



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Desarrollo de un entorno virtual 3D que simule un proceso industrial de nivel, orientado
al entrenamiento para la calibración de una válvula de control**

Ibáñez Jácome, Pepe Fernando

Vicerrectorado de investigación, innovación y transferencia tecnológica

Centro de estudios de posgrado

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.

01 de marzo de 2021



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

Certifico que el trabajo de titulación, “**DESARROLLO DE UN ENTORNO VIRTUAL 3D QUE SIMULE UN PROCESO INDUSTRIAL DE NIVEL, ORIENTADO AL ENTRENAMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA VÁLVULA DE CONTROL**” fue realizado por el señor **IBÁÑEZ JÁCOME, PEPE FERNANDO** 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, marzo del 2021

.....
Ing. Escobar Anchaguano, Ivón Patricia Mgs.

DIRECTORA

Document Information

Analyzed document UrkundTrabajo de titulación Pepelbañez.pdf (D96289388)
Submitted 2/22/2021 11:23:00 PM
Submitted by Escobar Anchaguano Ivon Patricia
Submitter email ipescobar@espe.edu.ec
Similarity 8%
Analysis address ipescobar.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report**Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Proyecto de investigación - Mauricio Rosero, Rai Pogo.pdf**

Document Proyecto de investigación - Mauricio Rosero, Rai Pogo.pdf (D40606124)
Submitted by: epruna@espe.edu.ec
Receiver: epruna.espe@analysis.orkund.com 1

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Capitulo1TP.pdf

Document Capitulo1TP.pdf (D14896040)
Submitted by: pao_cal92@hotmail.com
Receiver: wrfreire.espe@analysis.orkund.com 2

URL: <https://docplayer.es/55727258-Gobierno-del-estado-de-mexico.html>
Fetched: 1/18/2021 9:34:05 AM 2

URL: <https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2011/05/ELEMENTOS-FINALES-DE-CONTROL-m>

Fetched: 2/22/2021 11:23:00 PM 1

URL: <https://www.passeidireto.com/arquivo/85863480/instrumentos-industriales-su-ajuste->

Fetched: 2/22/2021 11:23:00 PM 2

Firma:

.....

Ing. Escobar Anchaguano, Ivón Patricia Mgs.

DIRECTOR



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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo **IBÁÑEZ JÁCOME, PEPE FERNANDO**, con cédula de ciudadanía n° **0501938617**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN ENTORNO VIRTUAL 3D QUE SIMULE UN PROCESO INDUSTRIAL DE NIVEL, ORIENTADO AL ENTRENAMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA VÁLVULA DE CONTROL** 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, marzo del 2021

.....
Ibáñez Jácome, Pepe Fernando

C.C.: 0501938617

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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **IBÁÑEZ JÁCOME, PEPE FERNANDO**, con cédula de ciudadanía n° **0501938617**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN ENTORNO VIRTUAL 3D QUE SIMULE UN PROCESO INDUSTRIAL DE NIVEL, ORIENTADO AL ENTRENAMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA VÁLVULA DE CONTROL** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, marzo del 2021

.....
Ibáñez Jácome, Pepe Fernando

C.C.: 0501938617

DEDICATORIA

“Gratitud es cuando los recuerdos se guardan en el corazón y no en la mente”

Lionel Hamton

En primer lugar a Dios por haberme cuidado y protegido día con día y mantenerme con salud y vida, en este tiempo de grandes riesgos para toda la humanidad.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas, pues me ha dado la oportunidad de ser parte de este programa de formación, el mismo que servirá para enriquecer mi accionar en el campo laboral y personal.

A mi tutor del proyecto de titulación, Ing. Ivón Escobar A. Mgs., que me ha orientado de una manera acertada y por ello, hoy he llegado a alcanzar este objetivo en mi formación.

A mis compañeros de clase, con quienes hemos compartido extensas jornadas de trabajo y en los que, me he apoyado para concluir con éxito este post grado.

Pepe F. Ibáñez J.

AGRADECIMIENTO

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo no en el resultado. Un esfuerzo total, es una victoria completa”

Mahatma Gandhi

Este trabajo final, lo quiero dedicar a Dios por su inmensa bondad, por acompañarme y darme las fuerzas espirituales que necesito día a día.

A mi familia, ellos son para mí la brújula que me guía y la inspiración para alcanzar grandes objetivos.

A mi esposa, mi compañera de vida, por alentar mis sueños y apoyarme siempre, por estar a mi lado a todo momento, y ser un respaldo para poder alcanzar esta meta más en mi vida

A mi madre, quien ha sido mi ejemplo de lucha, valor, perseverancia, fortaleza y quien con sus sabias enseñanzas ha formado en mí un hombre de bien, capaz de enfrentar los desafíos de la vida con absoluta responsabilidad.

Pepe F. Ibáñez J.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificacación	2
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos	8
Índice de figuras.....	13
Índice de tablas.....	17
Resumen	18
Abstract.....	19
Contenidos generales	20
Antecedentes	20
Problema	21
Objetivos	21

<i>Objetivo General</i>	21
<i>Objetivos Específicos</i>	22
Justificación, importancia y alcance del proyecto	22
Hipótesis de investigación	23
<i>Categorización de las variables de investigación</i>	23
Marco teórico referencial.....	25
Marco Legal	25
Marco Conceptual	25
<i>Realidad Virtual (RV)</i>	25
<i>Elementos de la RV</i>	26
<i>Arquitectura de la RV</i>	27
<i>Dispositivos empleados en RV para simulación en el área</i>	29
<i>Software utilizado en realidad virtual del control automático</i> ..	31
<i>Aplicaciones industriales de realidad virtual</i>	34
<i>Control de procesos industriales</i>	35
<i>Sistemas de nivel de líquido</i>	36
<i>Controladores PID</i>	38

<i>Métodos de sintonía de controladores PID</i>	39
<i>Elementos de control final</i>	41
<i>Válvulas de control</i>	42
<i>Válvula de Bypass</i>	44
<i>Posicionador inteligente y diagnóstico de la válvula (calibración)</i>	45
Metodología de la investigación	48
Diseño del diagrama P&ID de la estación de entrenamiento	50
Modelado 3D del proceso industrial de nivel	52
<i>Autocad Plant 3D</i>	52
Importación de modelos. En Autocad Plant 3D.	52
Conversión del modelo importado.	53
Ruteo de tuberías.	58
Diseño de la planta	60
<i>Blender</i>	60
Importación de modelos	60
Corrección de errores y optimización de los modelos	61

Puntos de rotación.....	66
Creación de mapas UV.....	68
Diseño del proceso industrial de control de nivel.....	68
<i>Implementación del entorno virtual en Unity 3D.....</i>	<i>69</i>
Diseño, materiales, texturas e iluminación.....	69
Simulación del comportamiento de la planta	71
Implementación del algoritmo del control PID	72
Sintonía del controlador PID.....	72
Implementación de la interfaz humana-máquina (HMI) ..	73
Implementación del Bypass.....	75
Programación de animaciones y características.....	76
Implementación del flujograma del proceso	77
Resultados.....	80
Resultados del entorno virtual inmersivo.....	80
Resultados del funcionamiento del sistema virtual de Nivel	82
Resultado de la calibración de la válvula de control	85
Resultado de las encuestas para la validación entorno virtual 3D.....	88

Conclusiones	95
Recomendaciones	97
Bibliografía	98

Índice de figuras

Figura 1 <i>Elementos de la RV</i>	26
Figura 2 <i>Arquitectura de la RV</i>	27
Figura 3 <i>La imagen del menú del juego muestra las funciones de los controladores Vive.</i>	30
Figura 4 <i>Descripción gráfica de la conexión de RV</i>	30
Figura 5 <i>Descripción de una plantilla de AutoCAD Plant 3D</i>	32
Figura 6 <i>Descripción del ambiente gráfico en Blender</i>	33
Figura 7 <i>Descripción del ambiente gráfico de UNITY 3D</i>	34
Figura 8 <i>Dinámica de un sistema de nivel de líquidos</i>	37
Figura 9 <i>Estructura de un lazo de control simple</i>	39
Figura 10 <i>Clasificación de las válvulas</i>	42
Figura 11 <i>Componentes de una válvula de control</i>	43
Figura 12 <i>Válvulas en sistema de BYPASS</i>	44
Figura 13 <i>Posicionador electroneumático/digital inteligente</i>	46
Figura 14 <i>Firma de la válvula</i>	47
Figura 15 <i>Esquema general del proyecto.</i>	49
Figura 16 <i>Diagrama P&ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel de un tanque</i>	51
Figura 17 <i>Selección Import File formato .fbx</i>	52
Figura 18 <i>Opción “Convert Equipment”</i>	53
Figura 19 <i>Modelo Catalogado</i>	54
Figura 20 <i>Despliegue de varias propiedades del modelo</i>	54
Figura 21 <i>Añadidura de los puntos de conexión</i>	55

	14
Figura 22 <i>Puntos de conexión opción “Add Nozzle”</i>	55
Figura 23 <i>Punto de conexión, uso de la herramienta de detección automática de referencias</i>	56
Figura 24 <i>Punto de conexión, definición del eje central de conexión</i>	57
Figura 25 <i>Punto de conexión, modificar características</i>	57
Figura 26 <i>Creación de una nueva boquilla</i>	58
Figura 27 <i>Ruteo de tuberías manual</i>	58
Figura 28 <i>Secuencia de ruteo de tuberías automático</i>	59
Figura 29 <i>Planta diseñada en Autocad 3D</i>	60
Figura 30 <i>Determinación de los formatos a exportar desde Blender</i>	61
Figura 31 <i>Corrección de los parámetros de configuración</i>	61
Figura 32 <i>Corrección de errores y optimización de los modelos</i>	62
Figura 33 <i>Eliminación de configuración del modelo importado</i>	63
Figura 34 <i>Sombreado de objeto desaparecido</i>	63
Figura 35 <i>Visualización de vértices innecesarios</i>	64
Figura 36 <i>Eliminación de vértices innecesarios</i>	65
Figura 37 <i>Cambio la distancia entre vértices para su eliminación</i>	65
Figura 38 <i>Configuración de los puntos de rotación</i>	66
Figura 39 <i>Origin to Geometry</i>	67
Figura 40 <i>Configuración de un punto de rotación personalizado</i>	67
Figura 41 <i>Creación de Mapas UV</i>	68
Figura 42 <i>Diseño final del proceso industrial del control de nivel</i>	69
Figura 43 <i>Importación del proceso industrial a Unity 3D</i>	70
Figura 44 <i>Escena del proceso industrial de nivel</i>	70

Figura 45 <i>Proceso industrial de nivel incluido iluminación, detalles, efectos y texturas diseñado en Unity 3D</i>	71
Figura 46 <i>Implementación del HMI (Proceso)</i>	73
Figura 47 <i>Implementación del HMI (Operación)</i>	74
Figura 48 <i>Implementación del HMI (Operación)</i>	75
Figura 49 <i>Implementación del Bypass</i>	76
Figura 50 <i>Entorno virtual del proceso industrial de nivel finalizado (tanque de nivel)</i>	76
Figura 51 <i>Entorno virtual del proceso industrial de nivel finalizado (sistema de calibración)</i>	77
Figura 52 <i>Flujograma del proceso de calibración de la válvula de control (Checx list)</i> ..	79
Figura 53 <i>Imagen de los guantes virtuales en movimiento para la manipulación de los instrumentos industriales</i>	80
Figura 54 <i>Uso de los mandos con control háptico HD y gatillos en el sistema virtual</i>	81
Figura 55 <i>Inicio del sistema mediante el uso del guante virtual que emula la acción física del operador</i>	81
Figura 56 <i>Apertura de una válvula manual, utilizando los guantes virtuales</i>	82
Figura 57 <i>Visualización de las variables principales del proceso industrial de nivel en el HMI</i>	82
Figura 58 <i>Controlador sintonizado y en funcionamiento con un mínimo error</i>	83
Figura 59 <i>Visualización del tanque de nivel en llenado continuo</i>	83
Figura 60 <i>Transmisor de nivel en funcionamiento con visualización de la corriente y la altura del tanque</i>	84
Figura 61 <i>Válvula de control en funcionamiento, desplazándose de acuerdo a la señal del control value (CV) que genera el controlador</i>	84
Figura 62 <i>Inicio del asistente para la calibración de la válvula de control</i>	85

Figura 63 Configuración del sistema de control en modo manual	85
Figura 64 Procedimiento para habilitación de la válvula de Bypass	86
Figura 65 Procedimiento realizado a la válvula de control, para la conexión del calibrador	86
Figura 66 Procedimiento de conexión del calibrador de procesos	86
Figura 67 Procedimiento de conexión del configurador de campo.....	87
Figura 68 Procedimiento para la obtención de la firma de la válvula (resultado “válvula descalibrada”).....	87
Figura 69 Procedimiento de ajuste de la válvula de control y la obtención de la firma de la válvula (resultado “válvula calibrada”).....	87
Figura 70 Resultado del nivel de instrucción de los encuestados	88
Figura 71 Resultado de la primera pregunta.....	89
Figura 72 Resultado de la segunda pregunta	89
Figura 73 Resultado de la tercera pregunta.....	90
Figura 74 Resultado de la cuarta pregunta.....	90
Figura 75 Resultado de la quinta pregunta	91
Figura 76 Resultado de la sexta pregunta	91
Figura 77 Resultado de la séptima pregunta.....	92
Figura 78 Resultado de la octava pregunta	93
Figura 79 Resultado de la novena pregunta	93
Figura 80 Resultado de la décima pregunta.....	94
Figura 81 Gráfico que describe el porcentaje de aceptación del sistema de entrenamiento para la calibración virtual de una válvula de control	94

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de Variables</i>	24
---	----

Resumen

El Desarrollo de un entorno virtual 3D que simule un proceso industrial de nivel, orientado al entrenamiento para la calibración de una válvula de control, fue diseñado manejando las normas ISA S5.1 e ISA S5.3 (Diagramas P&ID), la interfaz 3D de los componentes del sistema se desarrollaron en el software CAD; el funcionamiento de la planta industrial de nivel y animación de los componentes del sistema se realizó en el motor gráfico Unity 3D. Para el control de la planta industrial de nivel se implementó el algoritmo de control PID; se utilizó la metodología de calibración de una válvula de control, y se creó un asistente virtual que guía en la tarea de calibración a los usuarios, se integró al sistema gafas de realidad virtual con sus sensores. Las pruebas de funcionamiento realizadas, indican que el sistema es inmersivo por la integración de realidad virtual y el realismo que el usuario percibe al interactuar con cada componente que trabaja de forma similar a los instrumentos y equipos industriales reales, permitiendo que el lazo de control automático presente un mínimo error. La calibración de la válvula de control fue desarrollada gracias al asistente virtual implementado, que guía en cada actividad que el usuario debe desarrollar para cumplir con la tarea. Finalmente, se realizaron encuestas a 30 usuarios que demuestra lo amigable que es el sistema al presentar todos los componentes de un proceso industrial de nivel y la información proporcionada facilitando el desarrollo de la calibración de la válvula de control.

Palabras Claves:

- **ENTORNO VIRTUAL 3D**
- **CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS DE CONTROL**
- **SISTEMA DE ENTRENAMIENTO**

ABSTRACT

The Development of a 3D virtual environment that simulates an industrial level process, oriented to training for the calibration of a control valve, was designed using the ISA S5.1 and ISA S5.3 (P&ID Diagrams) standards, the 3D interface of the system components were developed in CAD software; the operation of the industrial level plant and animation of the system components was carried out in the Unity 3D graphics engine. For the control of the industrial level plant, the PID control algorithm was implemented; the methodology of calibration of a control valve was used, and a virtual assistant was created that guides the users in the calibration task, virtual reality glasses with their sensors were integrated into the system. The performance tests carried out indicate that the system is immersive due to the integration of virtual reality and the realism that the user perceives when interacting with each component that works in a similar way to real industrial instruments and equipment, allowing the automatic control loop present minimal error. The calibration of the control valve was developed thanks to the virtual assistant implemented, which guides each activity that the user must develop to fulfill the task. Finally, surveys were conducted with 30 users that demonstrate how user-friendly the system is by presenting all the components of an industrial level process and the information provided facilitating the development of the control valve calibration.

Key words:

- **3D VIRTUAL ENVIRONMENT**
- **CONTROL VALVE CALIBRATION**
- **TRAINING SYSTEM**

CAPÍTULO I

1. Contenidos generales

1.1. Antecedentes

La Realidad Virtual (RV) es definida como un conjunto de tecnologías fusionadas, desarrollada para integrar al usuario con entornos diseñados virtualmente (De Paiva, Colombo, et al, 2016). La RV se ha abierto campo en una gran cantidad de aplicaciones en diferentes áreas como: la medicina, la educación, la industria, entre otras.

Actualmente la RV cumple un papel importante en la industria, permite el entrenamiento en procesos que se ejecutan en las plantas industriales. El éxito de las industrias depende en gran parte de la capacidad que tiene el personal de trabajo, tanto para realizar y perfeccionar sus actividades cotidianas, como para resolver inconvenientes técnicos que se presentan en un proceso. (Andaluz, Castillo, Miranda y Alulema, 2017). Con la realidad virtual, se puede simular accidentes de trabajo, realizar simulaciones de maniobras de operación arriesgadas, visitas virtuales a instalaciones en las industrias, ensayos de actuación en caso de emergencia y rutas de escape.

Se han desarrollado trabajos de ambientes virtuales aplicados a la industria que proponen la implementación de objetos multimedia 3D, como una herramienta que refuerza las formas de aprendizaje y entrenamiento de operarios a través de la aplicación de RV, que proporciona información (González y Chávez, 2011); acorde con adquirir habilidad y pericia para realizar la operación y mantenimiento disminuyendo significativamente el peligro de daño físico de la implementación que permite mejorar la forma de gestionar los procesos de control en la industria.

1.2. Problema

En este momento en que las actividades de la humanidad han reducido la interactividad personal, se hace necesario desarrollar programas de entrenamiento en plataformas virtuales, además que el avance vertiginoso de estas tecnologías de programación de software y sobre todo la interconectividad que se está experimentado son ventajosas por la compatibilidad de protocolos existentes. En la actualidad las plataformas de realidad virtual e inmersiva captan la atención de la automatización industrial como herramientas complementarias para el entrenamiento en supervisión, control y mantenimiento de los procesos industriales.

En una planta industrial es necesario que las válvulas de control se encuentren calibradas para que el funcionamiento de todo el sistema sea óptimo; por lo mencionado el conocimiento en calibración de una válvula de control es de gran importancia en los profesionales del área de automatización, este entrenamiento requiere de un sistema muy sofisticado formado por válvulas, configuradores de campo, fuentes de presión, etc., con un riesgo de accidente en su operación, además todos estos equipos con un alto costo, por ello no es de fácil acceso para un profesional que necesite capacitarse en esta área al sistema antes mencionado.

En este contexto en la actualidad no existen trabajos de sistemas virtuales de calibración, con bajo costo y sin riesgos físicos para el usuario, que permitan a los profesionales un entrenamiento en la calibración de una válvula de control, conocimiento indispensable para su desempeño profesional.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Desarrollar un entorno virtual 3D para simular un proceso industrial de nivel, orientado al entrenamiento en calibración de una válvula de control.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Investigar el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de un proceso de nivel.
- Diseñar el entorno virtual 3D para la simulación del proceso de nivel y control en tiempo real.
- Establecer procedimientos de operación (Checklist) que permitan el entrenamiento de los usuarios.
- Realizar pruebas de funcionamiento para validar el proyecto.

1.4. *Justificación, importancia y alcance del proyecto*

Ante la limitación de recursos de hardware para las aplicaciones industriales del mundo real, las soluciones se deben orientar al desarrollo de software para utilizarlos de manera óptima, por lo que este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de control de un proceso industrial (nivel) simulado e interactivo basado en realidad virtual que permite el aprendizaje y entrenamiento para la calibración de una válvula de control, además el sistema permitirá monitorear a través de una HMI (Human-Machine Interface), y controlar mediante un algoritmo PID, siendo importante pues evitará la utilización de recursos físicos que implican costos asociados al funcionamiento y mantenimiento, y a su vez minimizando el daño material de la implementación industrial utilizada cabiendo a una realidad inmersa gestionando al usuario interactuar en un ambiente simulado y controlado.

Basado en programación de Unity 3D., y su infraestructura virtual, permite al sistema simular un ambiente virtual que proporcione a los usuarios una capacitación y entrenamiento seguro aumentando la eficiencia en el manejo, así como en dar soluciones rápidas, prácticas y mejoradas de mantenimiento.

1.5. Hipótesis de investigación

El desarrollo de un entorno virtual permitirá simular el entrenamiento en la calibración de válvulas de control a partir de un proceso de control de nivel.

1.5.1. *Categorización de las variables de investigación (variables independiente y dependiente).*

En consecuencia, de la hipótesis planteada se identifican dos variables:

- **Variable Independiente:** Desarrollo de un entorno virtual 3D, que simule un proceso industrial de nivel.
- **Variable Dependiente:** Entrenamiento en la calibración de válvulas de control a partir un proceso de control de nivel.

La operacionalización de las variables se muestra en la tabla 1

Tabla 1*Operacionalización de Variables*

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Entrenamiento en la calibración de válvulas de control a partir un proceso de control de nivel	Dependiente	La simulación de procesos son técnicas utilizadas para el diseño, desarrollo, análisis y optimización de procesos técnicos tales como: plantas químicas, procesos químicos, sistemas ambientales, centrales eléctricas, Operaciones de fabricación complejas, procesos biológicos y funciones técnicas similares.	El conocimiento adquirido por el profesional al entrenarse en la calibración de una válvula de control.	Aplicación práctica. Aplicación virtual.	- Eficacia de conocimiento adquirido por los usuarios.
Desarrollo de un entorno virtual 3D, que simule un proceso industrial de nivel	Independiente	Entorno virtual de simulación es el área que permite realizar la calibración de una válvula de control	Entorno virtual es un ambiente que permite simular un proceso industrial de nivel con características similares a las reales.	Aplicación de conceptos de calibración de instrumentos	- Similitud del proceso virtual de nivel desarrollado en software CAD basado en un proceso físico. - Ambiente virtual implementado que permita la inmersión e interacción con el usuario.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico referencial

2.1. Marco Legal

- Reglamento Régimen Académico 2019.pdf, (Registro Oficial No. RPC-SO-008-No.111.2019 pdf). Art. 45 - Proyectos de desarrollo, innovación y adaptación técnica o tecnológica.
- LEY ORGÁNICA DE EMPRENDIMIENTO E INNOVACIÓN, Art. 21.- Opción de trabajo de titulación. “Establecerán sin perjuicio de su régimen de autonomía, como alternativa a los trabajos de titulación”.
- Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública, (Registro Oficial N° 337 del 28-mayo-2004).
- Norma ISA S5.1, S5.3. permiten el diseño diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID).

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. *Realidad Virtual (RV)*

La comunidad científica lleva años trabajando en el campo de la realidad virtual, en mencionada comunidad existen varios intentos de dar una definición de RV, en varias ocasiones las definiciones inclusive causaban confusión. (Sheridam 92)

De acuerdo a Burdea 2003, la definición de realidad virtual es una interfaz de usuario-computadora de alta gama que involucra simulación en tiempo real e interacciones a través de múltiples canales sensoriales. Estas modalidades sensoriales son visuales, auditivas, táctiles, olfativas y gustativas.

En el sitio web (<https://www.cs.upc.edu/~virtual/SGL/guions/ArquitecturaRV.pdf>), se encuentra la siguiente definición: “La Realidad Virtual es una simulación interactiva

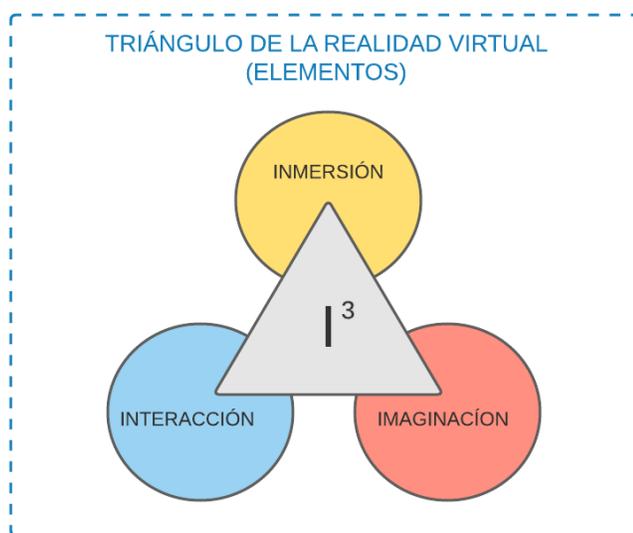
por computador desde el punto de vista del participante, en la cual se sustituye o se aumenta la información sensorial que recibe”.

2.2.2. Elementos de la RV

En la realidad virtual se consideran tres elementos: Inmersión, Interacción e Imaginación., los cuales se observan en la siguiente figura:

Figura 1

Elementos de la RV



Nota. Adaptado de Virtual Reality Technology, Burdea G. 2003, Wiley-IEEE Press

- A) Inmersión. De gran importancia en la realidad virtual pues permite la creación de ambientes tridimensionales creados por un computador, los mismos que proporcionan al usuario una sensación de realismo.
- B) Interacción. Permite al usuario actúe sobre el escenario, para la interacción en los sistemas de realidad virtual se utilizan sistemas de posicionamiento (permiten actuar sobre la posición de una cámara), sistemas hápticos (permiten interaccionar mediante fuerzas aplicadas en puntos del espacio), etc.

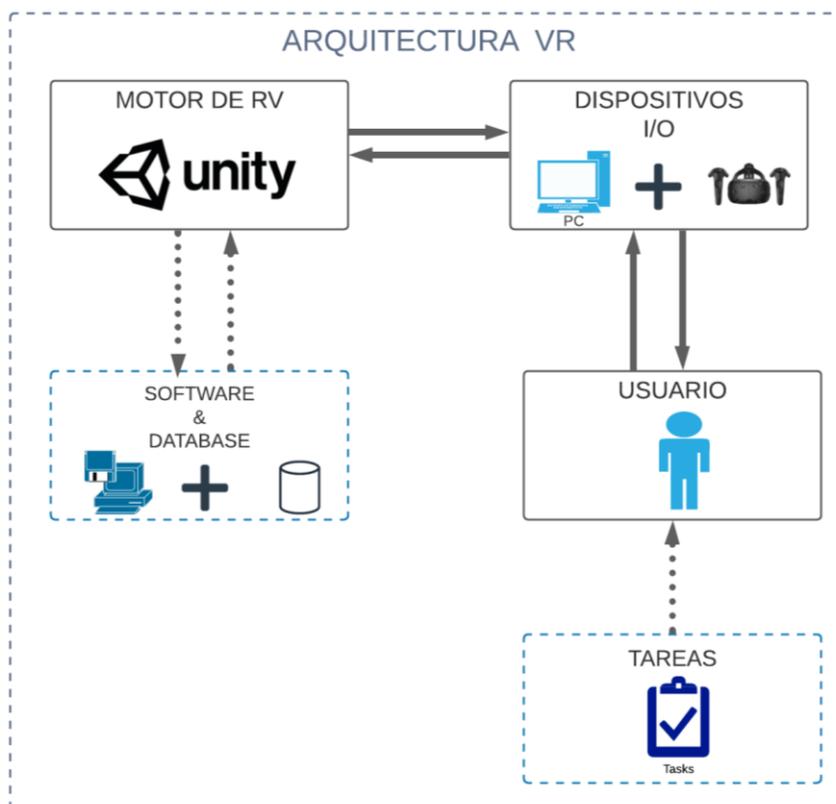
C) Imaginación. Es la capacidad mental que el usuario tiene para observar cosas que no existen y crear la ilusión que permite interactuar dentro de la RV, para lo cual emplea diferentes dispositivos de entrada (sensores de movimiento, dimensionamiento, guantes, etc.) (Burdea G. 2003).

2.2.3. Arquitectura de la RV

Los elementos que constituyen la arquitectura de acuerdo a Burdea 2003 son:

Figura 2

Arquitectura de la RV



Nota. Adaptado de Virtual Reality Technology, Burdea G. 2003, Wiley-IEEE Press

- **Dispositivos de Entrada:** El sitio web (Sistemas Gráficos Interactivos (SGI), Pere Brunet y Alvar Vinacua, <https://www.cs.upc.edu/~virtual/SGI/guions/ArquitecturaRV.pdf>) muestra que los

dispositivos de entrada se encargan de capturar las acciones del usuario y enviar esta información al computador. Los dispositivos de entrada más frecuentes en realidad virtual son los posicionadores (que permiten al sistema conocer en tiempo real la posición y la orientación de la cabeza, de la mano, o de todo el cuerpo del usuario), los guantes (que permiten detectar movimiento de los dedos de la mano) y los micrófonos (que graban la voz del participante).

- **Dispositivos de Salida:** Para la web (Sistemas Gráficos Interactivos (SGI), Pere Brunet y Alvar Vinacua, <https://www.cs.upc.edu/~virtual/SGI/guions/ArquitecturaRV.pdf>), los dispositivos de salida se encargan de traducir las señales de audio, video, etc. generados por el computador en estímulos para los órganos de los sentidos (sonidos e imágenes). Los efectores se clasifican según el sentido al que va dirigido: existen efectores visuales (casco estereoscópico, pantallas de proyección, etc.), y de audio (sistemas de sonido, altavoces, etc.) de fuerza y tacto (dispositivos táctiles), y del sentido del equilibrio (plataformas móviles).
- **Motor de RV:** Contiene el software que crea la realidad virtual, puede ser un cliente- servidor, donde el servidor permite sincronizar las imágenes, el control de colisión de las imágenes, comunicación con los clientes que visualizan el mundo virtual; el cliente contiene el mundo virtual, se comunicará con el servidor, cada cliente podrá tener varias perspectivas del mundo, en tanto el servidor enviará órdenes a los clientes. (Burdea G, 2003)
- **Software de RV:** Se utiliza como software de modelado de objetos virtuales, que involucran características del mundo virtual como geometría, modelado de textura, física de los objetos, dureza, inercia, etc. Incluye también drivers de entrada/salida (I/O), lenguajes de programación, librerías y demás sistemas que

se emplean para la implementación de las interfaces del mundo virtual. (Burdea G. 2003).

- **Base de datos:** Bases que contendrán los objetos del mundo virtual y sus propiedades. (Burdea G. 2003)

2.2.4. Dispositivos empleados en RV para simulación en el área del control automático

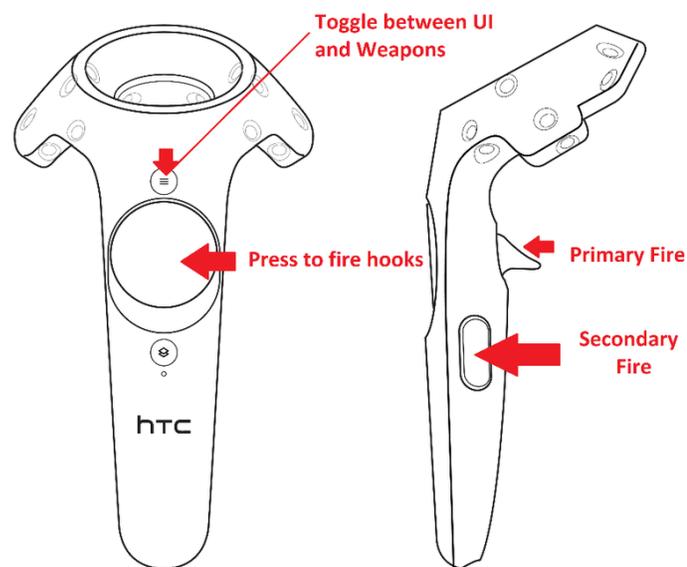
Los dispositivos más utilizados para simulación 3D en el área del control automático son:

- **HTC VIVE:** En el sitio web (Kit inicial, HTC Corporation, <https://www.vive.com/mx/product/vive-pro-starter-kit/>), se indica lo siguiente: HTC VIVE es un sistema de RV para PC del mundo que ofrece un conjunto de opciones modulares para una amplia gama de aplicaciones de RV, ofrece la mayor resolución visual de VIVE jamás vista hasta el momento, desde entornos de simulación básicos hasta un escenario de gran despliegue para varios usuarios, de una fidelidad visual de alta calidad, un potente audio y una experiencia de inmersión increíbles que solo VIVE puede ofrecer. Elementos:
 - Visor (HMD) de alta resolución certificada
 - Audífonos integrados con sonido 3D espacial que brinda un audio inmersivo fiel a la realidad.
 - Amplificador que es capaz de manejar audífonos de alta impedancia, creando paisajes sonoros que cambiarán tu mundo.
 - Micrófonos duales permiten cancelación activa del ruido además es posible habilitar un Modo Alerta y un Modo Conversación para que puedas escuchar lo que pasa alrededor mientras se está inmerso en algunas realidades sin la necesidad de quitarte el Visor.

- El rastreo preciso de 360 grados de los controles y visor, los gráficos realistas, el audio direccional y la retroalimentación perceptiva de alta definición; se traducen en movimientos y acciones realistas en el mundo virtual.
- Controladores vive, en la figura 3, indica los accionamientos de funcionalidad.

Figura 3

La imagen del menú del juego muestra las funciones de los controladores Vive.

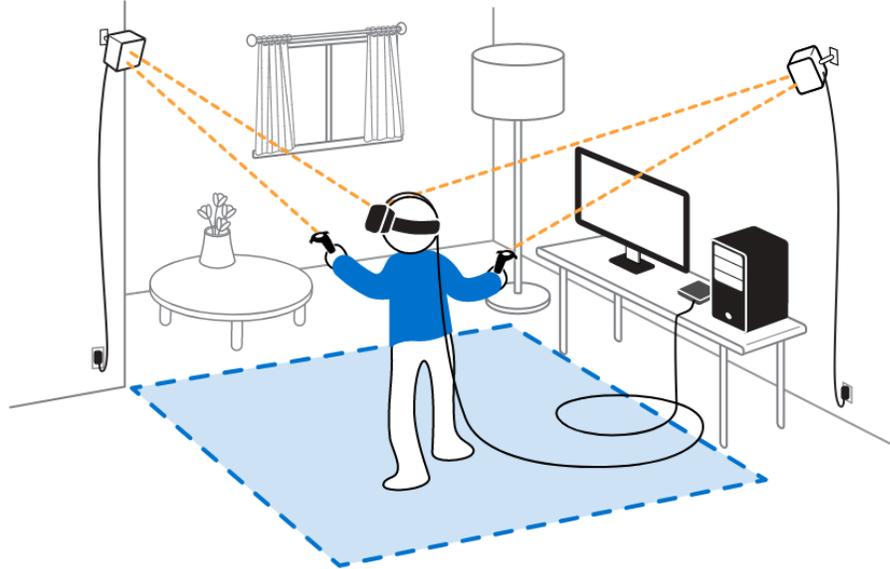


Nota. Tomado de Sercan Altundas (p. 16), Margus Luik, MSc, University of Tartu, 2018, https://comserv.cs.ut.ee/home/files/Altundas_Software_Engineering_2018.pdf?study=ATILoputoo&reference=6936B3D2144FA9BB33191EE578224531F7E6DAE2

A continuación, la figura 4, describe la conexión e interacción que presta el sistema de implementación de RV con el usuario.

Figura 4

Descripción gráfica de la conexión de RV



Nota. Tomado de Sercan Altundas (p. 14), Margus Luik, MSc, University of Tartu, 2018, https://comserv.cs.ut.ee/home/files/Altundas_Software_Engineering_2018.pdf?study=ATILoputoo&reference=6936B3D2144FA9BB33191EE578224531F7E6DAE2

2.2.5. Software utilizado en realidad virtual en el ámbito del control automático

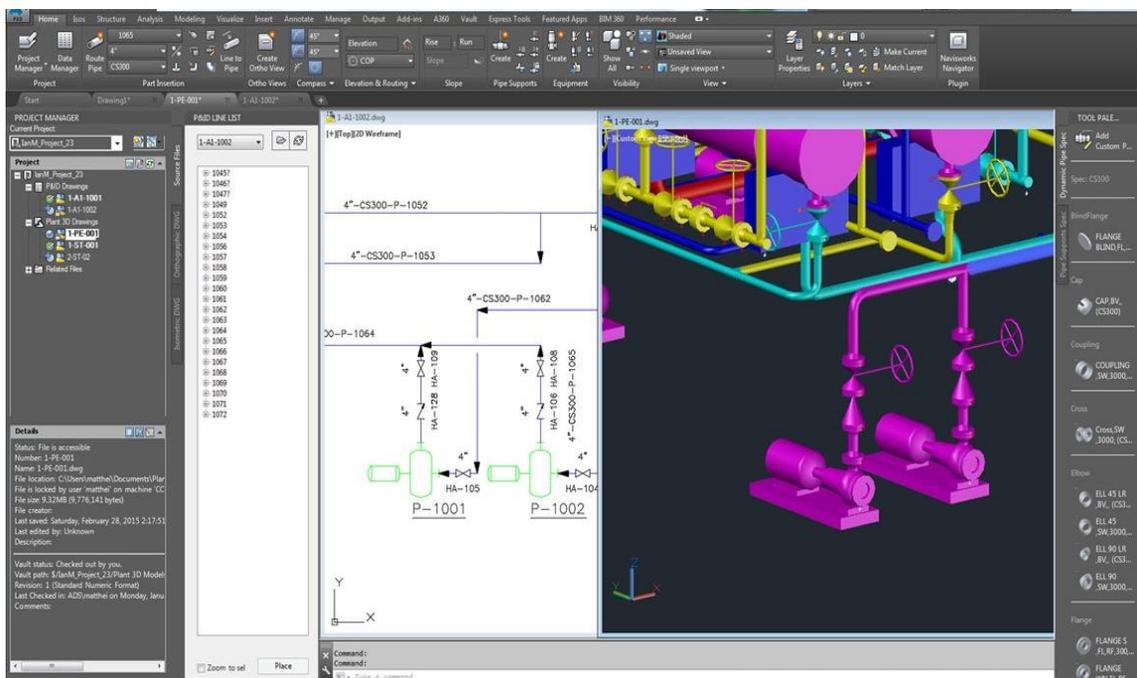
De acuerdo a la literatura científica revisada en: Virtual Reality as a Tool for the Cascade Control Learning , Immersive Environment for Training on Industrial Emergencies Didactic System for Process Control Learning: Case Study Flow Control, para el diseño de entornos virtuales para el áreas del control automático se utilizan los siguientes software:

- **AutoCAD Plant 3D:** Es un software de nueva generación que permite la integración de distintas disciplinas en el diseño 3D de plantas de procesos industriales. Para el área de ingeniería de procesos, permite la generación de P&ID, isométricos, listados de equipos y materiales inteligentes y planos de gran calidad, aumentando así la productividad y la calidad del diseño de plantas industriales que optimizarán el

proceso de diseño relacionando P&ID, modelado 3D, planos e isométricos, mejorando notablemente sus proyectos.

Figura 5

Descripción de una plantilla de AutoCAD Plant 3D

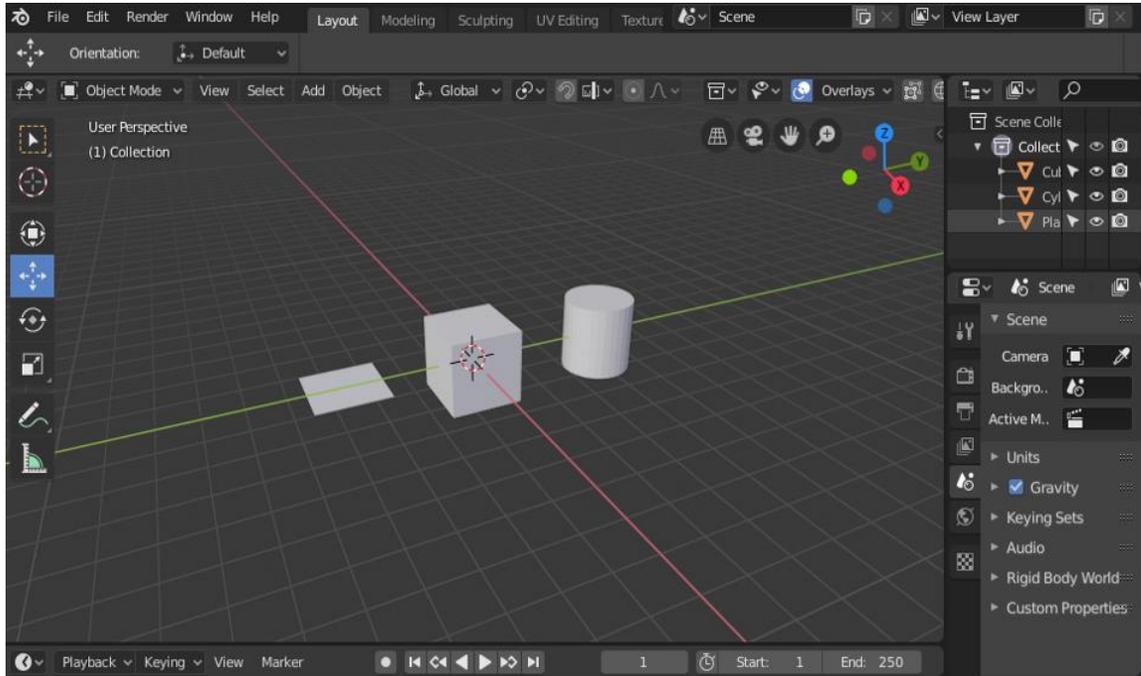


Nota. Adaptado de Autocad Plant 3D 2021

- **Blender:** Es la suite de animación 3D libre y de código abierto, se puede utilizar para crear visualizaciones en 3D, como imágenes fijas, animaciones en 3D, tomas VFX y edición de video. Blender es una aplicación multiplataforma que se ejecuta en sistemas Linux, macOS y Windows. Blender, también tiene requisitos de memoria y almacenamiento relativamente pequeños en comparación con otras suites de creación 3D. Su interfaz utiliza OpenGL y proporciona una experiencia consistente en todos los equipos y plataformas compatibles.

Figura 6

Descripción del ambiente gráfico en Blender



Nota. Adaptado de Blender

- **Unity3D:** Es una herramienta que permite crear videojuegos para diversas plataformas (PC, móviles, videoconsolas, etc.) mediante un editor visual y programación vía scripting, y pudiendo conseguir resultados totalmente profesionales. Se le conoce como un motor de desarrollo o motor de juegos. El término motor de videojuego, game engine, hace referencia a un software el cual tiene una serie de rutinas de programación que permiten el diseño, la creación y el funcionamiento de un entorno interactivo; es decir, de un videojuego. Dentro de las funcionalidades típicas que tiene un motor de videojuegos, son las siguientes:
 - Motor gráfico para renderizar gráficos 2D y 3D
 - Motor físico que permita simular las leyes de la física
 - Animaciones

- Sonidos
- Inteligencia Artificial
- Programación o scripting

Figura 7

Descripción del ambiente gráfico de UNITY 3D



Nota. Adaptado de Unity 3D

2.2.6. Aplicaciones industriales de realidad virtual

Revisados documentos científicos en los cuales se realizan aplicaciones industriales de RV, a continuación, se presentan algunas aplicaciones de RV:

- **Diseño y maquetización de productos y maquinaria:** En este trabajo los autores desarrollan ambientes virtuales industriales a modo de maquetas en 3D, que permitan tener una escena espacial de la configuración más óptima de una industria, así como la ubicación más ideal de las máquinas en función de las líneas de producción, encargadas de transformar insumos en productos terminados.

- **Experimentación y pruebas (productos, maquinaria, procesos de fabricación):**
En este trabajo los autores desarrollan ambientes virtuales que permitan experimentar las mejores opciones de los procesos de fabricación que permitan establecer pruebas de calidad de productos sin costos.
- **Mantenimiento de maquinaria y de cadenas de producción:** Los autores implementan herramientas virtuales útiles para el entrenamiento en calibración y mantenimiento de elementos finales de control como válvulas que permitan mantener la continuidad de las cadenas de producción.
- **Aplicaciones en la industria militar:** Los diseñadores para aplicaciones de la industria actualmente desarrollan simuladores virtuales sea para entrenamiento de operaciones tácticas como son tiro de fusil, lanzamiento de proyectiles para obuses, que permitirá al combatiente desenvolverse en condiciones de máximo riesgo, y poder minimizar la psicosis y fatiga de combate a lo que son expuestos. Esto permite tener mayor pro eficiencia por medio del entrenamiento virtual para reducir las pérdidas de vidas en el campo de batalla.

2.2.7. Control de procesos industriales

Cualquier estudio sobre control de procesos debe empezar por distinguir los diferentes conceptos de «proceso». Desde el punto de vista de producción, se conoce generalmente como un lugar donde materia, y muy a menudo energía, son tratadas para dar como resultado un producto deseado o establecido. Por ejemplo, son procesos de producción: reactores, hornos, intercambiadores de calor, etc.

Desde un punto de vista de control, su significado es más específico. Un proceso es un bloque que se identifica porque tiene una o más variables de salida de las cuales es importante conocer y mantener sus valores. Como consecuencia estas

variables han de ser controladas actuando sobre otra serie de variables denominadas manipuladas, según (José Acedo Sánchez, 2003).

2.2.8. Sistemas de nivel de líquido

Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento, de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds. Si el número de Reynolds es mayor que entre 3000 y 4000, el flujo es turbulento. El flujo es laminar si el número de Reynolds es menor que unos 2000. En el caso laminar, tiene lugar un flujo estable en las corrientes, sin turbulencia. Los sistemas que contienen un flujo laminar se pueden representar mediante ecuaciones diferenciales lineales.

Un sistema de nivel de líquidos es aquel, en que el líquido sale a chorros a través de la válvula de carga a un lado del tanque como se observa en la figura 2.8. Si el flujo a través de esta restricción es laminar, la relación entre el caudal en estado estable y la altura en estado estable en el nivel de la restricción se obtiene mediante:

$$Q = KH \quad (2.1)$$

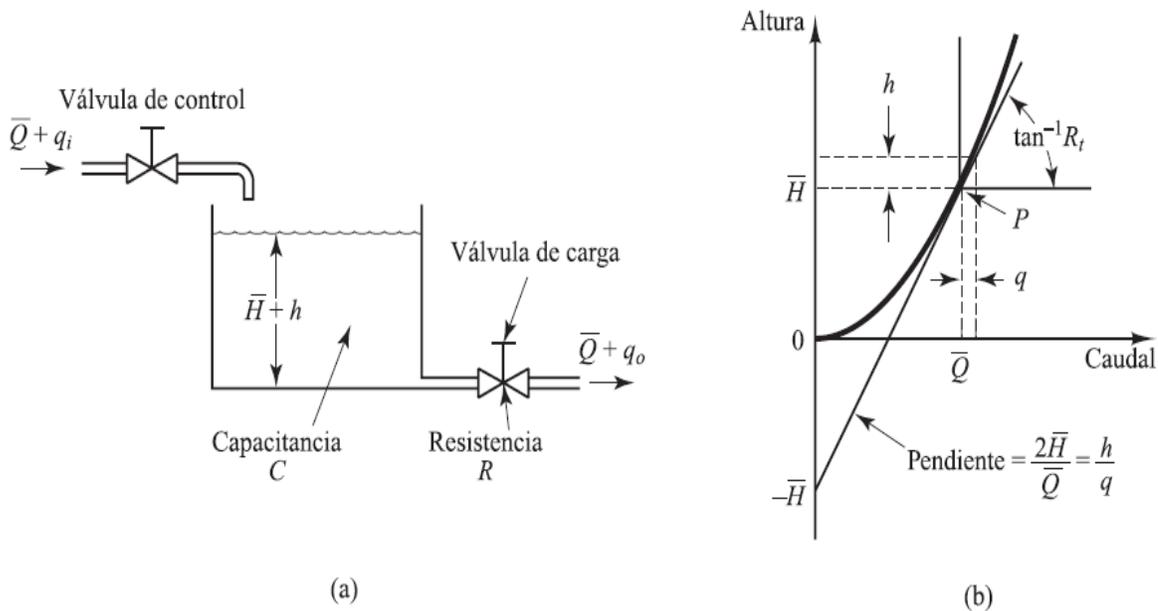
dónde: Q = caudal del líquido en estado estable, m³/seg

K = coeficiente, m²/seg

H = altura en estado estable, m

Figura 8

Dinámica de un sistema de nivel de líquidos



Nota. (a) Sistema de nivel de líquidos; (b) curva de altura frente al caudal. Adaptado de *Katsuhiko Ogata*

Para el flujo laminar, la resistencia R_1 se obtiene como:

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (2.2)$$

La resistencia del flujo laminar es constante y análoga a la resistencia eléctrica. Si el flujo es turbulento a través de la restricción, el caudal en estado estable se obtiene mediante:

$$Q = K\sqrt{H}$$

dónde: Q = caudal del líquido en estado estable, m^3/seg

K = coeficiente, $m^{2.5}/\text{seg}$ (2.3)

H = altura en estado estable, m

(Katsuhiko Ogata, 2002)

2.2.9. Controladores PID

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

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

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

A continuación se describe la ecuación del control proporcional integral derivativo (PID):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Donde:

K_p es ganancia proporcional

T_i es el tiempo integral

T_d es el tiempo derivativo

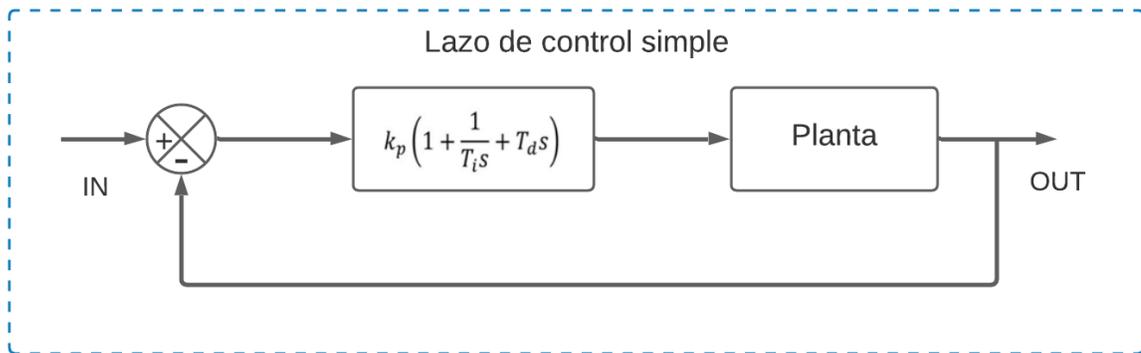
$e(t)$ es el error

2.2.10. Métodos de sintonía de controladores PID

La figura 9, muestra la estructura de un lazo de control PID de una planta, si se puede obtener un modelo matemático de la planta, entonces es posible aplicar diversos métodos para determinar los parámetros de sintonía del controlador que cumplirán las especificaciones del sistema. Sin embargo, si el modelo matemático de la planta no puede obtenerse fácilmente, entonces no es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. Para solucionar este problema se debe recurrir a enfoques experimentales para ajustar los controladores PID (Katsuhiko Ogata, 2002).

Figura 9

Estructura de un lazo de control simple



Nota. Tomado de Katsuhiko Ogata

- **Método de sintonía por Tanteo (lazo cerrado):** De acuerdo a Antonio Creus en su libro instrumentos industriales ajuste y calibración:
 - Método de tanteo (lazo cerrado), requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. Se provocan cambios de carga en el proceso, moviendo el punto de consigna arriba y abajo

en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

- Ajuste de los controladores proporcionales, se empieza con una ganancia pequeña y se estrecha gradualmente observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada. Ajuste de los controladores con banda P + I. Con la banda integral en ∞ minutos/repetición, se sigue el procedimiento descrito antes para obtener el ajuste de la ganancia proporcional hasta una relación de amortiguamiento aproximado de 0,25. Como la acción integral empeora el control y al poseerla el instrumento, su ganancia debe ser un poco menor, se disminuye ligeramente la ganancia y a continuación se incrementa por pasos la banda integral, creando al mismo tiempo perturbaciones en forma de desplazamientos del punto de consigna, hasta que empiecen a aumentar los ciclos. La última ganancia ensayada se aumenta ligeramente (se reduce ligeramente la última banda proporcional).
- Ajuste de los controladores P + I + D, con la banda derivada en 0 y la integral en ∞ minutos/repetición, se aumenta la ganancia proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25. Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada antes hasta acercarse al punto de inestabilidad. Se aumenta la banda derivada en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes puede aumentarse normalmente la ganancia proporcional con mejores resultados en el control.

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

Este método al igual que los mencionados anteriormente se basa en los parámetros de un sistema de primer orden más retardo, mostrado en la ecuación 2.5. Los parámetros de sintonía del controlador están en función de los parámetros del modelo mencionado, estas ecuaciones se muestran a continuación:

$$K = 1.2 \frac{T}{L} \quad (2.5)$$

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

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

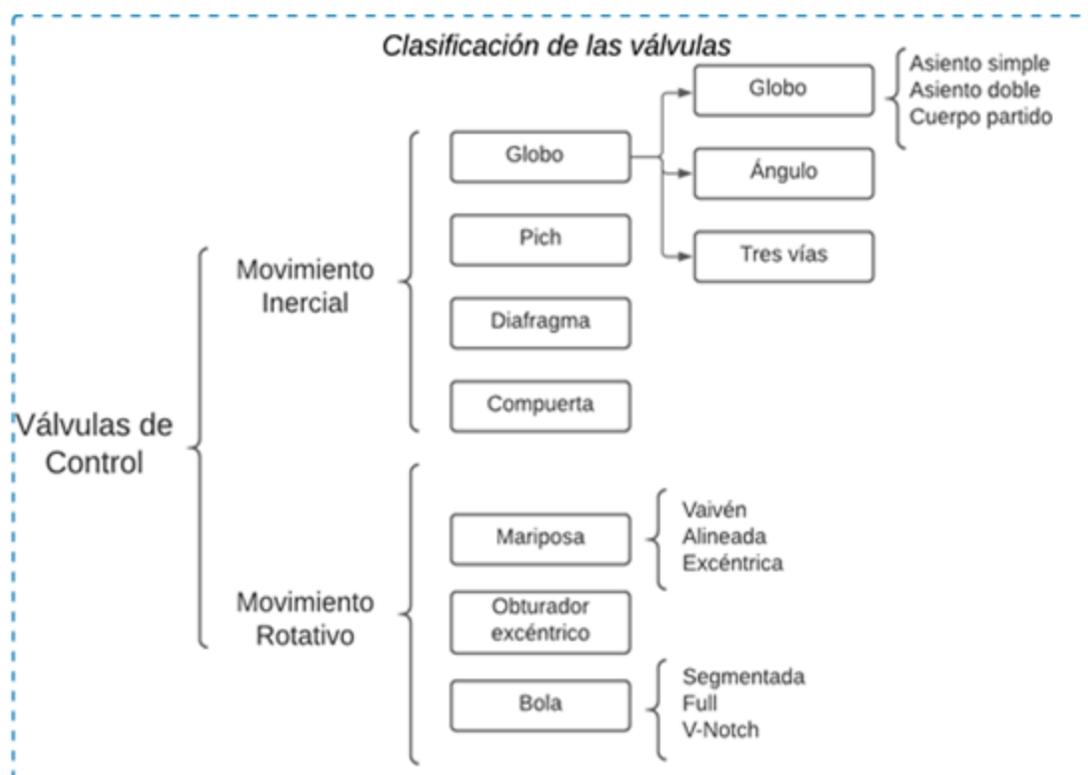
2.2.11. Elementos de control final

Para el control y automatización se describe la funcionalidad de los elementos de control final del proceso de nivel indicado en el libro electrónico: (Elementos Finales de Control, Edwin J. Alzate Rodríguez, 2011, <https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2011/05/ELEMENTOS-FINALES-DE-CONTROL-modificado.pdf>). Los elementos finales de control son mecanismos que modifican el valor de una variable que ha sido manipulada como respuesta a una señal de salida desde un dispositivo de control automático; es decir, se encarga de manipular alguna característica del proceso según lo ordenado por el controlador. Según el tipo de proceso, hay dispositivos que reciben señales de control del tipo discreto o continuo. Los elementos finales de control pueden ser una válvula de control que por su diseño sencillo (cabezal, vástago, cuerpo y conexiones) y su robustez hacen que más del 90%

de los lazos cerrados de control lo usan en las plantas industriales. Las válvulas se pueden clasificar de acuerdo a la forma de su cuerpo y al movimiento del obturador, como se muestra en la figura 10:

Figura 10

Clasificación de las válvulas



Nota. Tomado de Campo López, Válvula de control selección del cálculo

2.2.12. Válvulas de control

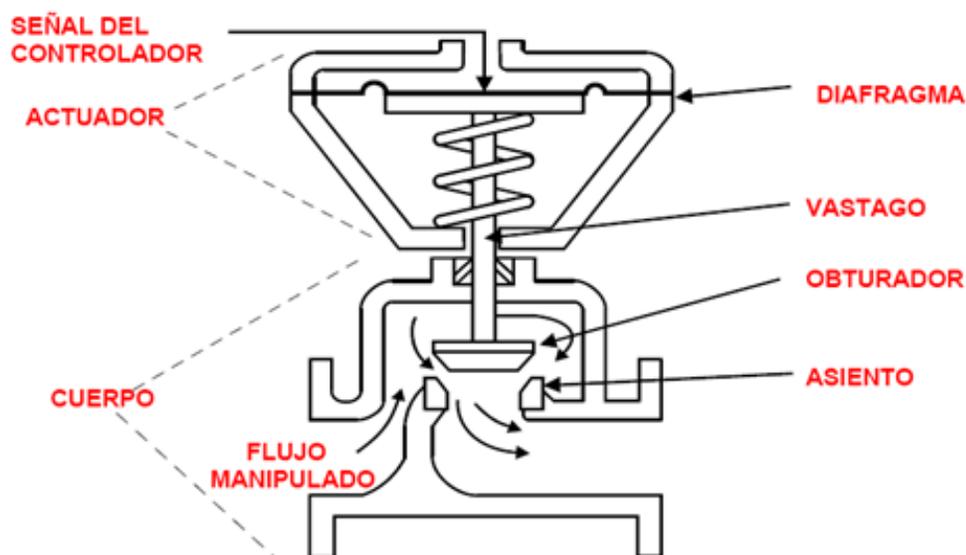
Las válvulas de control están diseñadas para controlar los parámetros del proceso, a saber, presión, flujo, nivel y temperatura, siendo el elemento de control final en cualquier control de circuito cerrado. Según su tipo de aplicación, se denominan válvula de control de presión, válvula de control de nivel y válvula de control de

temperatura. En el control automático de procesos industriales, la válvula de control es uno de los elementos de mayor importancia en el bucle de control.

Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene mucha importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador.

Figura 11

Componentes de una válvula de control



Nota. Adaptado de Low-Cost Electronic Opening Control Valve, H enao, Márquez, Castrillón, Isaza, Arroyave, Ramírez et al, 2017,

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-36672017000100087

Internamente la válvula contiene un obturador y sus asientos además de tener rosca o de bridas para efectuar la conexión entre la válvula y la tubería. El obturador es aquel que realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar de varias formas: en dirección de su propio eje o puede tener un movimiento en forma rotativa.

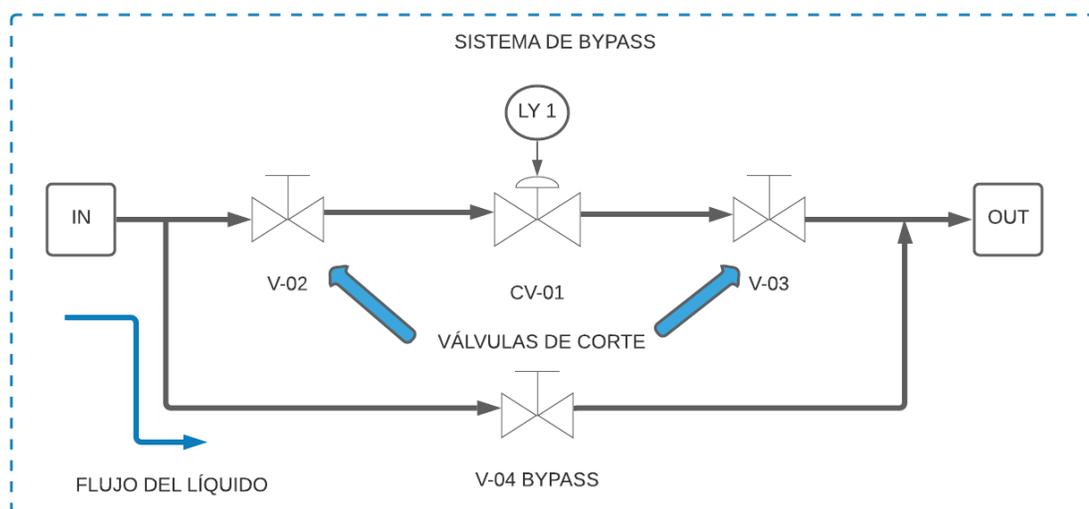
Generalmente, está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y es accionado de forma automática por un servomotor, en la figura 2.11, se describe un gráfico seccionado de una válvula con sus componentes.

2.2.13. Válvula de Bypass

El término "Válvula de Bypass" se refiere a cualquier válvula instalada en una línea de bypass o derivación, y no es utilizada para indicar una forma o configuración en particular.

Figura 12

Válvulas en sistema de BYPASS



Cuando se considera que tipos de válvula son los indicados para cada instalación en las tuberías de bypass, es necesario determinar el propósito de la instalación de esa línea de bypass en particular, las tuberías de bypass podrían ser divididas en dos categorías.

- La tubería de bypass que actúa como una línea de respaldo para permitir que la operación continúe mientras el equipo dañado como válvulas reductoras de presión y trampas de vapor sean aisladas y paradas durante la reparación o el reemplazo.

- Tubería de bypass cuyo propósito es el de suplementar el desempeño de las válvulas reductoras de presión y las trampas de vapor.

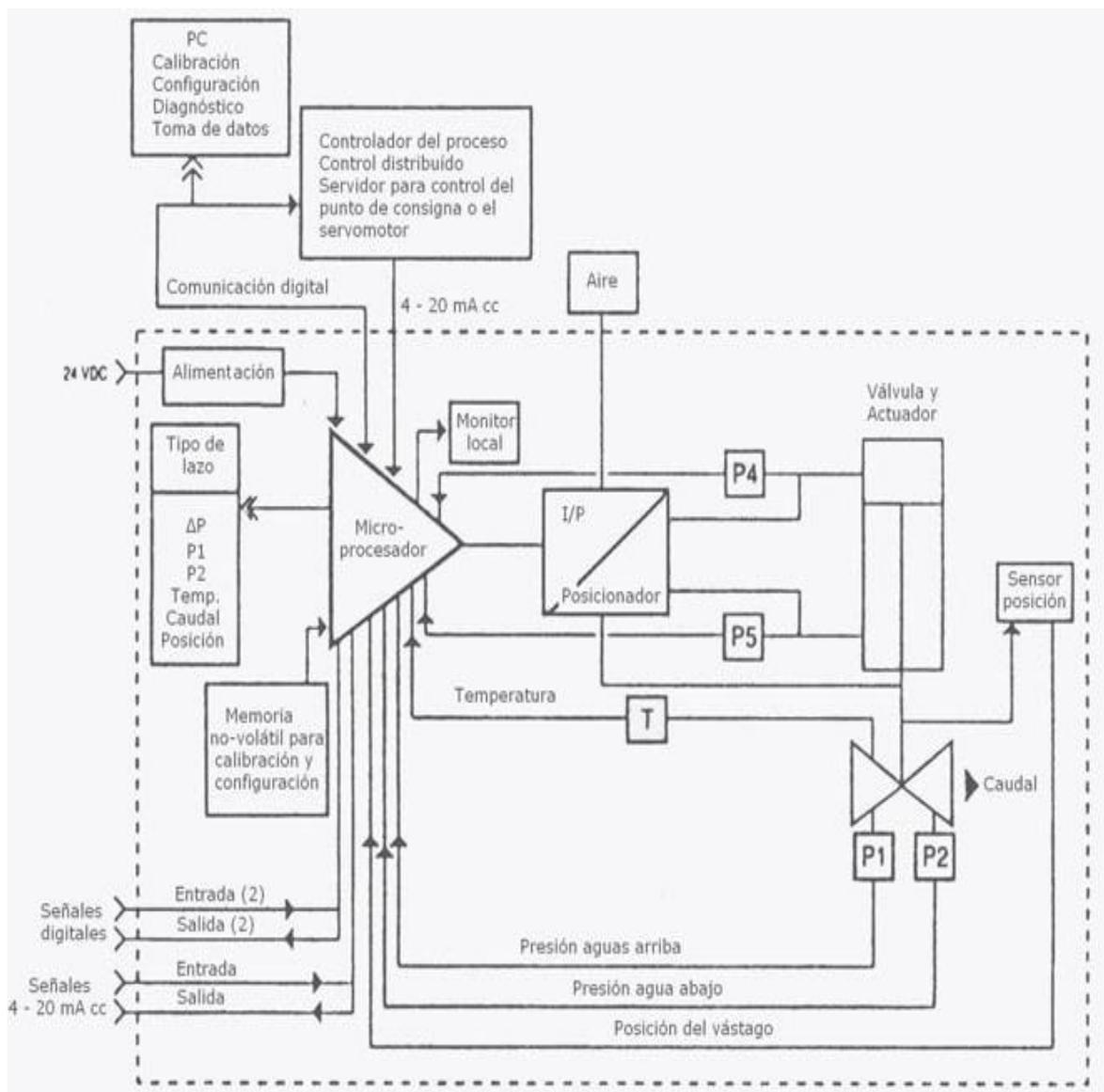
2.2.14. Posicionador inteligente y diagnóstico de la válvula (calibración)

De acuerdo a Antonio Creus en su libro instrumentos industriales ajuste y calibración. El posicionador inteligente, dispone de una interface con protocolos de comunicación HART o Fieldbus (u otro sistema de comunicaciones) y de un microprocesador, lo que le permite realizar diversas funciones de calibración como:

- Operación, calibración y configuraciones locales y remotas.
- Caracterización de la válvula a las curvas lineal, isoporcentual, apertura rápida y personalizada por el usuario.
- Rozamiento e histéresis de la válvula.
- Longitud recorrida por el vástago de la válvula (odómetro).
- Calibración del margen de recorrido y de la velocidad del vástago.
- Ajuste automático del recorrido de la válvula.
- Ajuste de la fuerza de asentamiento del obturador de la válvula.
- Compatibilidad con actuadores de acción directa o inversa.
- Configuración del cero y el span para operación con margen partido.
- Entradas adicionales (interruptores final de carrera, etc.)
- Histórico, datos de fábrica y funcionamiento (curvas que son la firma de la válvula).

Figura 13

Posicionador electroneumático/digital inteligente.



Nota. Tomado de Instrumentos Industriales su Ajuste y Calibración, Creus A.

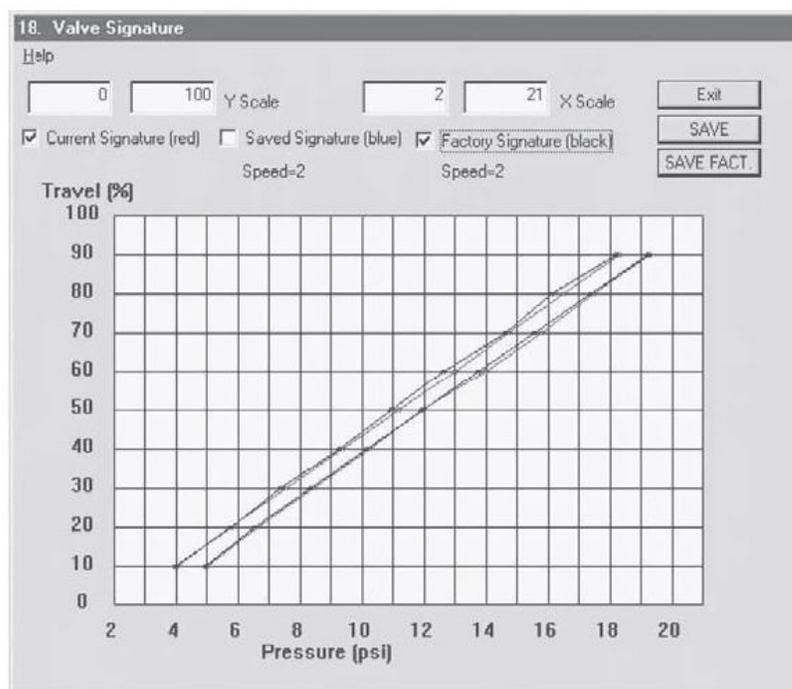
Como el posicionador conoce por retroalimentación la posición del vástago de la válvula, una función de diagnóstico incorporada permite conocer el estado del mantenimiento de la válvula, del actuador y del propio posicionador. De este modo, se puede realizar un trabajo de mantenimiento predictivo al poder visualizar a distancia

datos como el recorrido total del vástago desde la puesta en servicio de la válvula, el rozamiento de la estopada, la velocidad instantánea del vástago, el registro del tiempo de funcionamiento de la válvula, los datos históricos de calibración, la configuración de la válvula y la base de datos iniciales del fabricante.

La “firma” de la válvula (Figura 14) es el registro gráfico del estado del conjunto válvula-actuador (medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o “firmas” del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago).

Figura 14

Firma de la válvula



Nota. Tomado de Instrumentos Industriales su Ajuste y Calibración, Creus A.

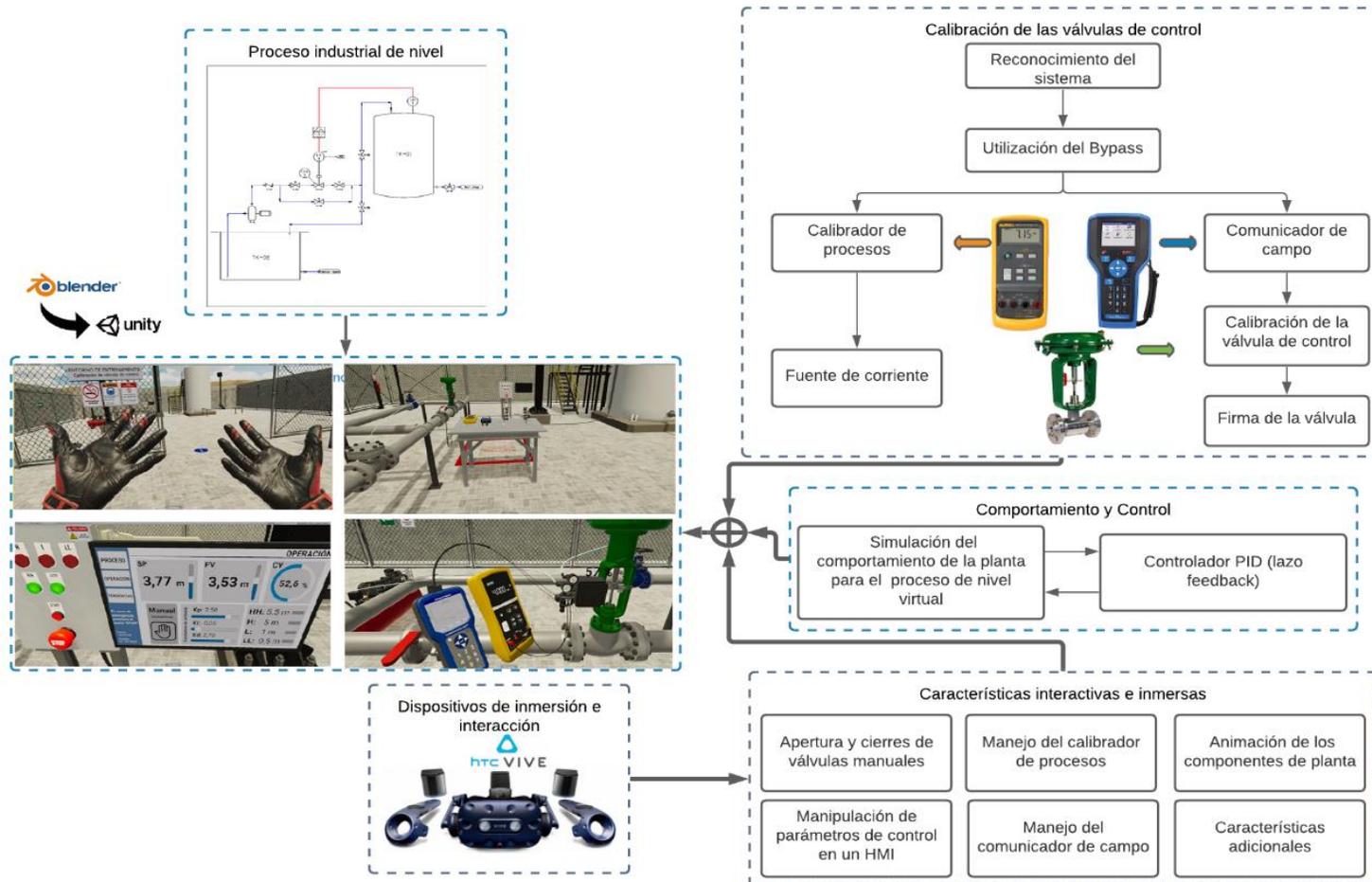
CAPÍTULO III

3. Metodología de la investigación

Para el desarrollo de un entorno virtual 3D orientado al entrenamiento para la calibración de válvulas de control, se consideró la revisión bibliográfica de artículos y libros de los cuales se obtiene la metodología de la presente investigación, la información requerida para el diseño e implementación del proceso industrial de nivel y la calibración de una válvula de control se realizó en base a la experimentación de un sistema didáctico de la mencionada variable. En la figura 15, se presenta el esquema general del proyecto, el que será detallado en el presente capítulo.

Figura 15

Esquema general del proyecto.

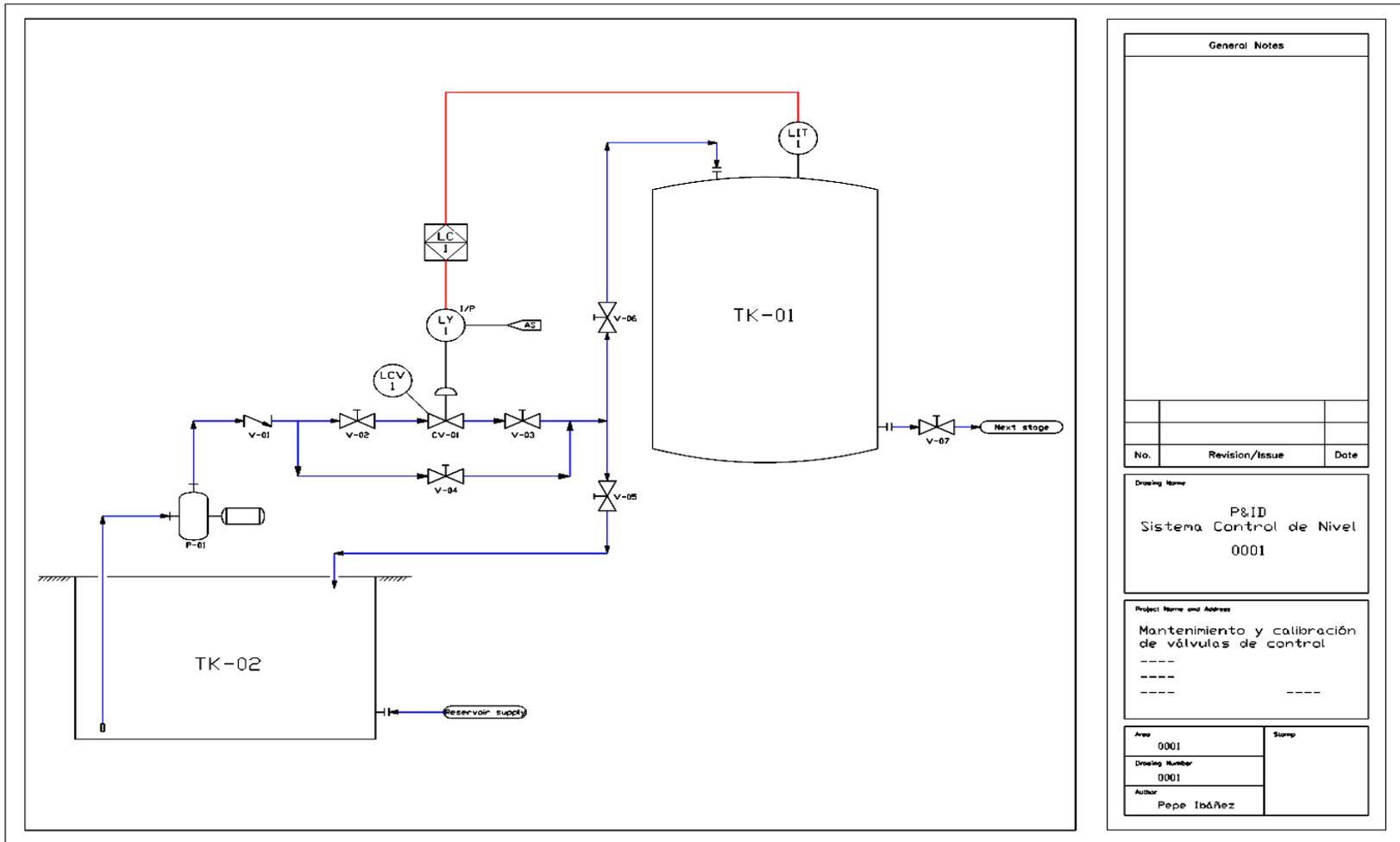


3.1. Diseño del diagrama P&ID de la estación de entrenamiento para el control del nivel de un tanque y calibración de válvula de control

En el sistema se consideran dos tanques, el primero corresponde al tanque del proceso y el segundo es un tanque reservorio que permite la recirculación del líquido, los equipos e instrumentos industriales utilizados son: un transmisor de nivel, un controlador de nivel, una válvula de control de nivel con su respectivo bypass para el mantenimiento de la válvula de control. En el diseño se utilizan las normas ISA 5.1 e ISA 5.3, a continuación, se presenta la figura 16, que corresponde al diagrama P&ID del proceso industrial del nivel.

Figura 16

Diagrama P&ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel de un tanque



General Notes		
No.	Revision/Issue	Date
Drawing Name P&ID Sistema Control de Nivel 0001		
Project Name and Address Mantenimiento y calibración de válvulas de control ----- -----		
Area	0001	Stamp
Drawing Number	0001	
Author	Pepe Ibáñez	

3.2. Modelado 3D del proceso industrial de nivel

El diseño de la planta se divide en dos etapas:

- En la primera etapa se utiliza Autocad Plant 3D para la ubicación de los equipos y el ruteo de tuberías.
- La segunda etapa comprende la modelación de los demás objetos necesarios, la corrección de los modelos, configuración de puntos de rotación, entre otros; en esta etapa, el modelo adquiere todas las características necesarias para ser utilizado en la aplicación.

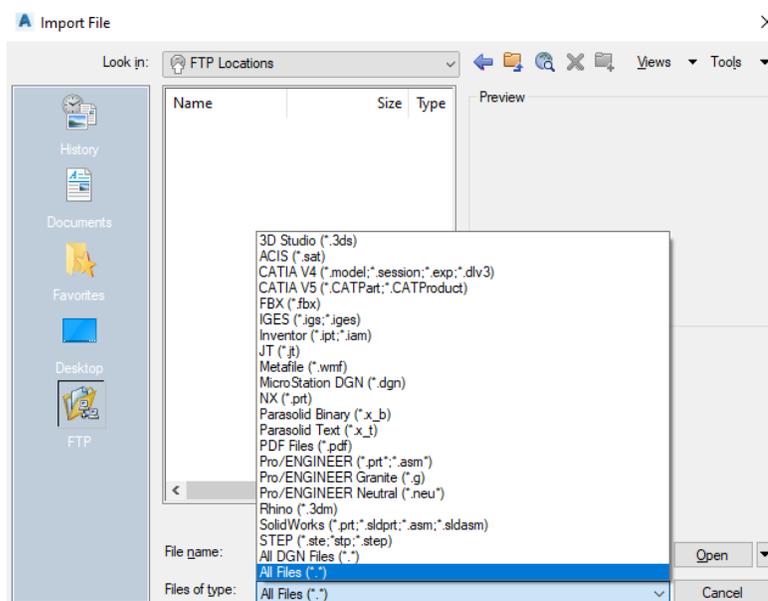
3.2.1. Autocad Plant 3D

Para el modelado 3D en este software se desarrollan los siguientes pasos:

3.2.1.1. Importación de modelos. En Autocad Plant 3D se puede importar una gran variedad de formatos como se aprecia en la figura 17

Figura 17

Selección Import File formato .fbx



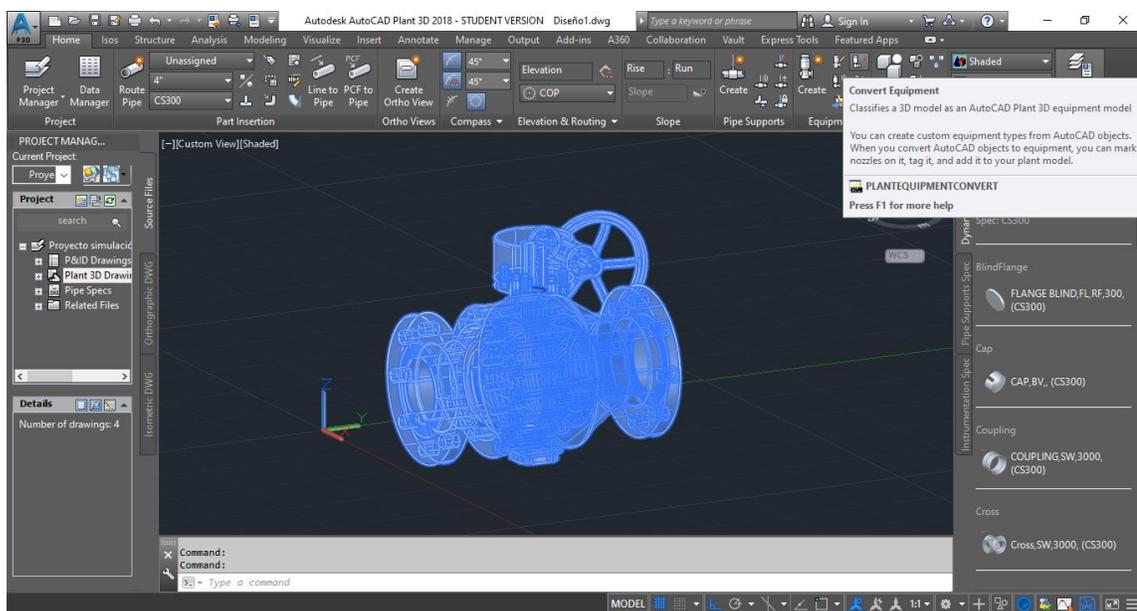
Nota. Adaptado de Autocad Plant 3D

3.2.1.2. Conversión del modelo importado “Equipo de Autocad Plant 3D”.

Para hacer uso del ruteo de tuberías que ofrece el Autocad Plant 3D con el modelo importado, es necesario convertir en objeto de Autocad Plant 3D. Para esto, se selecciona el modelo y se elige la opción “Convert Equipment” como se observa en la figura 18.

Figura 18

Opción “Convert Equipment”



A continuación, se selecciona el tipo de equipo de Autocad Plant 3D en el cual se cataloga el modelo, figura 3.5.

Finalmente se despliega una ventana que permite incluir al modelo varias propiedades en caso de ser necesario, como se indica en la figura 3.6.

Ahora el modelo es un equipo de Autocad Plant 3D y se le pueden añadir puntos de conexión como se observa en la figura 19

Figura 19

Modelo Catalogado

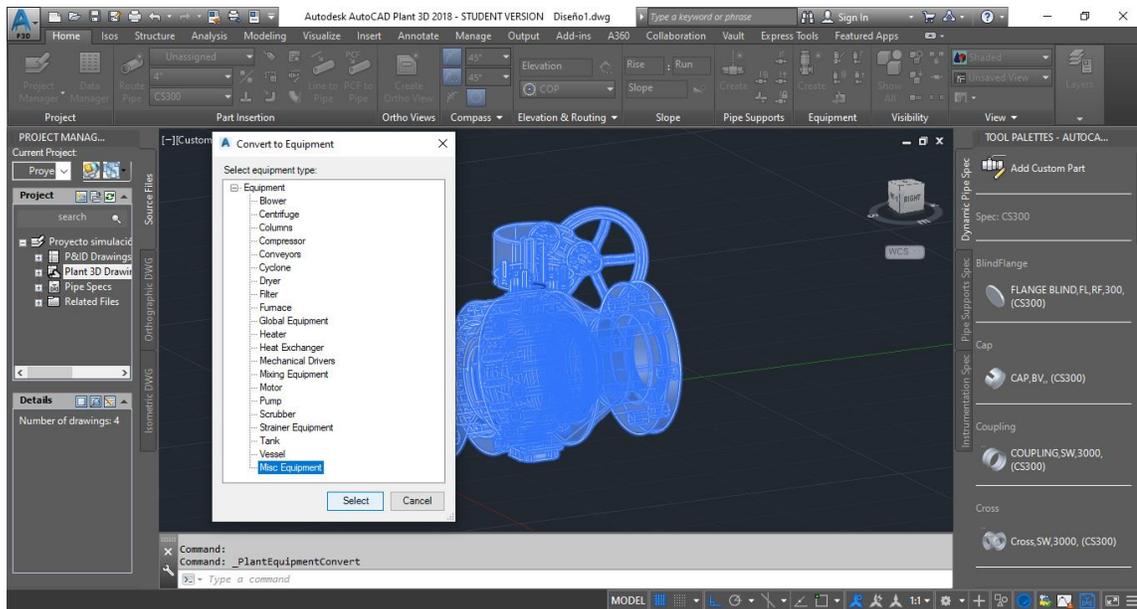


Figura 20

Despliegue de varias propiedades del modelo

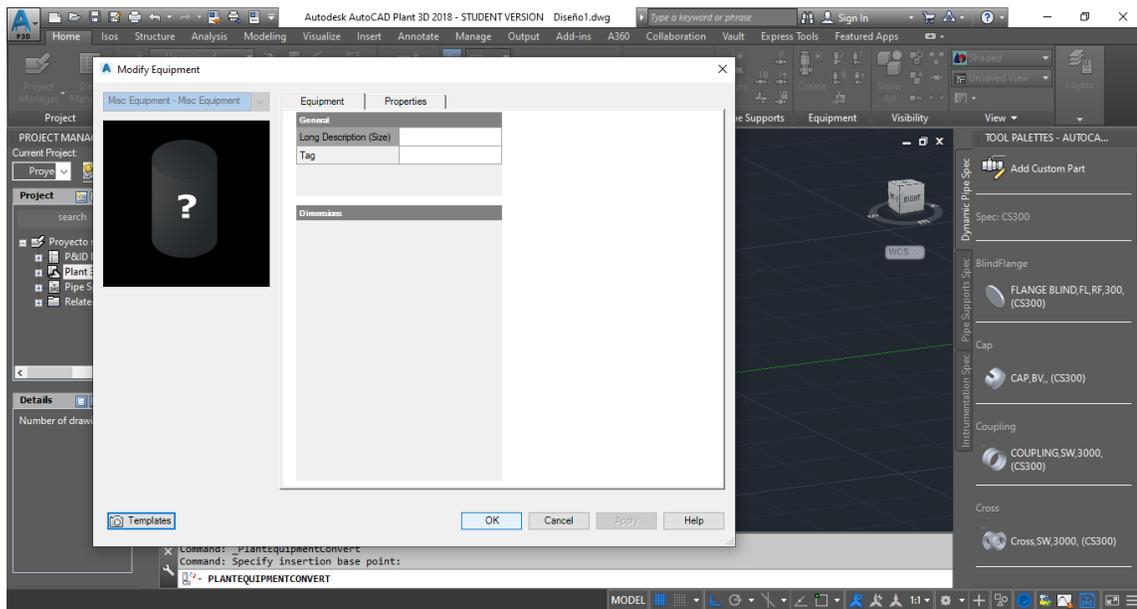
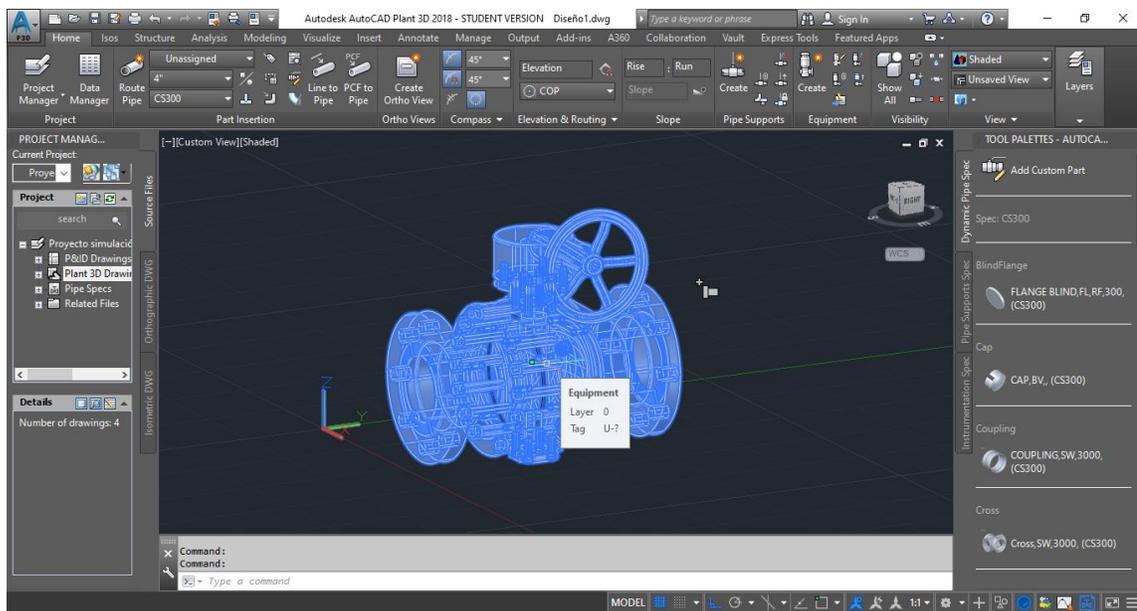


Figura 21

Añadidura de los puntos de conexión

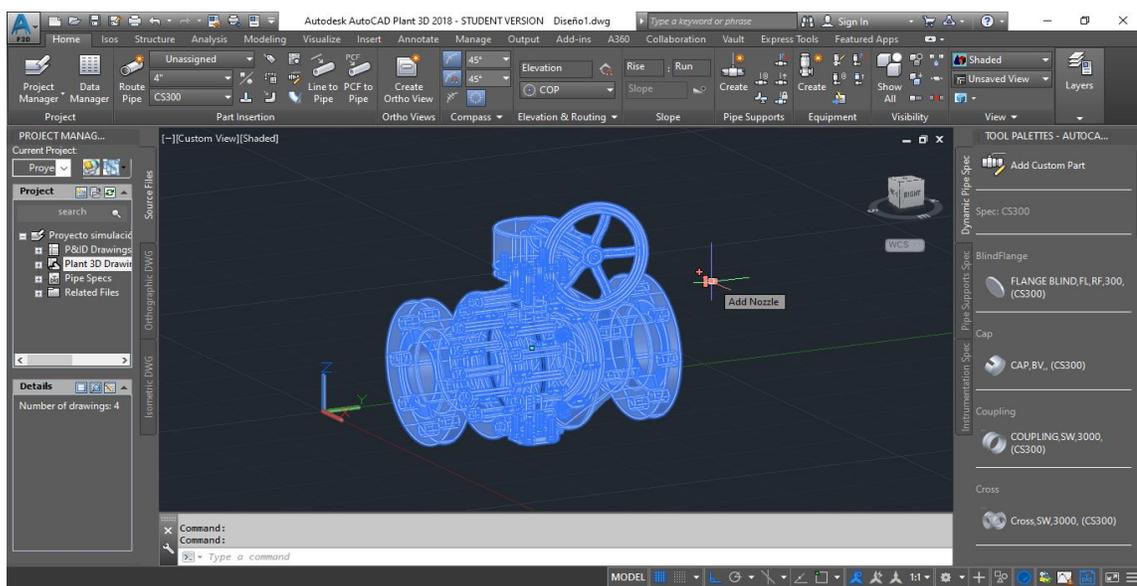


Después se añaden los puntos de conexión con la opción “Add Nozzle”, figura

22.

Figura 22

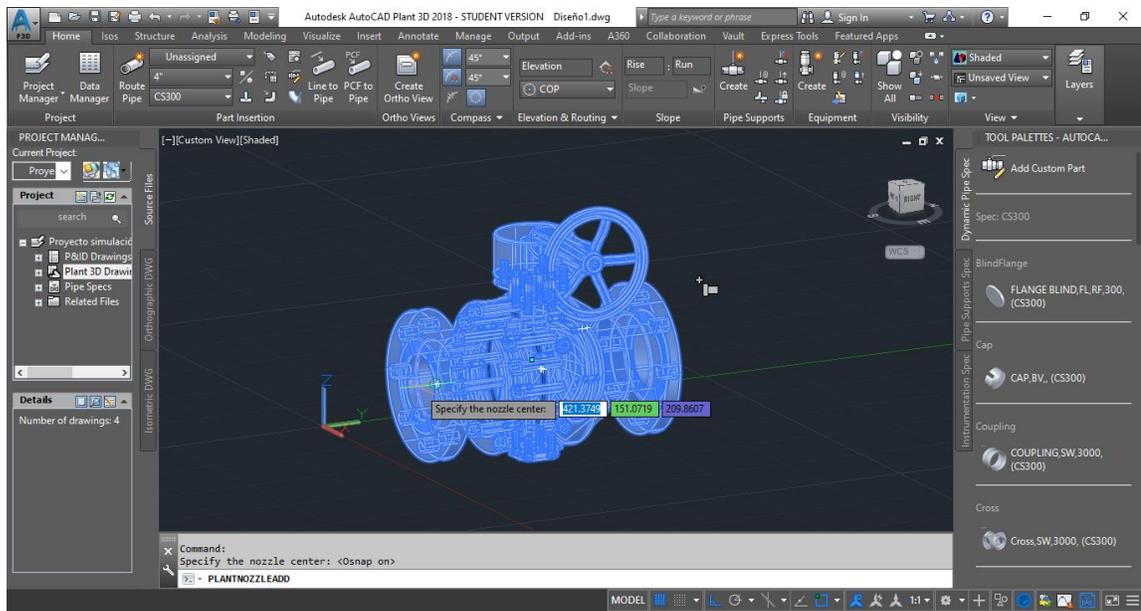
Puntos de conexión opción “Add Nozzle”



Luego se define el centro del nuevo punto de conexión, para lo cual se hace uso de la herramienta de detección automática de referencias, figura 23.

Figura 23

Punto de conexión, uso de la herramienta de detección automática de referencias



A continuación, se define la dirección del punto de conexión, figura 24, posteriormente aparece una ventana que permite modificar las características de este nuevo punto o boquilla de conexión creada, figura 25.

Ahora se puede conectar una tubería a la nueva boquilla del equipo o se puede crear una a partir de este punto, figura 26.

Figura 24

Punto de conexión, definición del eje central de conexión

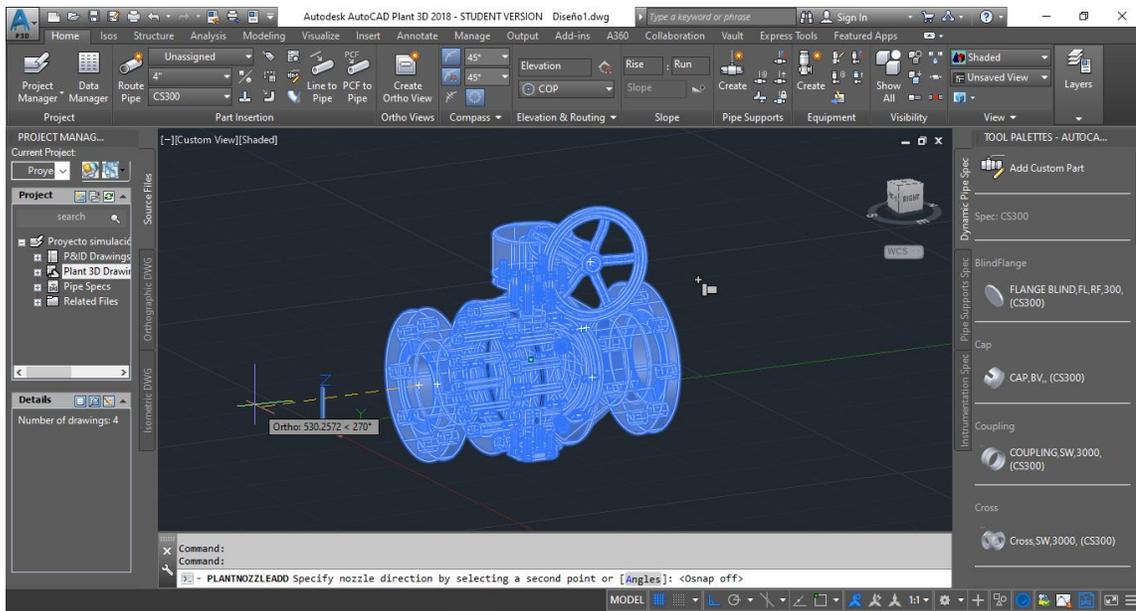


Figura 25

Punto de conexión, modificar características

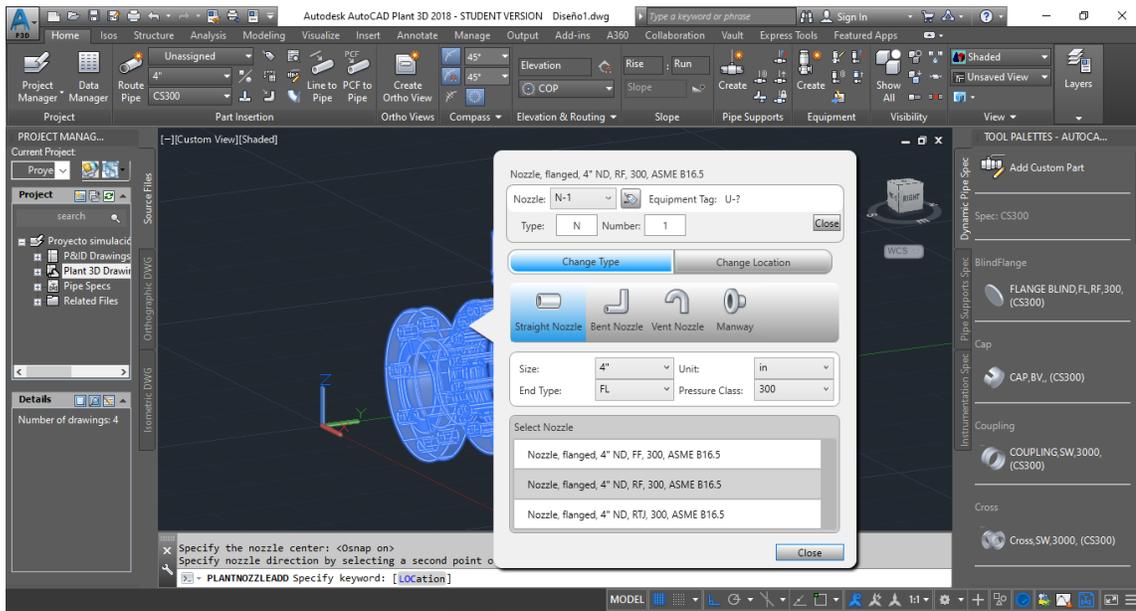
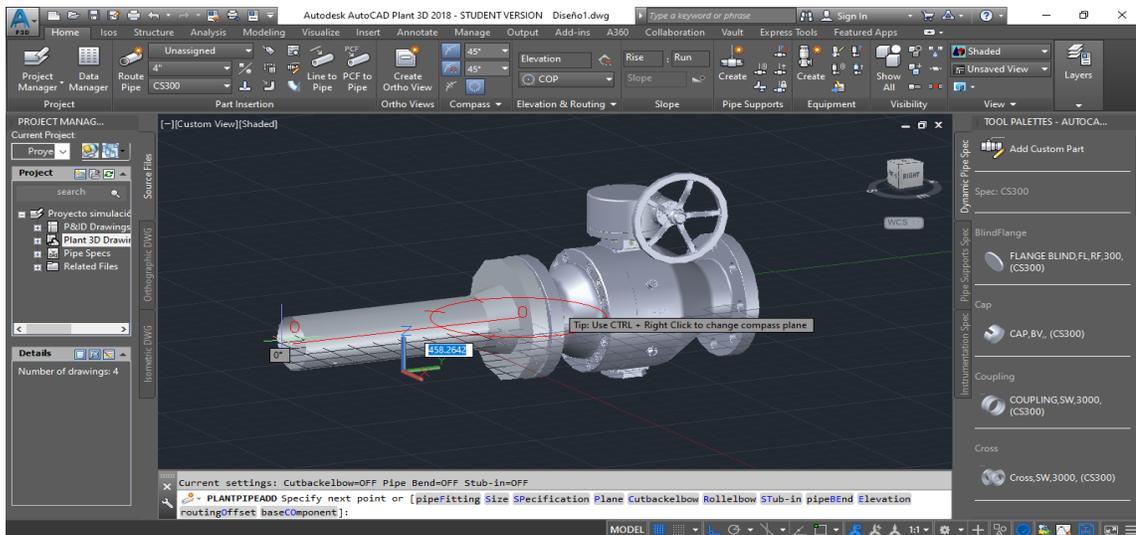


Figura 26

Creación de una nueva boquilla



3.2.1.3. Ruteo de tuberías. El ruteo de las tuberías se puede hacer de forma manual dirigiéndola hacia el punto deseado o de forma automática seleccionando dos boquillas de conexión, figuras 27 y 28.

Figura 27

Ruteo de tuberías manual

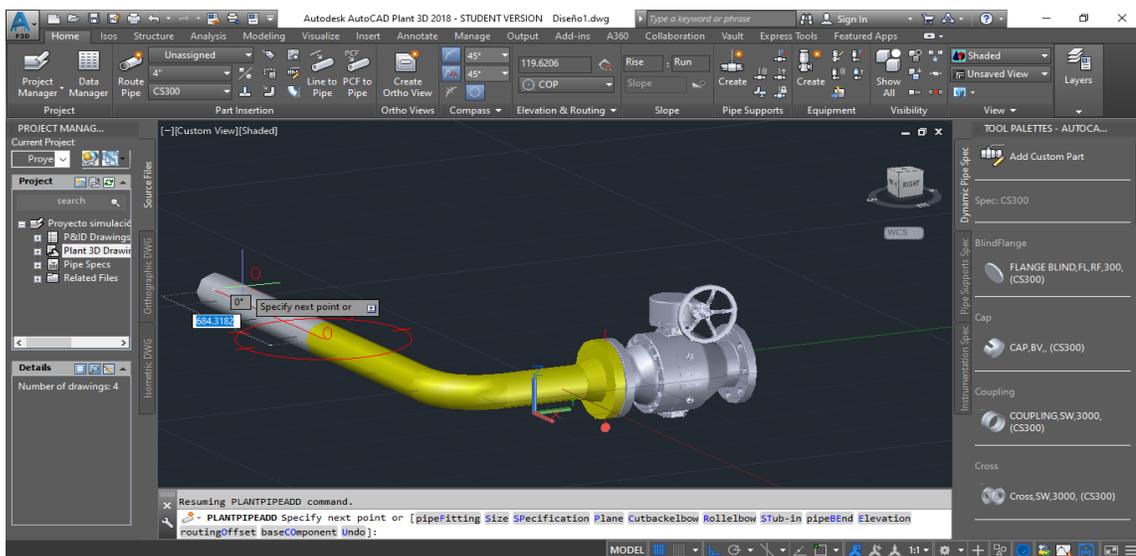
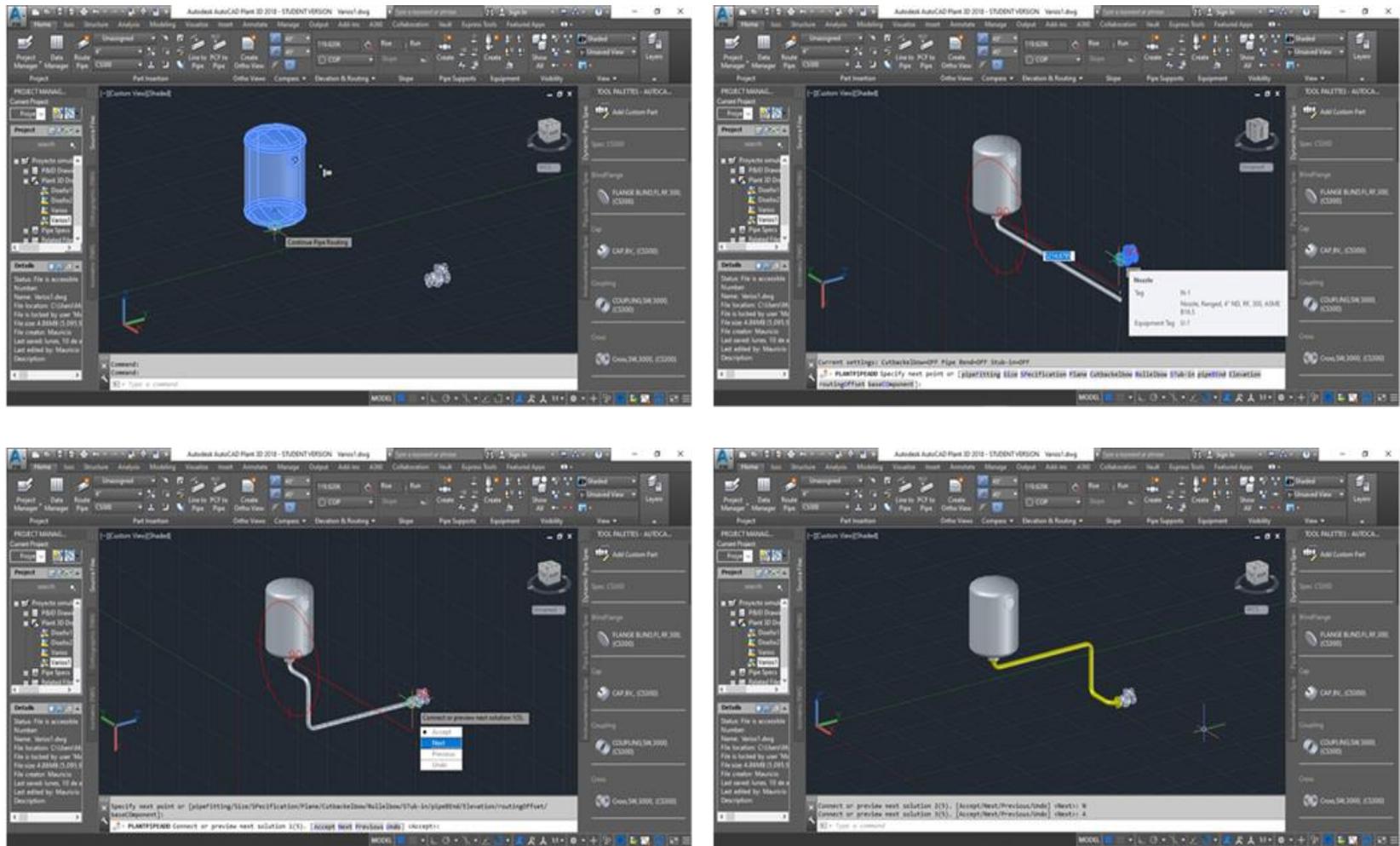


Figura 28

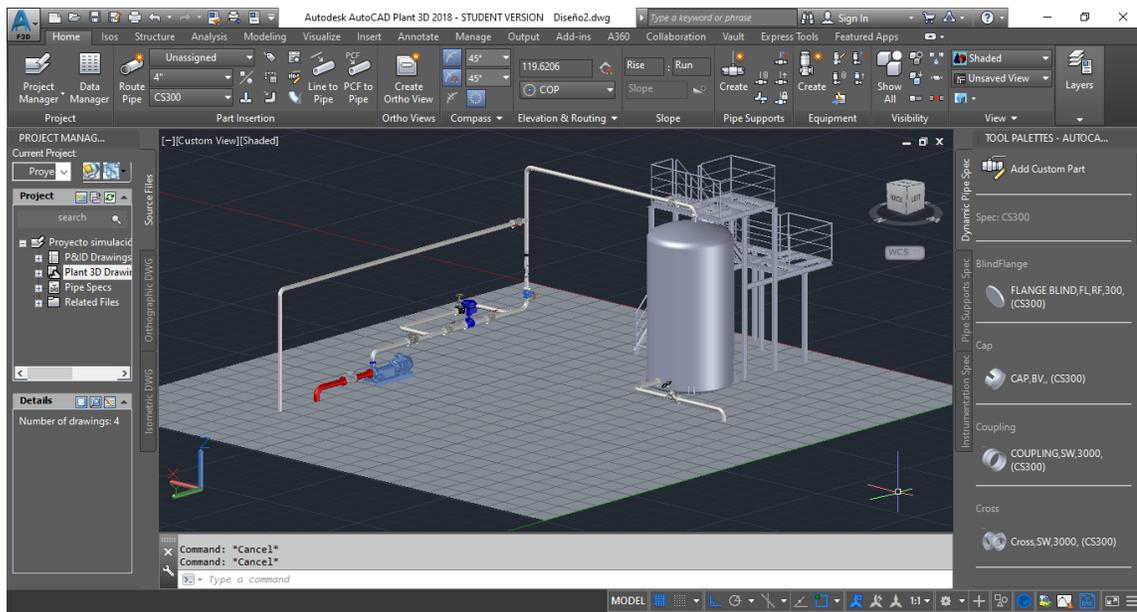
Secuencia de ruteo de tuberías automático



3.2.1.4. Diseño de la planta. El diseño de cada componente está basado en el diagrama P&ID descrito en este capítulo, a continuación, se muestra el diseño final de la planta:

Figura 29

Planta diseñada en Autocad 3D.



Finalmente, este modelo se exporta en formato FBX al software Blender, para continuar con la siguiente etapa de diseño.

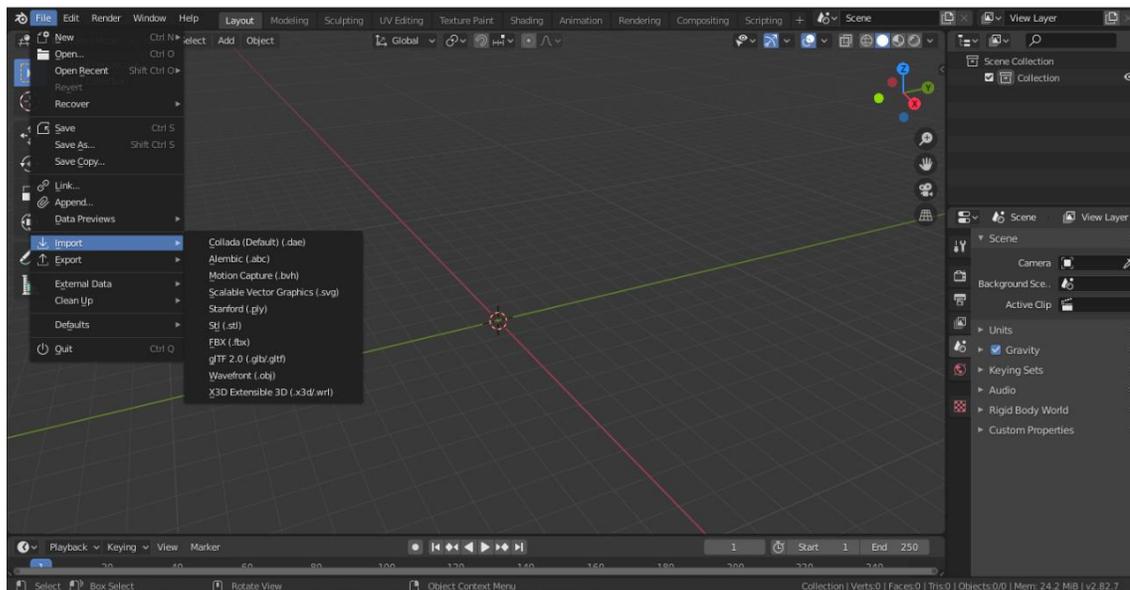
3.2.2. Blender

Para el modelado en este software se desarrollan los siguientes pasos:

3.2.2.1. Importación de modelos. Blender permite importación de modelos en los formatos que se aprecian en la figura 30

Figura 30

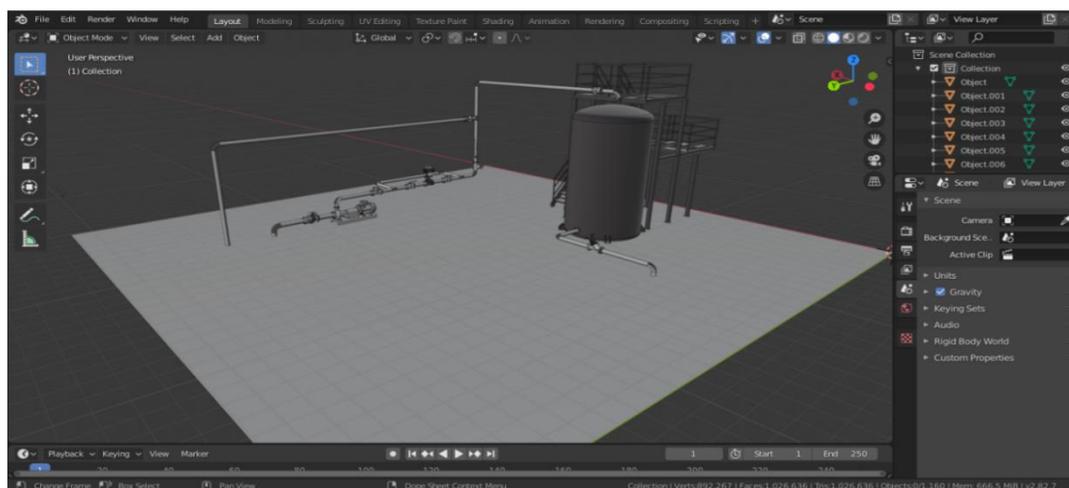
Determinación de los formatos a exportar desde Blender



Cuando el modelo se importa, se observan áreas sombreadas en los objetos que indican configuraciones en los mismos o errores en ciertos parámetros que deben corregirse, figura 31.

Figura 31

Corrección de los parámetros de configuración

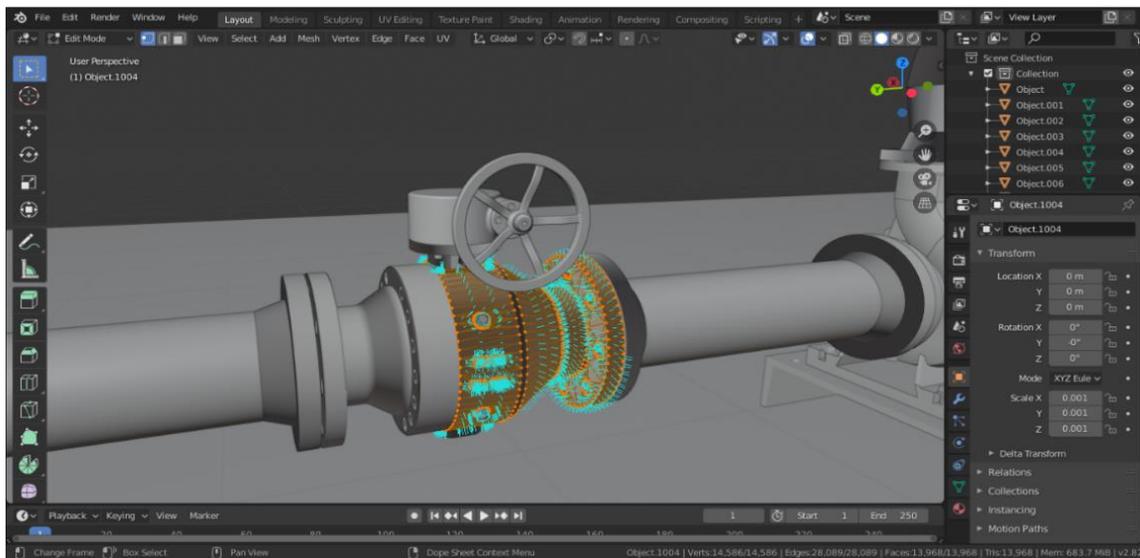


3.2.2.2. Corrección de errores y optimización de los modelos. Al seleccionar

un objeto se pueden visualizar las configuraciones que existen en su malla y la topología de la misma, esto a través del modo de edición de Blender y de sus múltiples opciones. En primer lugar, se verifican las configuraciones “normales” de la malla que indica la dirección de la misma, figura 32.

Figura 32

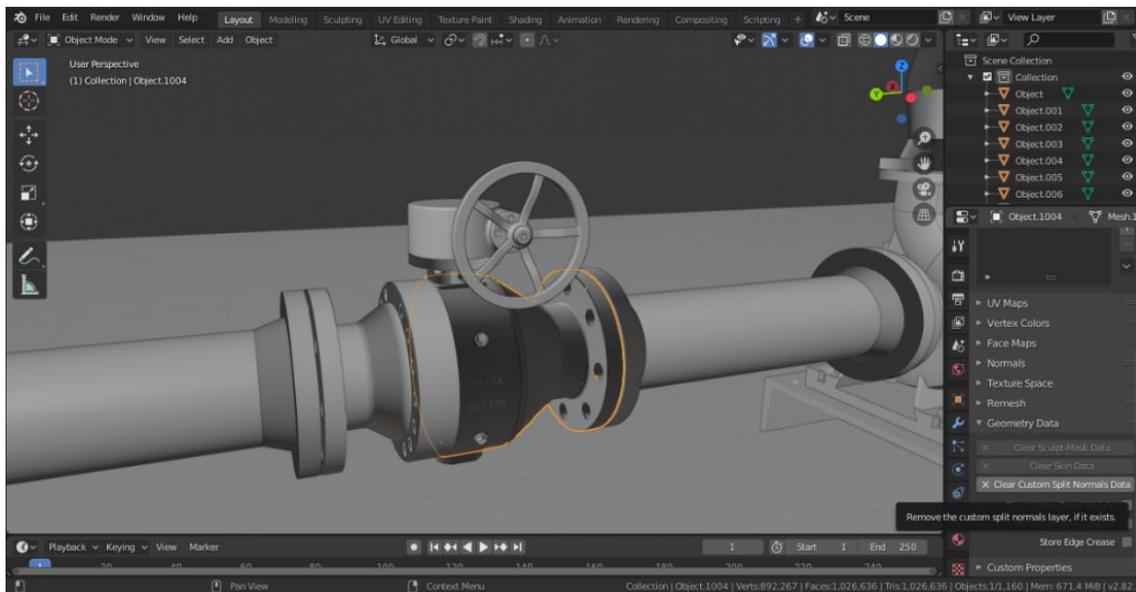
Corrección de errores y optimización de los modelos



Para este caso, tomando en cuenta el flujo de trabajo (workflow) utilizado, es recomendable eliminar cualquier configuración en las normales que tenga el modelo importado. Para esto, en el panel de propiedades del objeto, se selecciona la opción “Clear Custom Split Normals Data”, figura 33.

Figura 33

Eliminación de configuración del modelo importado

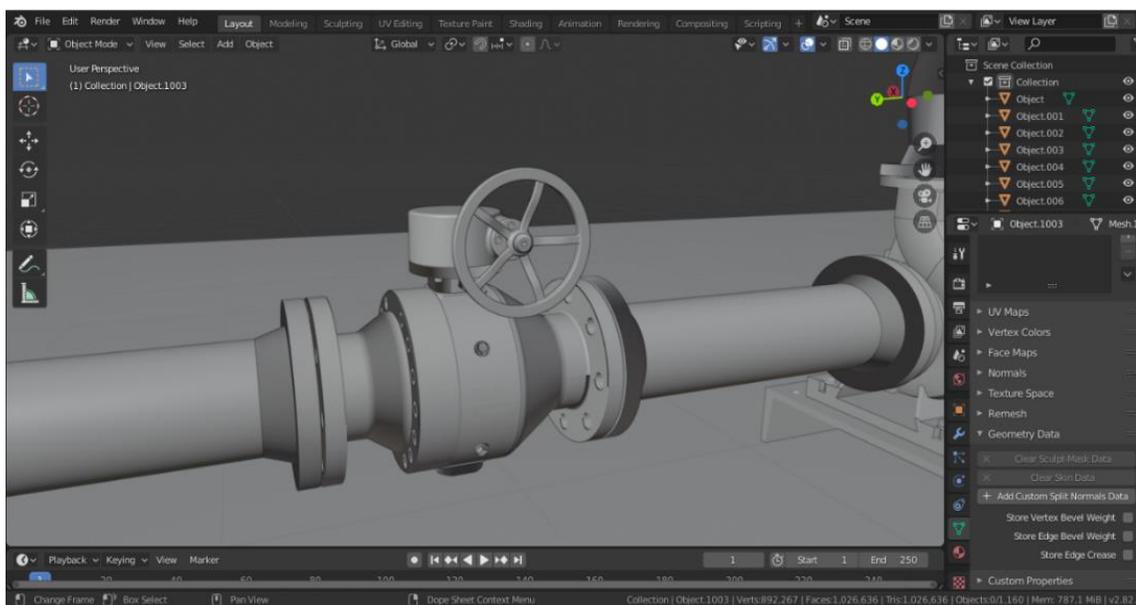


Ahora se puede observar el sombreado que tenía el objeto ha desaparecido,

figura 34.

Figura 34

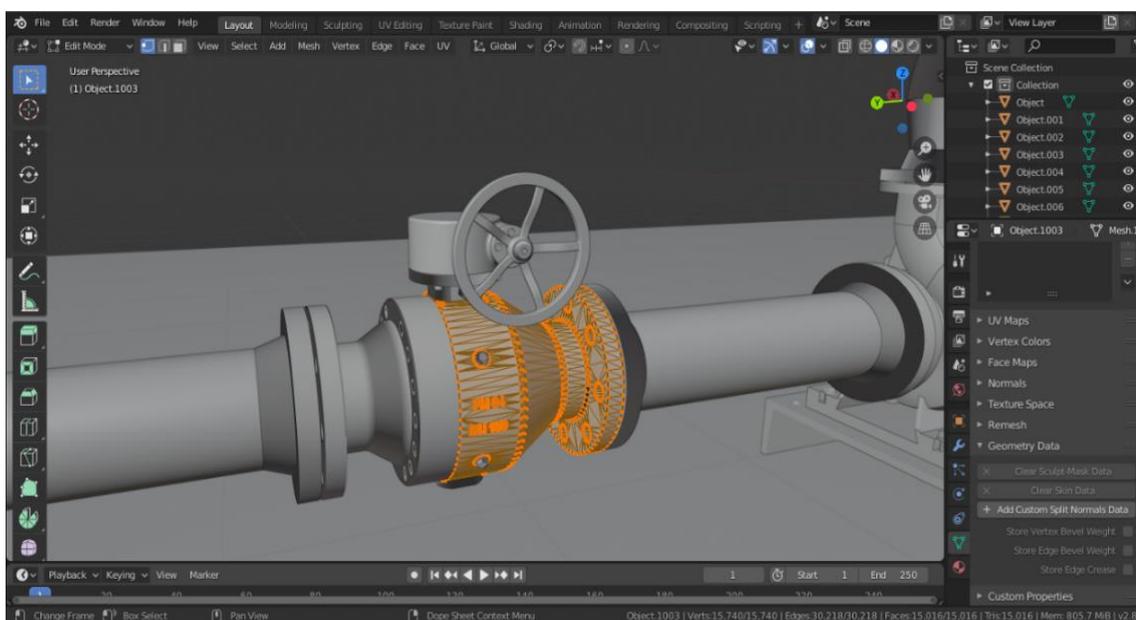
Sombreado de objeto desaparecido



Después se observa que el modelo tiene una gran cantidad de vértices, muchos de los cuales no aportan en el detalle del modelo, figura 35.

Figura 35

Visualización de vértices innecesarios



Para eliminar estos vértices innecesarios se utiliza la opción “Merge by distance” del menú “Mesh”, figura 36.

La cantidad de vértices removidos se visualiza en la parte inferior de la pantalla. Además, aparece un menú en la parte inferior izquierda que permite cambiar la distancia entre vértices para su eliminación. En este caso se utiliza el valor definido por defecto, figura 37.

Los pasos descritos anteriormente contribuyen para obtener una mejor calidad en la malla y una buena optimización de la misma. Existen muchas opciones para lograr este fin y su uso depende de los requerimientos del desarrollador. En este caso, se han descrito los principales parámetros a tomarse en cuenta para corregir errores en las mallas dado el flujo de trabajo utilizado en este proyecto.

Figura 36

Eliminación de vértices innecesarios

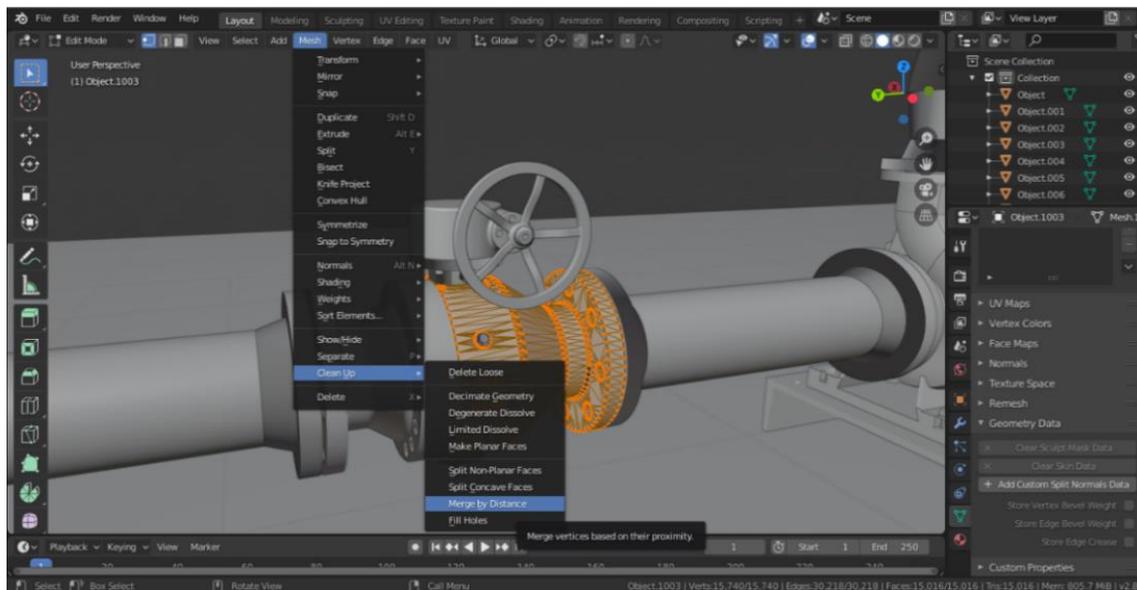
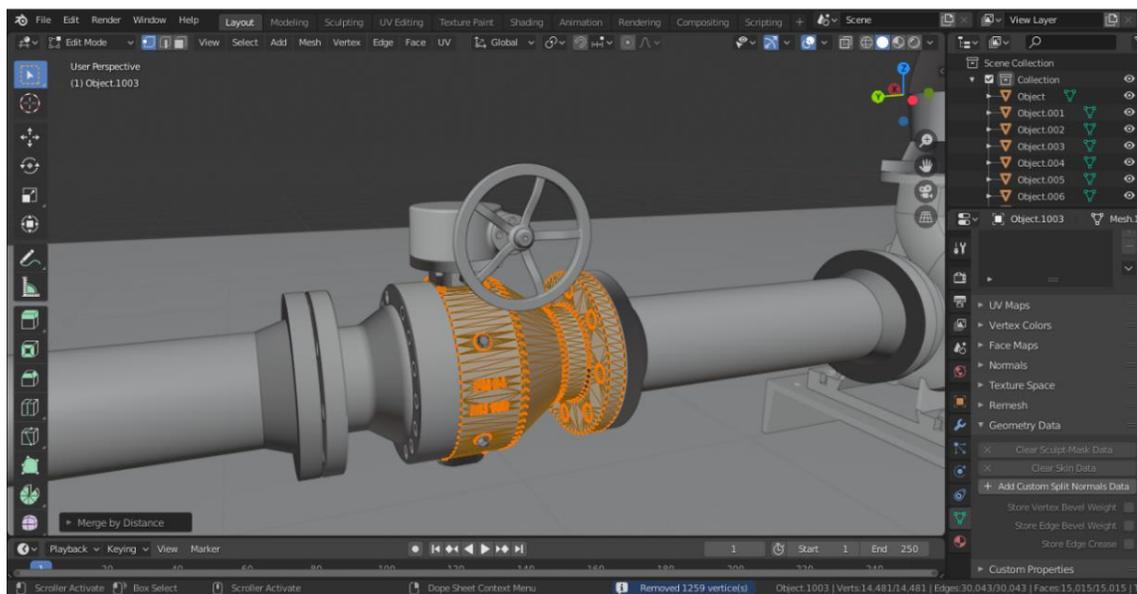


Figura 37

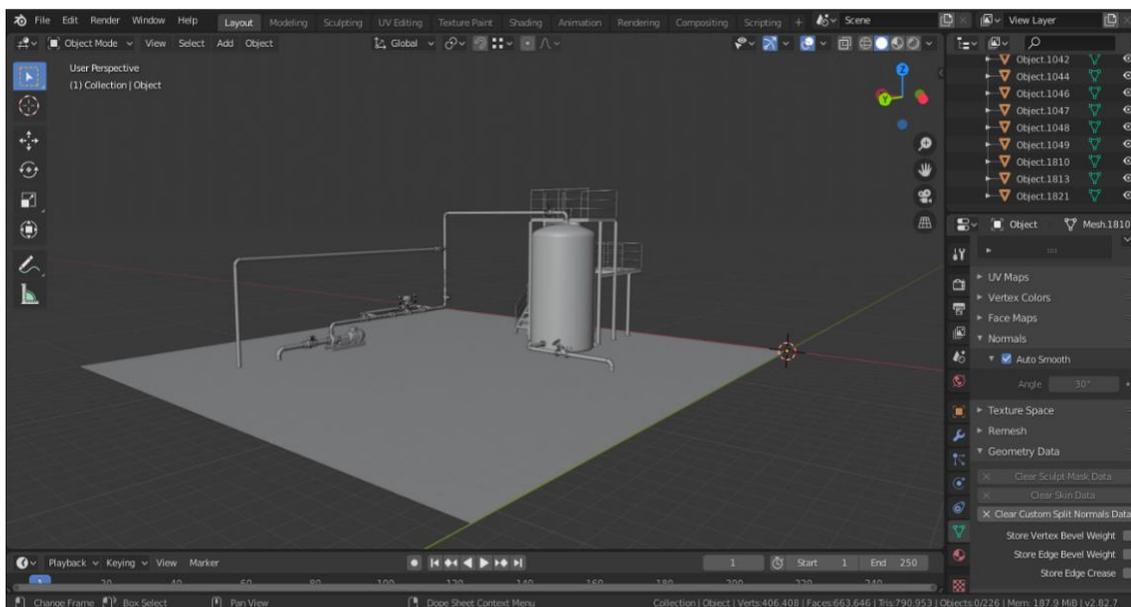
Cambio la distancia entre vértices para su eliminación



3.2.2.3. Puntos de rotación. Los puntos de rotación de cada objeto deben configurarse según las necesidades del proyecto. En este caso, es importante que los puntos de rotación de las válvulas estén ubicados correctamente para poder implementar su animación posteriormente. Inicialmente, los puntos de rotación de todos los objetos se encuentran en el origen de coordenadas, figura 38.

Figura 38

Configuración de los puntos de rotación



De manera general, se pueden configurar los puntos de rotación de todos los objetos para que se ubiquen en el centro de los mismos. Para esto, se seleccionan todos los objetos y se utiliza la opción “Origin to Geometry”, figura 39.

Luego, para configurar un punto de rotación personalizado se debe ubicar el cursor 3D de Blender en el punto deseado y seleccionar el objeto en cuestión, utilizar la opción “Origin to 3D Cursor”, figura 40.

Figura 39

Origin to Geometry

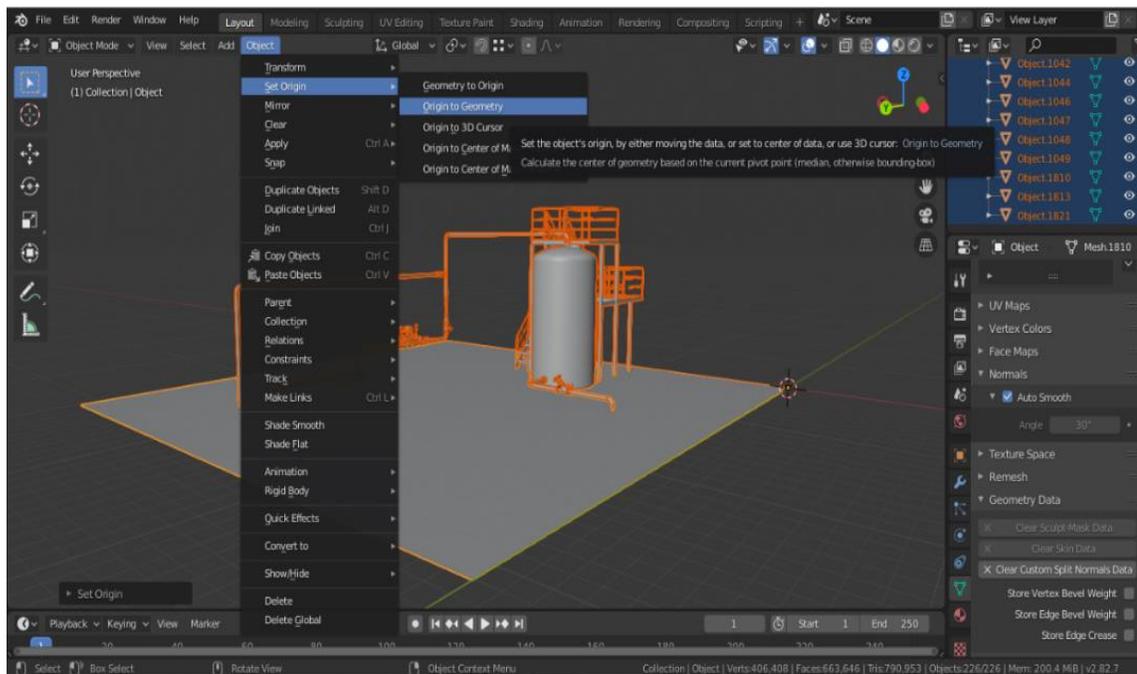
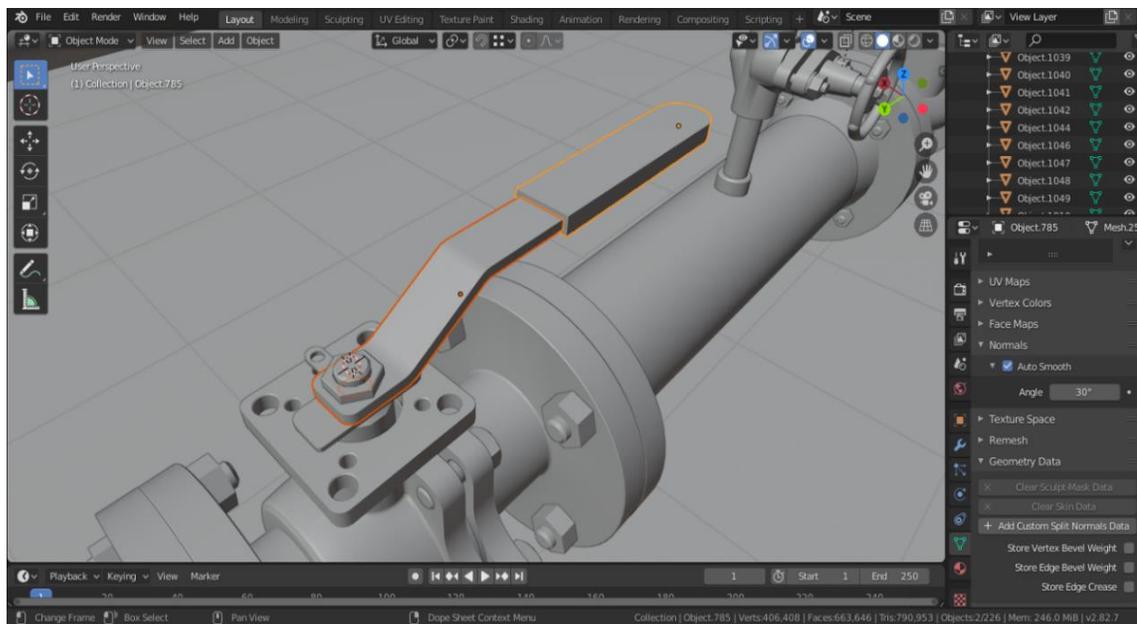


Figura 40

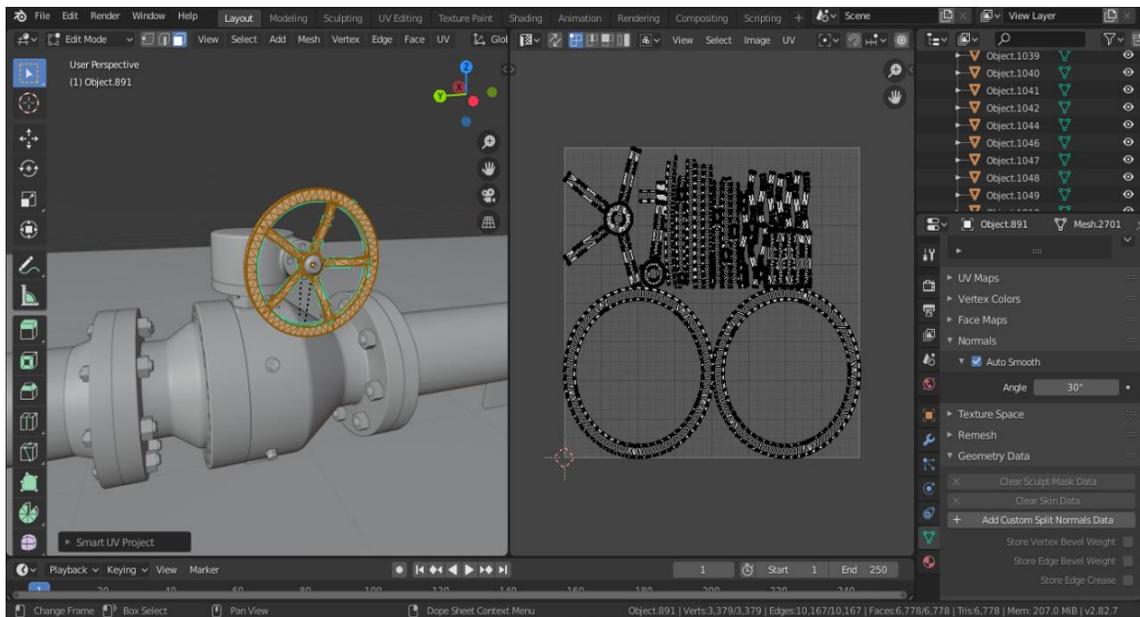
Configuración de un punto de rotación personalizado



3.2.2.4. Creación de mapas UV. Un parámetro importante para su uso posterior, es la creación de mapas UV en los objetos mismos que permitirán el uso de texturas y la creación de mapas de iluminación en el motor gráfico a utilizarse. Un mapa UV puede describirse como una representación plana del objeto tridimensional para colocar sobre las texturas fácilmente.

Figura 41

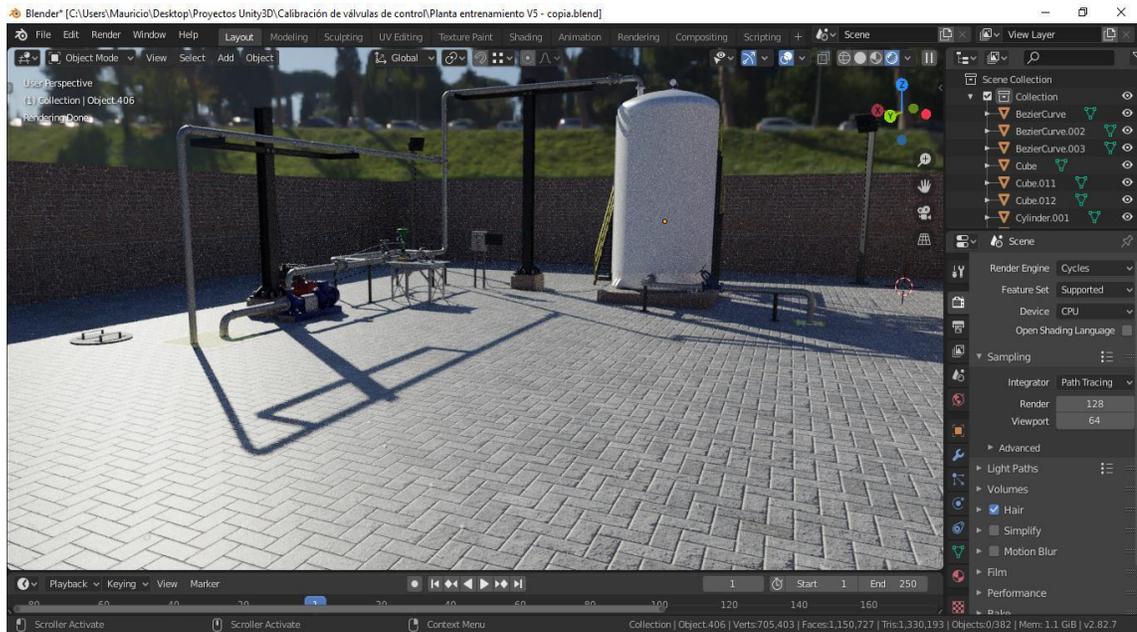
Creación de Mapas UV



3.2.2.5. Diseño del proceso industrial de control de nivel. Finalmente, se han modelado objetos adicionales y se han asignado materiales y texturas al diseño, esto con la finalidad de tener una idea completa del diseño del entorno para el motor gráfico, figura 42.

Figura 42

Diseño final del proceso industrial del control de nivel



Este diseño se exportará en formato FBX., para ser utilizado posteriormente en el motor gráfico. Hay que tomar en cuenta que los materiales y texturas se deberán configurarse nuevamente en el entorno virtual pues el manejo de los mismos no es compatible con motores gráficos.

3.2.3. Implementación del entorno virtual en Unity 3D

3.2.3.1. Diseño, materiales, texturas e iluminación. El entorno virtual se implementa en el motor gráfico Unity3D, para lo cual se importa el diseño final del proceso industrial del control de nivel en formato FBX., figura 43.

Luego, se coloca el modelo en la escena para configurar y asignar los materiales a cada objeto, figura 44.

Figura 43

Importación del proceso industrial a Unity 3D

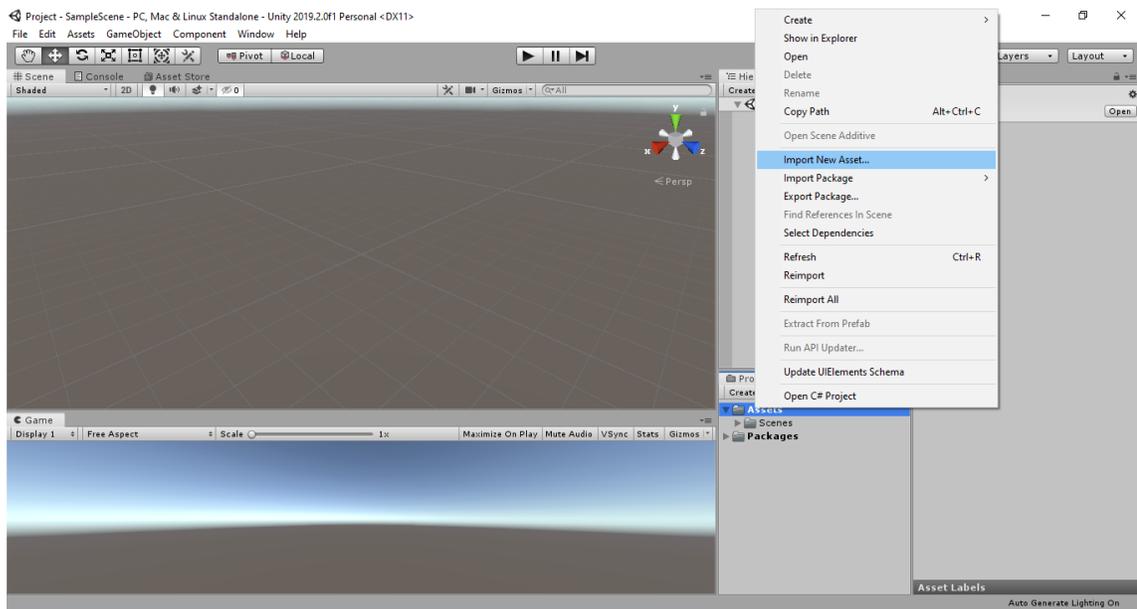
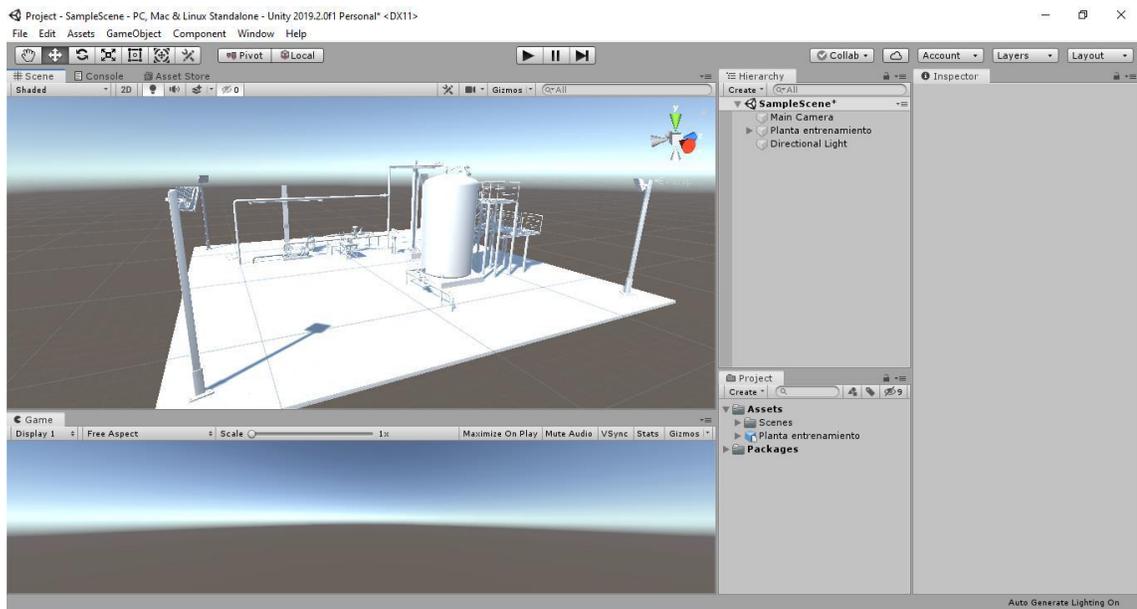


Figura 44

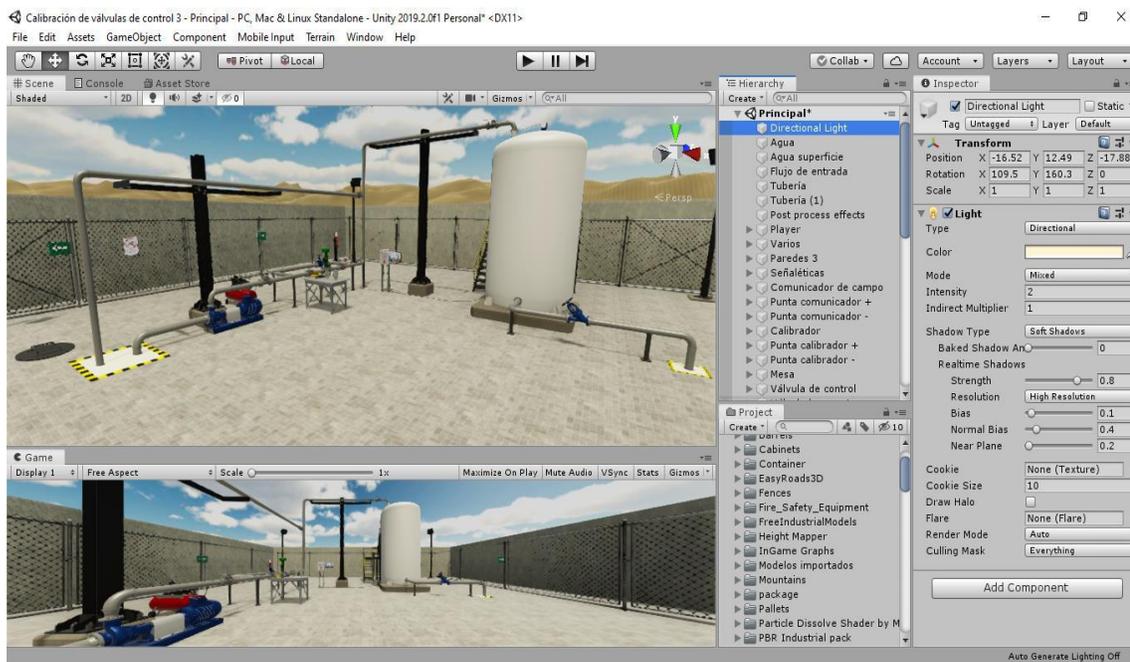
Escena del proceso industrial de nivel



Finalmente, se añaden modelos, se configura la iluminación del entorno y se implementan efectos que mejoren la calidad gráfica del entorno, figura 3.31.

Figura 45

Proceso industrial de nivel incluido iluminación, detalles, efectos y texturas diseñado en Unity 3D



3.2.3.2 Simulación del comportamiento de la planta. Los procesos

industriales representan su funcionamiento mediante expresiones matemáticas, en este sentido para simular el comportamiento de la planta de nivel en el entorno Unity 3D, se utiliza el principio de Bernoulli que, para este caso, se define de la siguiente manera:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_{in} - q_{out}}{A} \quad (3.1)$$

$$q_{in} = k_1 a_1 \quad (3.2)$$

$$q_{out} = k_2 a_2 \sqrt{2gh} \quad (3.3)$$

Para la simulación del funcionamiento de la planta industrial de nivel se utilizan las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, en dichas ecuaciones se incluyen los parámetros que se presentan a continuación:

h : nivel del tanque (0 – 6 m)

q_{in} : flujo de entrada en el tanque (0 - 50 gpm)

q_{out} : flujo de salida en el tanque

A : área del tanque (1.5 m)

k_1 : constante de la válvula en la entrada del tanque (0.05)

k_2 : constante de la válvula en la salida del tanque (0.015)

a_1 : Apertura de la válvula de entrada del tanque (0 – 100 %)

a_2 : Apertura de la válvula de salida del tanque (0 – 100 %)

g : gravedad (9.8 m/s²)

3.2.3.3. Implementación del algoritmo del control PID. El algoritmo de control PID, permite regular el nivel en el tanque a través de la apertura de la válvula de control en la entrada, la ecuación para este tipo de control se define de la siguiente manera:

$$integral(t) = integral(t) + e(t) * dt \quad (3.3)$$

$$integral(t) = integral(t) + e(t) * dt \quad (3.4)$$

$$derivativo(t) = \frac{e(t) - e_{anterior}(t)}{dt} \quad (3.4)$$

$$k_p = 2.5$$

$$k_i = 0.05$$

$$K_d = 2.7$$

3.2.3.4. Sintonía del controlador PID. Para la sintonía del controlador se utiliza el método del tanteo. El procedimiento realizado es colocar la acción integral en ∞ , la acción derivativa en cero y la ganancia proporcional en cero, después se aumenta la ganancia proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25; el valor obtenido de la ganancia proporcional es 2,5; después se incrementa lentamente la acción integral hasta eliminar el error en estado estacionario obteniendo el siguiente

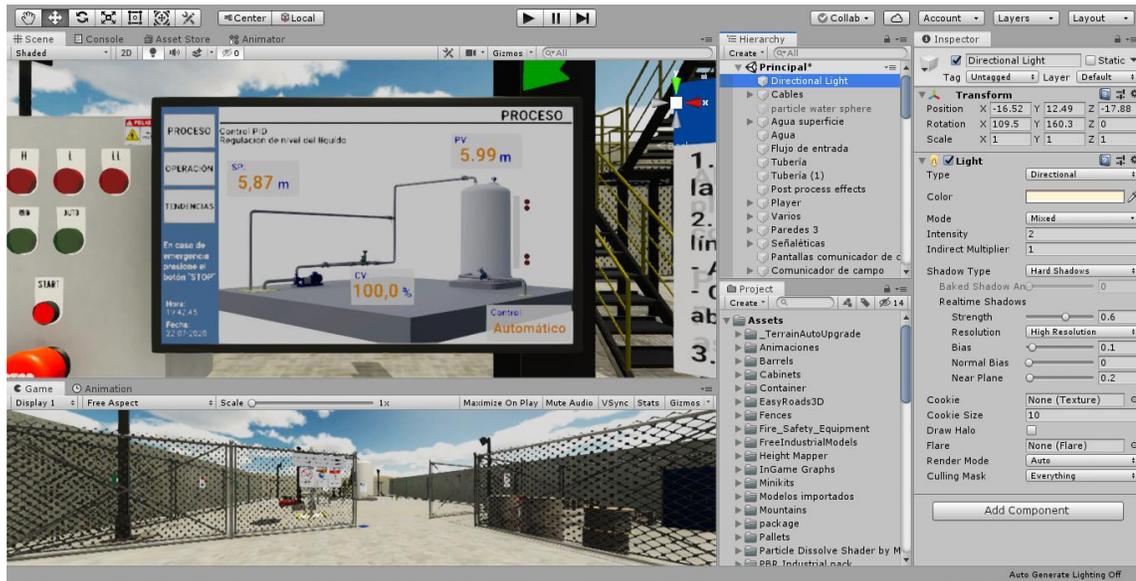
valor 0,05; finalmente se aumenta la acción derivativa en pequeños incrementos hasta obtener una respuesta anticipativa (rápida), el valor obtenido es 2,7.

3.2.3.5. Implementación de la interfaz humana-máquina (HMI). Para el desarrollo del HMI se revisó y consideró la interfaz de visualización que es utilizada en los sistemas de control y supervisión de procesos industriales. La implementación de mencionada interfaz de visualización se realiza utilizando las herramientas UI (User Interface) en Unity 3D. Para el diseño se considera una pantalla principal la cual va a tener tres opciones de acceso, a continuación, se describe las interfaces de visualización implementadas:

Interfaz de visualización (Proceso), en la implementación de esta interfaz se consideran el diseño del tanque de procesos, así como el diseño de las tuberías e instrumentos del proceso industrial de nivel, también se presentan las variables: set point, process value, control value y el tipo de control a ejecutarse (manual o automático). En la figura 46 se presenta la interfaz desarrollada:

Figura 46

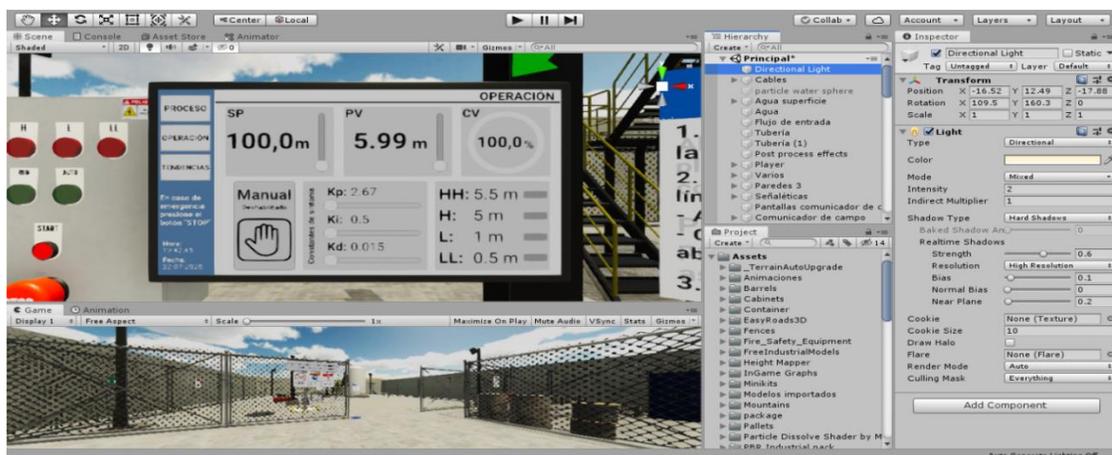
Implementación del HMI (Proceso)



Interfaz de visualización (Operación), en esta interfaz se implementa las opciones para el usuario, cambio de set point, cambio de control manual a control automático, sintonía del controlador y visualización de alarmas. En la figura 47 se presenta la interfaz desarrollada.

Figura 47

Implementación del HMI (Operación)

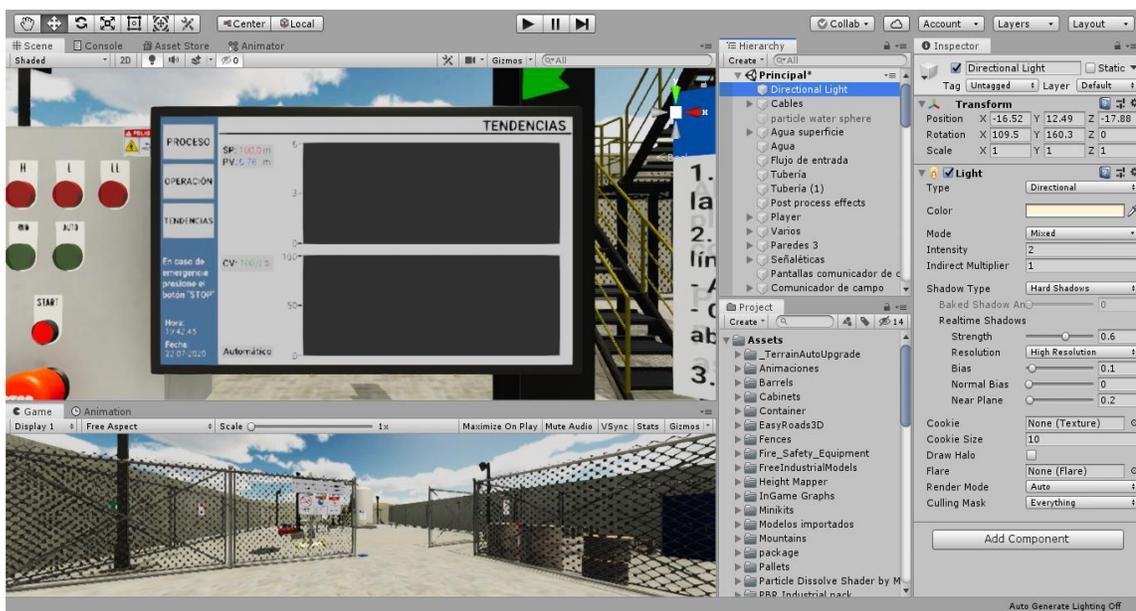


Interfaz de visualización (Tendencia), en esta interfaz se implementan dos tendencias, la primera permitirá la visualización del set point, el process value, y la

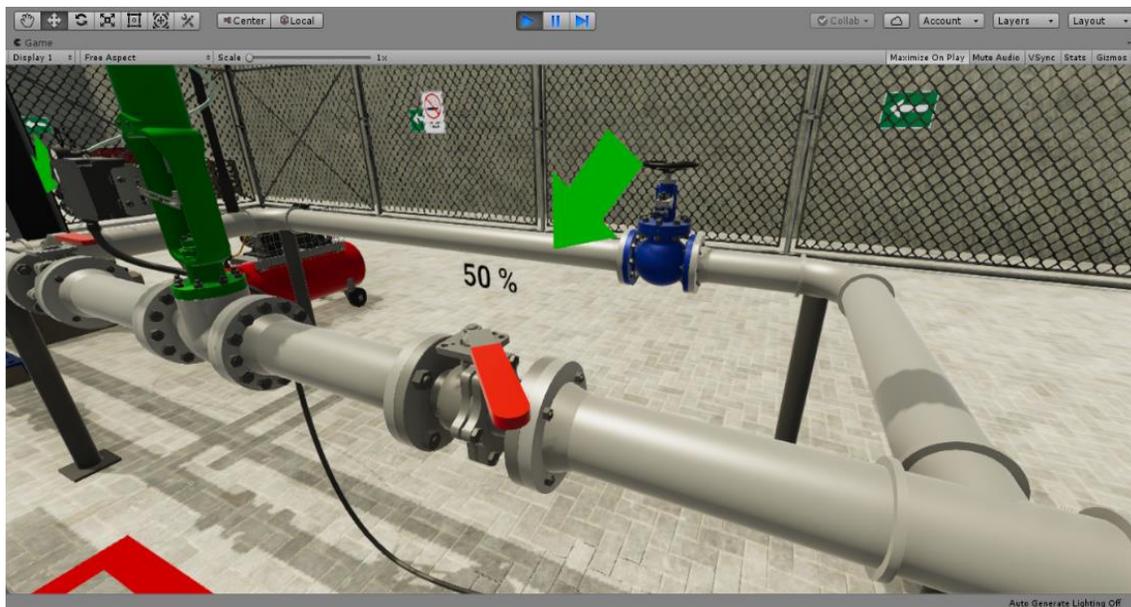
segunda tendencia permitirá la visualización del control value. Las tendencias permiten visualizar la evolución de las tres señales en el tiempo (SP, PV, CV), que son de gran importancia en el control automático. En la figura 48 se presenta la interfaz desarrollada:

Figura 48

Implementación del HMI (Operación)



3.2.3.6. Implementación del Bypass. Para el desarrollo del Bypass se revisó y consideró el funcionamiento de un bypass utilizado en los sistemas de control de nivel que tienen como elemento de control final una válvula de control proporcional. Se programan las animaciones respectivas para el funcionamiento de la válvula de control, así como se realizan las animaciones de las válvulas manuales, las mismas que se pueden manipular con los controles lo que permitirá realizar la simulación del mantenimiento de la válvula de control, a continuación, se presenta la implementación del bypass.

Figura 49*Implementación del Bypass*

3.2.3.7. Programación de animaciones y características de los objetos para lograr un entorno virtual inmersivo. Finalmente, se han programado todas las características e implementado las animaciones necesarias para lograr un entorno virtual que simule el control del nivel de un tanque. También, se añadieron sonidos para los objetos que los ameriten y se provee la posibilidad de que el usuario pueda observar en el interior del tanque, se incluye la animación de guantes que permiten la manipulación de las válvulas con el fin de emular la calibración en forma inmersiva. En las siguientes imágenes se observa el sistema desarrollado.

Figura 50*Entorno virtual del proceso industrial de nivel finalizado (tanque de nivel)*



Figura 51

Entorno virtual del proceso industrial de nivel finalizado (sistema de calibración)

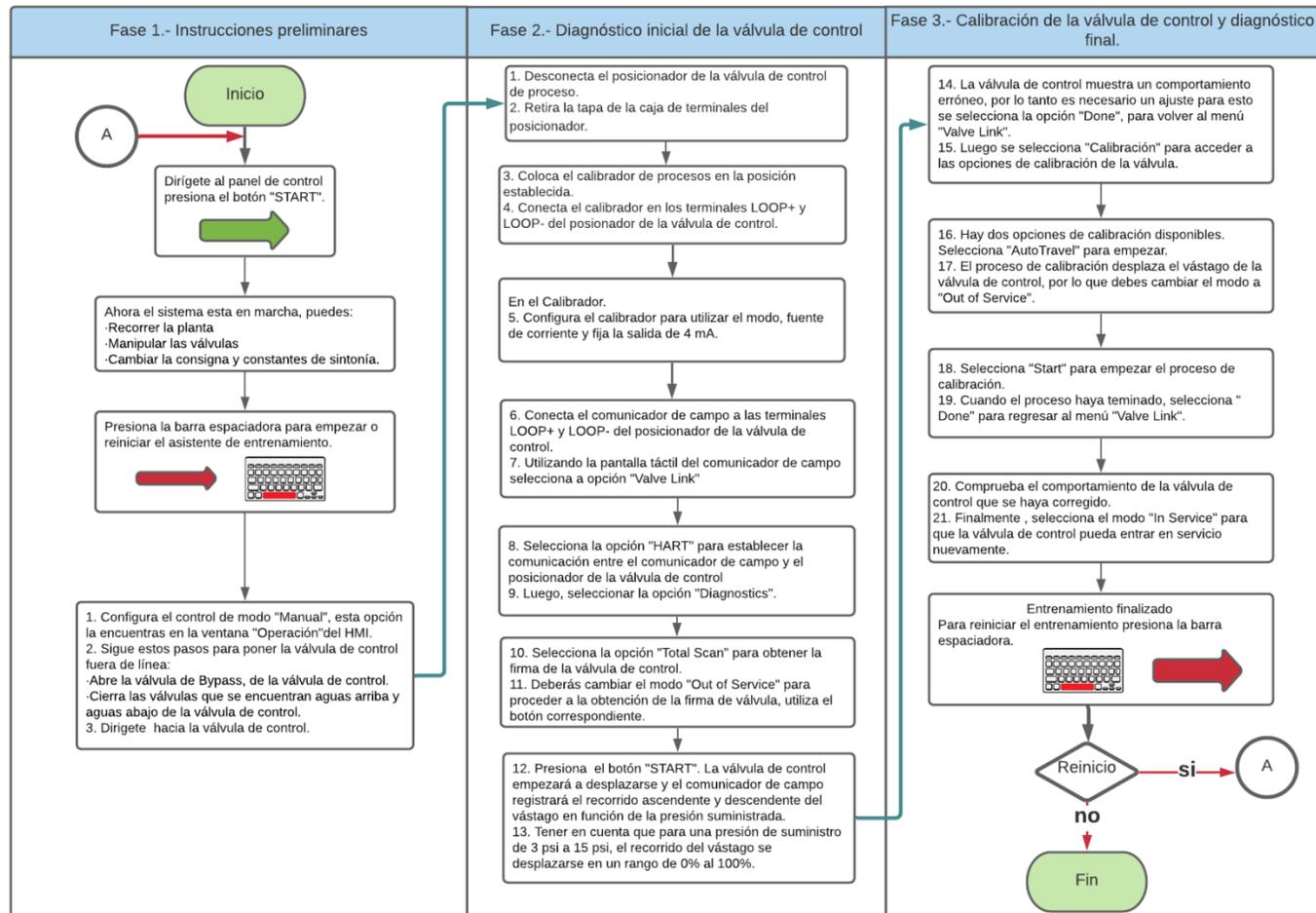


3.2.3.8. Implementación del flujograma del proceso de calibración de la válvula de control (Check List). El procedimiento de calibración de la válvula de control fue obtenido y desarrollado en base a la experimentación realizada en un

sistema de control de nivel, en la figura 3.38 se presenta la metodología para la calibración de la válvula de control en el entorno virtual.

Figura 52

Flujograma del proceso de calibración de la válvula de control (Chekx list)



CAPÍTULO IV

4. Resultados

Se realizaron pruebas de funcionamiento para determinar la inmersión del sistema, el funcionamiento en modo automático-manual, el funcionamiento de sus instrumentos industriales, también se realizó el procedimiento de calibración de la válvula de control y se determinó la usabilidad. Los resultados se presentan a continuación:

4.1. Resultados del entorno virtual inmersivo.

Con la inclusión de las gafas de realidad virtual HTC VIVE, con sus respectivos sensores, se obtiene un ambiente virtual inmersivo, en el mismo se incluye la animación de movimiento de manos para que el usuario utilice de una forma amigable el sistema, en la siguiente figura se presentan las imágenes del entorno virtual inmersivo en funcionamiento.

Figura 53

Imagen de los guantes virtuales en movimiento para la manipulación de los instrumentos industriales.

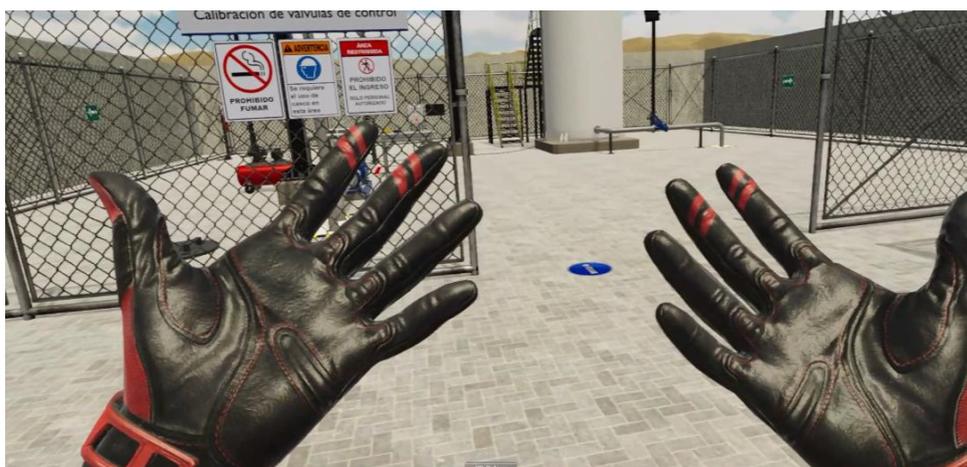
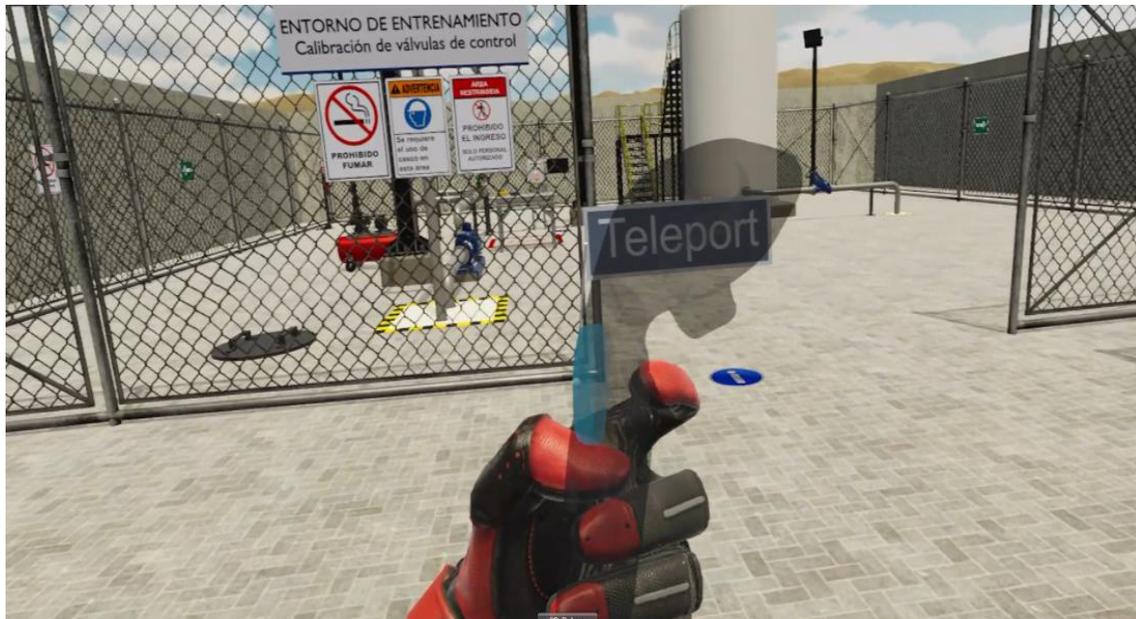


Figura 54

Uso de los mandos con control háptico HD y gatillos en el sistema virtual

**Figura 55**

Inicio del sistema mediante el uso del guante virtual que emula la acción física del operador



Figura 56

Apertura de una válvula manual, utilizando los guantes virtuales.



4.2. Resultados del funcionamiento del sistema virtual de Nivel

El sistema de control implementado es en lazo cerrado, el entorno virtual 3D contiene un transmisor de nivel, un controlador PID con el método de sintonía de tanteo, como elemento de control final la válvula de control, para visualizar las tendencias y las variables de interés esta implementada la interfaz humano máquina, además se realizó la animación del tanque de nivel con agua en su interior. En las siguientes figuras se presentan los instrumentos industriales virtualizados y en funcionamiento.

Figura 57

Visualización de las variables principales del proceso industrial de nivel en el HMI



Figura 58

Controlador sintonizado y en funcionamiento con un mínimo error

**Figura 59**

Visualización del tanque de nivel en llenado continuo.

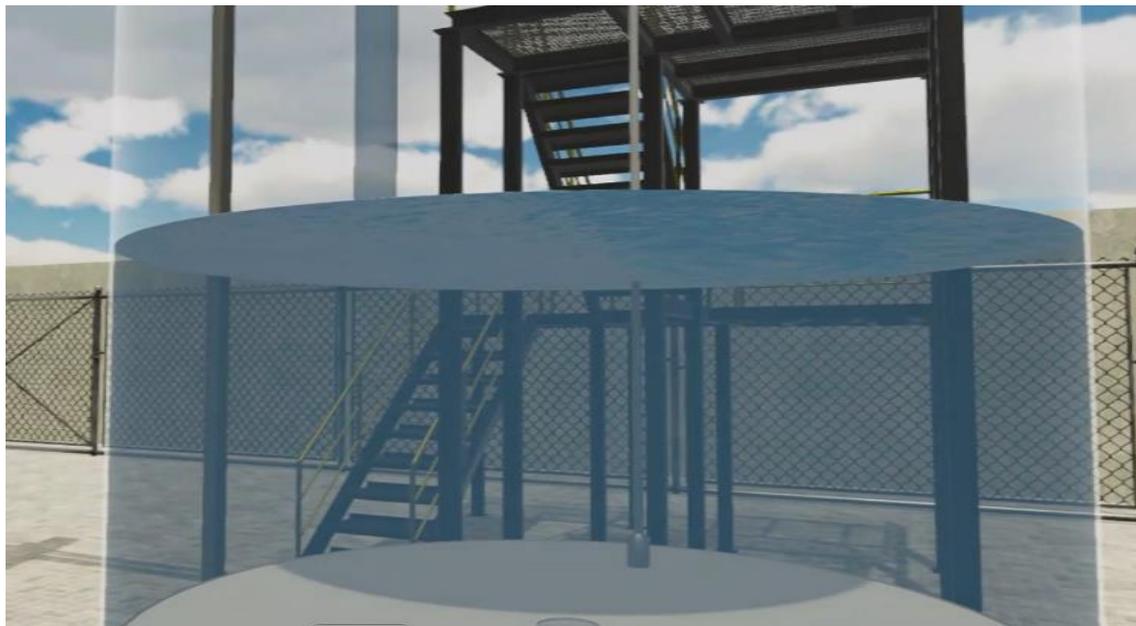
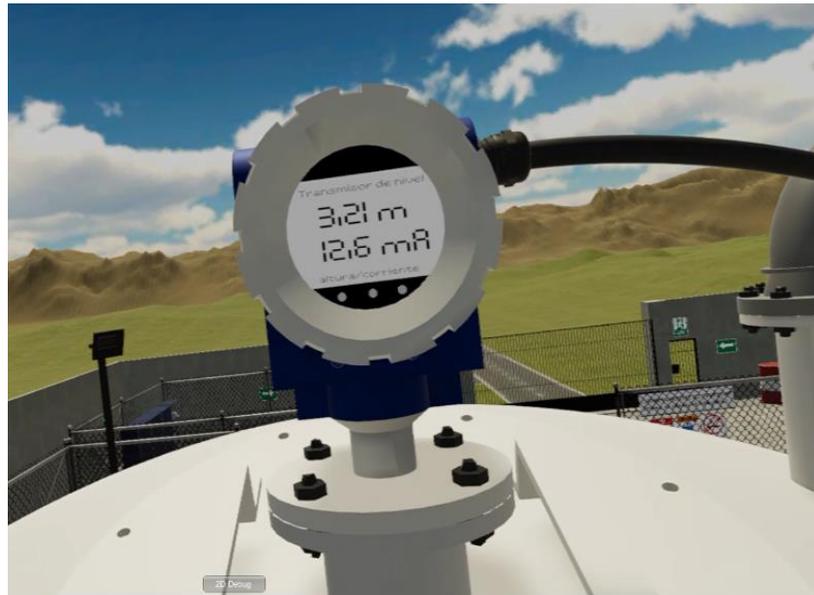


Figura 60

Transmisor de nivel en funcionamiento con visualización de la corriente y la altura del tanque

**Figura 61**

Válvula de control en funcionamiento, desplazándose de acuerdo a la señal del control value (CV) que genera el controlador



4.3. Resultado de la calibración de la válvula de control

Se implementó un asistente virtual que guía al usuario a realizar la calibración de la válvula de control de forma fácil e intuitiva, en las siguientes figuras se presentan la calibración de la válvula de control.

Figura 62

Inicio del asistente para la calibración de la válvula de control

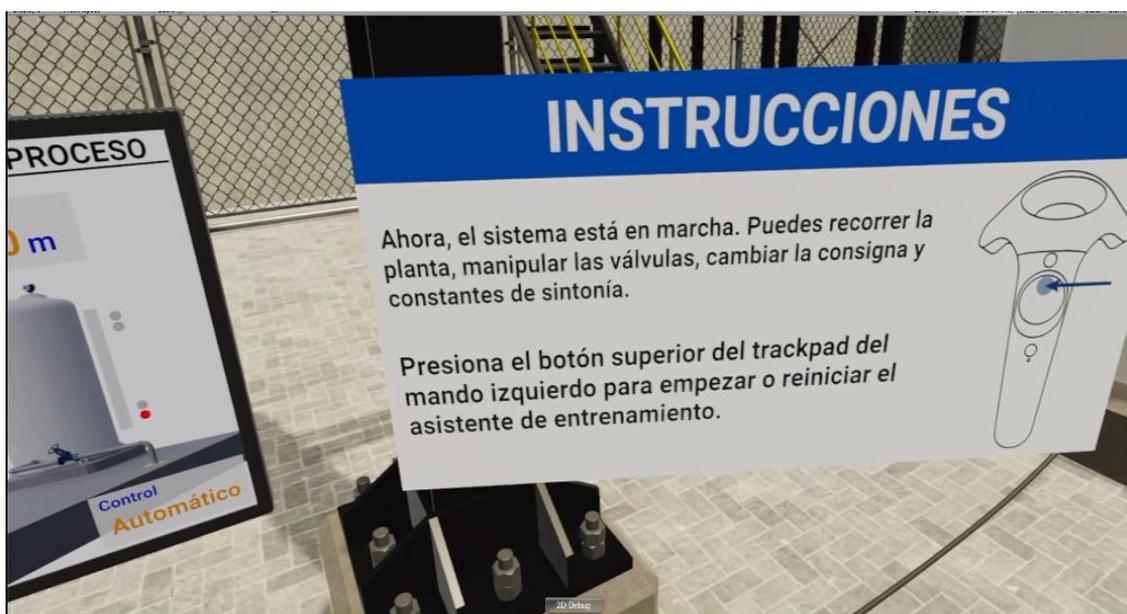


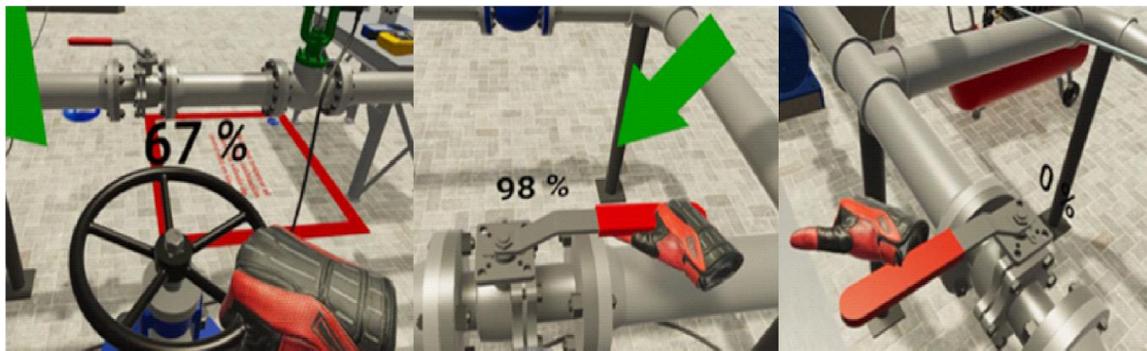
Figura 63

Configuración del sistema de control en modo manual



Figura 64

Procedimiento para habilitación de la válvula de Bypass

**Figura 65**

Procedimiento realizado a la válvula de control, para la conexión del calibrador

**Figura 66**

Procedimiento de conexión del calibrador de procesos



Figura 67

Procedimiento de conexión del configurador de campo

**Figura 68**

Procedimiento para la obtención de la firma de la válvula (resultado "válvula descalibrada")

**Figura 69**

Procedimiento de ajuste de la válvula de control y la obtención de la firma de la válvula (resultado "válvula calibrada")



Del procedimiento de calibración de la válvula de control se puede observar que en la figura 4.16 se presenta la firma de la válvula descalibrada, el sistema permite realizar el procedimiento de ajuste de la válvula de control con el fin de disminuir el error y ubicarlo dentro del rango considerado como aceptable, en la figura 4.17, se presenta la firma de la válvula calibrada.

4.4. Resultado de las encuestas para la validación del entorno virtual 3D del proceso industrial de nivel.

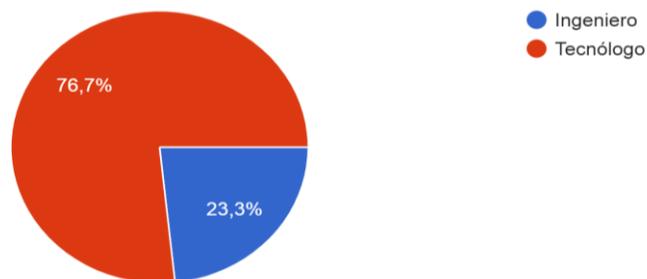
El sistema de entrenamiento implementado del entorno virtual 3D del proceso industrial de nivel ha sido puesto a prueba a profesionales en el área de control, instrumentación industrial y desarrollo de aplicaciones de realidad virtual para la ingeniería. Posteriormente, para validar el funcionamiento del sistema, se realizó una encuesta en la cual estos profesionales evalúan el proceso de entrenamiento.

A los usuarios del sistema se les realizó una pregunta inicial del tipo de formación que poseen (Ingenieros y Tecnólogos). El resultado de esta pregunta se presenta en la figura 70

Figura 70

Resultado del nivel de instrucción de los encuestados

Nivel de instrucción:
30 respuestas



Donde siete (7) participantes son ingenieros y veintitrés (23) son tecnólogos.

A continuación se presenta los resultados de la encuesta realizada a los usuarios del sistema virtual:

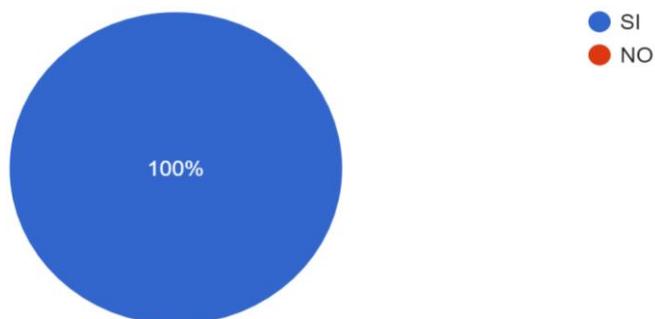
1. ¿El sistema de entrenamiento es intuitivo y amigable?

R1. SI, R2. NO

Figura 71

Resultado de la primera pregunta

30 respuestas



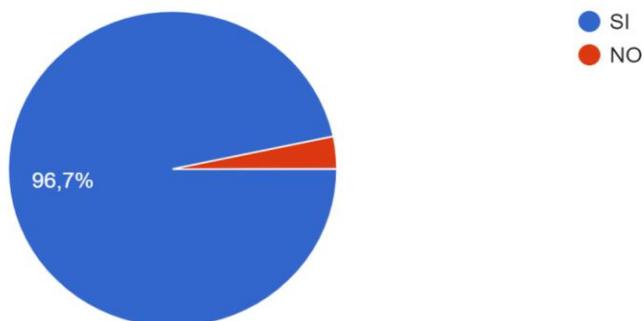
2. ¿La experiencia inmersiva ha sido satisfactoria?

R1. SI. R2.NO

Figura 72

Resultado de la segunda pregunta

30 respuestas



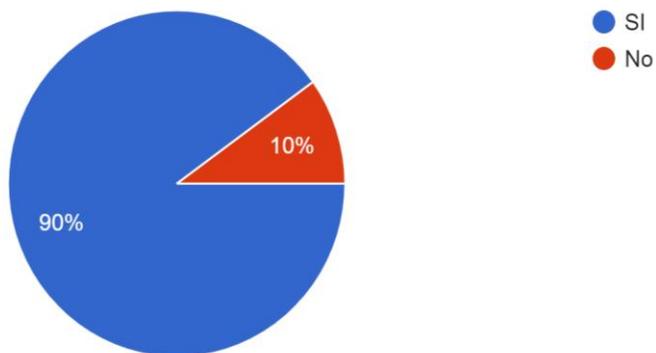
3. ¿El entorno virtual presenta una buena calidad gráfica y realismo?

R1. SI, R2.NO

Figura 73

Resultado de la tercera pregunta

30 respuestas



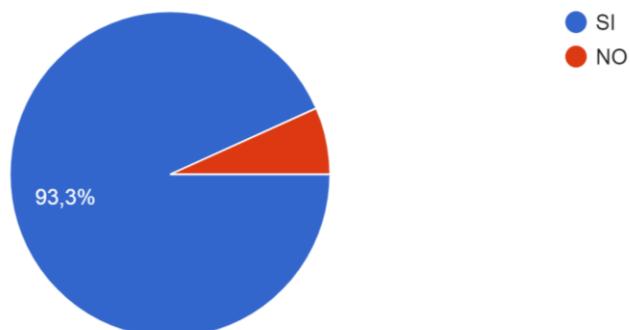
4. ¿El entorno virtual presenta todos los equipos e instrumentos necesarios en una planta industrial?

R1. SI, R2.NO

Figura 74

Resultado de la cuarta pregunta

30 respuestas



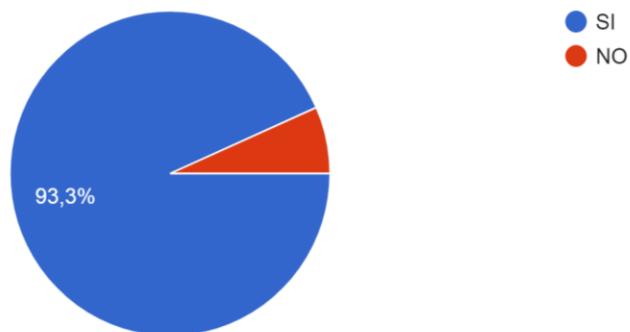
5. ¿La interacción del usuario con los instrumentos y equipos es satisfactoria?

R1. SI, R2.NO

Figura 75

Resultado de la quinta pregunta

30 respuestas



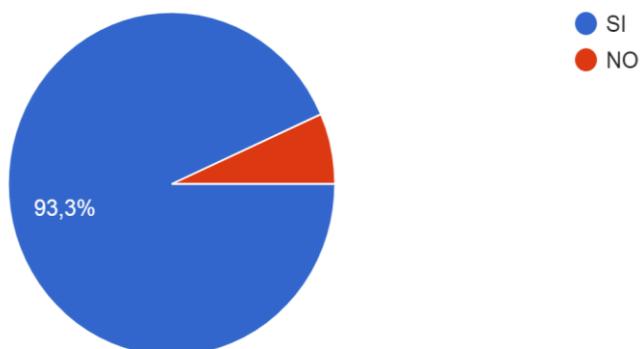
6. ¿El entrenamiento guiado es claro y entendible?

R1. SI, R2.NO

Figura 76

Resultado de la sexta pregunta

30 respuestas



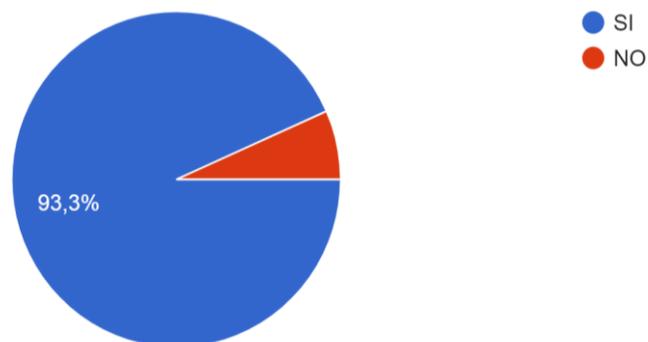
7. ¿La simulación del control del proceso es adecuada y presenta todos los parámetros necesarios?

R1. SI, R2.NO

Figura 77

Resultado de la séptima pregunta

30 respuestas



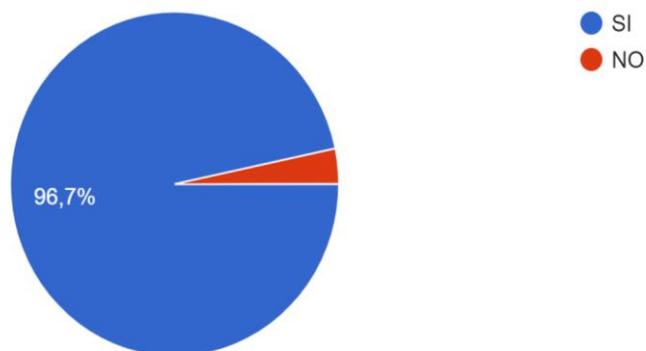
8. ¿Luego de hacer uso del sistema de entrenamiento, ¿es capaz de describir el procedimiento de calibración de una válvula de control?

R1. SI, R2.NO

Figura 78

Resultado de la octava pregunta

30 respuestas



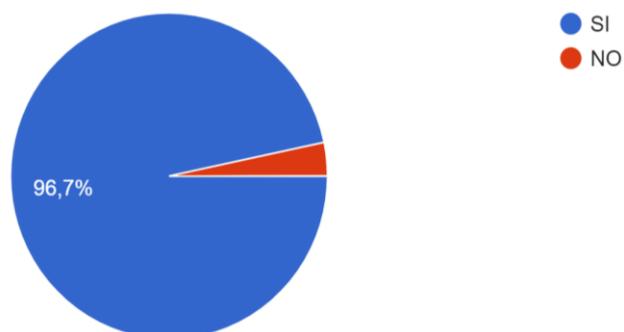
9. ¿Cree usted que el procedimiento implementado en este proyecto resulta adecuado para tomarlo como referencia en la calibración de todo tipo de válvulas de control?

R1. SI, R2.NO

Figura 79

Resultado de la novena pregunta

30 respuestas



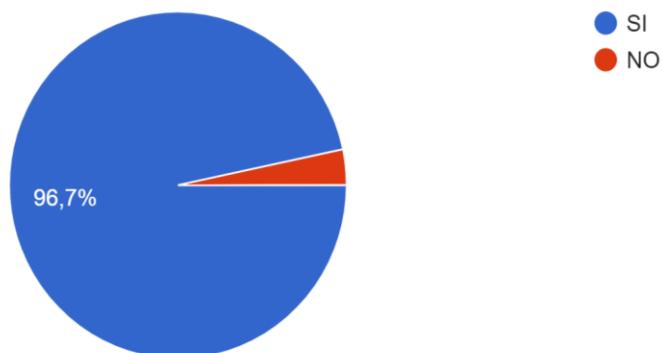
10. ¿Cree usted que el procedimiento implementado abarca todos los pasos necesarios para cumplir en su totalidad con un protocolo de calibración de válvulas de control?

R1. SI, R2.NO

Figura 80

Resultado de la décima pregunta

30 respuestas



Tabulando los resultados y promediando los porcentajes de las diez (10) preguntas se obtiene el resultado final:

Resultado de las respuestas:

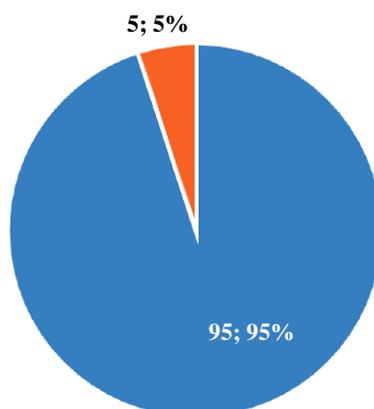
SI= 95%, de aceptación

NO= 5% de no aceptación

Figura 81

Gráfico que describe el porcentaje de aceptación del sistema de entrenamiento para la calibración virtual de una válvula de control

PROMEDIO DE ACEPTACIÓN "ENTRENAMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN VIRTUAL DE UNA VÁLVULA DE CONTROL"



La usabilidad del sistema presenta un porcentaje del 95% de aceptación por parte de los usuarios, determinando que el entorno virtual 3D del proceso industrial de nivel, orientado al entrenamiento para la calibración de una válvula de control, cumple como un entrenador virtual para los profesionales del área.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se implementó un sistema virtual para el entrenamiento en la calibración de válvulas de control utilizando herramientas informáticas y tecnologías inmersivas, las mismas

que permiten un adiestramiento más eficaz que los métodos tradicionales, además que elimina la necesidad de equipos e infraestructura física.

- Se determinó el modelo matemático que describe el comportamiento físico del proceso industrial de nivel, que permite la simulación del sistema de control por estrangulamiento, utilizando una válvula de control como elemento de control final.
- A partir de un diagrama P&ID desarrollado en Autocad Plant 3D, se diseñó una planta de control de nivel, por medio de herramientas CAD, el mismo que fue animado y caracterizado en un motor gráfico (Unity 3D) que permitió el proceso de aprendizaje óptimo para el entrenamiento de válvulas de control.
- Se realizaron pruebas experimentales de calibración de una válvula de control en un sistema real, de la experimentación se obtuvo el procedimiento de operación (Checklist) que permitió la implementación adecuada del sistema de entrenamiento virtual en la calibración de válvulas de control.
- El sistema virtual desarrollado cuenta con todos los componentes y detalles de un proceso industrial de nivel, lo que permite a los usuarios realizar la sintonía de controladores, cambios de control manual-automático, verificación del funcionamiento de instrumentos industriales y la calibración de la válvula de control. Proporcionando a los usuarios un sistema integral en el área de instrumentación y control.
- El sistema virtual implementado, permite al usuario un entrenamiento libre del riesgo físico, del daño de la infraestructura del módulo y brinda la oportunidad de repetir indefinidamente el proceso sin costo.
- Se validó el proyecto con pruebas de funcionamiento realizadas por profesionales del área de control e instrumentación dando una aceptación en la usabilidad del 95%,

donde su principal fortaleza fue la forma interactiva y fácil para realizar la calibración de la válvula.

- Se puede seguir desarrollando otras actividades de mantenimiento para los elementos de control final pues el código fuente del programa se encuentra abierto y se puede escalar otras actividades técnicas de operación.

5.2. Recomendaciones

- Para desempeño óptimo del sistema virtual desarrollado se debe contar con un computador que posea una tarjeta de video dedicada (NVIDIA GTX 2070 de gama alta o superior), para que de esta manera la experiencia del usuario sea satisfactoria.
- Considerar para futuros desarrollos la implementación de modos multiusuario o colaborativo en este tipo de aplicaciones didácticas a fin que existe una interacción de varios usuarios.

Bibliografía

- Katsuhiko Ogata, K. (2002). Ingeniería de control moderno (3.^a ed.). México, D.F. Katsuhiko Ogata.
- Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). Virtual reality technology. John Wiley & Sons.
- Fukuda, M., Ogata, Y., Saegusa, C., Kanno, E., & Mikoshiba, K. (2002). Alternative splicing isoforms of synaptotagmin VII in the mouse, rat and human. *Biochemical Journal*, 365(1), 173-180.
- Vive pro Kit de inicio. (2011). Vive Port. <https://www.vive.com/mx/product/vive-pro-starter-kit/>
- Boo, J. (2010). Introducción a la Realidad Virtual. Arquitectura RV. <https://www.cs.upc.edu/~virtual/SGI/guions/ArquitecturaRV.pdf>
- Pruna, E., Rosero, M., Pogo, R., Escobar, I., & Acosta, J. (2018, June). Virtual Reality as a Tool for the Cascade Control Learning. In International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics (pp. 243-251). Springer, Cham
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). Control PID avanzado. Pearson, Madrid.
- Creus, A. (2007). Simulación y control de procesos por ordenador (No. TS156. 8. C73 2007.). Marcombo.
- Elementos finales de control. (2010). Elementos de control final. Elementos de control final. <https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2011/05/ELEMENTOS-FINALES-DE-CONTROL-modificado.pdf>