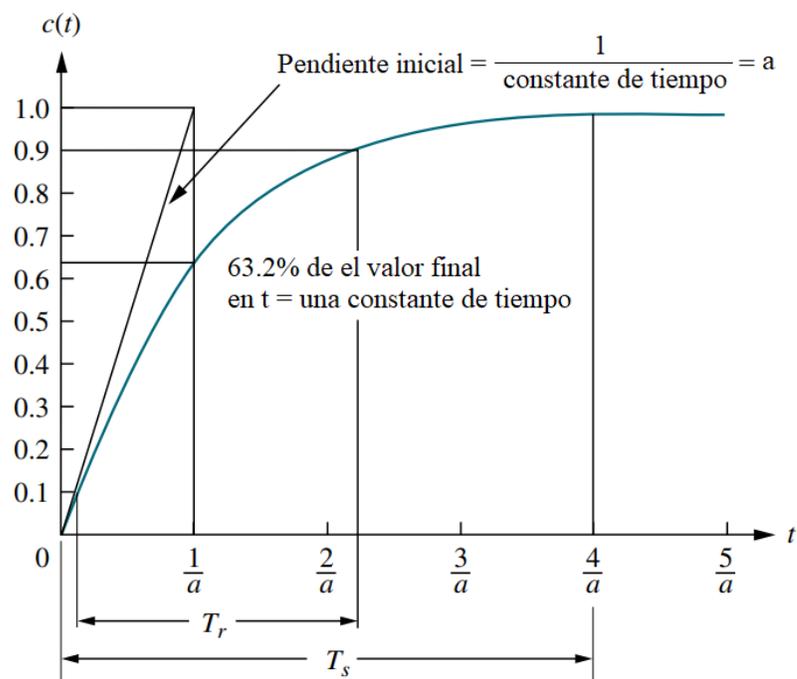
Ecuación 9

Nota. (Nise, 2011)

$$T_s = \frac{4}{a} = 4 \tau$$

Ecuación 10

Nota. (Nise, 2011)

Figura 12*Respuesta de un proceso autorregulado*

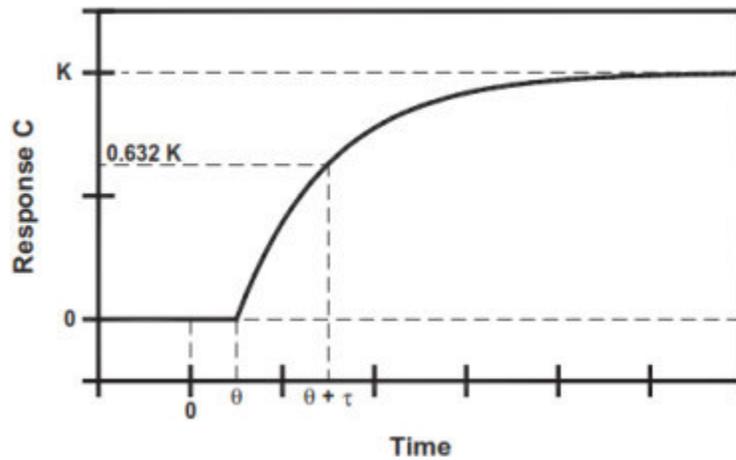
Tomado de (Nise, 2011).

Tiempo muerto

Este parámetro se refiere al tiempo que transcurre entre la entrada y el cambio del valor de la variable del proceso, este retardo se muestra en la Figura 13 siendo el intervalo existente entre 0 y θ . Este retardo depende de la dinámica propia del proceso a controlar (Smith & Corripio, 1991).

Figura 13

Respuesta de un proceso de primer orden más tiempo muerto



Tomado de (Ríos Ardila, 2013).

2.2.8. Tipos de procesos industriales

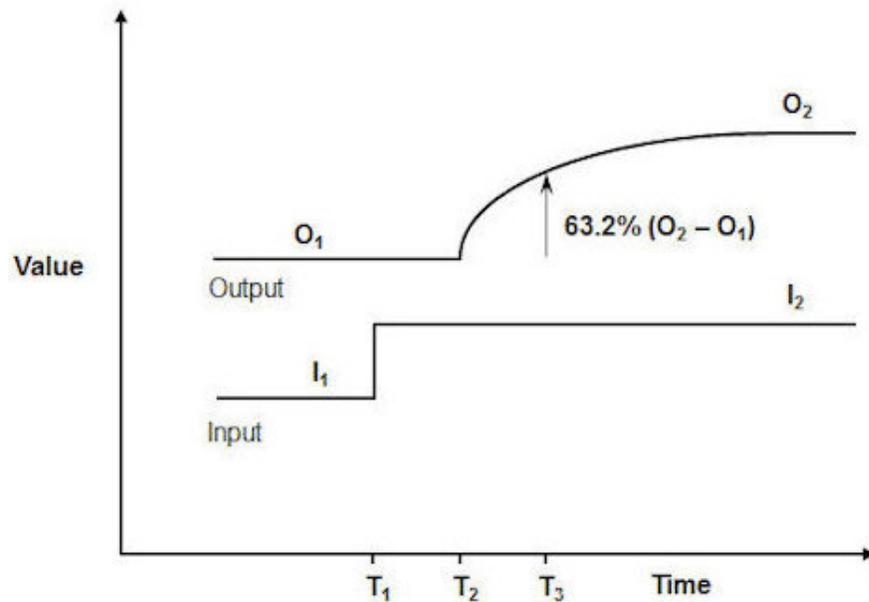
El análisis de la dinámica del proceso permite determinar su comportamiento ante una entrada determinada, de acuerdo a ello se distinguen los siguientes tipos de procesos:

Procesos Autorregulados

Son aquellos procesos en los cuales su respuesta es similar a la de un sistema de primer orden presentando una ganancia, constante de tiempo y un tiempo muerto. Ejemplos típicos de un proceso autorregulado son los procesos de temperatura, flujo y bajo ciertas circunstancias los de presión (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020). En la Figura 14 se presenta la respuesta a este tipo de procesos, tomando como consideración que la entrada y la salida deben estar en porcentaje de la escala.

Figura 14

Respuesta de un proceso autorregulado



Tomado de (Blevins, 2021).

La función de transferencia que describe este tipo de respuesta es la de un sistema de primero orden más tiempo muerto:

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

Ecuación 11

Función de Transferencia de un proceso autorregulado

Nota. (Blevins, 2021)

En donde:

K : Ganancia de proceso

τ : Constante de tiempo del proceso

L : Tiempo muerto del proceso

Los parámetros citados en la Ecuación 11 se los puede obtener a partir de la Figura 14 mediante las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{O_2 - O_1}{I_2 - I_1}$$

Ecuación 12

Determinación de la ganancia de proceso

$$L = T_2 - T_1$$

Ecuación 13

Determinación del tiempo muerto del proceso

$$\tau = T_3 - T_2$$

Ecuación 14

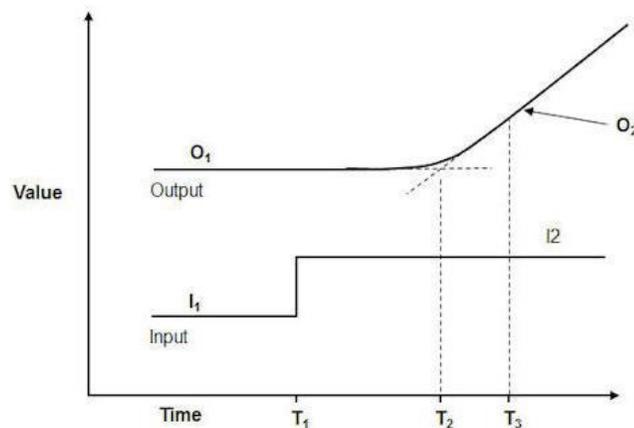
Determinación de la constante de tiempo del proceso

Procesos Integrantes

Los procesos integrantes son aquellos en los cuales su respuesta sube o baja en forma lineal hasta llegar a un punto establecido. Ejemplos típicos de estos procesos son los de nivel y presión (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020). En la Figura 15 se presenta la respuesta este tipo de procesos.

Figura 15

Respuesta de un proceso integrante



Tomado de (Blevins, 2021).

La función de transferencia que describe este tipo de respuesta es aquella que presenta una ganancia y un tiempo muerto:

$$G(s) = \frac{K}{s} e^{-Ls}$$

Ecuación 15

Función de Transferencia de un proceso integrante

Nota. (Blevins, 2021)

Estos parámetros se los obtiene a partir de la Figura 15:

$$K = \frac{O_2 - O_1}{(I_2 - I_1)(T_3 - T_2)}$$

Ecuación 16

Determinación de la ganancia de proceso

2.2.9. Control Automático

La tarea primordial del control automático es la de mantener la variable del proceso muy próxima con la señal de referencia, para ello elimina las perturbaciones las mismas que tienden a cambiar el valor de la variable controlada. En un controlador la acción de control que se desarrolla es la relación entre el error en la señal de salida $e(t)$ y la señal actuante $m(t)$. De esta forma al analizar la Figura 16 se puede decir que es la función de transferencia del controlador.

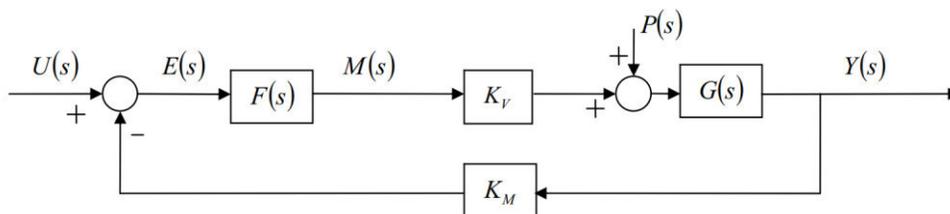
$$F(s) = \frac{M(s)}{E(s)} \text{ o en el dominio del tiempo } f(t) = \frac{m(t)}{e(t)}$$

Ecuación 17

Nota. (Dulhoste, 2006)

Figura 16

Diagrama típico de un control automático



Tomado de (Dulhoste, 2006).

En la teoría de control clásica se destacan varias acciones de control, las mismas que buscan estabilizar un proceso en una señal de referencia y cuyo tipo depende de la forma de obtención de la ley de control. Las acciones básicas de control o que son empleadas comúnmente en procesos industriales son:

- Control proporcional (P).
- Control proporcional integral (PI).
- Control proporcional integral derivativo (PID).

Control Proporcional

Este tipo de controlador es aquel que su salida es proporcional al error $e(t)$:

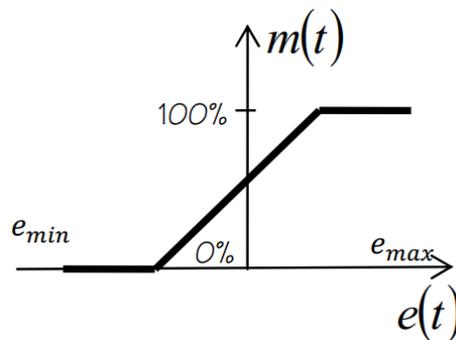
$$m(t) = K_P e(t)$$

Ecuación 18

Nota. (Mazzone, 2002)

Figura 17

Relación de respuesta del control proporcional



Tomado de (Dulhoste, 2006).

Control Proporcional Integral

Este tipo de control se basa en una acción proporcional con la suma de la integral del error y se define mediante la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Ecuación 19

Nota. (Mazzone, 2002)

En donde:

T_i = Tiempo integral

La función de transferencia de este control es:

$$M(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Ecuación 20

Nota. (Mazzone, 2002)

Como se puede ver este control depende del error, en la acción integral si el error es positivo se tendrá una respuesta creciente, lo contrario si el error es negativo la acción será decreciente. Es importante indicar que este controlador PI se lo aplica en aquellos procesos en los cuales su dinámica es de primer orden (Mazzone, 2002).

Control PID

El control PID tiene como salida del controlador la suma de una acción proporcional al error, a su derivada y a su integral, como se describe en la siguiente ecuación denominada ecuación de constantes independientes o ecuación paralela:

$$m(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Ecuación 21

Nota. (Mazzone, 2002)

La siguiente ecuación denominada ISA estándar o de constantes dependientes es otra forma de expresar el control PID:

$$m(t) = K_C \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Ecuación 22

Nota. (Dulhoste, 2006)

Dentro de las características de este controlador están su respuesta proporcional al error la misma que depende de la ganancia, la parte integral colabora en el reajuste automático que elimina el error en estado estable, finalmente la acción derivativa ayuda a que el controlador responda rápidamente a cambios en el error (Dulhoste, 2006).

En la Tabla 2 se describe un resumen de las características de los diferentes controladores.

Tabla 2*Característica de las acciones de control*

CONTROL	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	VELOCIDAD DE RESPUESTA	ERROR EN ESTADO ESTABLE	USO SOLO	COSTO
Proporcional (P)	K_p	Media	Existe	Si	Bajo
PI	$K_p + \frac{K_I}{s}$	Media	No hay	Si	Alto
PD	$K_p + K_D s$	Alta	Existe	Poco	Alto
PID	$K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$	Alta	No hay	Si	Alto

Nota. Características de las acciones de control. Tomado de (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020).

2.2.10. Sintonización de Controladores

El control PID se ha convertido en la herramienta más empleada en el ámbito del control automático, pero para su correcta aplicación es necesario que sea adecuadamente sintonizada con lo cual se pretende que el sistema presente un estado estacionario a pesar de sufrir perturbaciones. El procedimiento de sintonización consiste en encontrar las constantes K_C , T_I y T_D mostradas en la Ecuación 22.

En la industria los métodos de sintonización más empleados son para controladores tipo PI y PID los mismos que se describen en las siguientes tablas para procesos autorregulador y para procesos integrantes:

Tabla 3

Sintonización de un Controlador PI para un proceso autorregulado

MÉTODO	K_c	T_i
Ziegler and Nichols	$\frac{0.9 \tau}{K L}$	$3.3L$
Lambda	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{L + T_{CL}}$ $T_{CL}: \tau \text{ a } 3\tau$	τ
Callender	$\frac{0.568 \tau}{K L}$	$3.64L$
Chien	$\frac{0.7 \tau}{K L}$	$2.33L$
Moros	$\frac{0.8 \tau}{K L}$	$3L$

Nota. Métodos de sintonización de un controlador PI de procesos autorregulados.

Tomado de (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020).

Tabla 4

Sintonización de un Controlador PID para un proceso autorregulado

MÉTODO	K_c	T_i	T_d
Ziegler and Nichols	$\frac{1.2 \tau}{K L}$	$2L$	$0.5L$
Lambda	$\frac{1}{K} \frac{\frac{L}{2} + \tau}{\frac{L}{2} + T_{CL}}$ $T_{CL}: \tau \text{ a } 3\tau$	$\tau + \frac{L}{2}$	$\frac{\tau L}{L + 2\tau}$

Borresen and Grindal	$\frac{\tau}{K L}$	$3L$	$0.5L$
Callender	$\frac{1.066}{K L}$	$1.418L$	$0.353L$
Chien	$\frac{0.95 \tau}{K L}$	$2.38L$	$0.42L$
Moros	$\frac{1.2 \tau}{K L}$	$2L$	$0.42L$

Nota. Métodos de sintonización de un controlador PID de procesos autorregulados. Tomado de (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020).

Tabla 5

Sintonización de un Controlador PI para un proceso integrante

MÉTODO	K_c	T_i
Ziegler and Nichols	$\frac{0.9}{K L}$	$3.33L$
Coon	$\frac{10}{K L}$	0
Aström and Hägglund	$\frac{0.63}{K L}$	$3.2L$
Hay	$\frac{0.42}{K L}$	$5.8L$
Skogestad	$\frac{0.404}{K L}$	$7L$

Nota. Métodos de sintonización de un controlador PI de procesos integrantes. Tomado de (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020).

Tabla 6

Sintonización de un Controlador PID para un proceso integrante

MÉTODO	K_c	T_i	T_d
Ford	$\frac{1.48}{K L}$	$2L$	$0.37L$
Hay	$\frac{0.4}{K L}$	$3.2L$	$0.8L$
Aström and Hägglund	$\frac{0.94}{K L}$	$2L$	$0.5L$
Rotach	$\frac{1.21}{K L}$	$1.6L$	$0.48L$

Nota. Métodos de sintonización de un controlador PID de procesos integrantes. Tomado de (Balladares Vargas & Teneda Ardila, 2020).

2.2.11. Entornos Virtuales

La realidad virtual (VR) se la define como el dominio científico y técnico que explota las ciencias de la computación y el comportamiento de sus interfaces para simular en un mundo virtual el comportamiento de entidades 3D que interactúan en tiempo real entre sí y con uno o más usuarios en inmersión pseudo-natural por medio de canales sensoriomotores. Hoy en día la realidad virtual es empleada en diferentes aplicaciones, como los videojuegos, la salud, la biología, las operaciones militares, la educación, el aprendizaje y la formación, etc. Su aplicación en la industria moderna ha permitido simular procesos de manera eficiente; dando la oportunidad de interactuar con el modelo de simulación. Un sistema de simulación virtual incluye un conjunto de

interfaces sensoriomotoras y controla el comportamiento de la simulación en comparación con los modelos programados (Abidi et al., 2018).

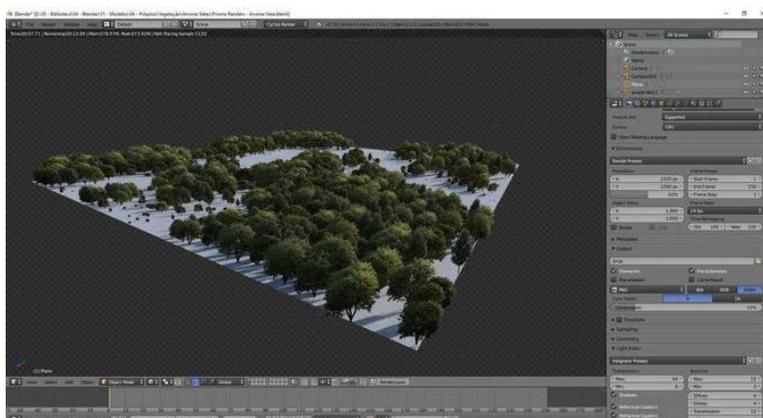
2.2.12. Blender

Blender es un software de diseño CAD que es considerado como un potente programa de ilustración 3D, el mismo que ejecuta renderizado y animación de gráficos tridimensionales y una de sus principales ventajas es el ser de código abierto.

Mediante el empleo de Blender se puede diseñar gráficos 3D, animaciones, efectos especiales, arte, modelos de impresión 3D y videojuegos. Además, con Blender se puede cambiar la posición, el tamaño y la orientación de un elemento, animar a un personaje o a un objeto sólido. Debido a estas razones es que se ha popularizado su empleo en el diseño de ambientes virtuales y que es muy usada para desarrollar videojuegos, gracias a la versatilidad y compatibilidad con otros programas de creación y motores de videojuegos, como Unreal Engine o Unity (Palacios, 2021).

Figura 18

Ambiente de trabajo en Blender



Nota. Descripción de un diseño en Blender. Tomado de (Palacios, 2021).

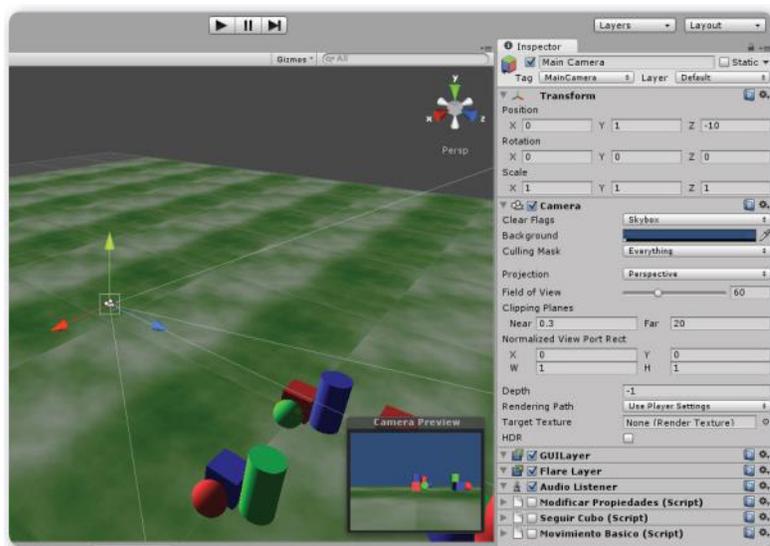
2.2.13. Unity 3D

Unity es un motor de desarrollo que permite crear videojuegos en 3D interactivos con una excelente calidad de los juegos, siendo completamente integrado y además presenta innumerables funcionalidades para facilitar la creación de videojuegos.

Unity además de ser un motor de juegos de gran calidad dispone de un buen editor de mundos presenta la ventaja de trabajar con diferentes lenguajes de programación en donde únicamente se requiere conocimientos básicos de programación.

Figura 19

Ambiente de trabajo en Unity



Nota. Creación de escenas en Unity. Tomado de (Landa Cosio, 2013).

Unity permite la creación de videojuegos de una manera sencilla, ya que provee de un editor que facilita la generación de niveles, y tiene diferentes paneles que permiten

trabajar con los objetos y recursos a utilizar. Es posible usar herramientas o colocar las propiedades a los objetos directamente.

Unity dispone de un editor visual el mismo que permite la importación de modelos 3D, texturas, sonidos, iluminación, scripts, efectos, física, terrenos, manejo de cámaras, etc. con la finalidad de disponer de ellos en la realización de un trabajo en especial. Además, se tiene la posibilidad de acceder a varias plataformas en donde se puede descargar estos elementos y utilizarlos fácilmente (Landa Cosio, 2013).

2.2.14. Hardware in the Loop

Hardware in the Loop (HIL) es la técnica que permite emular en tiempo real plantas o sistemas sumados a ellos los elementos que interactúan como son sensores y actuadores con la finalidad de optimizar los costos, probar algoritmos de control. En los desarrollos empleados con HIL los entornos simulados son aquellos que están en interacción con los componentes reales empleando para ello los modelos dinámicos (Caldas Flautero et al., 2013).

La implementación de Hardware in the loop permite a los sistemas reales llevarlos a un modelo matemático embebido en un sistema electrónico para así de esta manera emular sus condiciones de operación, destacándose de implementaciones de esta técnica el ahorro de tiempo en la identificación de errores en forma segura para su posterior implementación en procesos reales (Isermann et al., 1999).

La simulación HIL es una técnica de prueba dinámica que simula el comportamiento de las entradas o salidas (I/O) de un sistema físico que interactúa con un sistema de control. Las pruebas HIL permiten al diseñador simular en tiempo real el

comportamiento y las características del sistema físico, con el fin de probar el proceso que opera en el sistema físico, sin necesidad de disponer del hardware o del entorno operativo real (Krishnan & Pillai, 2018).

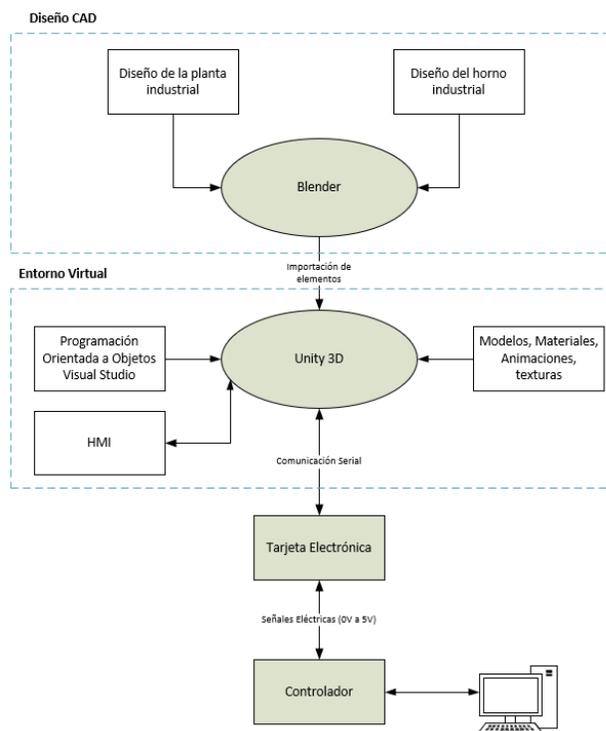
Capítulo III

3. Metodología de la investigación

El presente trabajo contempla el desarrollo de un entorno virtual 3D que simule un proceso industrial de temperatura, mediante la técnica Hardware in the Loop, orientado al entrenamiento de Control Automático, para ello se considera una revisión de tipo bibliográfica de artículos científicos y libros a fin de determinar los modelos y metodología a seguir. Además, para la correcta verificación de su funcionamiento se emplea la metodología experimental, en la figura 20 se muestra el esquema del proyecto.

Figura 20

Esquema general del proyecto

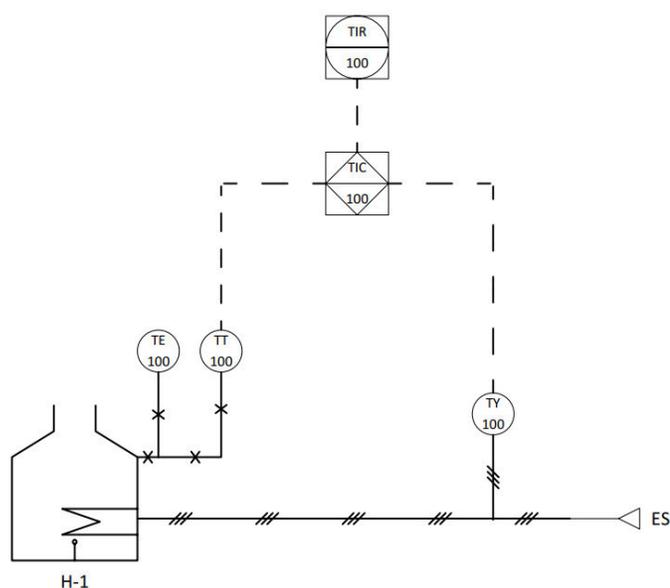


3.1. Diagrama P&ID del proceso

El objetivo del proyecto se basa en la virtualización del comportamiento de un proceso de temperatura, para ello es necesario conocer la función de transferencia de un proceso real a fin de poderlo implementar y validar su funcionamiento. El diseño de sistemas de temperatura incluye elementos como hornos, serpentines, niquelinas, transmisores, válvulas, etc. En el presente sistema se realiza el control de un horno eléctrico, el mismo que se lo emplea para el proceso de pintura al horno de automóviles usado para alcanzar un acabado de calidad, duradero y en corto tiempo. Mediante la técnica Hardware in the Loop el entorno virtual desarrollado en Unity 3D se comunicará con una tarjeta electrónica que permita la generación de señales eléctricas para la simulación del transmisor de temperatura y el elemento de control final de temperatura, proporcionando con ello una similitud a un sistema de temperatura real.

Figura 21

Diagrama P&ID para el control de un horno eléctrico

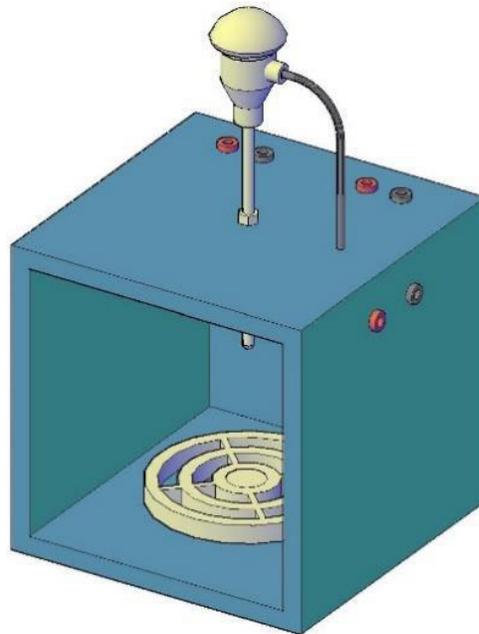


3.2. Descripción proceso real

Para el desarrollo de la aplicación virtual se toma como base un horno eléctrico disponible en el Laboratorio de Automatización y Control de la Universidad Técnica de Cotopaxi, el mismo que tiene como elemento calefactor una resistencia tubular de 1100W a 120V/60Hz y una resistencia de 12.5Ω ; este elemento es el encargado de transformar la energía eléctrica en calor debido al efecto Joule, dichas resistencias tubulares son muy empleadas en procesos de calentamiento de agua, aceite, líquidos corrosivos, etc.

Figura 22

Horno eléctrico empleado



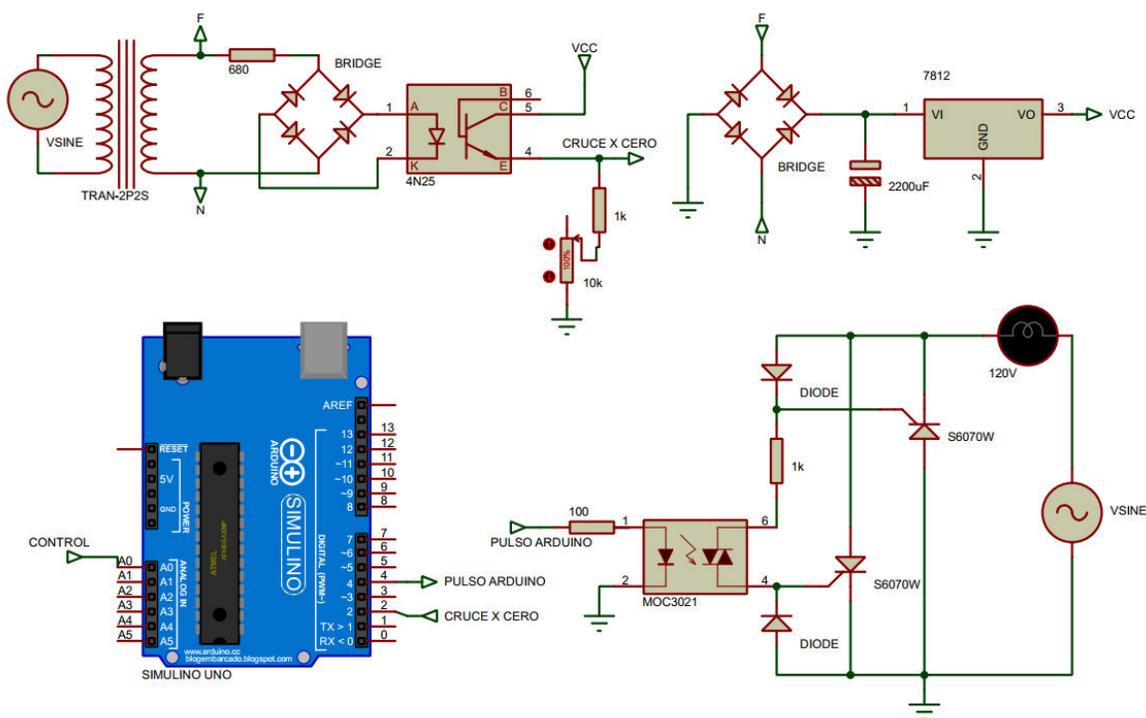
Tomado de (López Herrera & Vargas Soria, 2021).

El elemento de control de las resistencias del horno está compuesto por un circuito digital de control de fase empleando SCRs, dicho control es capaz de adquirir señales eléctricas entre 0V a 5V y controlar su ángulo de disparo entre 0° y 180° a fin de comandar la cantidad de corriente eléctrica que circule por las resistencias lo que hará que la temperatura dentro del horno varíe.

Se emplea como elemento de medición una RTD tipo PT-100 acoplada a un transmisor de temperatura inteligente el mismo que tiene la posibilidad de configurar sus rangos de medición, para el presente proyecto se trabajará en los rangos de 0°C a 100°C para una salida de 4mA a 20mA.

Figura 23

Circuito de Control de Fase



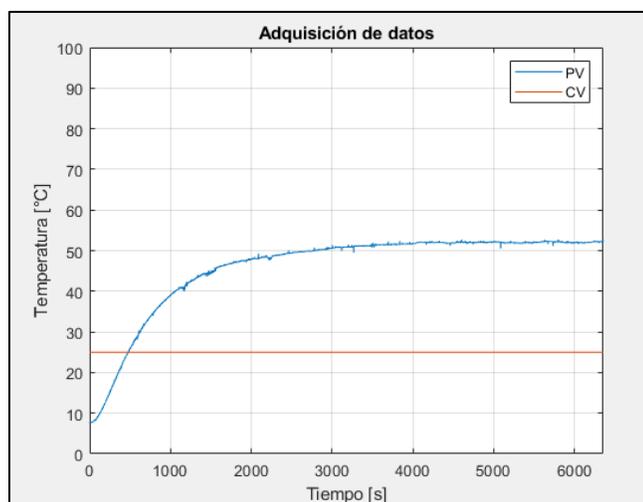
3.3. Función de Transferencia del Sistema

Como se mencionó anteriormente el desarrollo del presente proyecto requiere disponer del modelo matemático del sistema, mismo que se lo implementará en Unity 3D para su virtualización. La dinámica de comportamiento del proceso de temperatura se la determina manteniendo un cierto nivel de potencia suministrada a las resistencias, para ello se generará de forma manual un escalón en la entrada del proceso, el mismo que será entre el 10% al 30% del span del actuador. Se procederá a registrar las variaciones en la variable de salida. La prueba finalizará cuando se haya alcanzado un nuevo punto de estabilización de la variable de salida.

En la Figura 24 se indica el resultado obtenido, en donde a las resistencias se aplica un escalón del 25% del valor de la entrada AC y se mide la temperatura en el interior del horno, cabe indicar que el valor inicial de temperatura fue de 7.82°C. Además, es importante tomar en cuenta el tiempo de muestreo se lo estableció cada segundo.

Figura 24

Respuesta del horno ante una entrada escalón



El cambio de temperatura ante la presencia de un escalón a la entrada del sistema presenta un tiempo de retardo, tiempo en el cual no se percibe cambio alguno en la variable de salida. Luego de este tiempo se nota el cambio en la temperatura dentro del horno y su comportamiento es ascendente hasta llegar a un punto de equilibrio. Este comportamiento es similar al descrito en el capítulo 2 en la Ecuación 4.

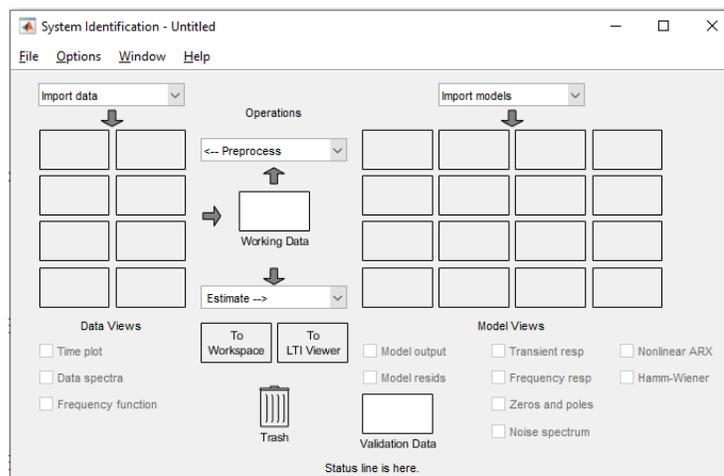
Una vez determinado que el proceso responde a un sistema de primer orden más tiempo muerto, es indispensable que se identifique sus parámetros K , τ y L . Existen procedimientos tanto experimentales como empleando herramientas computacionales que permiten determinar dichos parámetros.

En primera instancia se empleará MATLAB con su toolbox “systemIdentification” la cual es una herramienta de software avanzada que permite determinar el modelo de un proceso a partir de sus parámetros de entrada y salida mismos que formaron la curva mostrada en la Figura 24. El procedimiento se detalla a continuación:

- Generar dos variables dentro del Workspace de MATLAB, estas variables contendrán los vectores de datos de la entrada y de la salida. Para el presente proyecto se las llamará PV (variable del proceso) y CV (variable de control).
- Abrir el toolbox para ello digitar systemIdentification
- En Import data seleccionar la opción Time domain data...

Figura 25

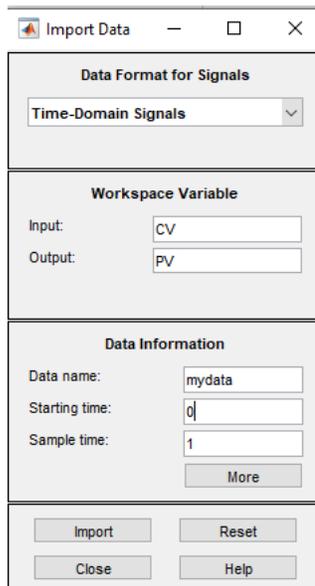
Toolbox System Identification



- Establecer las variables que se generaron en el Workspace como entrada y salida del proceso, además especificar el tiempo de inicio y el tiempo de muestreo.

Figura 26

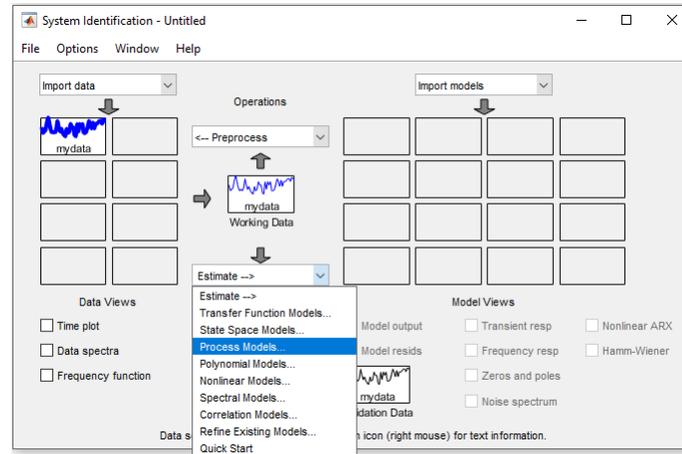
Importación de los datos a estimar



- Una vez importado los datos se elegirá Process Models.

Figura 27

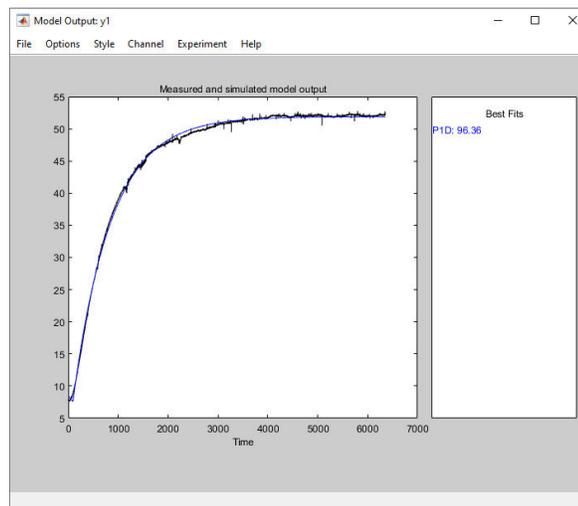
Estimación en Modelo de Proceso



- Para validar el modelo se debe seleccionar Model output en donde es importante que el porcentaje de estimación sea superior al 80%.

Figura 28

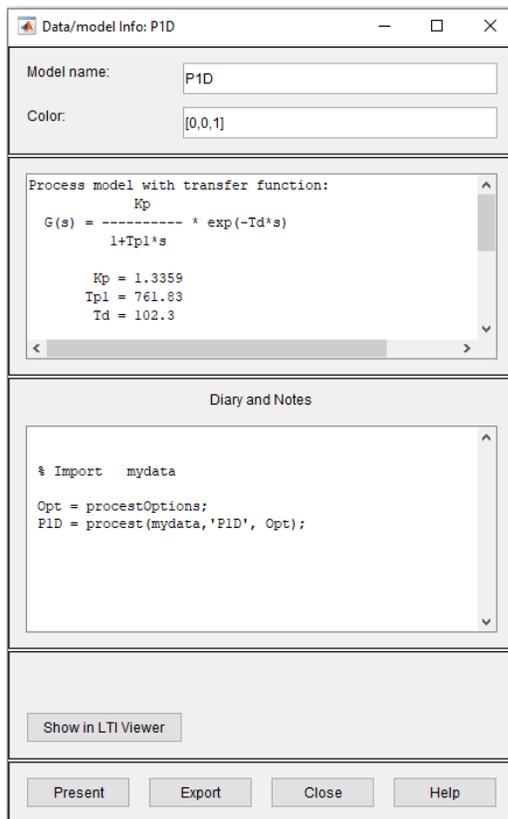
Validación y respuesta de la estimación ante una entrada escalón



- Finalmente, el modelo obtenido es el siguiente:

Figura 29

Modelo obtenido



$$P(s) = \frac{1.3359}{1 + 761.83s} e^{-102.3s}$$

Ecuación 23

Como alternativa al uso de herramientas computacionales se puede identificar el modelo del proceso con un procedimiento experimental, el mismo que se describe a continuación:

Para determinar la ganancia del proceso:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CV}$$

Ecuación 24

En donde:

ΔPV : Variación del PV

ΔCV : Variación del CV

Definiendo el Span del PV, que en este caso será de 0°C a 100°C y el Span del CV siendo entre 0V y 115V, se procede a calcular las variaciones de PV y de CV:

$$\Delta PV = \frac{PV_{final} - PV_{inicial}}{Span PV} = \frac{52^{\circ}C - 7.82^{\circ}C}{100^{\circ}C} = 0.44\%$$

Ecuación 25

$$\Delta CV = \frac{CV_{final} - CV_{inicial}}{Span CV} = \frac{33.5V - 0V}{115V} = 0.29\%$$

Ecuación 26

Empleando la Ecuación 24 se determina el valor de la ganancia del proceso:

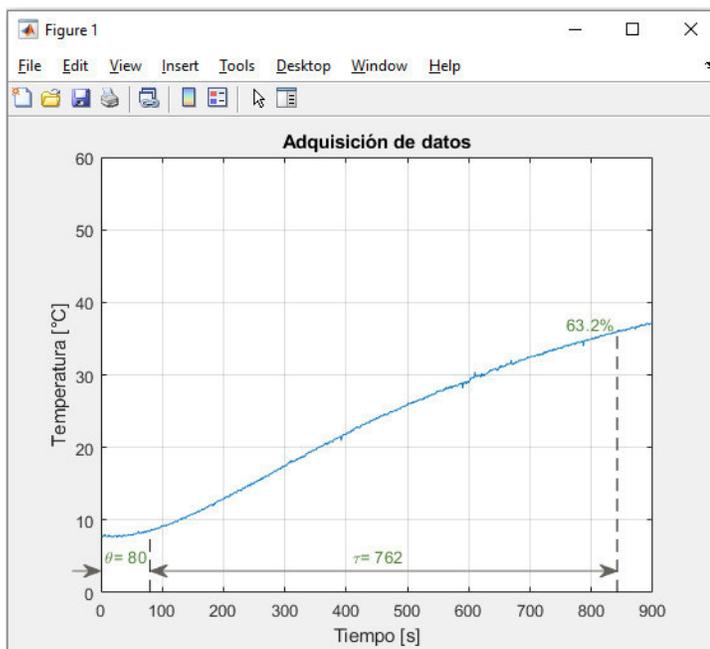
$$K = \frac{0.44\%}{0.29\%} = 1.51$$

Para determinar el valor del tiempo muerto del proceso se recurre a la Figura 30, en donde se analiza desde el instante $t=0$, se observa que la variable del proceso permanece estable y se encuentra el punto en el cual comienza a presentarse

variaciones en el PV, para este caso aproximadamente se tiene un valor de 80 segundos.

Figura 30

Determinación del tiempo muerto en forma gráfica



Finalmente, para encontrar el valor de la constante de tiempo del proceso se sabe que se genera cuando transcurre el 63,2% de la señal cuando esta llega al punto de estabilización, de acuerdo a ello:

$$PV_{63.2\%} = [0.632 * (PV_{final} - PV_{inicial})] + PV_{inicial}$$

Ecuación 27

$$PV_{63.2\%} = [0.632 * (52.19^{\circ}C - 7.82^{\circ}C)] + 7.82^{\circ}C = 35.86^{\circ}C$$

Una vez encontrado el valor del PV al 63.2% se procede a determinar el instante de tiempo en el cual se produce este valor, siendo en este caso 842 segundos, al cual se le resta el valor del tiempo muerto:

$$\tau = t_{63.2\%} - L$$

$$\tau = 842 - 80 = 762 \text{ segundos}$$

Con lo cual la estimación de la función de transferencia del sistema es:

$$P(s) = \frac{1.51}{1 + 762s} e^{-80s}$$

Ecuación 28

La Ecuación 23 y la Ecuación 28 se puede decir que tienen una gran similitud con lo cual se valida el proceso de modelamiento. En el transcurso del presente proyecto se trabajará con la Ecuación 23 determinada con Matlab.

3.4. Descripción del proceso virtual

Para el diseño del proceso virtual que se asemeje a un proceso de pintura al horno real se lo realiza empleando Unity ya que ofrece una gran versatilidad y potencia de desarrollo visual.

El diseño contempla el desarrollo de la planta industrial dentro de la cual se ubica un horno eléctrico el mismo que permitirá el ingreso del auto a la fase de secado, proceso que se lo realiza generalmente a una temperatura de entre 60 a 80°C por un período aproximado de 45 minutos. Adicional el sistema dispone de controles para interactuar

con el usuario y verificar su comportamiento. En la Figura 31 se observa el interior y exterior de un horno de secado real.

Figura 31

Proceso de pintura al horno



Nota. Proceso real de pintura al horno. Tomado de (García Sanders, 2021).

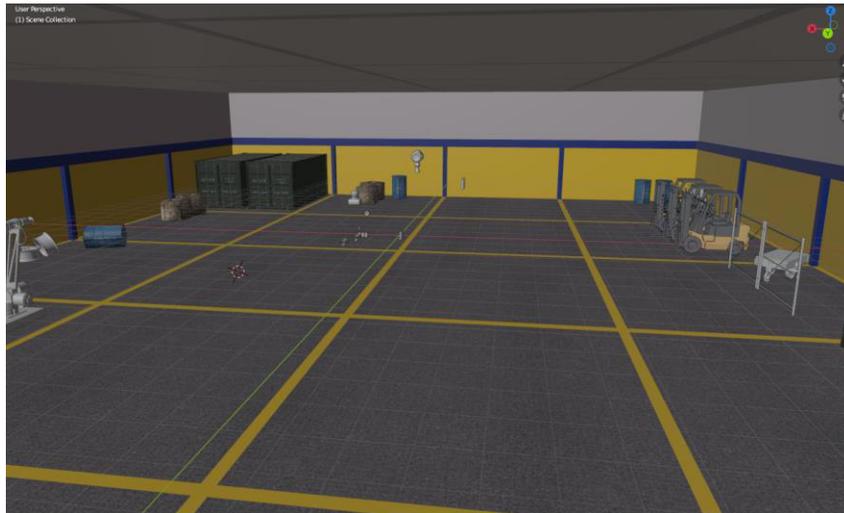
3.5. Diseño del proceso virtual en Blender

El diseño de la planta se lo realiza tomando como base la Figura 31, para ello se emplea el modelador 3D Blender como software de diseño CAD.

En primera instancia para disponer de un entorno 3D se creó un ambiente industrial dentro del cual se coloca el horno y el automóvil que ingresará a recibir el tratamiento de pintura. Para darle realismo se colocó elementos propios de un taller mecánico, además de la iluminación necesaria entre otros elementos.

Figura 32

Ambiente industrial



Posterior a ello se diseña el horno en donde se toma en cuenta los objetos como cabina, lámparas, ventanas, resistencias, transmisor de temperatura, consola, etc.

Figura 33

Horno de pintura diseñado en Blender



El automóvil que se emplea en el proceso de pintado se lo importa desde páginas de diseño disponibles en la web.

Figura 34

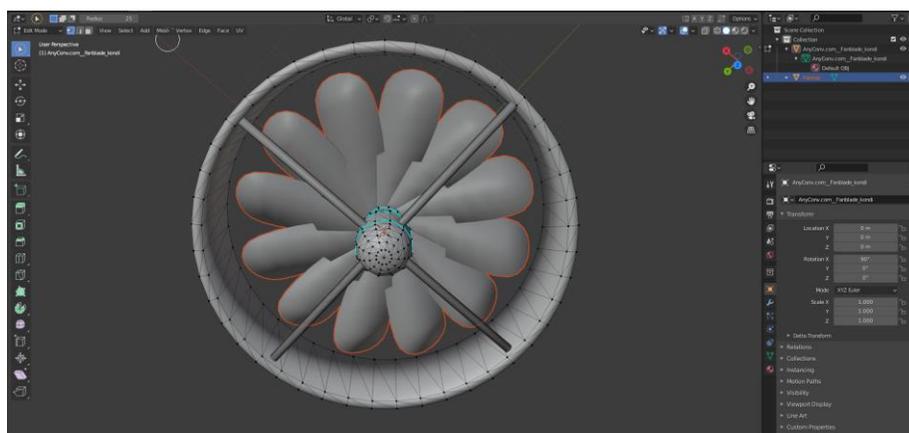
Proceso virtual de pintura al horno diseñado en Blender



Para poder validar el adecuado funcionamiento del proceso es necesario disponer de una perturbación, se diseñó ventiladores los mismos que se los colocará en el horno.

Figura 35

Diseño de los ventiladores en Blender



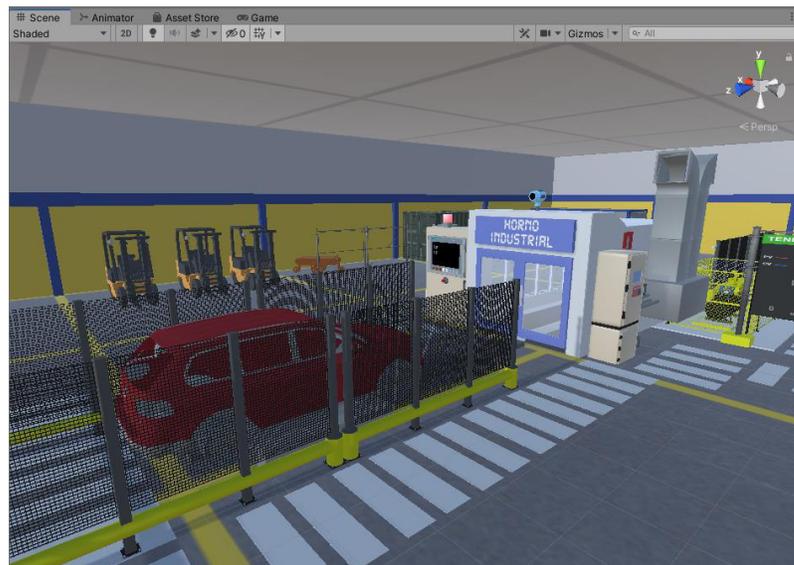
3.6. Diseño del proceso virtual en Unity

El desarrollo del entorno virtual emplea el diseño realizado en Blender, en donde se procede a exportarlo en formato FBX para su posterior importación en Unity. Es allí donde se configura texturas, materiales, puntos de rotación, animaciones y la comunicación serial con la tarjeta electrónica. Es importante mencionar que la versión de Unity empleada es la 2019.3.5f1.

Unity tiene la gran potencialidad que permite desarrollar animaciones y movimientos necesarios para que el entorno virtual sea similar al entorno real. Para el presente proyecto se animará movimientos del personaje, efectos de calentamiento, y además la visualización numérica y de tendencias en el HMI. Como se puede ver en la Figura 36, se ha agregado una zona de seguridad en el área de ingreso y salida del automóvil similar a la de un proceso real.

Figura 36

Proceso virtual de pintura al horno en Unity 3D



En la Figura 37 se puede observar que el diseño consta de un módulo de control para las resistencias que son empleadas para calentar el horno.

Figura 37

Módulo de control para las resistencias de calefacción en Unity 3D



La consola de presentación de los datos e información al usuario ha sido diseñada tomando como referencia una pantalla KTP700, en donde se encontrará botones los mismos que desplegarán el diagrama P&ID del proceso, la información de los controles para comandar el sistema y los valores del CV y PV, tal como se aprecia en las Figuras 38, 39 y 40.

Figura 38

Diagrama P&ID en la pantalla KTP700

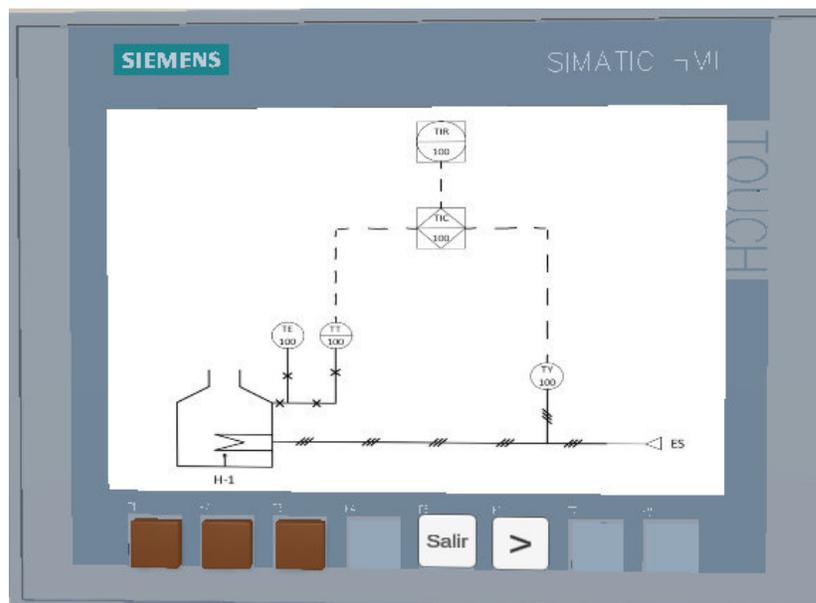


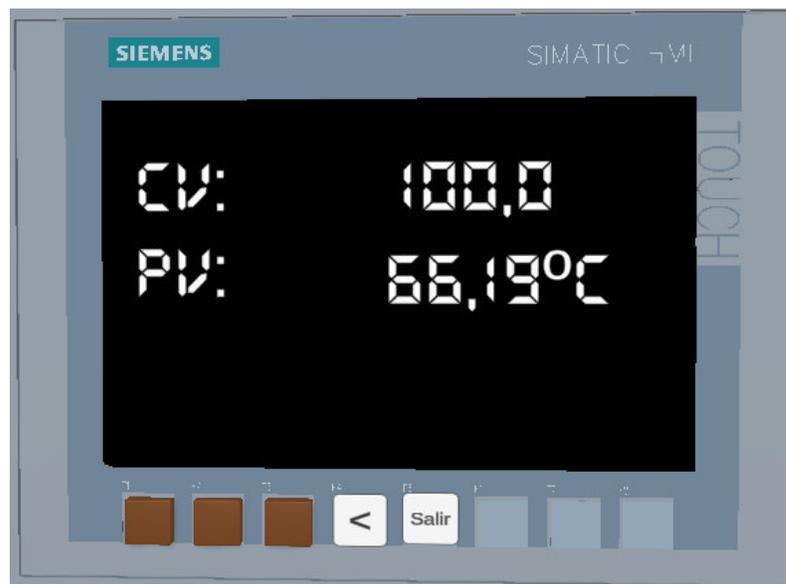
Figura 39

Información de los controles en la pantalla KTP700



Figura 40

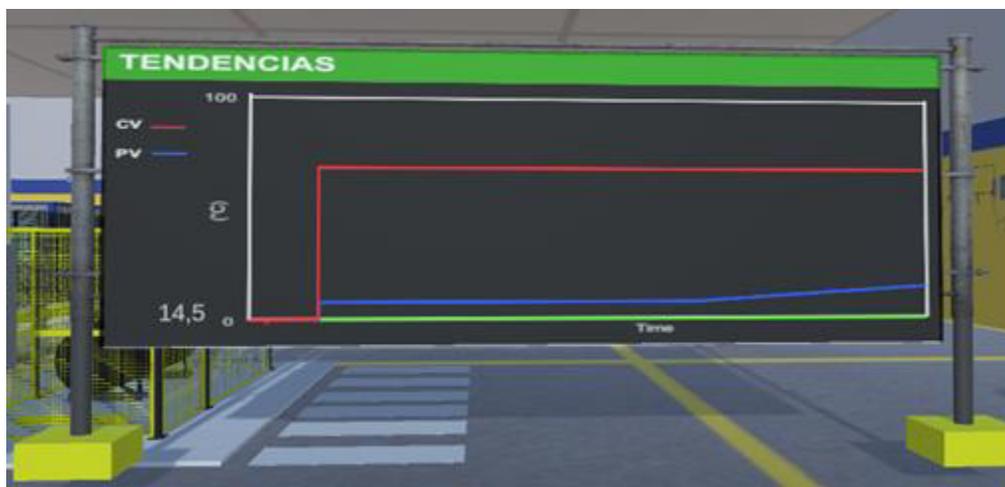
Información de los valores de CV y PV en la pantalla KTP700



El sistema además contempla una pantalla donde se despliegan las tendencias del proceso, en donde se muestran el PV y CV.

Figura 41

Tendencias del proceso



Como parte de la instrumentación del proceso se ha diseñado un transmisor de temperatura el mismo que en su parte frontal muestra el valor actual de la temperatura medida.

Figura 42

Transmisor de Temperatura



Finalmente, en la Figura 43 se muestra el funcionamiento del proceso.

Figura 43

Proceso en Unity



3.7. Implementación del Algoritmo C#

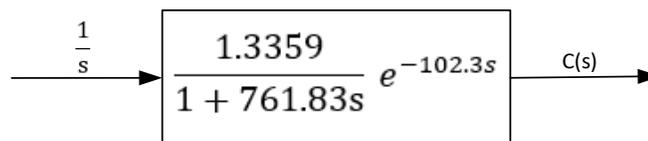
Para la simulación del comportamiento del horno de pintura se parte de la función de transferencia de un Sistema de Primer Orden más Tiempo Muerto obtenida en la Ecuación 23.

Una vez encontrada la función de transferencia del sistema de temperatura a simular se procede a ingresarla dentro de Unity. Es importante señalar que la programación de los Scripts se los realiza en C#, y las funciones se las debe ingresar en el dominio del tiempo, y generalmente una función de transferencia se la dispone en el dominio de la frecuencia, por lo que previamente se procede a encontrar la función en el dominio del tiempo, para ello se aplica la Transformada Inversa de Laplace.

El análisis parte de un sistema en lazo abierto en donde se tendrá como entrada una señal de tipo escalón, la misma que actúa sobre el sistema representado por la función de transferencia, lo cual originará que se tenga una salida $C(s)$, siendo esta salida la de interés, tal como se describe en la Figura 44.

Figura 44

Representación en función de transferencia del proceso



La siguiente ecuación permite determinar la salida $C(s)$:

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{1}{1 + 761.83s} e^{-102.3s}$$

Ecuación 29

Antes de su resolución, es importante indicar que el término e^{-Ls} indica que la función en el dominio del tiempo comenzará a responder a partir del valor de L, razón por la cual se excluirá este término en la resolución analítica, la misma que se emplea fracciones parciales quedando de la siguiente forma:

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{1.3359}{1 + 761.83s} = \frac{A}{s} + \frac{B}{1 + 761.83s}$$

Encontrando las constantes A y B se obtiene:

$$A = 1.3359$$

$$B = -1017.73$$

Con lo cual la ecuación 29 se la representa de la siguiente forma:

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{1.3359}{1 + 761.83s} = \frac{1.3359}{s} - \frac{1017.73}{1 + 761.83s}$$

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{1.3359}{1 + 761.83s} = 1.3359 \left(\frac{1}{s} - \frac{761.83}{1 + 761.83s} \right)$$

Finalmente, se la puede expresar de la siguiente forma:

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{1.3359}{1 + 761.83s} = 1.3359 \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{761.83}} \right)$$

Aplicando la Transformada Inversa de Laplace se tiene:

$$c(t) = 1.3359 (1 - e^{-t/761.83}) U(t - 102.3)$$

La Ecuación 30 será la que se implemente en la programación en C# para definir el comportamiento del sistema.

Para generalizar la función y que permita realizar los cálculos respectivos ante una variación en la señal de control hacia el sistema se agregará el tiempo en el que suceda dicha variación quedando generalizada de la siguiente manera:

$$c(t) = K (1 - e^{(t_0 - t)/\tau}) U(t - L)$$

Ecuación 31

En donde los parámetros K , τ y L son aquellos que se obtuvieron en la función de transferencia de la Ecuación 23, quedando:

$$c(t) = 1.3359 (1 - e^{(t_0 - t)/761.83}) U(t - 102.3)$$

Ecuación 32

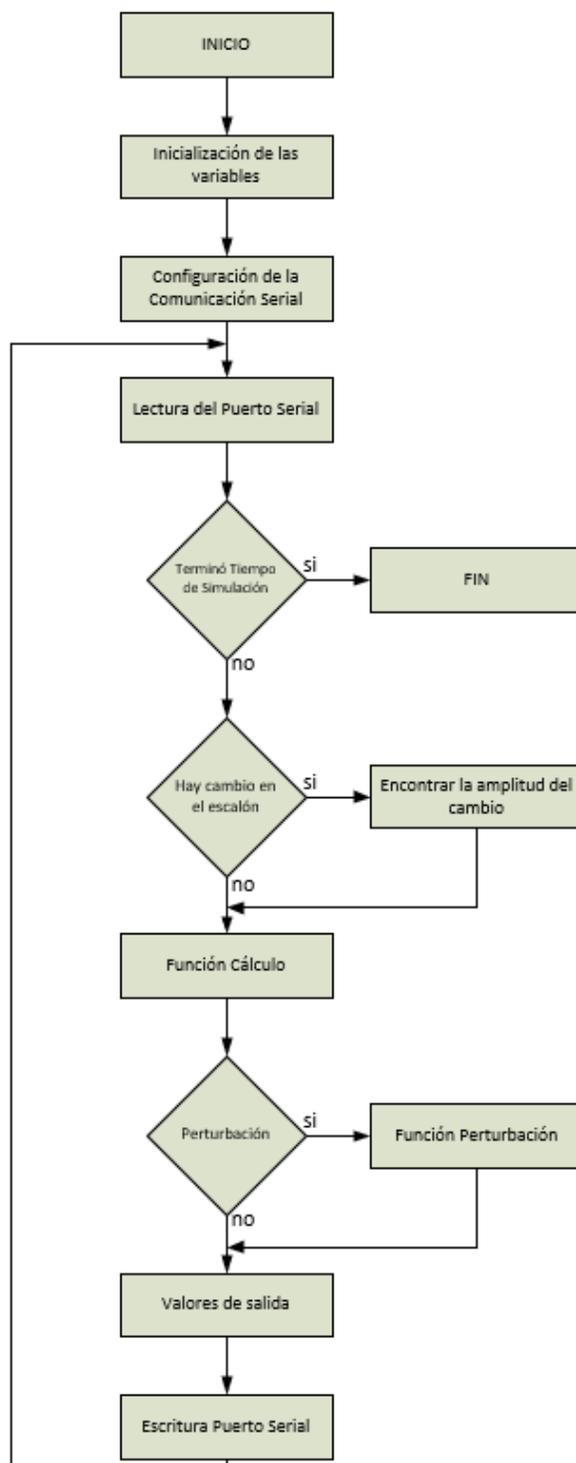
La Ecuación 32 se la implementa dentro de una función a fin de que sea llamada cada 0.5 segundos para su cálculo.

En el Anexo 01 se muestra el diagrama de conexiones que servirá para interactuar ingresando señales (CV) y obteniendo señales (PV) del sistema virtual, misma que tiene la finalidad de ser fácilmente interpretada al momento de realizar las conexiones a un controlador, de manera similar cuando se tiene un proceso real.

En la Figura 45 se describe el algoritmo implementado:

Figura 45

Algoritmo implementado en Unity



3.8. Diseño de Controladores

Para el control del horno virtual se desarrolla un controlador tipo PI debido a las características de un proceso de temperatura. El sistema de control implementado es el analizado en el capítulo 2, el mismo que para el presente proyecto se establece de la siguiente manera:

Set Point: Parámetro fijado desde el controlador.

Controlador: Implementado mediante una tarjeta electrónica DAQ USB-6009 y/o el PLC S7-1200.

Elemento de Control Final: Se lo realiza mediante un circuito de control de fase de carga resistiva.

Proceso: Es el horno de pintura virtualizado en Unity.

Transmisor: Señal generada en el proceso virtual y acondicionada por medio de un conversor digital-analógico (MCP4725).

Variable de Proceso: Señal de temperatura obtenida en la simulación del proceso virtual.

En la Figura 46 se observa la conexión de la tarjeta electrónica empleada para la interacción entre el controlador y el proceso virtualizado. En donde el puerto analógico A0 recibe la entrada del CV (en rangos de 0 a 5V), en cambio la entrada A1 está conectada a VCC con la finalidad de tener una medida del nivel de voltaje ingresado a fin de mejorar la precisión en las conversiones de las diferentes variables. Para simular el comportamiento real del transmisor de temperatura se emplea el módulo MCP4725

el cual es un conversor digital a analógica de la señal del PV, este módulo es fabricado por Microchip, usa el bus I2C y tiene una resolución de 12 bits.

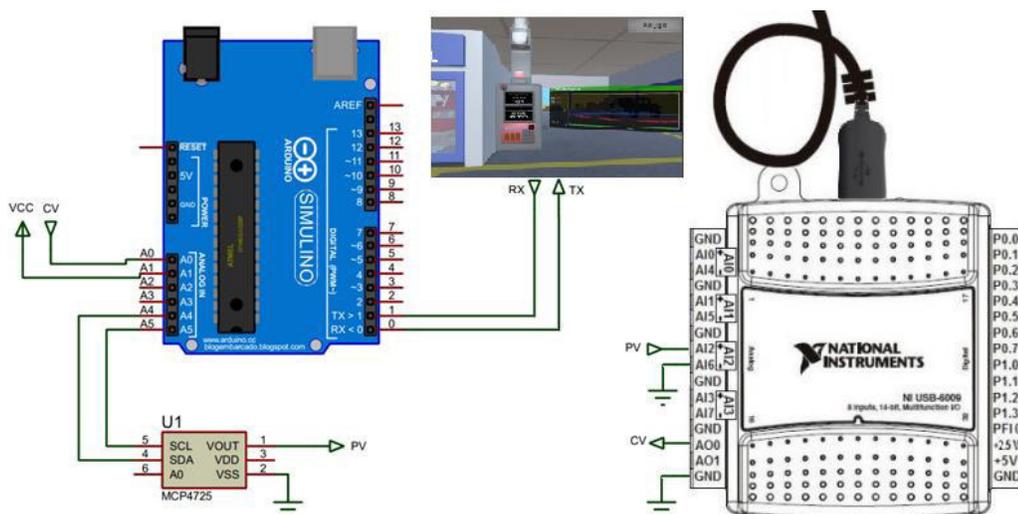
Además, la tarjeta electrónica emplea comunicación serial para enviar y recibir los datos desde y hacia Unity.

Inicialmente se desarrolla un Control en Lazo Abierto del sistema a fin de establecer las características del proceso con ello validar su funcionamiento y respuesta en base al proceso real.

Se emplea la tarjeta DAQ USB-6009 misma que tiene una resolución de entrada de 14 bits y una resolución de salida de 12 bits.

Figura 46

Esquema de conexión en Lazo Abierto



En la Figura 47 se muestra la interfaz de la aplicación para la adquisición de datos en LabVIEW, mientras que en la Figura 48 se muestra la programación del control en lazo abierto.

Figura 47

Adquisición de datos en Lazo Abierto en LabVIEW

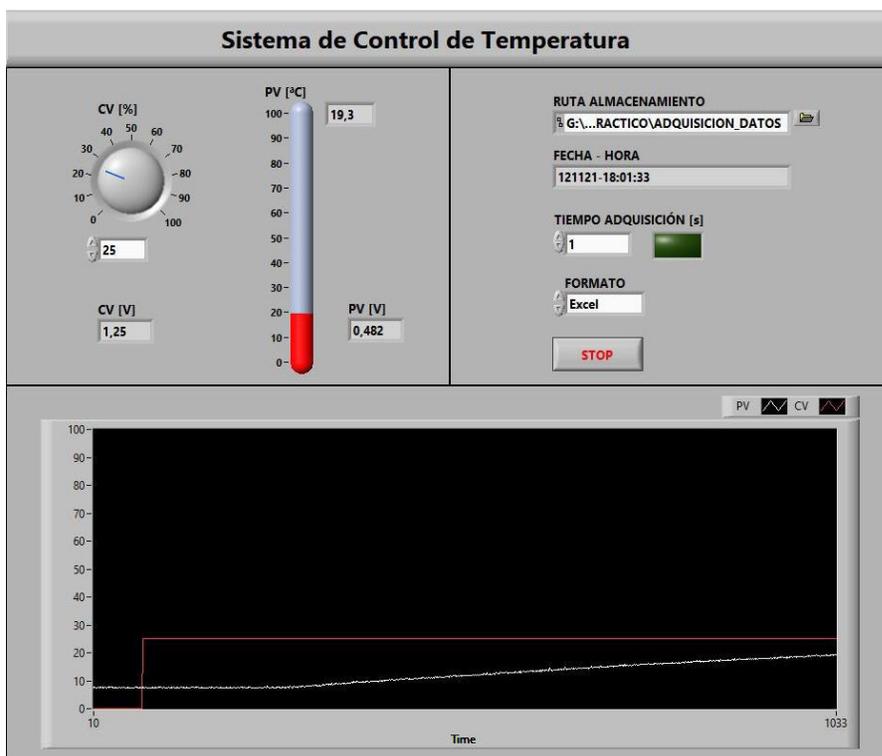
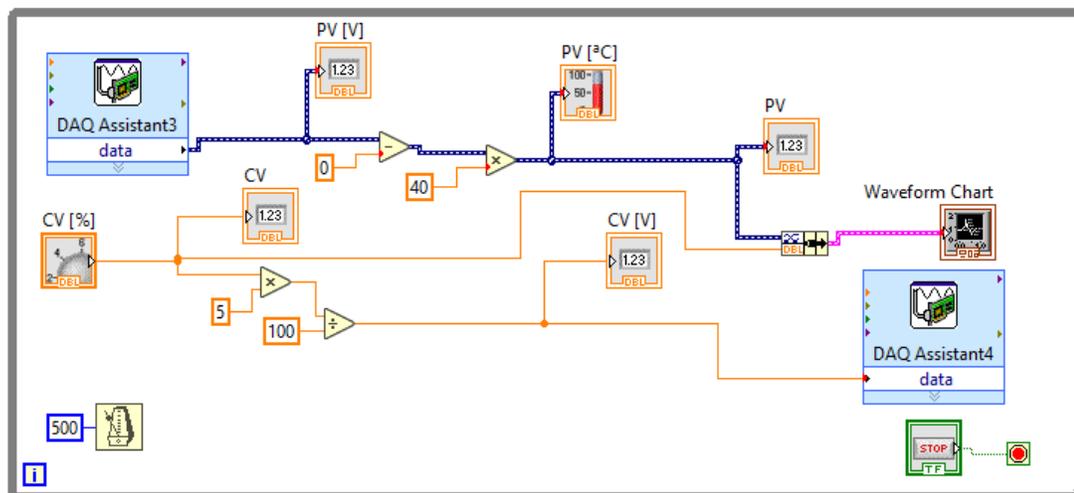


Figura 48

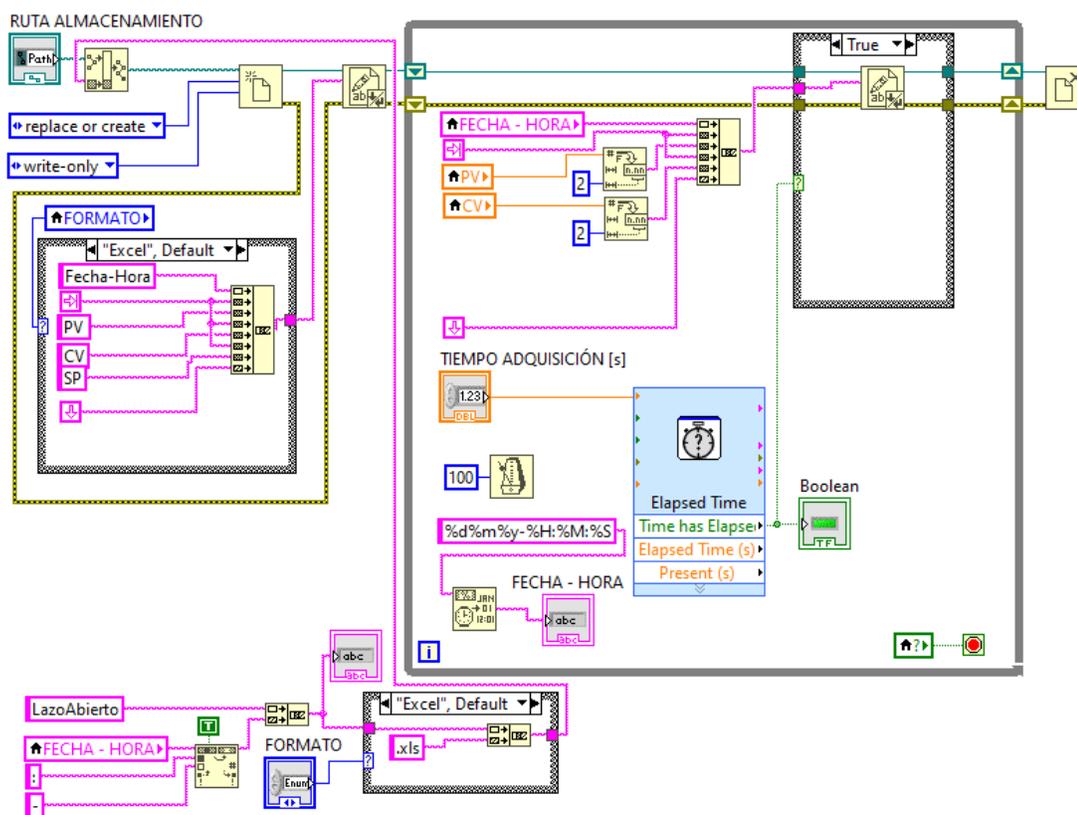
Programación Control en Lazo Abierto en LabVIEW



La Figura 49 indica la programación empleada para el registro de los datos en formato Excel o Bloc de Notas mismos que servirán para el análisis posterior.

Figura 49

Programación para el registro de datos en LabVIEW



Posteriormente se desarrolla la aplicación en Lazo Cerrado a fin de controlar el proceso de temperatura virtual, para ello se emplea en primera instancia la tarjeta DAQ USB-6009. En la Figura 50 se muestra la interfaz de control, mientras que en la Figura 51 se desarrolla el control PID en LabVIEW.

Figura 50

Sistema de Control de Temperatura en Lazo Cerrado en LabVIEW

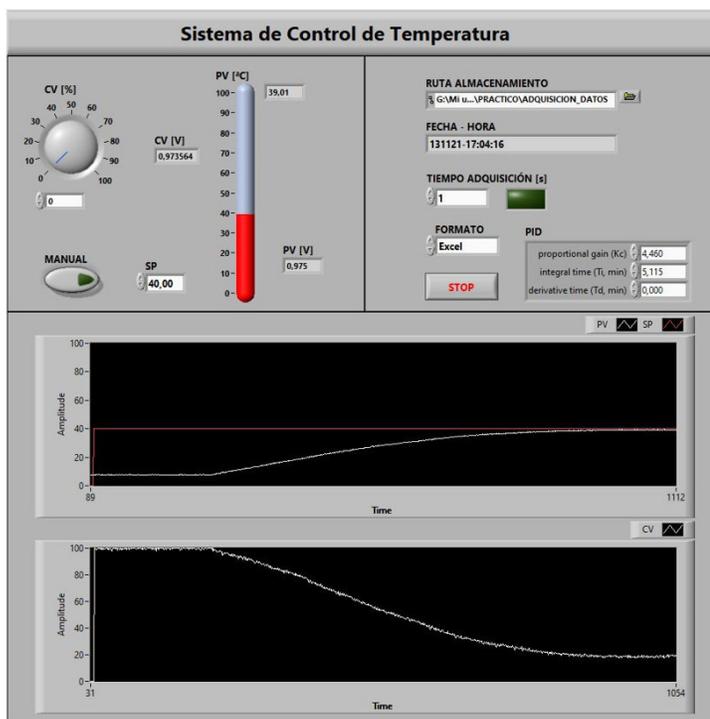
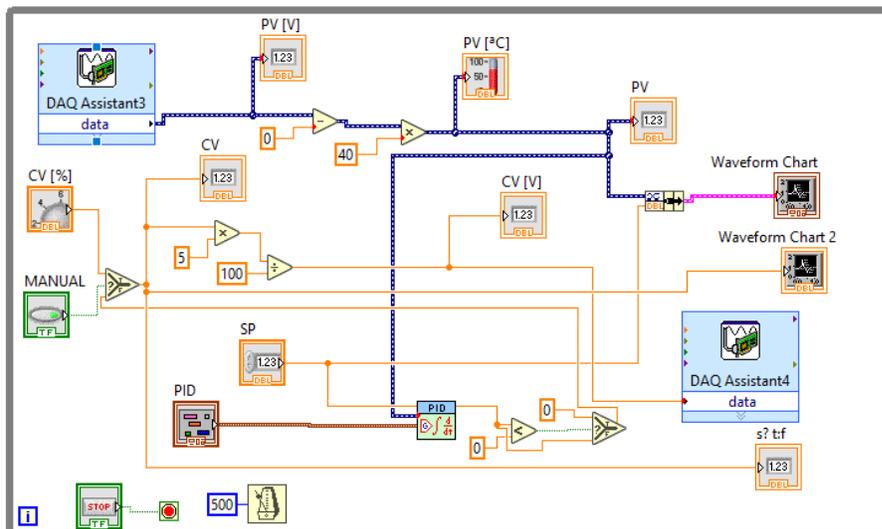


Figura 51

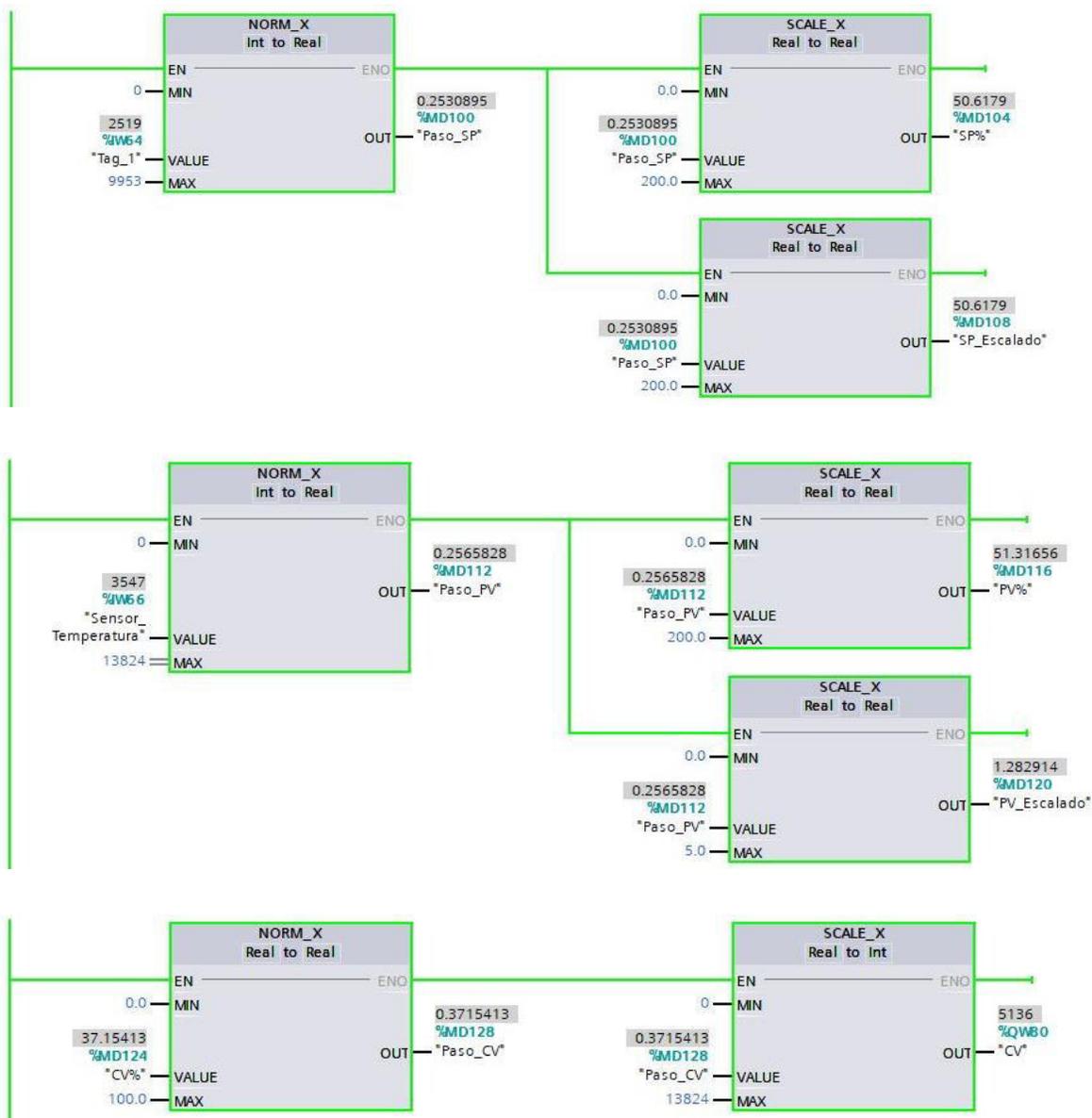
Control PID realizado en LabVIEW

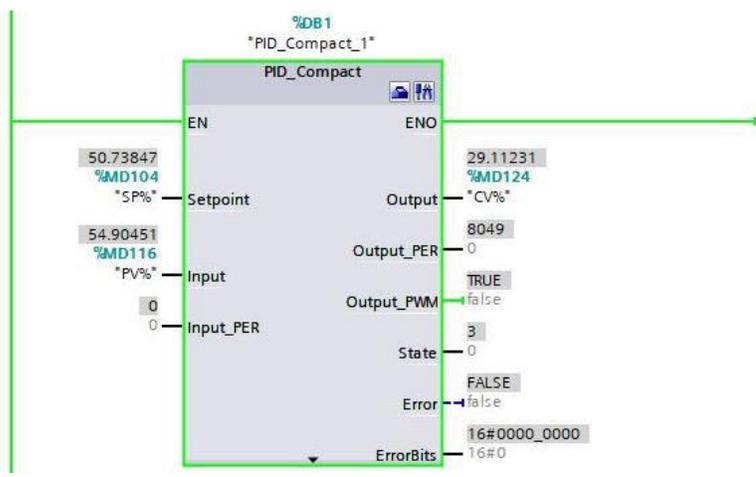


Finalmente, para validar los resultados obtenidos se realiza el Control del Proceso de Temperatura empleando un PLC S7-1200. En la Figura 52 se muestra la programación empleada.

Figura 52

Control PID realizado en TIA PORTAL





Capítulo IV

4. Pruebas y resultados

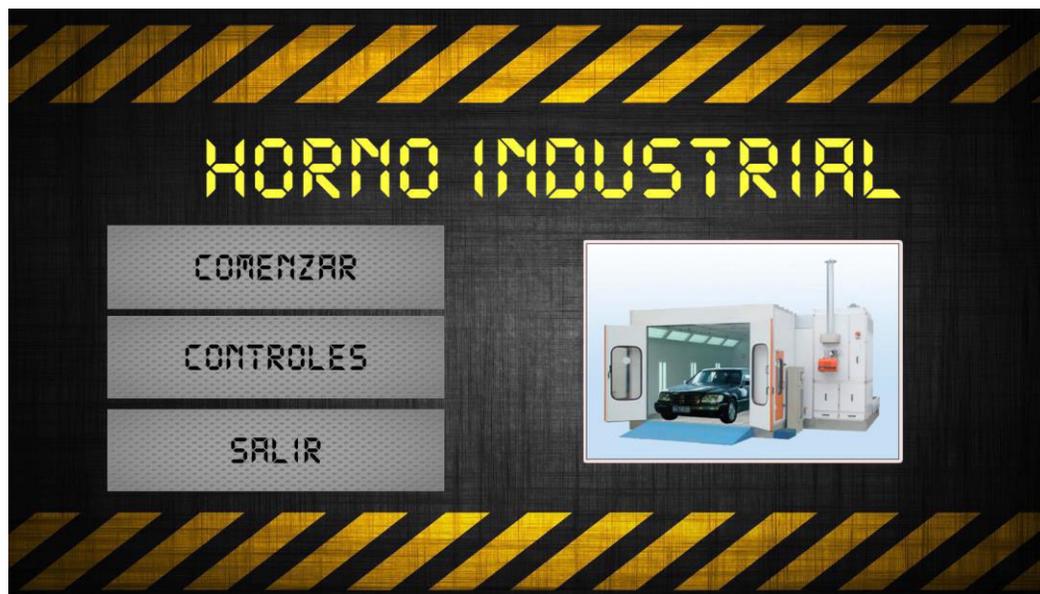
En este capítulo se describen las diferentes acciones para validar los resultados obtenidos, esto permitirá identificar el grado de similitud obtenido entre el sistema real y el proceso virtual.

4.1. Funcionamiento del entorno virtual

En primera instancia se describirá el funcionamiento y puesta en marcha del proceso virtual. Una vez ingresado en el proceso aparecerá una pantalla como se muestra en la Figura 53.

Figura 53

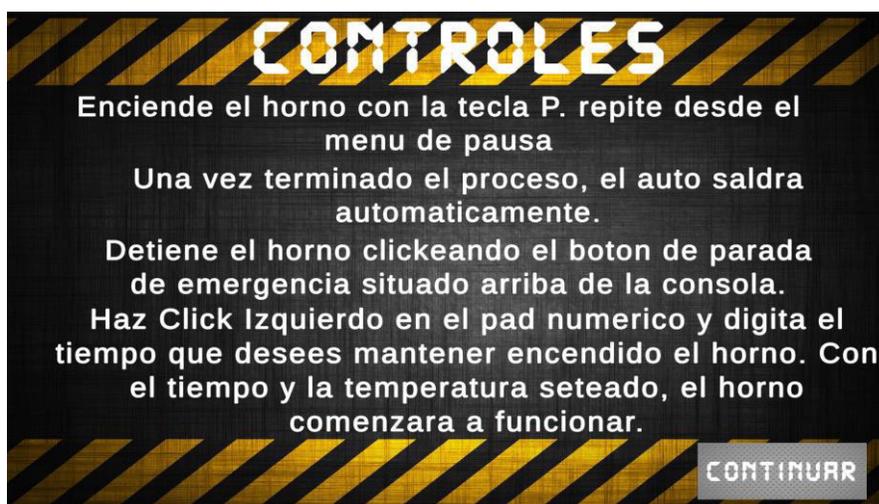
Menú de Inicio



Al presionar en la opción Controles se desplegará la pantalla que se muestra en la Figura 54.

Figura 54

Opción Controles



Una vez elegida la opción Comenzar se solicitará que se elija el color del vehículo.

Figura 55

Selección del color del vehículo



Luego el usuario debe elegir el puerto de comunicación con la tarjeta electrónica, para ello la aplicación presenta la lista de puertos COM detectados en la computadora. Cabe señalar que mientras no se elija un puerto de comunicación serial no se habilitará el ingreso al Proceso. Además, se dispone de la opción de refrescar para realizar una nueva búsqueda de los puertos disponibles.

Figura 56

Selección del puerto de comunicación serial



Seleccionado el puerto se debe elegir la opción conectar, luego de ello aparecerá un mensaje indicando que se ha establecido la conexión con el puerto serial, y también se habilitará el botón para ingresar el Proceso, como se muestra en la Figura 57.

Figura 57

Comunicación establecida

**Figura 58**

Ambiente de trabajo en Unity



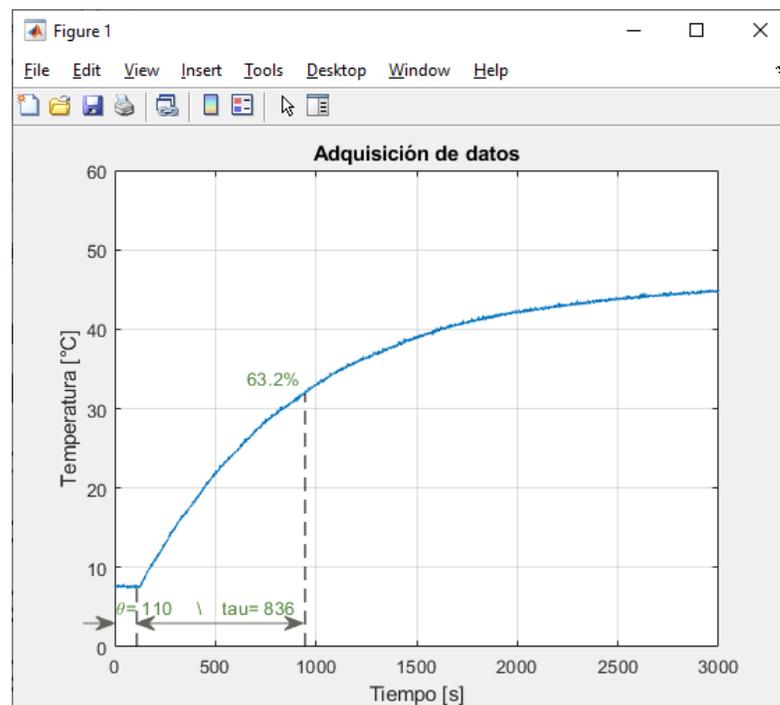
4.2. Validación del entorno virtual

Para la validación del correcto funcionamiento del entorno virtual en relación al modelo matemático se procede a obtener en forma experimental la función de transferencia del sistema virtual, de esta manera se interactúa entre la tarjeta electrónica y el horno diseñado en Unity, el procedimiento es el descrito en el capítulo 3, cumpliendo los siguientes pasos:

- Construir la gráfica de respuesta del sistema
- Determinar el tiempo muerto
- Encontrar la constante de tiempo

Figura 59

Determinación de parámetros del modelo matemático



Luego de ello haciendo uso de las ecuaciones 24, 25 y 26 se determina la ganancia K del sistema teniendo de esta manera los siguientes parámetros del Sistema de Primer Orden más Tiempo Muerto:

K : 1.58

τ : 836

L : 110

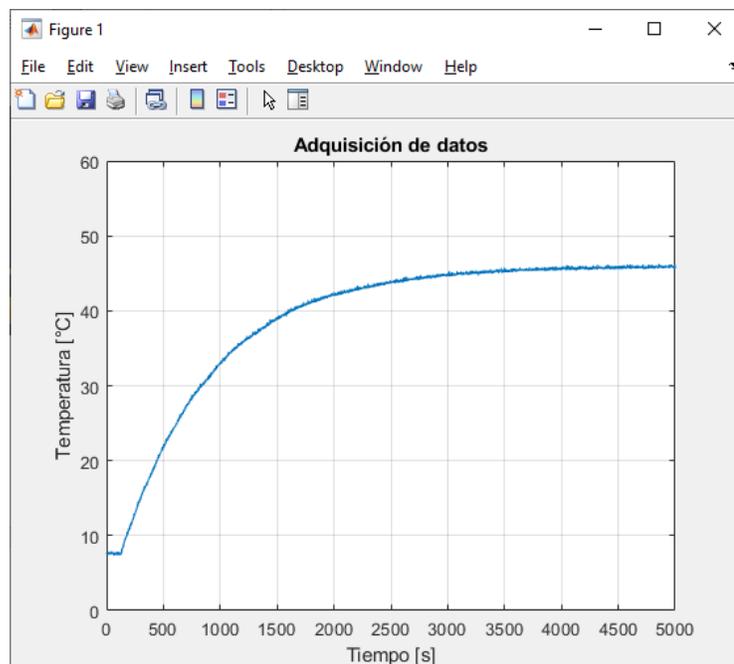
Con lo cual la Función de Transferencia del sistema es:

$$P(s) = \frac{1.58}{1 + 836s} e^{-110s}$$

La respuesta del sistema a una entrada escalón se muestra en la Figura 60.

Figura 60

Respuesta del sistema a una entrada escalón

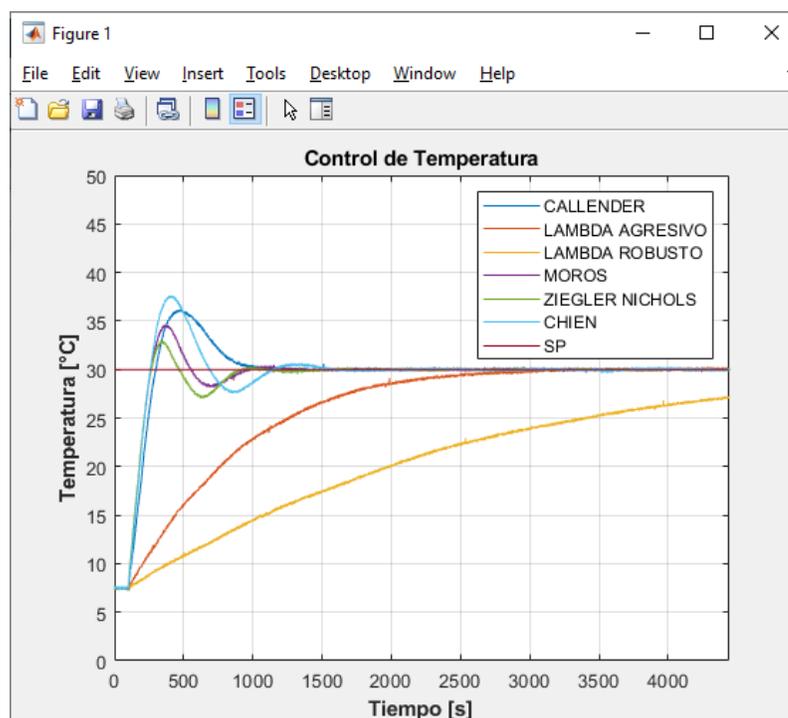


4.3. Validación del controlador

Una vez determinado que el sistema tiene el comportamiento deseado y que el mismo responde adecuadamente a la función de transferencia planteada se procede a validar su respuesta en un sistema en lazo cerrado, para ello se emplea un control tipo PI empleando los métodos de sintonización descritos en la Tabla 3.

Figura 61

Respuesta real del sistema con los métodos de sintonización



En la Tabla 7 se describe los parámetros de desempeño de los controladores empleados, es importante destacar que en un proceso de temperatura se requiere que el control no tenga sobre impulso y el tiempo de establecimiento sea corto. De esta manera se puede indicar que el método de sintonización Lambda Agresivo presenta un mínimo sobre impulso en comparación con los otros métodos descritos.

Tabla 7

Parámetros de desempeño de los Controladores PI

MÉTODO	SP	T_{max} [°C]	K_C	T_i [min]	PEM [%]	T_s [s]
Ziegler Nichols	30,00	32,93	5,017	5,627	9,77%	1407
Lambda Agresivo	30,00	30,28	0,660	12,697	0,93%	3422
Lambda Robusto	30,00	27,33	0,239	12,697	-	>5000
Callender	30,00	36,24	3,166	6,206	20,80%	1300
Chien	30,00	37,62	3,902	3,973	25,40%	1591
Moros	30,00	34,61	4,460	5,115	15,37%	1263

En la Figura 62 se muestra el comportamiento del sistema real, mientras que en la Figura 63 se muestra el comportamiento del sistema virtual, en ambos casos el controlador es realizado en LabVIEW empleando la tarjeta DAQ USB-6009.

Figura 62

Control del proceso real en LabVIEW

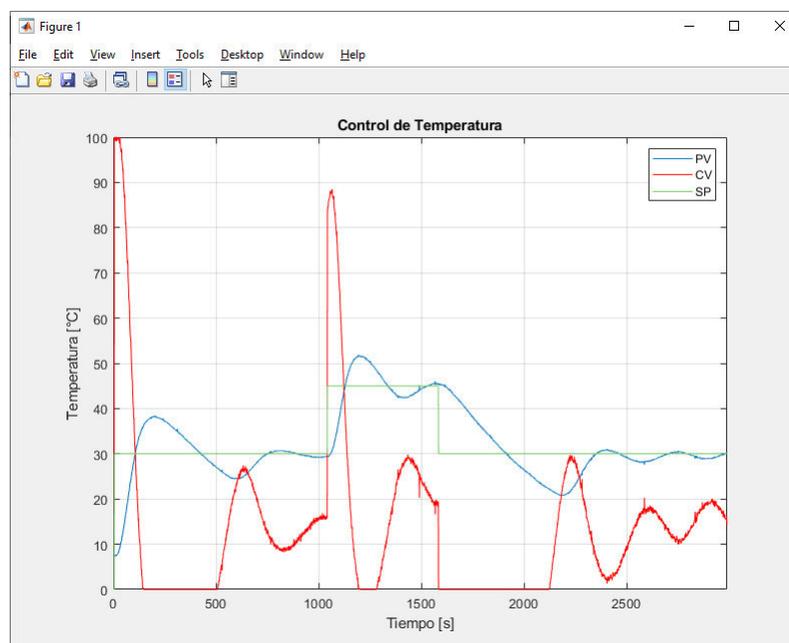


Figura 63

Control del proceso virtual en LabVIEW

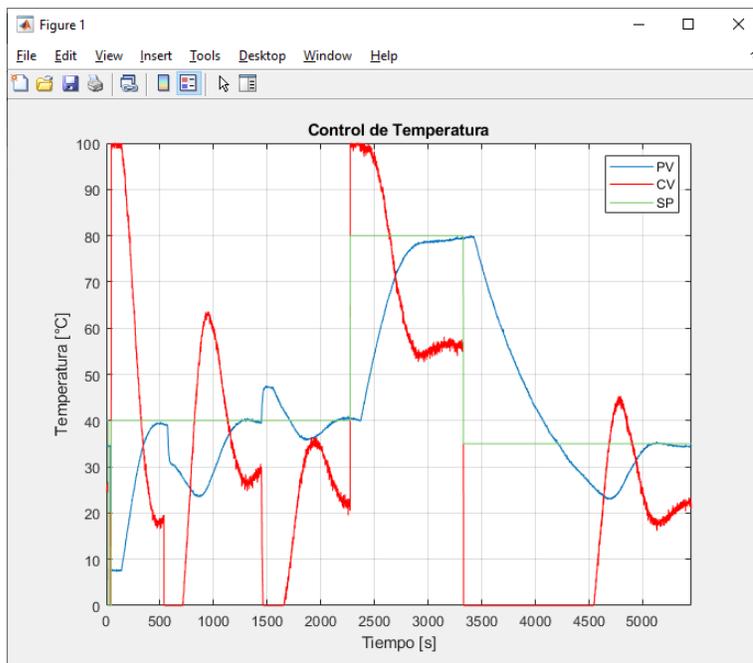
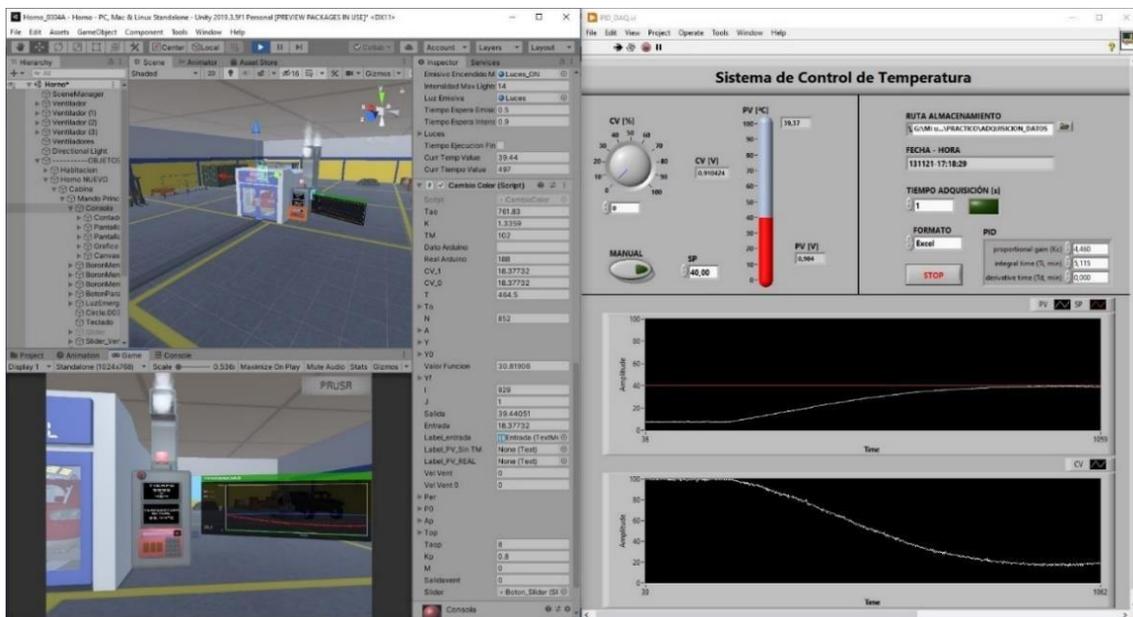


Figura 64

Interacción del control del proceso virtual en LabVIEW



De igual manera se realiza el control empleando el PLC S7-1200 a fin de validar su comportamiento.

Figura 65

Control del proceso virtual con PLC S7-1200

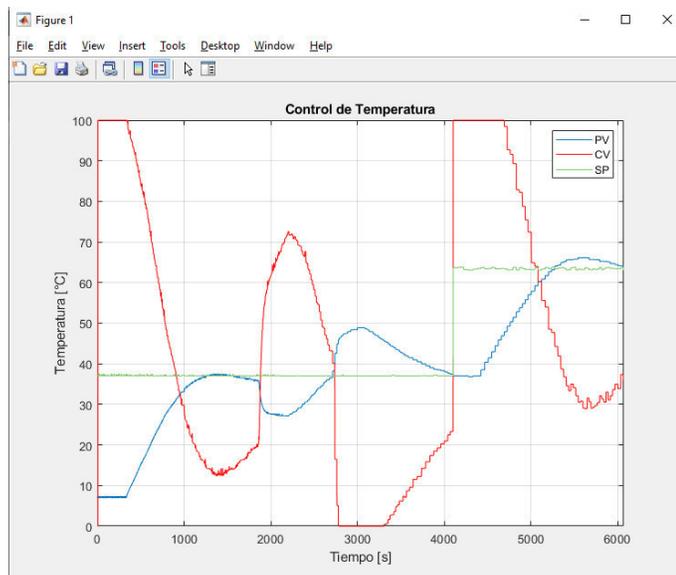


Figura 66

Tendencias mostradas en TIA PORTAL

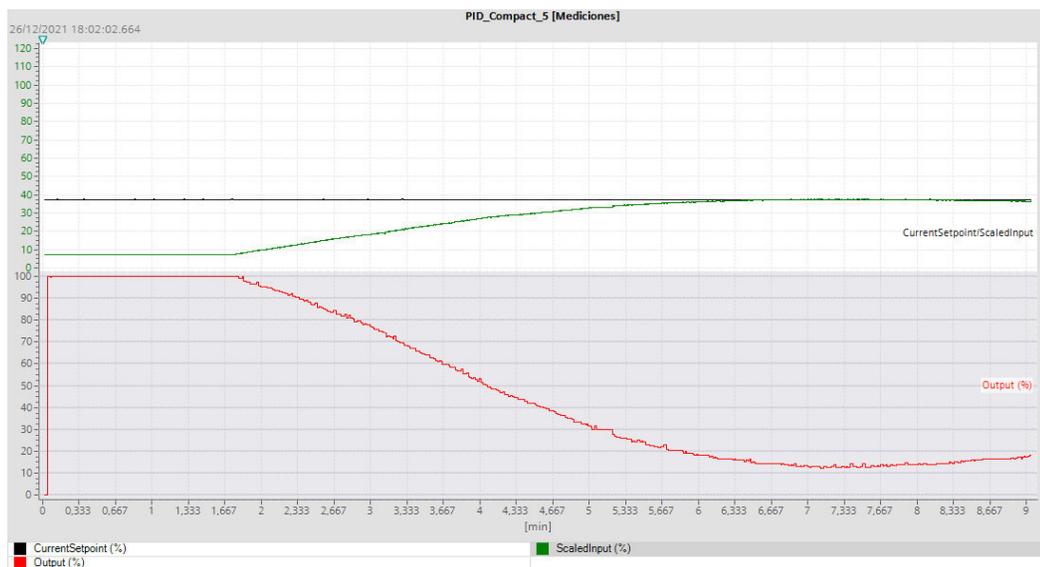


Figura 67

Tendencias mostradas en el proceso virtual



Se diseña una calculadora básica la misma que permite la determinar las constantes de sintonía dependiendo del método que se requiera.

Figura 68

Calculadora para determinar las constantes del controlador PI

Calculadora

Calculadora Parámetros Controlador PI

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

Ingrese los siguientes campos:

K

T

L

Método de Sintonización

- Lambda Agresivo
- Ziegler Nichols
- Lambda Agresivo
- Lambda Robusto
- Callender
- Chien
- Moros

4.4. Validación del entrenamiento

A fin de determinar el grado de aceptación y funcionalidad del sistema desarrollado se realiza la siguiente encuesta, la cual fue aplicada en total a 42 alumnos de Séptimo y Octavo ciclo de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Se plantea las siguientes preguntas:

- 1) ¿El sistema es fácil de usar?
- 2) ¿Es clara la forma de conexión entre el proceso virtual y el hardware?
- 3) ¿A su criterio, el sistema virtual funciona similar al proceso real?
- 4) ¿La obtención de la función de transferencia del sistema virtual tuvo alguna complicación?
- 5) ¿La función de transferencia obtenida fue similar a la original?
- 6) ¿El diseño del sistema virtual presenta realismo?

En la Figura 69 se muestra los resultados obtenidos sobre la aceptación del entorno virtual, mientras que en el Anexo 2 se detalla los resultados obtenidos:

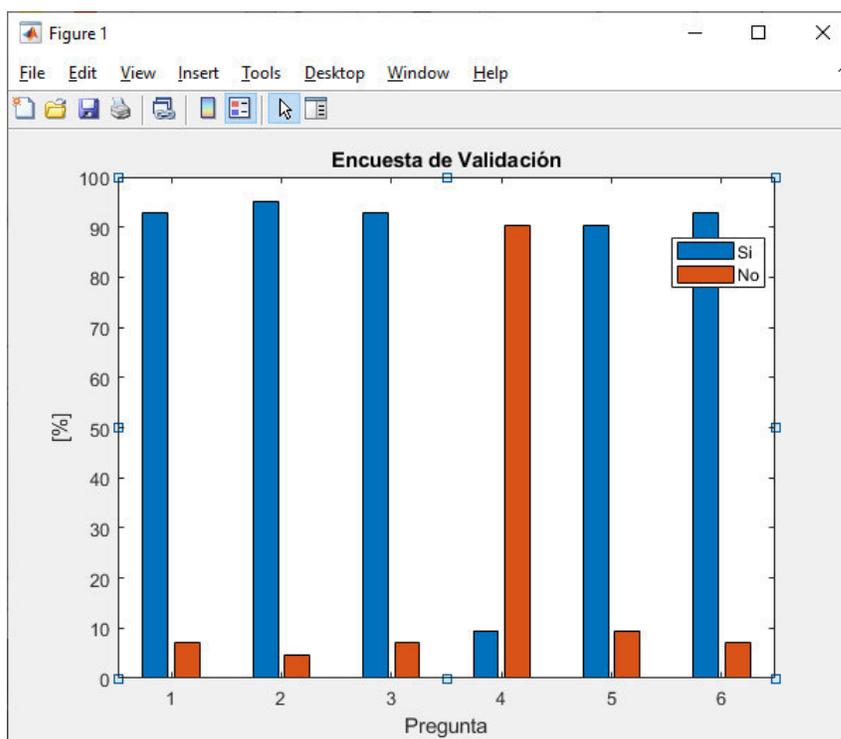
Los resultados muestran que el sistema tiene una alta aceptación en lo que se refiere al manejo del mismo, así también se nota que la interacción entre hardware y software es simple la cual no genera complicaciones.

En lo referente a la obtención de la función de transferencia del sistema virtual y su comparación con el modelo matemático original presenta una aceptación superior al 90% de los alumnos encuestados.

Finalmente se menciona que el sistema presenta un alto realismo comparado con el proceso disponible en los laboratorios.

Figura 69

Encuesta de validación de resultados



4.5. Validación de la hipótesis

La hipótesis planteada al inicio del proyecto fue:

Un entorno de simulación virtual 3D de un proceso de temperatura empleando “Hardware in the Loop” permitirá un adecuado entrenamiento de Control Automático.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las encuestas se puede determinar que el 90.5% obtienen resultados satisfactorios en la obtención del modelo matemático del sistema virtual siendo este un parámetro importante que se emplea en el análisis del Control Automático con lo cual se puede decir que el sistema propuesto ayuda al entrenamiento de los estudiantes que es la razón de su desarrollo.

4.6. Alcances

- Se desarrolló el entorno virtual de un proceso de temperatura empleando la técnica Hardware in the Loop.
- Se implementó el modelo matemático en el dominio del tiempo a fin de que responda al proceso real.
- La técnica Hardware in the Loop permite disponer de señales eléctricas simulando sensores y actuadores lo cual es aprovechado para poder utilizar diversos tipos de controladores.
- El sistema permite realizar el análisis matemático a fin de obtener su función de transferencia y emplear el método de sintonización adecuado.

4.7. Limitaciones

- Es importante disponer de un sistema computacional de altas prestaciones a fin de que el desempeño del sistema no sufra intermitencias.
- Se debe tomar en cuenta que los niveles de voltaje de entrada al sistema son de 0V a 5V.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La virtualización de un proceso real es factible para ello es importante la obtención de su función de transferencia, mediante el desarrollo del presente proyecto se pudo comprobar que su funcionamiento llega a ser similar al de un sistema real.
- Mediante la técnica Hardware in the Loop se puede interactuar adecuadamente entre un sistema implementado en un sistema computacional con el hardware de control (PLC, controlador, etc.).
- La implementación de los modelos matemáticos en los lenguajes computacionales como es el caso del lenguaje C# es posible siempre y cuando se lo analice adecuadamente tomando en cuenta que se lo debe hacer en el dominio del tiempo.
- El desarrollo de entornos virtuales es una gran alternativa al entrenamiento en el Control Automático ofreciendo ventajas como tiempo de funcionamiento y en el caso de procesos reales de temperatura se evita la innecesaria espera a que el proceso se enfríe para volver a trabajar con el sistema.

- El mejor controlador para el proceso de temperatura es el Control PI método Lambda Agresivo ya que no presenta sobre impulso y tiene un tiempo de establecimiento de 3422 segundos.
- El sistema virtual del control de temperatura de un horno cuenta con los instrumentos industriales (transmisores, control de fase, PLC, HMI, etc.), que presentan un funcionamiento similar a los equipos industriales físicos, proporcionando a los usuarios un entrenamiento cercano a la realidad.

5.2. Recomendaciones

- En el desarrollo de los procesos virtuales es necesario establecer los rangos de operación tanto en el software como en el acondicionamiento de las señales.
- Los procesos de temperatura presentan un tiempo muerto elevado por lo que es importante tomarlo en cuenta para que los resultados sean los esperados.
- Considerar para futuros proyectos el análisis de la comunicación entre Unity y la tarjeta electrónica a fin de que no se convierta en una limitante en la transmisión de datos.

Bibliografía

- Abidi, M. A., Lyonnet, B., Chevaillier, P., Toscano, R., & Baert, P. (2018). Simulation of manufacturing processes via Virtual Reality. In *Virtual and Augmented Reality: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (Vol. 2, Issue March).
<https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5469-1.ch044>
- Balladares Vargas, G. M., & Teneda Ardila, H. A. (2020). *Sistema virtual 3D de una torre de destilación, mediante la técnica de Hardware in The Loop, para la enseñanza en el Control de Procesos*. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Bharath, V. G., & Patil, R. (2018). Solid Modelling Interaction with Sensors in Virtual Environment for the Application of Virtual Reality Welding. *International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication, CTCEEC 2017*, 645–647. <https://doi.org/10.1109/CTCEEC.2017.8455034>
- Blevins, T. (2021). *Modeling and Control Dynamic World of Process Control*.
<https://modelingandcontrol.com/2013/04/on-demand-tuning/>
- Braschi, E. A. (2014). *Enfoque práctico del control moderno con aplicaciones en Matlab* (primera). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas S.A.C.
- Caldas Flautero, O. I., Jiménez Gómez, S., Mejía Ruda, E., Avilés Sánchez, O. F., & Amaya Hurtado, D. (2013). Sistema de control de una planta embebida en FPGA empleando hardware-in-the-loop. *DYNA (Colombia)*, 80(179), 51–59.
- Canales Ruiz, R., & Barrera Rivera, R. (1976). *Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático*.
- Craighead, J., Burke, J., & Murphy, R. (2008). Using the Unity game engine to develop SARGE: A case study. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Simulation Workshop*.

http://dl.getdropbox.com/u/18762/jeffcraighead/Craighead_IROS2008_Workshop.pdf

Crespo, R., García, R., & Quiroz, S. (2015). Virtual reality simulator for robotics learning. *Proceedings of 2015 International Conference on Interactive Collaborative and Blended Learning, ICBL 2015, December*, 61–65.

<https://doi.org/10.1109/ICBL.2015.7387635>

Distefano, J. J., Stubberud, A. R., & Williams, I. J. (1992). *Retroalimentación y Sistemas de Control* (Segunda). McGraw-Hill.

Dorf, R., & Bishop, R. (2005). *Sistemas de control moderno* (décima). Prentice Hall.

Dulhoste, J. (2006). *Teoría de Control*.

webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index.../Teoria_Control.pdf

Flores Cruz, J. A., Camarena Gallardo, P., & Avalos Villarreal, E. (2014). La realidad virtual una tecnología innovadora aplicable al proceso de enseñanza de los estudiantes de ingeniería. *Apertura - Revista de Innovación Educativa*, 6(2), 1–10.

García Sanders, L. (2021). *Pintura al horno*. <https://www.pintura-para.com/pintura-al-horno/>

Ipanaqué, W., Belupú, I., Valdiviezo, J., & Vásquez, G. (2014). Laboratorios Virtuales y Remotos para la Experimentación. *Memorias Del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático*, 1404–1409.

Isermann, R., Schaffnit, J., & Sinsel, S. (1999). Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. *Control Engineering Practice*, 7(5), 643–653. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(98\)00205-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(98)00205-6)

Krishnan, A., & Pillai, A. (2018). Digital sensor simulation frame work for hardware-in-the-loop testing. *2017 International Conference on Intelligent Computing*,

Instrumentation and Control Technologies, ICICICT 2017, 2018-Janua, 813–817.

<https://doi.org/10.1109/ICICICT1.2017.8342669>

Kucera, E., Haffner, O., & Leskovsky, R. (2018). Interactive and virtual/mixed reality applications for mechatronics education developed in Unity engine. *Proceedings of the 29th International Conference on 2018 Cybernetics & Informatics, (K & I)*, 1–5.

<https://doi.org/10.1109/CYBERI.2018.8337533>

Landa Cosio, N. A. (2013). *AprendA A desArrollAr increíbles juegos 3d* (F. Andina, Ed.).

López Herrera, J. M., & Vargas Soria, L. E. (2021). *Implementación de un Sistema SCADA para el Control de Temperatura de dos hornos a través de una Red Ethernet*.

Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*.

Moncada Albitres, L. (2005). *Automatización y Control de Procesos Industriales* (Segunda).

Nise, N. (2011). *CONTROL SYSTEMS ENGINEERING* (sixth).

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (Quinta). Pearson Educación S.A.

Palacios, A. (2021). *¿Qué es Blender? El software que convertirá tus ideas en 3D*.

<https://www.crehana.com/ec/blog/animacion-modelado/que-es-blender/>

Pruna, E., Jimenez, I., & Escobar, I. (2020). Hardware-in-the-Loop of a Flow Plant Embedded in FPGA, for Process Control. *In: Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 169*, 181-189

Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1616-0_17

Pruna, E., Rosero, M., Pogo, R., Escobar, I., & Acosta, J. (2018). Virtual reality as a tool for the cascade control learning. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in*

Bioinformatics), 10850 LNCS, 243–251. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95270-3_20

Ríos Ardila, C. A. (2013). Sintonización del lazo de control de un modelo de simulación de un horno empleando el método Lambda. In *Journal Tunas Bangsa*.

Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1991). *Control Automático de Procesos* (Primera). Limusa S.A.

Wazir, H. K., & Annaz, F. Y. (2014). Using unity for 3D object orientation in a virtual environment. *IET Conference Publications, 2014*(CP649).

<https://doi.org/10.1049/cp.2014.1088>

Anexos