



**Diseño e implementación de una estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales, para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.**

Rocha Pullopaxi, Víctor Israel y Rocha Rocha, Kevin Raúl

Departamento de Eléctrica Y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

22 de febrero del 2021



## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“Diseño e implementación de una estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales, para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.”*** fue realizado por los señores **Rocha Pullopaxi, Víctor Israel** y **Rocha Rocha, Kevin Raúl**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado 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 sustenten públicamente.

Latacunga, 22 de febrero del 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**EDWIN  
PATRICIO  
PRUNA PANCHI**

---

**Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio**

C.C.: 0502651003

## REPORTE DEL URKUND

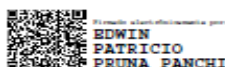


### Document Information

Analyzed document	Trabajo de Titulación Kevin Rocha y Víctor Rocha.pdf (D96281311)
Submitted	2/22/2021 9:23:00 PM
Submitted by	Pruna Panchi Edwin Patricio
Submitter email	epruna@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	epruna.espe@analysis.arkund.com

### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://radio.unr.edu.ar/nota/6023/virtualizacion-de-la-educacion-en-tiempos-de-pa...">https://radio.unr.edu.ar/nota/6023/virtualizacion-de-la-educacion-en-tiempos-de-pa ...</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://altertecnica.com/realidad-aumentada-realidad-virtual-industria-40/">https://altertecnica.com/realidad-aumentada-realidad-virtual-industria-40/</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		7
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/">https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://cl.omega.com/technical-learning/metodologias-escalamiento-transmisor-tempe...">https://cl.omega.com/technical-learning/metodologias-escalamiento-transmisor-tempe ...</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://core.ac.uk/download/pdf/71398246.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/71398246.pdf</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-mult...">https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-mult ...</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		3
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.femto-calibracion.es/bombas-y-generadores-de-presion/">https://www.femto-calibracion.es/bombas-y-generadores-de-presion/</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-de-p...">https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-de-p ...</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-de-t...">https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-de-t ...</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		2
<b>W</b>	URL: <a href="http://www.controlware.com.pe/beamex/Publicaciones/CalibracionEnCampoOtaller.pdf">http://www.controlware.com.pe/beamex/Publicaciones/CalibracionEnCampoOtaller.pdf</a> Fetched: 2/22/2021 9:24:00 PM		3
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4993/1/T-ESPEL-0861.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4993/1/T-ESPEL-0861.pdf</a> Fetched: 7/21/2020 11:04:06 PM		1



Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

C.C.: 0502651003

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

Nosotros, **Rocha Pullopaxi, Víctor Israel** con cédula de identidad N° 0502867138 y **Rocha Rocha, Kevin Raúl** con cédula de identidad N° 1724985716, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación ***“Diseño e implementación de una estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales, para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.”***, es de nuestra 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, 22 de febrero del 2021

Firmas:

---

**Rocha Pullopaxi, Víctor Israel**

C.C.: 0502867138

---

**Rocha Rocha, Kevin Raúl**

C.C.:1724985716



## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

#### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Rocha Pullopaxi, Víctor Israel** con cédula de identidad N° 0502867138 y **Rocha Rocha, Kevin Raúl** con cédula de identidad N° 1724985716, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación ***“Diseño e implementación de una estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales, para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 22 de febrero del 2021

Firmas:

---

**Rocha Pullopaxi, Víctor Israel**

C.C.: 050286713-8

---

**Rocha Rocha, Kevin Raúl**

C.C.:172498571-6

## DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado:

A mi padre Víctor y a mi madre Flor quienes, con su amor, trabajo y esfuerzo me han permitido cumplir una meta más en la vida, por inculcarme buenos valores, por brindarme el apoyo moral y por querer verme convertido en un profesional, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y ser un orgullo para la familia.

A mi hermana Viví por su compañía que me ha brindado a lo largo de esta etapa de la vida y quien ha sido un ejemplo de hermana mayor para mí.

A mi hermano Henry por estar conmigo en todo momento, quien me impulsa a cada día ser mejor y ser un ejemplo para él.

Para ellos es esta dedicatoria, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

*Víctor Israel Rocha Pullopaxi*

## DEDICATORIA

*“Carta a mi hijo”*

*Mira hijo... La mejor herencia que deja un padre es la educación; piensa, estudia, edúcate y triunfarás en la vida.*

Este trabajo de titulación quiero dedicar a mis padres, quienes, con amor y paciencia han entregado todo su esfuerzo y trabajo al bienestar mío y de mis hermanos, quienes siempre han luchado por vernos superar, y han sabido mantener a la familia unida a pesar de los momentos difíciles. Recuerdo un día cuando era niño, mis padres me regalaron un cuadro con un escrito que decía *“Carta a mi hijo”*. Gracias mamá, gracias papá, es por ustedes este logro en mi vida, por esto y más se los dedico, los quiero mucho.

También dedico este trabajo a mi hermano mayor, quien fue mi primer profesor y compañero de vida; a mi hermano menor y a mis abuelitos, quienes siempre estuvieron pendientes de mí durante el transcurso de mi carrera universitaria a pesar de sus limitaciones.

*Kevin Raúl Rocha Rocha*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por las bendiciones a lo largo de mi vida, por permitirme compartir muchos momentos junto las personas que más estimo y quiero. Gracias por mantenerme con salud y ser la luz que me permite seguir cumpliendo con mis objetivos y sueños.

A la vez quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe-L, a la carrera de Ingeniería de Electrónica e Instrumentación y a los profesores quienes me han formado como profesional y me han brindado sus sabios conocimientos.

De igual manera quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Ing. Edwin Pruna principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección y conocimiento ha permitido el desarrollo de este trabajo.

A mi gran amigo y compañero de tesis Raúl por su dedicación y paciencia en la realización de este proyecto, gracias por tantas experiencias y aventuras académicas que compartimos a lo largo de la carrera.

Finalmente agradezco a todos mis amigos, amigas y futuros colegas con los que tengo el privilegio de compartir la vida, gracias infinitas por su ayuda y buena voluntad.

Agradezco especialmente a Edison Bonilla, Edison Araque, Francisco Flores, Raúl Rocha, amigos con quienes he compartido inolvidables momentos en la universidad.

*Víctor Israel Rocha Pullopaxi*



## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, a mis hermanos, y a mis abuelitos, por estar pendientes de mí en todo momento, apoyándome e impulsándome siempre a ser mejor. A mi tío Diego y a mi tía Jenny, quienes siempre han estado dispuestos cuando de su ayuda he necesitado.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, a la carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y a los docentes que han compartido sus conocimientos, permitiéndome formar profesionalmente.

También, quiero extender un sincero agradecimiento al Ing. Edwin Pruna, quien ha guiado el presente trabajo y nos ha compartido sus conocimientos para poder culminarlo exitosamente.

A Víctor, por el esfuerzo dedicado a la realización de este proyecto, por ser un apoyo constante a lo largo de la carrera y por brindarme su amistad incondicional.

Finalmente agradezco a todas las personas con quienes he compartido momentos, experiencias y vivencias en el transcurso de mi vida universitaria y a todos quienes de una u otra manera han contribuido para que hoy logre cumplir este objetivo.

*Kevin Raúl Rocha Rocha*

## Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte del urkund.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento .....	8
Agradecimiento .....	9
Índice de tablas .....	16
Índice de figuras.....	17
Resumen .....	23
Abstract.....	24
Capítulo I.....	25
Introducción.....	25
Planteamiento del problema .....	25
Antecedentes .....	26
Justificación e importancia.....	27
Objetivos .....	28
<i>Objetivo general</i> .....	28
<i>Objetivos específicos</i> .....	28
Variables de la investigación .....	29
<i>Variable independiente</i> .....	29
<i>Variable dependiente</i> .....	29
Hipótesis .....	29

	11
Capítulo II.....	30
Marco Teórico.....	30
Entornos 3D .....	30
<i>Realidad Virtual de Escritorio</i> .....	30
<i>Realidad Virtual Inmersiva</i> .....	31
Plataformas de desarrollo de entornos 3D .....	32
Gráficos 3D.....	33
<i>Modelado</i> .....	34
<i>Composición de la escena</i> .....	37
<i>Rénder</i> .....	37
¿Por qué utilizar Realidad Virtual en la Educación? .....	38
Realidad Virtual en la Industria.....	40
<i>Optimización de diseños para el prototipado</i> .....	41
<i>Diseño y montaje de instalaciones</i> .....	41
<i>Operaciones de mantenimiento</i> .....	41
<i>Formación con Realidad Virtual</i> .....	42
Instrumentación Industrial .....	42
Transmisores Industriales .....	43
<i>Transmisores de presión absoluta</i> .....	43
<i>Relación presión-volumen: Ley de Boyle</i> .....	44
<i>Relación temperatura-volumen: Ley de Charles y de Gay Lussac</i> .....	45
<i>Transmisores de presión diferencial</i> .....	47
<i>Aplicación para Tanques Abiertos</i> .....	48
<i>Aplicación para Tanques Cerrados</i> .....	49
<i>Transmisores de temperatura</i> .....	50
Calibración de transmisores.....	50

	12
<i>Calibración Hart</i> .....	51
<i>Calibración de transmisores “Smart” de presión absoluta</i> .....	52
<i>Calibración de transmisores “Smart” de presión diferencial</i> .....	54
<i>Calibración de transmisores “Smart” de temperatura</i> .....	55
Calibraciones in situ.....	56
Calibraciones en banco.....	57
Control de procesos .....	58
<i>Tipos de procesos industriales</i> .....	59
<i>Procesos autorregulados</i> .....	60
<i>Procesos Integrantes</i> .....	61
<i>Métodos de sintonización</i> .....	62
Motor gráfico Unity 3D.....	64
Capítulo III.....	66
Diseño e Implementación .....	66
Identificación de características y restricciones del proceso virtual.....	68
<i>Características</i> .....	69
<i>Restricciones</i> .....	71
Diseño de la estación virtual de instrumentación y control de procesos.....	71
<i>Dimensiones del tanque</i> .....	73
<i>Dinámica de los procesos</i> .....	74
<i>Rango de operación de los procesos</i> .....	79
<i>Proceso de Nivel</i> .....	79
<i>Cálculo del LRV</i> .....	82
<i>Cálculo del URV</i> .....	83
<i>Proceso de presión absoluta</i> .....	85
<i>Cálculo del LRV</i> .....	86

	13
<i>Cálculo del URV</i> .....	88
<i>Proceso de temperatura</i> .....	93
<i>Modelado 3D de componentes necesarios en software Maya</i> .....	94
Implementación del entorno virtual en Unity 3D .....	99
<i>Implementación de la estación virtual de procesos</i> .....	101
<i>Implementación del sistema de medición virtual de presión absoluta</i> .....	104
<i>Implementación del sistema de medición virtual de presión diferencial</i> .....	108
<i>Implementación del sistema de medición virtual de temperatura</i> .....	111
Desarrollo de procedimientos de calibración en el entorno virtual .....	114
<i>Calibración</i> .....	116
<i>Ajuste</i> .....	118
<i>Animaciones e interacciones para la calibración del transmisor de presión absoluta</i> .....	122
<i>Animaciones e interacciones 3D</i> .....	130
<i>Animaciones e interacciones 2D</i> .....	133
<i>Animaciones e interacciones para la calibración del transmisor de presión diferencial</i> .....	136
<i>Animaciones e interacciones 3D</i> .....	137
<i>Animaciones e interacciones 2D</i> .....	139
<i>Animaciones e interacciones para la calibración del transmisor de temperatura</i> .....	142
<i>Animaciones e interacciones 3D</i> .....	148
<i>Animaciones e interacciones 2D</i> .....	150
Animaciones generales para interacción con el entorno virtual .....	152
<i>Teclas de interacción</i> .....	153
<i>Configuraciones</i> .....	154
Desarrollo del algoritmo de control PID para el control del sistema virtual .....	155

	14
<i>Control para el proceso de Nivel</i> .....	157
<i>Control para el proceso de Temperatura</i> .....	158
<i>Integración numérica</i> .....	160
<b>Guías de prácticas virtuales para la calibración de los transmisores</b>	
<b>“Smart”</b> .....	162
<i>Guía General de Usuario</i> .....	162
<i>Guía de usuario (Presión Absoluta)</i> .....	164
<i>Guía de usuario (Presión Diferencial)</i> .....	166
<i>Guía de usuario (Temperatura)</i> .....	168
<b>Realización de la aplicación ejecutable para computadores con sistema operativo Windows</b> .....	170
<b>Capítulo IV</b> .....	173
<b>Análisis y Resultados</b> .....	173
<b>Interacción general en el entorno virtual</b> .....	173
<i>Funcionamiento del proceso industrial virtual</i> .....	173
<i>Similitud de los equipos virtuales de calibración con equipos reales</i> .....	179
<i>Funcionamiento de los equipos durante el proceso de calibración</i> .....	180
<b>Desarrollo de práctica virtual de calibración de transmisores “Smart” de presión absoluta</b> .....	183
<i>Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 %</i> .....	183
<i>Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.25 %</i> .....	184
<i>Procedimiento de ajuste</i> .....	185
<i>Procedimiento de calibración en otro rango</i> .....	188
<b>Desarrollo de práctica virtual de calibración de transmisores de presión diferencial</b> .....	190
<i>Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 %</i> .....	190
<i>Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.25 %</i> .....	192

	15
<i>Procedimiento de ajuste</i> .....	193
<i>Procedimiento de calibración en otro rango</i> .....	195
<b>Desarrollo de práctica virtual de calibración de transmisores de temperatura</b> .....	200
<i>Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 % y 2 segundos de demora</i> .....	200
<i>Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.05 % y 2 segundos de demora</i> .....	201
<i>Procedimiento de ajuste</i> .....	202
<i>Procedimiento de calibración en otro rango</i> .....	207
<b>Comprobación de la Hipótesis</b> .....	210
<b>Alcances</b> .....	212
<b>Limitaciones</b> .....	212
<b>Capítulo V</b> .....	214
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	214
<b>Conclusiones</b> .....	214
<b>Recomendaciones</b> .....	215
<b>Bibliografía</b> .....	216
<b>Anexos</b> .....	221

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Clasificación de las aplicaciones instruccionales y su relación con la realidad virtual .....	39
<b>Tabla 2</b> Métodos de sintonía para un controlador PI. ....	63
<b>Tabla 3</b> Métodos de sintonía para un controlador PID.....	64
<b>Tabla 4</b> Identificación de los elementos virtuales del Lazo 3 de acuerdo al diagrama P&ID .....	105
<b>Tabla 5</b> Identificación de los elementos virtuales del Lazo 1 de acuerdo al diagrama P&ID. ....	109
<b>Tabla 6</b> Identificación de los elementos virtuales del Lazo 2 de acuerdo al diagrama P&ID .....	112
<b>Tabla 7</b> Identificación de los instrumentos virtuales para la calibración .....	115
<b>Tabla 8</b> Descripción de variables de operación. ....	127
<b>Tabla 9</b> Descripción de variables de operación. ....	145
<b>Tabla 10</b> Teclas para uso del avatar o Player .....	152
<b>Tabla 11</b> Teclas de interacción con el proceso virtual. ....	154
<b>Tabla 12</b> Información asignada a cada transmisor. ....	154
<b>Tabla 13</b> Parámetros de sintonización de acuerdo al método de Cohen Coon.....	157
<b>Tabla 14</b> Parámetros de sintonización de acuerdo al método de Lambda agresivo ....	159
<b>Tabla 15</b> Comparación de equipos virtuales con equipos reales .....	179
<b>Tabla 16</b> Resultados obtenidos para la validación de la Hipótesis .....	211



## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Realidad virtual de escritorio o no inmersiva.....	31
<b>Figura 2</b> Realidad virtual inmersiva.....	32
<b>Figura 3</b> Representación de imagen en tres dimensiones.....	34
<b>Figura 4</b> Estructuras 3D predefinidas.....	35
<b>Figura 5</b> Objeto diseñado con Box Modelling.....	36
<b>Figura 6</b> Objeto modelado aplicando operaciones booleanas.....	37
<b>Figura 7</b> Realidad virtual en la Industria.....	40
<b>Figura 8</b> Ley de Boyle.....	44
<b>Figura 9</b> Ley de Charles.....	47
<b>Figura 10</b> Aplicación de transmisores de nivel tipo DP en tanques abiertos.....	48
<b>Figura 11</b> Aplicación de transmisores de nivel tipo DP en tanques cerrados. ....	49
<b>Figura 12</b> Diagrama de bloques de un transmisor Hart.....	51
<b>Figura 13</b> Calibrador y Documentador de procesos FLUKE 754.....	53
<b>Figura 14</b> Bomba y generador de presión.....	53
<b>Figura 15</b> Módulos de presión serie FLUKE 750P. ....	54
<b>Figura 16</b> Módulos de presión serie FLUKE 750P22. ....	55
<b>Figura 17</b> Pozo de metrología de campo Fluke 9144.....	56
<b>Figura 18</b> Calibraciones en campo. ....	57
<b>Figura 19</b> Calibraciones en taller o banco.....	58
<b>Figura 20</b> Control de procesos asistido por un humano.....	58
<b>Figura 21</b> Control de procesos automático.....	59
<b>Figura 22</b> Respuesta de un proceso autorregulado. ....	60
<b>Figura 23</b> Respuesta de un proceso integrante.....	61
<b>Figura 24</b> Sistema de control realimentado.....	63
<b>Figura 25</b> Logo oficial de Unity.....	65

	18
<b>Figura 26</b> Aplicación desarrollada.....	66
<b>Figura 27</b> Sistema industrial ejemplo de Fluke.....	68
<b>Figura 28</b> Diagrama P&ID de la estación virtual.....	72
<b>Figura 29</b> Esquema de la estación virtual diseñada.....	73
<b>Figura 30</b> Dimensiones del tanque. ....	74
<b>Figura 31</b> Representación gráfica de la función de transferencia de un proceso. ....	75
<b>Figura 32</b> Respuesta del sistema a un escalón unitario .....	76
<b>Figura 33</b> Curva de comportamiento del proceso de nivel .....	77
<b>Figura 34</b> Curva de comportamiento del proceso de temperatura.....	77
<b>Figura 35</b> Medición de nivel mediante presión diferencial en tanque cerrado .....	80
<b>Figura 36</b> Medición de nivel para determinar el LRV.....	83
<b>Figura 37</b> Medición de nivel para determinar el URV .....	84
<b>Figura 38</b> Medición de presión absoluta en tanque cerrado.....	85
<b>Figura 39</b> Medición de presión absoluta para determinar el LRV (tanque vacío) .....	87
<b>Figura 40</b> Medición de presión absoluta para determinar el URV. ....	89
<b>Figura 41</b> Imagen de referencia en MAYA .....	94
<b>Figura 42</b> Modelado 3D a partir de un cubo.....	95
<b>Figura 43</b> Manipulación de los vértices para el modelado 3D. ....	95
<b>Figura 44</b> Suavizado del objeto 3D. ....	96
<b>Figura 45</b> UV editing para texturas. ....	96
<b>Figura 46</b> Modelo 3d Calibrador FLUKE 754. ....	97
<b>Figura 47</b> Exportar a Unity el Modelo 3d Calibrador FLUKE 754. ....	97
<b>Figura 48</b> Pozo de metrología FLUKE 9144.....	98
<b>Figura 49</b> Bomba Manual y módulo de presión absoluta.....	98
<b>Figura 50</b> Módulo de presión diferencial. ....	99
<b>Figura 51</b> Tanque para el proceso de nivel. ....	99

<b>Figura 52</b> Integración de componentes gráficos en el software Unity 3D. ....	100
<b>Figura 53</b> Integración de Assets en la escena. ....	101
<b>Figura 54</b> Vista general de la estación didáctica virtual.....	102
<b>Figura 55</b> Implementación de UI en el escenario 3D.....	103
<b>Figura 56</b> Vista general del sistema virtual de presión absoluta.....	104
<b>Figura 57</b> Ventana de calibración 2D y configuración del Canvas.....	106
<b>Figura 58</b> Creación de pantallas del equipo calibrador Fluke 754 .....	106
<b>Figura 59</b> Configuración del botón de encendido del calibrador.....	107
<b>Figura 60</b> Vista general del sistema virtual de presión diferencial. ....	108
<b>Figura 61</b> Vista general del sistema virtual de presión absoluta.....	111
<b>Figura 62</b> Ventana de calibración 2D .....	113
<b>Figura 63</b> Creación de pantallas para los instrumentos en la ventana 2D.....	114
<b>Figura 64</b> Vista general de los instrumentos virtuales de calibración. ....	115
<b>Figura 65</b> Diagrama de flujo del procedimiento de calibración del transmisor de presión absoluta. ....	123
<b>Figura 66</b> Diagrama de flujo de la programación en Visual Studio del procedimiento de calibración. ....	125
<b>Figura 67</b> Ventana de calibración 2D .....	126
<b>Figura 68</b> Diagrama de flujo del funcionamiento del calibrador virtual.....	128
<b>Figura 69</b> Diagrama de flujo del procedimiento de ajuste en el calibrador virtual. ....	129
<b>Figura 70</b> Mesa con los equipos necesarios para la calibración.....	130
<b>Figura 71</b> Animaciones en apertura y cierre de las válvulas. ....	131
<b>Figura 72</b> Animación del purgado de las tuberías. ....	131
<b>Figura 73</b> Conexión de instrumentos para calibración .....	132
<b>Figura 74</b> Conexión de instrumentos para la calibración del transmisor de presión absoluta en el entorno 3D .....	132
<b>Figura 75</b> Alimentación de bucle habilitada.....	133

<b>Figura 76</b> Calibración del transmisor de presión absoluta.....	134
<b>Figura 77</b> Tabla de puntos de calibración y errores. ....	135
<b>Figura 78</b> Pantalla de configuración de rango del transmisor.....	135
<b>Figura 79</b> Diagrama de flujo del procedimiento de calibración virtual.....	136
<b>Figura 80</b> Animaciones de apertura y cierre de válvulas en el sistema de presión diferencial.....	138
<b>Figura 81</b> Animación del purgado de las tuberías. ....	138
<b>Figura 82</b> Conexión para la calibración del transmisor.....	139
<b>Figura 83</b> Alimentación de bucle habilitada.....	140
<b>Figura 84</b> Tabla de puntos de calibración y errores. ....	141
<b>Figura 85</b> Ventana de ajuste sensor en el URV. ....	141
<b>Figura 86</b> Diagrama de flujo del procedimiento de calibración virtual.....	142
<b>Figura 87</b> Diagrama de flujo de la programación en Visual Studio para la calibración del transmisor de temperatura. ....	144
<b>Figura 88</b> Ventana de calibración 2D.....	146
<b>Figura 89</b> Diagrama de flujo del funcionamiento del calibrador virtual en el procedimiento de temperatura.....	147
<b>Figura 90</b> Diagrama de flujo del procedimiento de Ajuste en el calibrador virtual.....	148
<b>Figura 91</b> Conexión de instrumentos para calibración .....	149
<b>Figura 92</b> Conexión de instrumentos en el entorno 3D .....	149
<b>Figura 93</b> Alimentación de bucle habilitada.....	150
<b>Figura 94</b> Tabla de puntos de calibración y errores. ....	151
<b>Figura 95</b> Pantalla de configuración de rango del transmisor.....	152
<b>Figura 96</b> a) Flecha de interacción, b) Mensajes indicativos. ....	153
<b>Figura 97</b> a) Setup Menu(HART), b) Cambio de rango .....	155
<b>Figura 98</b> Diagrama de Bloques del sistema de control implementado.....	156
<b>Figura 99</b> Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario. ....	158

<b>Figura 100</b> Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario. ....	160
<b>Figura 101</b> Configuraciones para construcción del ejecutable. ....	171
<b>Figura 102</b> Configuraciones en el asistente “Player Settings” .....	172
<b>Figura 103</b> Ejecutable de la aplicación (EVIC-2R) .....	172
<b>Figura 104</b> Comportamiento del proceso de nivel manual dentro de la aplicación .....	174
<b>Figura 105</b> Control del proceso de nivel automático dentro de la aplicación .....	175
<b>Figura 106</b> Respuesta del control de nivel ante una perturbación.....	175
<b>Figura 107</b> Comportamiento del proceso de temperatura manual dentro de la aplicación .....	176
<b>Figura 108</b> Control del proceso de temperatura automático dentro de la aplicación ...	177
<b>Figura 109</b> Evolución del proceso virtual y mediciones en los transmisores .....	178
<b>Figura 110</b> Pantalla de modo de operación del calibrador. a) Equipo real, b) Equipo virtual .....	181
<b>Figura 111</b> Pantalla fuente/medición. a) Equipo real, b) Equipo virtual .....	182
<b>Figura 112</b> Pantalla de resultados de la calibración en el equipo real.....	182
<b>Figura 113</b> Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 1) .....	183
<b>Figura 114</b> Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 2) .....	184
<b>Figura 115</b> Tabla final de resultados en el DPC (Tolerancia=0.25%) .....	185
<b>Figura 116</b> a) Ajuste realizado por usuario 1, b) Ajuste realizado por usuario 2.....	186
<b>Figura 117</b> Curvas de calibración antes y después del ajuste.....	187
<b>Figura 118</b> a) Mediciones sin ajuste, b) Mediciones con ajuste (usuario 1), c) Mediciones con ajuste (usuario 2) .....	188
<b>Figura 119</b> Resultados obtenidos antes y después del ajuste.....	189
<b>Figura 120</b> Mediciones en los equipos antes y después del ajuste .....	189
<b>Figura 121</b> Mediciones en los equipos 3D durante la calibración.....	190
<b>Figura 122</b> Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 1) .....	191
<b>Figura 123</b> Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 2) .....	191

<b>Figura 124</b> Tabla final de resultados en el DPC (Tolerancia = 0.25%) .....	192
<b>Figura 125</b> a) Ajuste realizado por usuario 1, b) Ajuste realizado por usuario 2 .....	193
<b>Figura 126</b> Curvas de calibración antes y después del ajuste.....	194
<b>Figura 127</b> a) Mediciones sin ajuste, b) Mediciones con ajuste (usuario 1), c) Mediciones con ajuste (usuario 2) .....	195
<b>Figura 128</b> Resultados obtenidos antes y después del ajuste.....	196
<b>Figura 129</b> Resultados obtenidos tras un segundo ajuste.....	196
<b>Figura 130</b> Curvas de calibración antes y después del ajuste.....	197
<b>Figura 131</b> Curvas de calibración antes y después del ajuste (zoom).....	198
<b>Figura 132</b> Mediciones en los equipos antes y después del ajuste. ....	199
<b>Figura 133</b> Mediciones en los equipos 3D durante la calibración.....	200
<b>Figura 134</b> Resultados obtenidos en el calibrador virtual .....	201
<b>Figura 135</b> Resultados obtenidos en el calibrador virtual .....	202
<b>Figura 136</b> Resultados después de ajustar (demora de 2 segundos) .....	203
<b>Figura 137</b> Resultados después de ajustar (demora de 20 segundos).....	204
<b>Figura 138</b> Curvas de calibración (mediciones ascendentes) .....	205
<b>Figura 139</b> Curvas de calibración (mediciones descendentes) .....	205
<b>Figura 140</b> Mediciones en los equipos antes y después del ajuste .....	206
<b>Figura 141</b> Mediciones en los equipos virtuales 3D .....	207
<b>Figura 142</b> Resultados obtenidos tras la calibración .....	208
<b>Figura 143</b> Resultados de la calibración después del ajuste (tolerancia de 0.25% y demora de 2 segundos).....	208
<b>Figura 144</b> Curvas de calibración antes y después del ajuste.....	209

## Resumen

Se diseñó e implementó una estación virtual de instrumentación y control de procesos para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart”, en forma de una aplicación ejecutable en computador. En la estación virtual de procesos se integró un tanque cerrado para el llenado y el calentamiento de agua; se controla el nivel del líquido en el tanque y su temperatura mediante controladores PID. Para la medición de las variables físicas involucradas en el proceso se integró un transmisor de presión absoluta, un transmisor de presión diferencial (medición de nivel) y un transmisor de temperatura. Para los procedimientos de calibración y ajuste se integraron los siguientes equipos: un calibrador documentador de procesos, una bomba manual, módulos de presión y un pozo de metrología. El procedimiento de calibración se realizó mediante la comparación de la medida de los transmisores (Instrumento Bajo Prueba IBP) con la medida en el calibrador (Instrumento Patrón IP), y el ajuste mediante un factor de corrección y un desplazamiento en los valores de URV y LRV. Se asignaron modelos dinámicos de primer orden para la evolución en el tiempo de los sistemas y procesos que interactúan dentro del entorno 3D. El escenario virtual y la interacción con el mismo se desarrolló en el software libre Unity 3D. Como plataforma de modelado 3D para el dibujo de los componentes del entorno virtual se utilizó el software Maya de Autodesk.

Palabras clave:

- **ESTACIÓN VIRTUAL DE PROCESOS**
- **CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES**
- **CALIBRACIÓN Y AJUSTE DE TRANSMISORES**
- **ERROR EN LA MEDIDA**

**Abstract**

A virtual instrumentation and process control station was designed and implemented for the development of virtual calibration practices for “Smart” transmitters, in the form of a computer-executable application. In the virtual station of processes, a closed tank was integrated for the filling and the heating of water; the level of the liquid in the tank and its temperature is controlled employing PID controllers. To measure the physical variables involved in the process, an absolute pressure transmitter, a differential pressure transmitter (level measurement), and a temperature transmitter were integrated. For the calibration and adjustment procedures, the following equipment was integrated: a documenting process calibrator, a hand pump, pressure modules, and metrology well. The calibration procedure was performed by comparing the measurement of the transmitters (Instrument Under Test IBP) with the measurement in the calibrator (Reference Instrument IP), and the adjustment through a correction factor and a displacement in the URV and LRV. First-order dynamic models were assigned for the evolution over time of the systems and processes that interact within the 3D environment. The virtual stage and the interaction with it were developed in the free software Unity 3D. Autodesk's Maya software was used as a 3D modeling platform for drawing the components of the virtual environment.

Keywords:

- **VIRTUAL PROCESS STATION**
- **INDUSTRIAL PROCESS CONTROL**
- **CALIBRATION AND ADJUSTMENT OF TRANSMITTERS**
- **MEASUREMENT ERROR**



## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **Planteamiento del problema**

Los estudiantes de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y Electrónica en Automatización no tienen acceso a los laboratorios de la Universidad para la realización de prácticas, debido al estado de emergencia que vive el país por causa de la pandemia mundial producida por el virus COVID 19.

La modalidad de clases virtuales ha obligado al personal docente a buscar plataformas digitales que permitan llevar la enseñanza de las asignaturas de una manera adecuada; sin embargo, para el área de Instrumentación Industrial, específicamente para el desarrollo de prácticas de calibraciones de transmisores “Smart” no existe una herramienta virtual que permita emular los procedimientos que se realizan para llevar a cabo la calibración de un transmisor de procesos de una manera muy semejante a como se lo hace en una práctica real.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga cuenta con un laboratorio para prácticas de Instrumentación Industrial, sin embargo, el desarrollo de prácticas de laboratorio referentes a la calibración de transmisores “Smart” consumen demasiado tiempo, en ocasiones, las horas asignadas de clases son insuficientes, por lo que los estudiantes de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y Electrónica en Automatización muchas veces no logran consolidar los fundamentos para el desarrollo de estos procedimientos.

### **Antecedentes**

En el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos se realiza prácticas de calibración de transmisores “Smart”, en donde el estudiante tiene la oportunidad de conocer, manipular y ejecutar procedimientos de calibración de dichos transmisores de procesos; siendo Instrumentación Industrial una de las asignaturas más importantes de acuerdo al perfil profesional de los estudiantes de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y Electrónica en Automatización.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en la actualidad continúa el período académico en modalidad virtual, debido al estado de emergencia sanitaria que vive el Ecuador a causa de la pandemia mundial producida por el virus COVID 19, llegando al país a mediados del mes de marzo del 2020. Entre las medidas dictaminadas por el gobierno se encuentra la suspensión de actividades académicas de manera presencial, por tal motivo, los estudiantes de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y Electrónica en Automatización no pueden acceder a los laboratorios de la universidad para la realización de prácticas.

En el contexto de la crisis pandémica mundial la virtualización de la educación llega casi con pretensiones universalistas. Al no contar en la mayoría de los sistemas educativos con docentes e instituciones preparadas para implementar una educación a distancia (EaD) en entornos virtuales y dada la complejidad que este desafío demanda, tanto para la educación superior en general, universitaria en particular y para otros niveles del sistema educativo, el gran reto que se presenta es el de la virtualización de la educación en el marco de una cultura digital y un cambio tecnológico en tiempos de pandemia. (Copertari, 2020)

A medida que el costo de los Laboratorios Convencionales (LC) aumenta tanto por la actualización y la complejidad de sus actividades, las tecnologías de información y comunicación (TICs) y la computación han hecho que los Laboratorios Virtuales (LV) evolucionen, en los que con el software y el hardware adecuados el estudiante puede usar y controlar los recursos físicos de un LC, permitiendo una aportación didáctica a la docencia nunca antes vista. (Lorandi & Hermida, 2011)

### **Justificación e importancia**

Las prácticas de calibración de transmisores “Smart” como parte de la asignatura de Instrumentación Industrial es importante para la formación profesional de un estudiante de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y Electrónica en Automatización, que debido a la pandemia no se las puede desarrollar con normalidad. A su vez, en el área de instrumentación no existe una herramienta virtual dedicada al desarrollo de dichas prácticas, por lo que una estación virtual con este fin resulta ser una propuesta acorde a la necesidad presentada.

Al implementar un entorno para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart”, los estudiantes de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación y Electrónica en Automatización pueden realizar los procedimientos de calibración de manera muy semejante a lo que se realiza en una práctica real de laboratorio, sin requerir la presencia física del usuario y eliminando el riesgo que presenta tanto para el estudiante como el docente tutor.

Una vez que las actividades vuelvan a la normalidad, el proyecto desarrollado aún puede seguir siendo utilizado como una herramienta de ayuda para la enseñanza de la asignatura, donde el estudiante pueda ejecutar y culminar una práctica, ya que

muchas veces el tiempo dedicado a los laboratorios resulta corto debido a la cantidad de estudiantes, actividades extracurriculares, decretos gubernamentales u otro tipo de contratiempos.

También, el tutor puede utilizar esta herramienta para dar una inducción previa hacia la práctica que se pretende desarrollar, sin que esto represente un riesgo para los equipos del laboratorio ante una mala utilización de los mismos. A su vez, el estudiante puede acceder a esta herramienta en su hogar como un sistema de entrenamiento antes de ingresar al laboratorio.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

- Diseñar e implementar una estación virtual de instrumentación y control de procesos, para el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.

### ***Objetivos específicos***

- Investigar conceptos teóricos acerca de softwares 3D que permitan el desarrollo de entornos virtuales en el área de ingeniería, así como también de softwares de modelado tridimensional y procedimientos de calibración de transmisores “Smart”.
- Diseñar e implementar una estación virtual en el software Unity 3D considerando las funciones primordiales de un laboratorio de prácticas para la calibración de transmisores “Smart”.
- Realizar la animación e interacción de los procedimientos de calibración de los transmisores de presión absoluta, presión diferencial y temperatura en la

estación virtual mediante la programación en el software de desarrollo 3D.

- Simular un controlador en lazo cerrado para el control de la estación virtual e implementación de una Interfaz de Usuario que permita la interacción con el proceso virtual.
- Elaborar guías de prácticas virtuales para la calibración de transmisores “Smart” en área de Instrumentación Industrial y desarrollar pruebas de funcionamiento del sistema virtual.

### **Variables de la investigación**

#### ***Variable independiente***

Estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales

#### ***Variable dependiente***

Desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart”

### **Hipótesis**

El diseño e implementación de una estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales, permitirán el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo se desarrolla la fundamentación teórica acerca de: entornos 3D, realidad virtual, plataformas de desarrollo para los entornos 3D, realidad virtual en la industria y en la educación, y el motor de desarrollo gráfico Unity 3D. Además, se trata temas de control de procesos e instrumentación industrial, específicamente de transmisores industriales “Smart”, la calibración y el ajuste de los mismos.

#### **Entornos 3D**

En la última década han aparecido una serie de entornos tecnológicos avanzados, especialmente idóneos para el desarrollo y la evaluación de las competencias (Redecker, 2013). Uno de ellos son los entornos virtuales 3D, también denominados, aunque con matices diferentes, metaversos o entornos virtuales multiusuario (MUVEs) (De Freitas, 2008). Este tipo de entornos 3D permite la interacción con otros seres, así como la manipulación de objetos que existan en él (Beck, 2009). Según (Atkins, 2009) se trata de entornos inmersivos, interactivos, personalizables, accesibles y programables, con numerosas potencialidades para prácticas e investigaciones educativas (Esteve, 2013). Existen dos tipos de entornos 3D:

#### ***Realidad Virtual de Escritorio***

También llamada realidad virtual no inmersiva, se simula un mundo real o imaginario en un formato que es mostrado en pantalla.

Según (Fällman, 1999) la realidad virtual de escritorio o no inmersiva es la forma más común y menos costosa de hacer RV, por lo general está conformada simplemente

de una computadora de escritorio con características comunes, capacidad para reproducir contenidos multimedia o simulaciones que se pueden explorar a través del teclado, el mouse, u joystick o una pantalla táctil. En la Figura 1 observamos un claro ejemplo de lo que es una realidad virtual de escritorio o no inmersiva.

### **Figura 1**

*Realidad virtual de escritorio o no inmersiva.*



*Nota.* Tomado de (Klaudia Grechuta, 2019)

### ***Realidad Virtual Inmersiva***

Según (Fällman, 1999) la realidad virtual inmersiva está constituida por un par de pantallas de visualización tridimensional montadas en un casco sobre la cabeza del usuario, que le permiten estar aislado del mundo físico exterior; en esta categoría también entran las llamadas cuevas de realidad virtual, las cuales son una sala en la que las paredes rodean al usuario, producen las imágenes tridimensionales a través de diversos tipos de proyección, y ofrecen la sensación de inmersión total.

En estos ambientes inmersivos también es necesario utilizar el hardware como guantes, trajes y sistemas de sensores que ayuden al usuario a interactuar con el entorno y sus elementos, tal como se muestra en la Figura 2.

## **Figura 2**

*Realidad virtual inmersiva*



*Nota.* Tomado de (Reality, 2017)

La realidad virtual ha llegado a la actualidad con el fin de mejorar el desempeño de las personas en las actividades laborales que realizan, es por eso que se desarrollan aplicaciones con el fin de capacitar al personal laboral dentro de varias áreas como son la salud, la ingeniería, e incluso para entrenamiento militar. Con esto se busca que el presente proyecto ayude a desarrollar aptitudes a los estudiantes para la calibración y ajuste de transmisores “Smart” dentro del área de instrumentación industrial, utilizando la realidad virtual de escritorio o no inmersiva.

## **Plataformas de desarrollo de entornos 3D**

En lo que al desarrollo de entornos virtuales se refiere, lo que se les exige a estas herramientas es poder crear los objetos 3D haciendo uso de polígonos,



generalmente triángulos; colorearlos, mejorar su aspecto con el uso de texturas y, en caso necesario, construir animaciones para mostrar el comportamiento de los objetos dentro del entorno virtual.

Adicionalmente, es deseable que estas herramientas guarden los objetos 3D en algún formato estándar que sea fácilmente accesible para otras herramientas, ya que, aunque es posible emplear utilidades que conviertan un formato gráfico en otro, los resultados no son siempre los deseados. (Gonzalo Méndez, 2005)

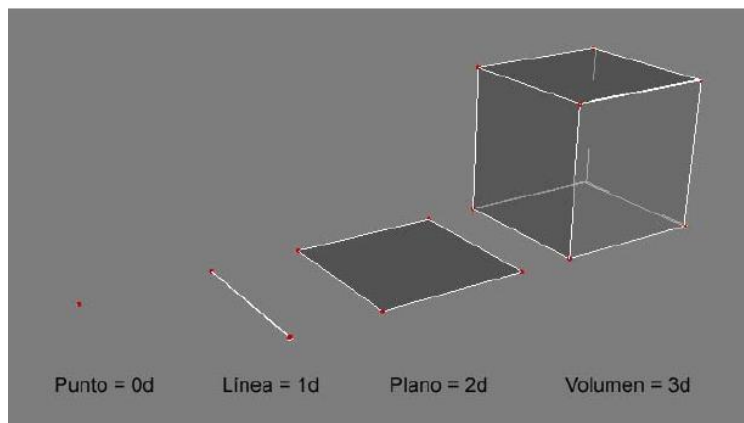
Para desarrollar un entorno 3D es necesario que el software de desarrollo tenga ciertas características adicionales, las cuales permitan hacer animaciones y generación de scripts, es por eso que, la plataforma en que se desarrolla el entorno con el que va a interactuar el usuario es unity3D.

### **Gráficos 3D**

Los gráficos en tres dimensiones, son aquellos que utilizan los tres planos para ubicar en un objeto cualquiera en el espacio, tomando en cuenta las tres dimensiones x, y, z. El termino gráficos 3D por computadores se refiere a trabajos de arte gráfico que son creados con ayuda de computadoras y programas especiales. En general, el termino puede referirse también al proceso de crear dichos gráficos, o el campo de estudio de técnicas y tecnologías relacionadas en los gráficos tridimensionales. (Gahan, 2009)

### Figura 3

*Representación de imagen en tres dimensiones.*



*Nota.* Tomado de (Pérez, 2014)

Los gráficos 3D se originan de un proceso de cálculos matemáticos sobre entidades geométricas tridimensionales para simular que una imagen tenga las tres dimensiones, por lo que, para su creación se necesitan programas de computadora como Maya, 3D Studio Max, Lightware 3D, Softimage XSI, Bryce, POV-Ray, Blender entre otros, y se siguen estas tres fases básicas:

- Modelado.
- Composición de la escena
- Rénder (creación de la imagen final)

#### **Modelado**

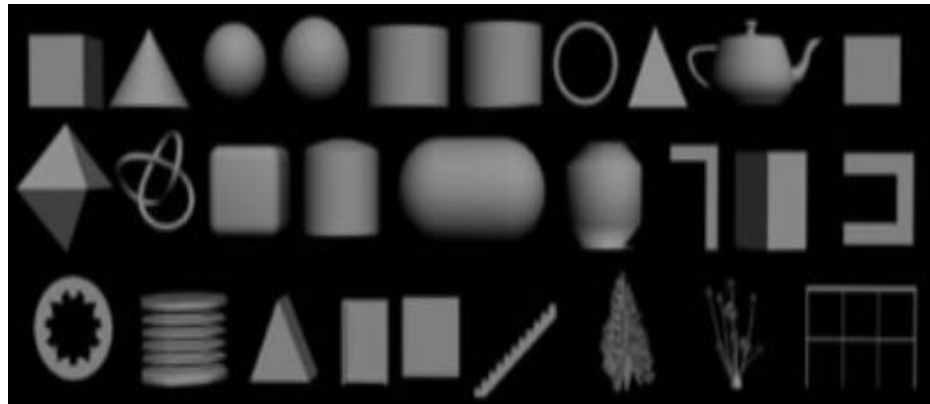
Consiste en utilizar objetos poligonales (esferas, cubos, conos), a los cuales se les pueda modificar la superficie o propiedades del material (color, difusión, transparencia, opacidad, luminosidad, especularidad, texturas mapas de relieve, etc.) y de esta manera ir construyendo el modelo. (Santillán Romero, 2014)

El 3D es una representación de coordenadas, las cuales conforman objetos envueltas por unas texturas. Por lo tanto, primero se deben construir un modelo, para ello hay técnicas de modelado comunes, entre las cuales se encuentran:

- Estructuras Predefinidas: Son aquellas las cuales vienen armadas por defecto en el sistema. Existen tres tipos:
  - a. Primitivas: Esferas, cilindros, cubos, anillo, cono, plano, pirámides.
  - b. Primitivas extendidas: Nudo toroide, caja redondeada, cilindro redondeado, tanques, capsulas, prisma, forma L o C.
  - c. Librerías: son formas armadas como pueden ser; puertas, ventanas, árboles, escaleras, entre otros.

#### Figura 4

*Estructuras 3D predefinidas*



*Nota.* Tomado de (Pérez, 2014)

Todas estas estructuras sirven para modelar objetos en 3D o escenas más complejas, las cuales permiten hacer más realista el entorno virtual con el fin de engañar al ojo humano.

- **Box Modelling:** Comprende el modelado de una figura compleja a través de una caja. Empleando modificadores de mallas “Edith Mesh” se puede ir extendiendo la caja convirtiéndola en otro objeto.

### **Figura 5**

*Objeto diseñado con Box Modelling.*

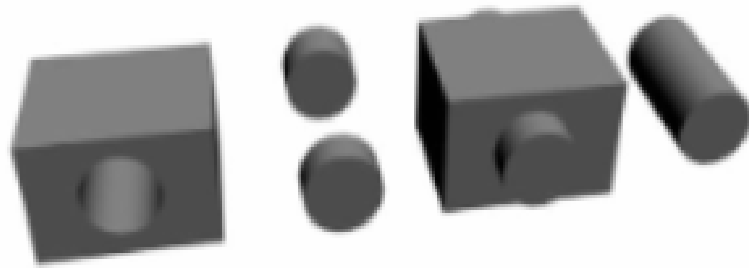


*Nota.* Tomado de (Pérez, 2014)

- **Operaciones Booleanas:** Consiste en tomar dos mallas y aplicarles una de tres operaciones booleanas disponibles:
  - a. **Resta:** resta de dos figuras A-B o B-A
  - b. **Intersección:** da como resultado sólo lo que está tocándose de ambas figuras.
  - c. **Unión:** Funde figuras creando una nueva figura.

**Figura 6**

*Objeto modelado aplicando operaciones booleanas.*



*Nota.* Tomado de (Pérez, 2014)

***Composición de la escena***

Consiste en la distribución de objetos, cámaras, luces y otros elementos que se colocan en la escena (espacio que observa el usuario), ya sea para producir una imagen estática o una animación. Si es una animación, la descripción del objeto debe variar en algo con respecto al tiempo como: cambio de cámaras, objetos, forma, luces, etc.

Actualmente las herramientas facilitan la creación de movimientos compilados en la escena, las cuales permiten utilizar la interpolación en dónde los cuadros entre keyframes son generados automáticamente, es decir en lugar de corregir la posición, tamaño o rotación del objeto en cada cuadro de la animación, sólo se necesita marcar algunos cuadros clave. (Guinot, 2015).

***Rénder***

Se denomina al proceso final de generar una imagen 3D o una animación a partir de la escena creada, como al tomar una foto, o en el caso de la animación filmar una escena de la vida real.

Requiere gran capacidad de procesamiento que, con el transcurrir de los años se ha ido mejorando, por lo que las escenas son cada vez más realistas, con nuevos efectos cinematográficos, técnicas para simular efectos de origen natural como la interacción de la luz con la atmosfera o el humo. (Lerache, 2014)

Al final, se trata de usar estas herramientas con el objetivo de alcanzar mayor realismo en todas las representaciones, de esta forma la simulación tiende a niveles de perfección.

### **¿Por qué utilizar Realidad Virtual en la Educación?**

La Realidad Virtual se está consolidando como una herramienta muy útil para la enseñanza, ya que tienen capacidad de proveer entornos inmersivos, multisensoriales y creíbles. La utilización de las tecnologías de Realidad Virtual en la educación trae beneficios como:

- Una información más interactiva y visual, la cual mejora el proceso de aprendizaje entre el contenido y el estudiante.
- La creación de nuevas profesiones para implementar aplicaciones y nuevas tecnologías.
- La destrucción de la barrera tiempo, lugar y espacio para el aprendizaje
- La percepción del entorno de aprendizaje entendible y mejorado.
- Un aprendizaje normal
- El educando aumenta el interés por aprender. (Martín, 2020).

Según (Taichi, 1997) hace una clasificación de las aplicaciones instruccionales y describe su relación con las técnicas de enseñanza que podrían apoyar.

La Tabla 1 muestra la relación con tales técnicas y con la realidad virtual.

**Tabla 1**

*Clasificación de las aplicaciones instruccionales y su relación con la realidad virtual.*

<b>Tipo de Aplicación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Técnicas de Enseñanza que apoyan</b>	<b>Realidad Virtual</b>
<b>Tutorial</b>	Interrogan al usuario con preguntas y, según la respuesta interrogan al usuario nuevamente.	Ejercitación repetida y constante. Modificación de la conducta. (Permiten medir el progreso más fácilmente ya que el estudiante y el profesor saben dónde están ubicados) Aprendizaje en base a prerrequisitos.	Un mundo virtual donde se muestran las características físicas y químicas de los elementos. Cambio de niveles de complejidad en el mundo virtual, con mayor detalle, más información, y relaciones más complejas.
<b>Exploratoria</b>	Los estudiantes dirigen sus propios aprendizajes a través de un proceso de descubrimiento o mediante descubrimientos guiados.	Estudio de Casos (El estudiante analiza cuidadosamente sus decisiones antes de sintetizar una solución, para ello usa su propio conocimiento) Experimentación en laboratorio	Mundos Virtuales donde el alumno puede modificar las características de los objetos y/o procesos de acuerdo a sus conocimientos o criterios. Laboratorios virtuales de Anatomía, Química, Física... donde pueda llevar a cabo sus experimentos.
<b>Generadora</b>	Los estudiantes tienen el control para crear sus propios mundos. (En el proceso de crear un libro el estudiante necesita planificar cuidadosamente su organización literaria, así como también su aspecto).	Estudio de casos (Planificar la generación de un libro en base al análisis de procesos tradicionales). La técnica de juego de roles es apoyada cuando el estudiante crea cosas ficticias, por ejemplo, puede asumir el rol de un pintor si el generador es un graficador. El aprendizaje casual puede ocurrir porque en el proceso de generación de un libro sobre la WEB, los estudiantes pueden aprender HTML.	Generadores de Mundos Virtuales.

*Nota.* Tomado de (Taichi, 1997)

La aplicación para la calibración de transmisores “Smart” es constituida como una aplicación de tipo exploratoria ya que el estudiante debe aplicar sus propios conocimientos para lograr el objetivo planteado. Es decir que el estudiante deberá analizar sus decisiones antes de ejecutar una solución.

### **Realidad Virtual en la Industria**

La realidad virtual se encuentra en la actualidad en desarrollo dentro de la Industria. Esta nueva tecnología permitirá a los trabajadores tener información acerca de un proceso industrial, mejorar la toma de decisiones y procedimientos de trabajo.

Los operadores podrán instruirse y conocer de mejor manera el funcionamiento de un proceso industrial gracias a la realidad virtual, de esa manera se podrán realizar varias actividades reduciendo el riesgo de accidentes como la reparación de dispositivos, calibración de instrumentos o simplemente para la verificación del proceso industrial aumentando la eficiencia y seguridad.

### **Figura 7**

*Realidad virtual en la Industria.*



*Nota.* Tomado de (Altertecnica, 2020)



Aunque todavía están por ver todas las posibilidades de la realidad virtual, actualmente destacan cuatro posibles áreas de aplicación:

### ***Optimización de diseños para el prototipado***

La industria del automóvil es un gran ejemplo de ello. Normalmente, en la fase de prototipado, lo que se venía haciendo era fabricar el modelo que posteriormente se iba a comercializar, pero con calidades inferiores para simplemente analizar su comportamiento.

La Realidad Virtual desliga a los fabricantes de esta costosa operación, permitiéndoles crear simulaciones sin invertir en esa creación física del prototipo. (Altertecnica, 2020)

### ***Diseño y montaje de instalaciones***

Las aplicaciones de Realidad Aumentada permiten, por ejemplo, mejorar tareas destinadas a la instalación de maquinaria industrial.

Gracias a la información extra de esta metodología, los técnicos pueden conocer si un proyecto se adaptará o no a las características, la morfología o el tamaño de la fábrica. (Altertecnica, 2020)

### ***Operaciones de mantenimiento***

Gracias a esta tecnología puede no solo acceder a los manuales detallados, sino también recibir indicaciones desde el propio dispositivo, además de reconocer a la máquina en cuestión, y localizar el problema para indicarle al operario de qué forma proceder para encontrar una solución.

Aunque esto no es aplicable únicamente a los trabajos de reparación, sino también en las rutinas de control, que eviten precisamente las averías gracias al mantenimiento preventivo. (Altertecnica, 2020)

### ***Formación con Realidad Virtual***

Cada vez es más común aplicar la realidad virtual en las simulaciones para el entrenamiento de las situaciones de riesgos, enseñando a los trabajadores a seguir los protocolos de seguridad y a emplear los equipos, sin ponerlos en riesgo en ningún caso.

Con la realidad virtual se podrá formar técnicos especializados, permitiendo a quienes se forman, interactuar con las máquinas y su funcionamiento. (Altertecnica, 2020).

### **Instrumentación Industrial**

Según (Marlleis del Valle Gutiérrez Hinestroza, 2017), la optimización de procesos industriales hace de la instrumentación el conjunto de herramientas que sirven para la medición, la conversión o transmisión de las variables. Tales variables pueden ser químicas o físicas necesarias para iniciar, desarrollar y controlar las diversas etapas que involucran a los yacimientos, considerando que la instrumentación es usada en operaciones de la planta.

Los instrumentos industriales surgen con la necesidad de reemplazar las acciones manuales de los operadores que son realizadas en los procesos industriales, con el fin de que, los procesos sean automatizados y tengan un control más eficiente.

El avance de la tecnología ha permitido desarrollar instrumentos industriales para las medidas de variables físicas, es por ello que se debe conocer los términos de la

instrumentación industrial y de la variable física, los cuales ayudan a entender de mejor manera esta ciencia.

### **Transmisores Industriales**

Los transmisores industriales en el campo de la instrumentación y control son instrumentos los cuales captan señales del proceso y transmiten a distancia en forma de una señal de control (por ejemplo 4 a 20 mA). Los transmisores que se utilizan para el proceso de calibración en el presente proyecto son los siguientes:

#### ***Transmisores de presión absoluta***

Los transmisores de presión absoluta miden la presión con respecto a una cámara de referencia (cercana al vacío absoluto). La ventaja más evidente de un transmisor de presión absoluta radica en que siempre mide en relación con la misma presión de referencia (el vacío absoluto); por lo tanto, no se ve afectado por los cambios en la presión atmosférica y, además los cambios de temperatura influyen en menor medida en su funcionamiento. (HBK, 2020)

En el proceso industrial virtual realizado para el presente proyecto se considera un tanque cerrado, con líquido en su interior de volumen variable y sometido a cierta temperatura; es por ello que se aplica ciertos conceptos y leyes de los gases ideales para obtener los rangos de medición del transmisor de presión absoluta.

**Relación presión-volumen: Ley de Boyle.** En el siglo XVII, Robert Boyle estudió en forma sistemática y cuantitativa el comportamiento de los gases. En una serie de experimentos, Boyle analizó la relación que existe entre la presión y el volumen de una muestra de gas.

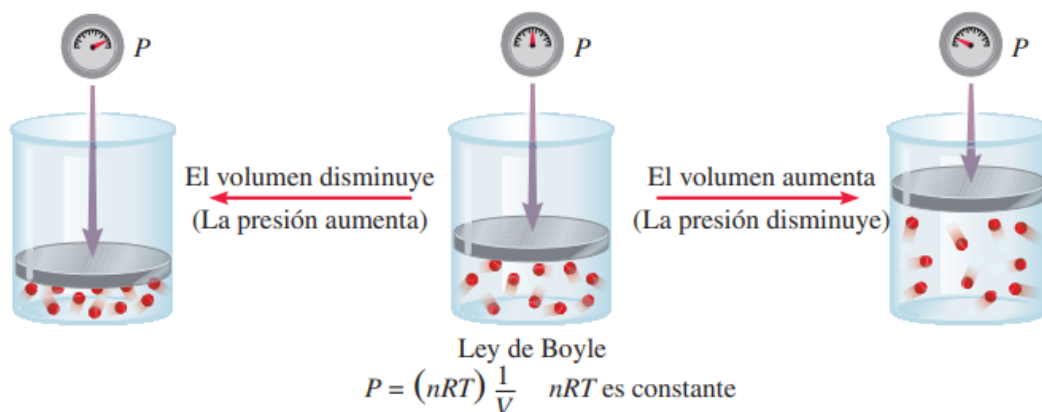
Boyle pudo evidenciar que existe una relación entre la presión y el volumen de un gas a temperatura constante, a medida que la presión aumenta, el volumen disminuye. Por lo contrario, si la presión aplicada disminuye, el volumen ocupado por el gas aumenta. Esta relación se conoce como la Ley de Boyle, según la cual la presión de una cantidad fija de un gas a temperatura constante es inversamente proporcional al volumen de un gas. (Chang, Leyes de los gases, 2010)

$$P \propto \frac{1}{V} \quad (1)$$

### Figura 8

*Ley de Boyle.*

Incremento o disminución del volumen de un gas a una temperatura constante



*Nota.* Tomado de (Chang, Relación presión volumen Ley de boyle, 2010)

Aunque los valores individuales de presión y volumen pueden variar mucho para una muestra dada de un gas, siempre que la temperatura permanezca constante y la cantidad de gas no cambie,  $P$  multiplicada por  $V$  siempre será igual a la misma constante. Por consiguiente, para una muestra de un gas bajo dos conjuntos de condiciones distintas a temperatura constante tenemos:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (2)$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son los volúmenes sometidos a las presiones  $P_1$  y  $P_2$ , respectivamente. (Chang, Relación presión volumen: ley de Boyle, 2010)

**Relación temperatura-volumen: Ley de Charles y de Gay Lussac.** La ley de Boyle depende de que la temperatura del sistema permanezca constante. Pero si la temperatura cambia afectará al volumen y presión de un gas. Los estudios de Charles y de Gay Lussac demostraron que, a una presión constante, el volumen de una muestra de gas se expande cuando se calienta y se contrae al enfriarse (Figura 9). Las relaciones cuantitativas implicadas en estos cambios de temperatura y volumen de gas resultan ser notablemente congruentes. (**Chang, Relación temperatura-volumen: ley de Charles y de Gay-Lussac, 2010**).

La dependencia del volumen de un gas con la temperatura, se da por:

$$V \propto T \quad (3)$$

$$V = kT \quad (4)$$

$$\frac{V}{T} \propto k \quad (5)$$

Donde  $k$  es la constante de proporcionalidad. La ecuación anterior se conoce

como Ley de Charles, la cual establece que el volumen de una cantidad fija de gas manteniendo a presión constante es directamente proporcional a la temperatura absoluta del gas. Tal como se hace para la relación presión – volumen a temperatura constante, se puede comparar dos condiciones de volumen-temperatura para una muestra dada de un gas a presión constante.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (6)$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son los volúmenes de los gases a las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  (ambas en Kelvin), respectivamente.

Otra forma de la ley de Charles muestra que, para una cantidad de gas a volumen constante, la presión del gas es directamente proporcional a la temperatura.

$$P \propto T \quad (7)$$

$$P = k_1 T \quad (8)$$

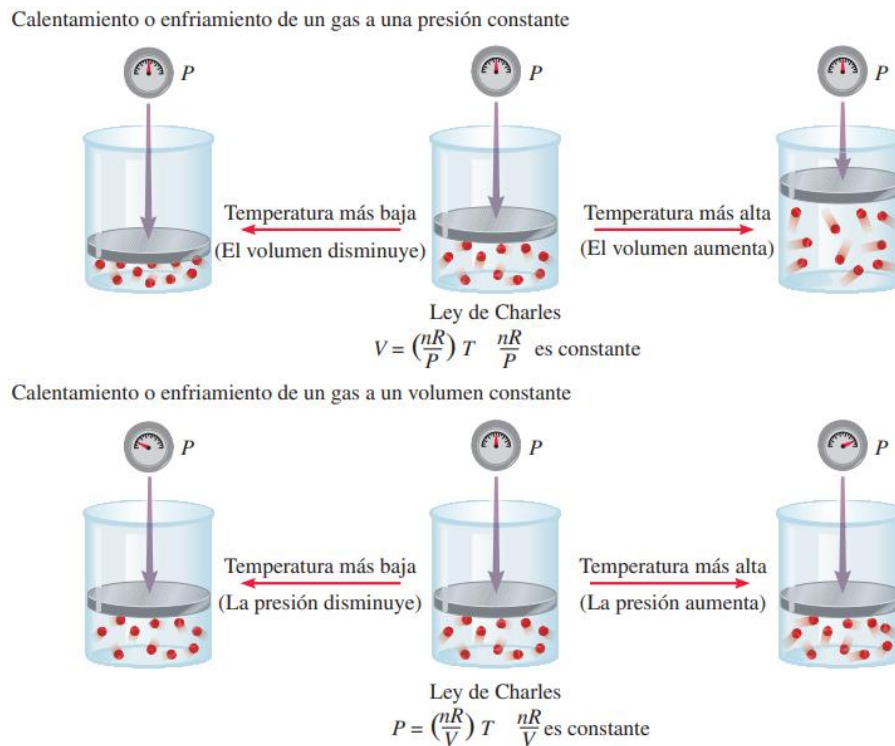
$$\frac{P}{T} \propto k_1 \quad (9)$$

Con la ecuación anterior podemos deducir las dos condiciones de presión-temperatura para una muestra dada de un gas a volumen constante.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (10)$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son las presiones del gas a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

(Chang, Relación temperatura-volumen: ley de Charles y de Gay-Lussac, 2010)

**Figura 9***Ley de Charles.*

*Nota. Tomado de (Chang, Leyes de los Gases, 2010)*

### ***Transmisores de presión diferencial***

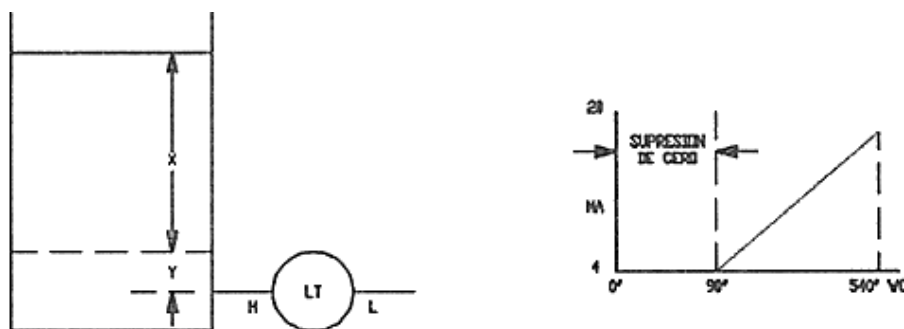
Los transmisores de presión diferencial son utilizados para medir el nivel de líquido de un tanque, es decir miden presión hidrostática. Esta presión es igual a la altura del líquido sobre la conexión o toma de proceso, multiplicada por la gravedad específica del líquido y es independiente del volumen o forma del recipiente. (Ennys Amaya Isea, Aplicación de transmisores de nivel, 1997) .

**Aplicación para Tanques Abiertos.** Según (Ennys Amaya Isea, *Aplicación para tanques abiertos*, 1997), en tanques abiertos un transmisor de presión diferencial instalado cerca del fondo del tanque medirá la presión correspondiente del líquido sobre él.

La conexión se hace siempre en el lado de alta presión del transmisor. El lado de baja presión se ventea a la atmósfera. Si el transmisor se encuentra instalado por debajo del valor inferior del rango de nivel deseado entonces se procede hacer una supresión de cero. En la imagen se muestra cómo debe instalarse el transmisor de presión diferencial en un tanque abierto y la supresión de cero si lo requiere.

### Figura 10

*Aplicación de transmisores de nivel tipo DP en tanques abiertos.*



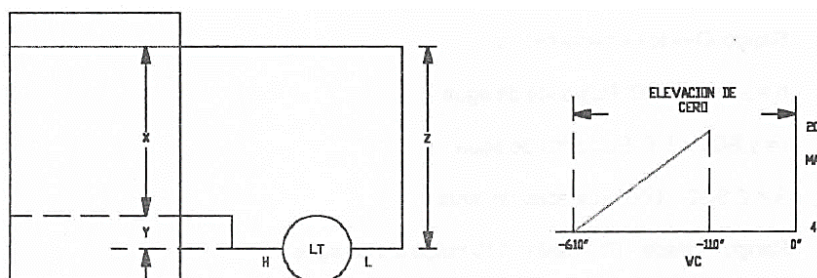
*Nota.* Tomado de (Ennys Amaya Isea, *Aplicación para tanques abiertos*, 1997)



**Aplicación para Tanques Cerrados.** Según (Ennys Amaya Isea, *Aplicación para Tanques Cerrados*, 1997), en tanques cerrados la presión del líquido afecta la presión medida en el fondo. La presión en el fondo del tanque es igual a la altura del líquido multiplicado por la gravedad específica del líquido, más la presión en el tanque. Para medir el nivel real, la presión del tanque debe restarse a la medición. Esto se hace colocando una toma de presión en el tope del tanque y conectándola al lado de baja presión del transmisor. De este modo, la presión del tanque se aplica igualmente en los lados de alta y baja presión del transmisor. La presión que resulta es proporcional a la altura del líquido multiplicada por la gravedad específica.

### Figura 11

*Aplicación de transmisores de nivel tipo DP en tanques cerrados.*



*Nota.* Tomado de (Ennys Amaya Isea, *Aplicación para Tanques Cerrados*, 1997)

El gas que está sobre el líquido en el recipiente puede condensarse a la temperatura y presión de operación, la tubería de la toma de baja presión del transmisor se llenará lentamente de líquido produciendo error en la medición. Para eliminar este error potencial, la tubería se llena con un fluido de referencia. El fluido de referencia producirá una presión sobre el lado de baja presión del transmisor, haciendo necesario realizar una elevación de cero con se muestra en la figura anterior. (Ennys Amaya Isea, 1997)

### ***Transmisores de temperatura***

Un transmisor de temperatura es aquel el cual permite conocer el valor de una temperatura medida como una señal analógica de 4 a 20 mA, la cual es enviada a un dispositivo de control para que pueda ser monitoreada. Este transmisor industrial está compuesto de un circuito electrónico el cual adquiere la señal del proceso, se acondiciona dicha señal con amplificadores, filtros y convertidores de señal. (Córdoba Antonio, 2010).

Los transmisores de temperatura pueden reducir el ruido de RFI y EMI que puede interferir con las señales producidas por sensores de temperatura y mejorar la exactitud de las mediciones. Mientras que los sistemas DCS y PLC graban mediciones sobre todo el rango del sensor, un transmisor de temperatura puede ser calibrado a cualquier rango concreto dentro de sus capacidades. La limitación de las mediciones a un rango estrecho mejora la precisión. (Omega, 2020)

### **Calibración de transmisores**

El término calibración hace referencia a un conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre valores de las magnitudes que indica un instrumento de medición o un sistema de medición, o valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes determinados por medio de los patrones. (Vargas, 2006)

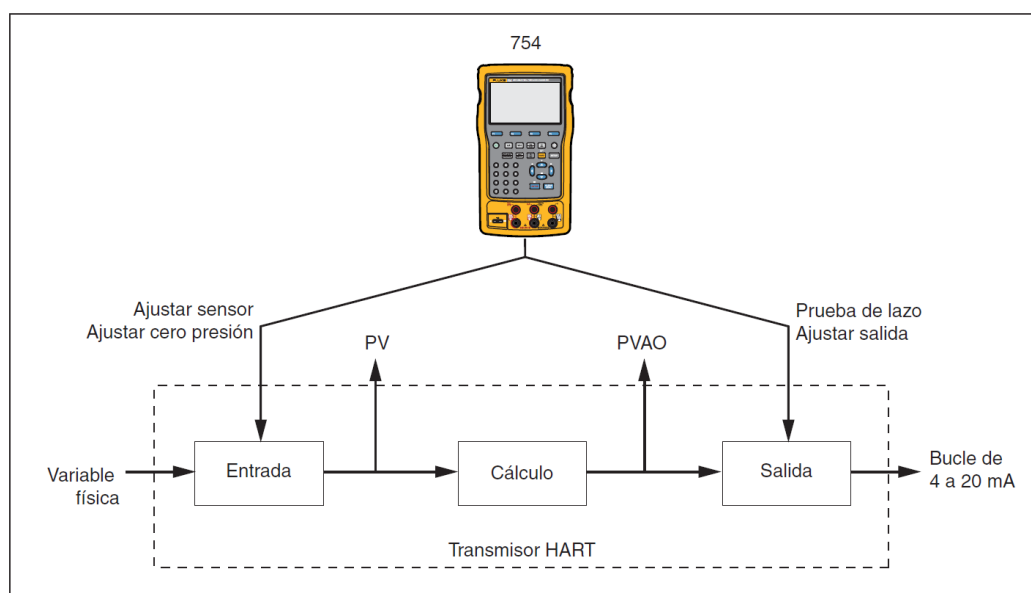
La calibración cuantifica el error en la indicación del instrumento de medición mediante la comparación con un patrón de referencia y luego se verifica que este error encontrado sea menor al máximo permitido especificado, por lo general, en una norma que aplica al instrumento a calibrar. (Vargas, 2006)

### Calibración Hart

Un transmisor analógico realiza la conversión eléctrica del parámetro físico medido a una corriente de lazo de 4 a 20 mA en una etapa. Un transmisor HART tiene los tres bloques de la Figura 12. (Corporation, 2011)

**Figura 12**

*Diagrama de bloques de un transmisor Hart.*



*Nota.* Tomado de (Fluke, Diagram de bloques de un transmisor HART, 2011).

En los transmisores HART puede ser necesario examinar y ajustar el bloque de entrada, salida, o ambos. Es decir, si se desea que la variable primaria PV sea correcta al ser leída por el dispositivo anfitrión, en este caso debe calibrar la etapa de entrada. Por otro lado, si exige que el valor de la salida de corriente de 4 a 20mA refleje exactamente lo que el bloque de entrada este midiendo, en este caso debe calibrar tanto la etapa de entrada como la salida. Los ajustes para los transmisores HART depende de cada transmisor, hay algunos los cuales poseen ajustes del sensor, es decir

ajustan el bloque de entrada, y en los ajustes de salida se configura el bloque de salida, todo esto se puede realizar con el calibrador 754 en el menú servicio por medio de su comunicación HART. Para los transmisores de presión se debe realizar el ajuste adicional Ajuste Cero Presión, que es lo mismo que establecer el sensor inferior a cero. (Fluke, Ajuste del modo Hart, 2011)

### ***Calibración de transmisores “Smart” de presión absoluta***

La calibración de transmisores “Smart” se puede realizar con dispositivos diseñados específicamente para realizar estas acciones. Estos dispositivos llevan el nombre de Calibradores de procesos entre los más conocidos están los calibradores FLUKE; el proyecto de calibración virtual de transmisores “Smart” está basado en calibrador documentador de procesos DPC FLUKE 754.

Para la calibración y el ajuste de transmisores “Smart” de presión absoluta se utiliza los siguientes instrumentos:

- Calibrador Documentador FLUKE 754: Es el dispositivo el cual permite configurar de forma rápida los procedimientos potentes, automatizados de calibración para transmisores lineales. Las rutinas de calibración programables permiten crear y ejecutar procedimientos automáticos de valor encontrado/valor dejado para lograr calibraciones rápidas y coherentes. Está integrada la función de comunicación HART, esta herramienta confiable y resistente es ideal para la calibración y el mantenimiento de dispositivos HART y otros instrumentos.

(Fluke, Fluke, 2018)

**Figura 13**

*Calibrador y Documentador de procesos FLUKE 754.*



*Nota.* Tomado de (Fluke, Fluke, 2018).

- Bomba manual de presión: Las bombas de presión para aplicaciones de calibración y verificación son equipos que permiten al operador generar y controlar la presión para estabilizar la presión en el punto de medida requerido. (FemtoCal, 2021). Una de las bombas más comunes de Fluke es la 700PTP-1, que puede generar una presión de hasta 600 psi.

**Figura 14**

*Bomba y generador de presión.*



*Nota.* Tomado de (FemtoCal, 2021).

- Módulo de presión FLUKE 750P07: Los módulos de presión ideales para habilitar el medidor, el diferencial y la medición de presión absoluta con los calibradores de procesos. (Fluke, 2021).

### Figura 15

*Módulos de presión serie FLUKE 750P.*



*Nota.* Tomado de (Fluke, 2021).

### ***Calibración de transmisores “Smart” de presión diferencial***

Para la calibración y el ajuste de los transmisores “Smart” de presión diferencial se utilizan los mismos instrumentos que en el apartado anterior con la diferencia que el módulo de presión FLUKE 750P22 es para la medida de presión diferencial:

- Módulo de presión FLUKE 750P22: Es una serie de los módulos de presión FLUKE 750P pues estos permiten medir la presión diferencial. Los módulos de presión diferencial tienen dos conectores de presión y miden la diferencia entre la presión aplicada al conector de presión alta y la aplicada al conector de presión baja.

**Figura 16**

*Módulos de presión serie FLUKE 750P22.*



*Nota.* Tomado de (Fluke, 2021).

***Calibración de transmisores “Smart” de temperatura***

Para la calibración y el ajuste de los transmisores “Smart” de temperatura se utiliza el calibrador FLUKE 754 y un pozo de metrología el cual sirve para generar temperatura y desarrollar el procedimiento de calibración:

- Pozo de metrología FLUKE 9144: Los hornos de calibración para trabajo en campo de la serie 9140 amplían sus elevadas prestaciones al entorno de los procesos industriales aumentando la portabilidad, velocidad y funcionalidad sin comprometer las prestaciones de medida. Estos calibradores industriales de lazo de temperatura son idóneos para realizar calibraciones de transmisores de lazo, calibraciones de comparación o simplemente la comprobación de termopares. (Fluke, Fluke, 2021). El rango de trabajo de este equipo es de -25 a 660 °C.

**Figura 17**

*Pozo de metrología de campo Fluke 9144.*



*Nota.* Tomado de (Fluke, Fluke, 2021).

**Calibraciones in situ**

Si no se puede retirar el instrumento de su lugar de instalación, se debe realizar la calibración en campo. La calibración en campo asegura que el instrumento está calibrado en las mismas condiciones de campo real en la que también se utiliza. La calibración en campo puede ser una manera más eficaz para calibrar, en el supuesto caso que las instalaciones dificulten el desmontaje de los instrumentos de campo. Cuando existen muchos instrumentos industriales instalados en campo, hay equipos de calibración portátil disponibles (presión, señales eléctricas, comunicadores HART, Profibus, Fieldbus Foundation). La calibración de campo en la actualidad es el método comúnmente más utilizado. (Beamex, 2016)



**Figura 18**

*Calibraciones en campo.*



*Nota.* Tomado de (Beamex, 2016)

**Calibraciones en banco**

Si calibra instrumentos durante la fase de puesta en marcha, cuando los instrumentos aún no están instalados en campo, es muy conveniente calibrar los instrumentos en un taller o laboratorio de calibración dedicado. Es más fácil conseguir una mejor incertidumbre total en un laboratorio que en el campo. Esto se logra mediante equipos estacionarios de calibración de alta precisión y las condiciones ambientales controladas y procesos en el laboratorio. Si utiliza repuestos de cambio frecuente, o desea calibrar los dispositivos de repuesto en almacén, antes de instalarlos en el campo, es muy práctico hacerlo en un laboratorio. Si desea emitir certificados de calibración, es más fácil de conseguir la acreditación para la calibración realizada en un laboratorio/taller de calibración, que en el campo. A veces, la condición real de campo puede ser muy difícil o duro para realizar la calibración, y en ese caso es mejor que sea en el laboratorio. Cuando se quiere calibrar el equipo de calibración patrón portátil usando el equipo estándar de referencia, esta calibración se hace a menudo en el laboratorio. (Beamex, 2016)

### Figura 19

*Calibraciones en taller o banco.*



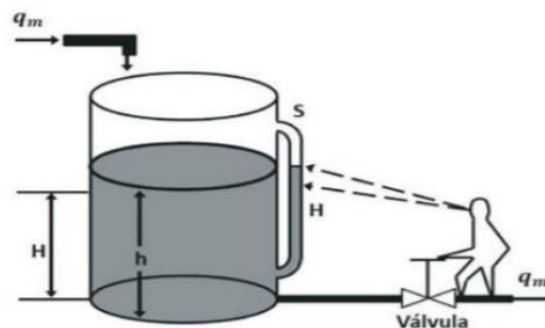
*Nota.* Tomado de (Beamex, 2016)

### Control de procesos

El control de procesos es una rama de los sistemas de control, dentro de los cuales están los sistemas de control manuales o automáticos. En la Figura 20 se puede observar que, para que exista una respuesta del sistema, interviene el hombre sobre el elemento de control. Es decir, la acción del hombre es la que actúa siempre sobre el sistema (cierra o abre la válvula), con el objeto de mantener un nivel de líquido en el tanque.

### Figura 20

*Control de procesos asistido por un humano*

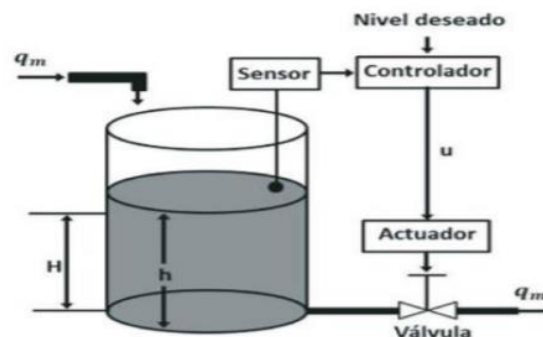


*Nota.* Tomado de (Aldemar, 2014)

En la Figura 21 se observa el sistema de respuesta sin que nadie intervenga de manera directa sobre él, excepto en la introducción de condiciones iniciales o de consigna. El sistema opera por sí solo, efectuando los cambios necesarios durante su funcionamiento. Así, se reemplaza el operador humano por dispositivos tecnológicos que operan sobre el sistema (actuadores, relés, válvulas, PLC's, motores, etc.)

### Figura 21

*Control de procesos automático*



*Nota.* Tomado de (Aldemar, 2014)

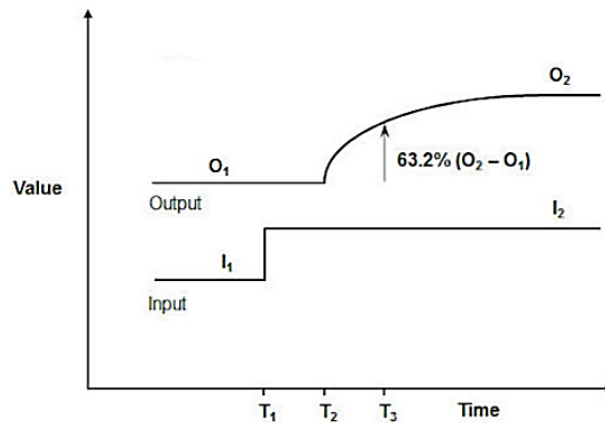
### ***Tipos de procesos industriales***

Existen dos tipos de procesos desde el punto de vista del controlador. Para calcular la característica dinámica de los procesos en lazo abierto, se modifica el valor del actuador (CV) y se mide la respuesta del proceso (PV), los procesos existentes en la industria pueden ser: Autorregulados o integrantes. (King, 2016).

**Procesos autorregulados.** Un proceso autorregulado como su nombre lo indica se regula a sí mismo a una nueva condición de funcionamiento. Es decir que si se coloca un CV y esto hace que la variable del proceso PV comience a evolucionar (subir/bajar), pero el gradiente comienza a disminuir rápidamente hasta que se nivela, entonces tiene un proceso autorregulado. (Peacock, 2017)

### Figura 22

*Respuesta de un proceso autorregulado.*



*Nota.* Tomado de (Terry, 2013)

Para un proceso de autorregulación, la respuesta del proceso se suele aproximar como una función de primer orden, es decir, la respuesta se caracteriza por tener ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto, como se ilustra en la siguiente ecuación. (Terry, 2013)

$$G_m(s) = \frac{K_m * e^{-\tau_m s}}{1 + sT_m} \quad (11)$$

Donde la ganancia  $K_m$  se obtiene a partir de:

$$K_m = \frac{O_2 - O_1}{I_2 - I_1} \quad (12)$$

La constante de tiempo  $T_m$  se obtiene a partir de:

$$T_m = T_3 - T_2 \quad (13)$$

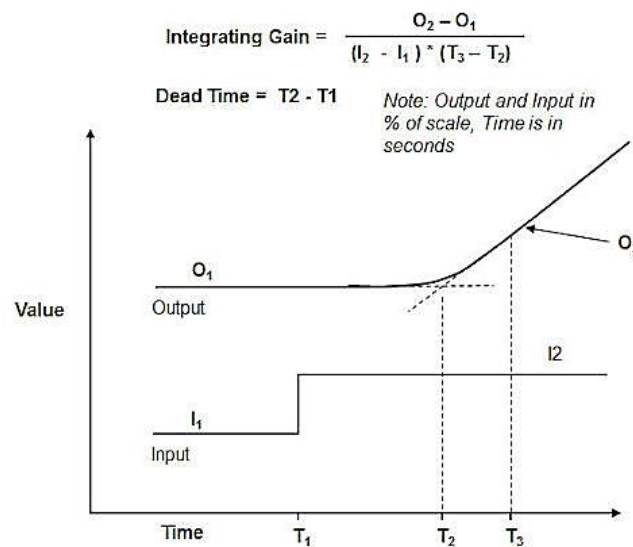
El tiempo muerto  $\tau_m$  se obtiene a partir de:

$$\tau_m = T_2 - T_1 \quad (14)$$

**Procesos Integrantes.** Si a un determinado CV del controlador en lazo abierto, la variable del proceso (PV) comienza a subir o bajar, esta se sigue moviendo en esa dirección de forma lineal en su mayoría, como se ilustra en la Figura 23 se conoce como un proceso integrante.

### Figura 23

*Respuesta de un proceso integrante*



Nota. Tomado de (Terry, 2013)

En un proceso integrante, la respuesta se caracteriza por tener ganancia y tiempo muerto, como ejemplo tenemos el proceso de nivel de un tanque, como se ilustra en la siguiente ecuación. (Terry, 2013)

$$G_m(s) = \frac{K_m * e^{-\tau_m s}}{s} \quad (15)$$

Donde la ganancia de integración  $K_m$  se obtiene a partir de:

$$K_m = \frac{O_2 - O_1}{(I_2 - I_1) * (T_3 - T_1)} \quad (16)$$

La ganancia de integración  $\tau_m$  se obtiene a partir de:

$$\tau_m = T_2 - T_1 \quad (17)$$

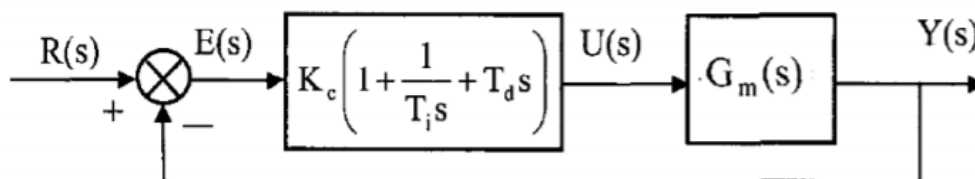
En el proyecto se ha hecho referencia a procesos autorregulados con tiempo muerto, por lo que se puede utilizar los siguientes métodos de sintonización de controladores PID.

### **Métodos de sintonización**

La sintonización de los controladores Proporcional – Integral – Derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros ( $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado, como muestra el lazo de control de la (Figura 24). (Ruiz, 2003)

Figura 24

Sistema de control realimentado.



Nota. Tomado de (O'Dwyer, 2009)

**Controlador PI.** Si se desea integrar un controlador Proporcional-Integral, la Tabla 2 muestra diferentes métodos de sintonía para calcular la ganancia proporcional ( $K_c$ ) y el tiempo integral ( $T_i$ ) una vez que se haya identificado el modelo del proceso y este sea autorregulado:

Tabla 2

Métodos de sintonía para un controlador PI.

Método	$K_c$	$T_i$
Ziegler-Nichols	$0.9 \frac{T_m}{\tau_m}$	$\frac{\tau_m}{0.3}$
Halman	$\frac{2 T_m}{3 k_m \tau_m}$	$T_m$
Cohen Coon	$\frac{T_m}{k_m \tau_m} \left( 0.9 + \frac{\tau_m}{12 T_m} \right)$	$\frac{\tau_m (30 T_m + 3 \tau_m)}{9 T_m + 20 \tau_m}$
Chien	$\frac{0.7 T_m}{k_m \tau_m}$	$2.33 \tau_m$

Nota. Tomado de (Hindawi Publishing Corporation, 2015)

**Controlador PID.** Si se desea integrar un controlador PID, la Tabla 3 muestra diferentes métodos de sintonía para calcular la ganancia proporcional ( $Kc$ ), el tiempo integral ( $Ti$ ) y el tiempo derivativo ( $Td$ ) para un modelo de proceso autorregulado:

**Tabla 3**

*Métodos de sintonía para un controlador PID.*

<b>Método</b>	<b>Kc</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
Ziegler-Nichols	$1.2 \frac{T_m}{\tau_m}$	$2 \tau_m$	$0.5 \tau_m$
Cohen Coon	$\frac{T_m}{k_m \tau_m} \left( \frac{4}{3} + \frac{\tau_m}{4T_m} \right)$	$\frac{\tau_m (32T_m + 6\tau_m)}{13T_m + 8 \tau_m}$	$\frac{4T_m \tau_m}{11T_m + 2\tau_m}$
Lambda	$\frac{1}{k_m} \left( \frac{\tau_m + T_m}{\tau_m + T_{cl}} \right)$	$T_m + \frac{\tau_m}{2}$	$\frac{T_m \tau_m}{\tau_m + 2T_m}$

$T_{cl} = 3T_m$  *lambda robusto*

$T_{cl} = T_m$  *lambda agresivo*

*Nota.* Tomado de (Hindawi Publishing Corporation, 2015)

### **Motor gráfico Unity 3D**

Es un motor de videojuegos desarrollado por Unity Technologies, que se encuentra disponible para los sistemas operativos de Windows, Linux y MacOS, que maneja diversas herramientas, diseñadas para el desarrollo de videojuegos en diversas plataformas mediante lo siguiente:

- El editor visual de Unity posee herramientas intuitivas que desarrollan juegos inmersivos para mejorar la capacidad en el manejo del programa.
- El ambiente de desarrollo MonoDevelop sirve para la creación de nuevos Scripts



el cual combina con éxito las habilidades de un editor de texto con las herramientas y ayudas de Unity mediante el uso de los lenguajes de programación C# y JavaScript donde actualmente este último está siendo desactivado desde agosto del 2017 con el lanzamiento de Unity 2017.1

- Principalmente usado para la creación de videojuegos 2D, 3D y simulaciones para computadoras, consolas y dispositivos móviles. (R, 2017).
- Unity puede usarse junto con Blender, 3ds Max, Maya, Softimage, Modo, ZBrush, Cinema 4D, Cheetah3D, Adobe Photoshop, Adobe Fireworks y Allegorithmic Substance. Los cambios realizados a los objetos creados con estos productos se actualizan automáticamente en todas las instancias de ese objeto durante todo el proyecto sin necesidad de volver a importar manualmente. (Unity, 2020)
- Unity posee una tienda llamada Asset Store, la cual contiene múltiples y variados Assets como pueden ser herramientas para el desarrollo de objetos 3D que ayudan a la ambientación del entorno y además ayudan a mejorar el rendimiento y la lógica del entorno virtual.

## Figura 25

*Logo oficial de Unity.*



*Nota.* Tomado de (Unity, 2020)

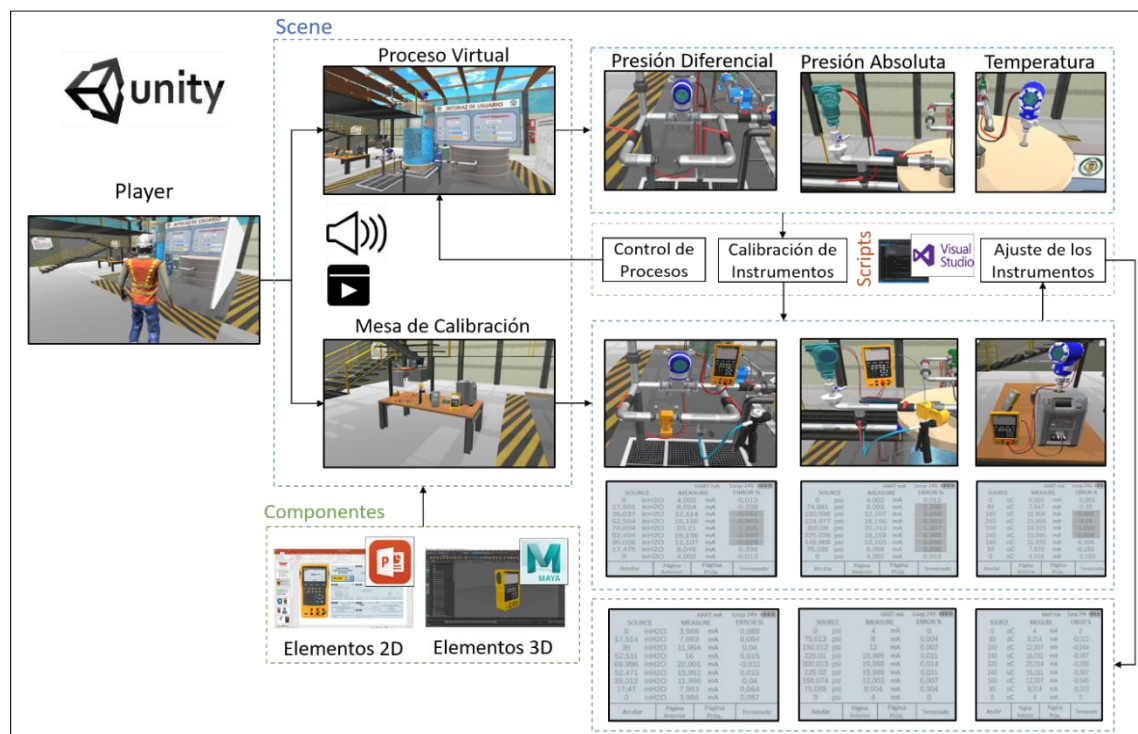
## CAPÍTULO III

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el presente capítulo se muestra el diseño y la implementación de la estación virtual de instrumentación y control de procesos, así como también el desarrollo de las interacciones y animaciones, tanto para el proceso virtual como para los procedimientos de calibración y ajuste de los transmisores virtuales “Smart” de presión absoluta, presión diferencial y de temperatura. En la Figura 26 se indica el diagrama de bloques que constituye la aplicación desarrollada.

**Figura 26**

*Aplicación desarrollada.*



En la estación didáctica virtual de procesos se integra un tanque cerrado para el llenado y el calentamiento de agua; en donde se controla el nivel del líquido dentro de

éste mediante un control PI de Cohen Coon, y la temperatura mediante un control PID de Lambda agresivo.

Para la medición de las variables físicas involucradas en el proceso se integra un transmisor de presión absoluta, un transmisor de presión diferencial (medición de nivel) y un transmisor de temperatura. Para los procedimientos de calibración y ajuste se toma como referencia los siguientes equipos: calibrador documentador de procesos DPC Fluke 754, bomba manual Fluke 700PTP-1, módulo de presión diferencial Fluke 750P22, módulo de presión absoluta 700P07, y un pozo de metrología Fluke 9144.

Todo el escenario virtual y la interacción con el mismo es desarrollado en el software libre Unity 3D. La programación para emular todos los acontecimientos de manera lógica se realiza en Visual Studio. Como plataforma de modelado 3D para el dibujo de los dispositivos del entorno virtual se usa el software Maya de Autodesk y las imágenes 2D en PowerPoint. Finalmente se obtiene una aplicación ejecutable para computadores de sistema operativo Windows.

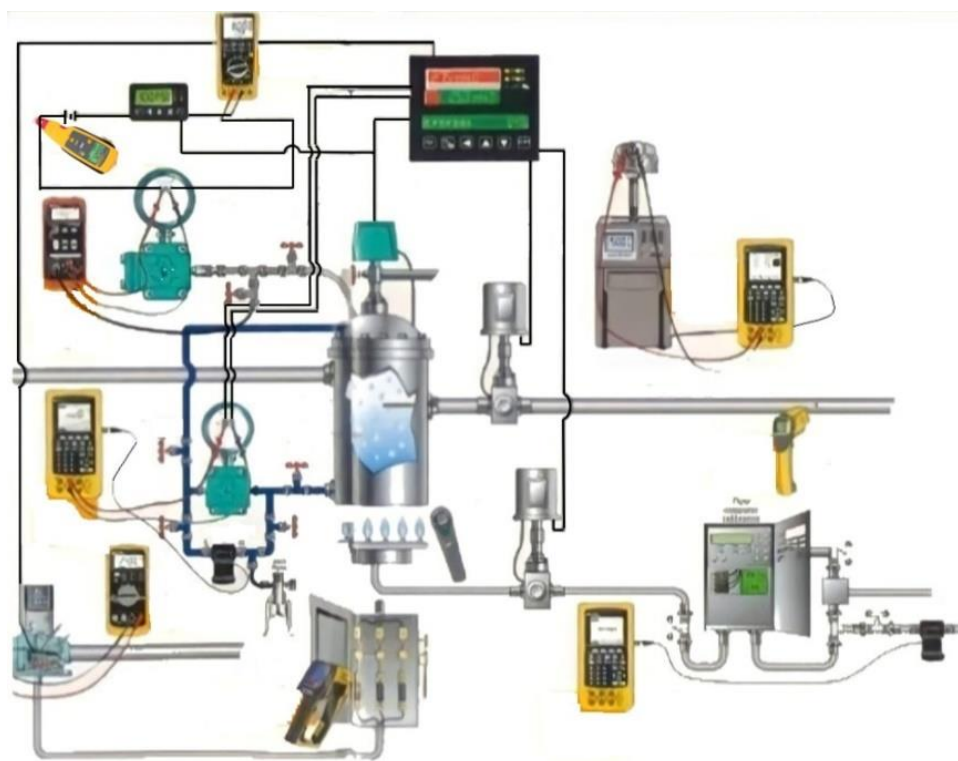
Para una mejor comprensión de cada etapa de la estructura de la aplicación, se ha dividido este capítulo en ocho secciones: identificación de características y restricciones del proceso virtual, diseño de la estación virtual de instrumentación y control de procesos, implementación del entorno virtual en Unity 3D, desarrollo de procedimientos virtuales de calibración, animaciones generales para interacción con el entorno virtual, desarrollo del algoritmo PID para el control del sistema virtual, guías de prácticas virtuales para la calibración de los transmisores “Smart” y realización de aplicación ejecutable para computadores con sistema operativo Windows.

### Identificación de características y restricciones del proceso virtual

El principal objetivo del presente proyecto es la realización de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart”, por ende, el diseño de la estación virtual viene ligado a este requerimiento. En la Figura 27, se observa un sistema industrial para la calibración de múltiples equipos, encontrado en los manuales de calibradores Fluke.

#### Figura 27

*Sistema industrial ejemplo de Fluke.*



*Nota.* Tomado de (Fluke, 2008)

La imagen de la Figura 27 se toma como punto de partida para el diseño de la estación virtual en el presente proyecto.

### **Características**

Para que el proceso virtual sea coherente en su funcionamiento, se establece características primordiales que se integran en el proyecto, dichas características se enlistan a continuación:

- **Dimensión de los elementos:** El tamaño de los elementos: transmisores, tuberías, equipos de calibración, válvulas, etc, deben ser apreciados como si de un proceso real se tratase. Para esto, se parte dimensionando el tanque, siendo este el primer objeto tridimensional en colocarse en el escenario, también, los componentes se escalan en base a la “mirada” del player (avatar).
- **Ubicación de los elementos:** Los componentes en la estación virtual deben estar ubicados en el sitio adecuado, para esto se realiza el diagrama P&ID y un bosquejo en 2 dimensiones, siendo utilizados como “planos” o “guías” de referencia.
- **Dinámica de los procesos:** Los procesos deben evolucionar en el tiempo, es decir, tener una dinámica, para esto se integran modelos dinámicos de primer orden (funciones de transferencia).
- **Rango de operación de los procesos:** Los procesos deben tener un rango de funcionamiento coherente, para esto se realizan cálculos en base a las dimensiones del tanque.
- **Rangos de trabajo de los transmisores:** Los transmisores deben tener un rango de trabajo, este es el rango que se configura en el transmisor para que su medición se obtenga en un valor de corriente de 4 a 20 mA. Para esto, una vez calculado los rangos de operación de los procesos se determinan los rangos de trabajo y de medición máxima de los transmisores.

- **Rangos de medición de los transmisores:** Los transmisores deben tener un rango de medición, que es la máxima capacidad que un transmisor puede medir.
- **Controlabilidad de los procesos:** Los procesos se van a controlar de modo automático, para esto se diseñan controladores PID para los procesos de Nivel y Temperatura.
- **Modo manual/automático:** En los procedimientos de calibración in situ es necesario pasar del modo de control automático al manual para que se pueda sacar de línea al transmisor y calibrarlo. Para esto se programa el modo de control automático y manual en una Interfaz de Usuario (UI)
- **Interfaz de usuario:** En un proceso industrial es necesario la visualización y modificación de sus variables mediante una interfaz de usuario. Para esto se implementa una UI sencilla en donde se puede modificar el SetPoint en el caso de control automático y el Valor de Control en el modo manual.
- **Calibración y Ajuste:** En la calibración de transmisores “Smart” se obtiene el error porcentual de su medición y el ajuste minimiza dicho error. Para lograr esto se plantean ecuaciones que se integran en el software de programación 3D.
- **Navegación en el entorno virtual 3D:** Es necesario que el usuario navegue por el escenario virtual 3D e identifique los componentes presentes, para esto se coloca un “player” (avatar) que puede ser “manejado” libremente.
- **Animaciones e Interacciones:** En un proceso real se puede observar el llenado y vaciado del tanque, la apertura y cierre de válvulas, etc. Para esto, en el proceso virtual se realizan todas las animaciones necesarias posibles.

### **Restricciones**

La estación virtual 3D no reemplaza a una estación industrial real de laboratorio, únicamente es una herramienta de ayuda, por ende, existen restricciones en su diseño. A continuación, se enlistan dichas restricciones.

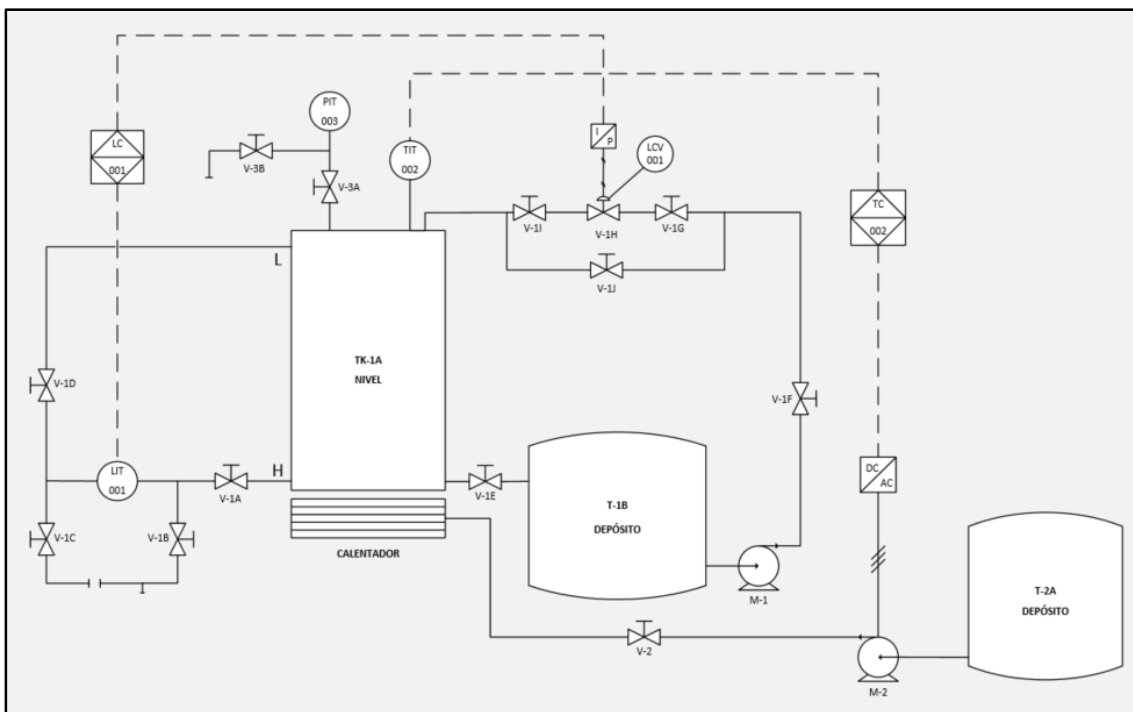
- **Manipulación:** En la estación virtual 3D es imposible manipular como tal los componentes, ya que no son tangibles para el tacto humano.
- **Animaciones e Interacciones:** En un proceso real se puede observar un sinnúmero de acontecimientos y sucesos, que en un entorno virtual no se puede apreciar, por ende, en el presente proyecto únicamente se realizan las animaciones necesarias posibles.
- **Realismo:** No es posible obtener un realismo del 100% con referencia a un proceso real.

### **Diseño de la estación virtual de instrumentación y control de procesos**

La estación virtual de instrumentación y control de procesos es diseñada bajo parámetros reales de un proceso de laboratorio, considerando características que permitan funcionalidad en el entorno virtual y semejanza con un entorno real. En la Figura 28 se presenta el diagrama P&ID del sistema virtual diseñado.

**Figura 28**

*Diagrama P&ID de la estación virtual*

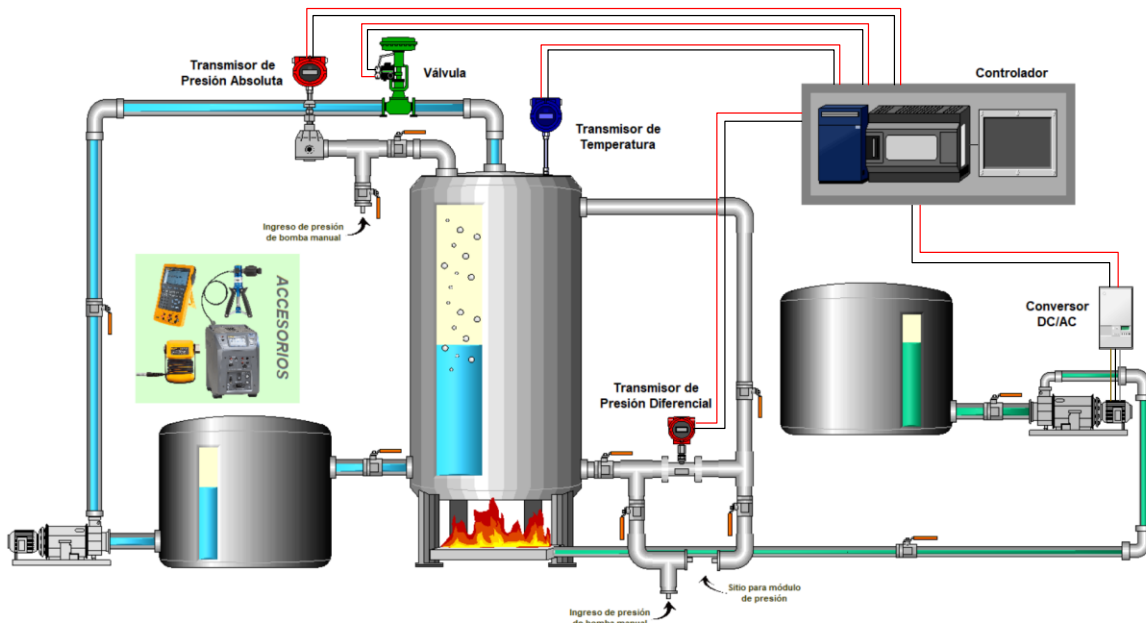


El sistema virtual cuenta con un transmisor industrial “Smart” para la variable de presión absoluta, un segundo transmisor industrial “Smart” para la variable de temperatura y un tercero para la variable de presión diferencial (medida de nivel); una estación didáctica de procesos que consiste en un tanque para el llenado y el calentamiento de líquido, equipos y accesorios para realizar el procedimiento de calibración, tales como: un calibrador de procesos, una bomba manual, un módulo de presión, y un pozo seco, en la Figura 29 se presenta el esquema de la estación virtual.



**Figura 29**

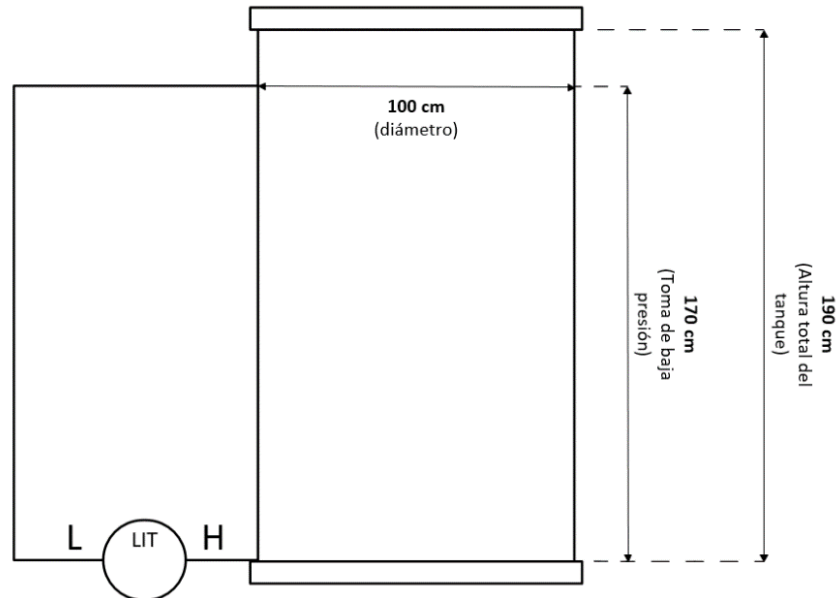
*Esquema de la estación virtual diseñada.*



El diagrama P&ID y el esquema de la estación virtual son utilizados como “planos” para implementar el laboratorio virtual en el motor gráfico Unity 3D.

### ***Dimensiones del tanque***

Como primera instancia se dimensiona un tanque cerrado cilíndrico en donde se controla el nivel de líquido dentro de éste y su temperatura; al tratarse de un proceso de laboratorio se consideran las dimensiones mostradas en la Figura 30.

**Figura 30***Dimensiones del tanque.*

El tanque es el primer objeto en colocarse en el escenario virtual, seguido por el avatar, con la finalidad de escalar los demás elementos, tomando como referencia el tamaño del tanque y la “vista” del Player.

### ***Dinámica de los procesos***

Los procesos en el sistema virtual (Nivel y Temperatura), son considerados como procesos autorregulados, por ende, se los puede expresar como si respondieran a un modelo de primer orden con: ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto; a partir de su función de transferencia (ecuación 18). En teoría de control se usan las funciones de transferencia para caracterizar la relación existente entre la salida y entrada del sistema (Figura 31), por ende, la función de transferencia de un sistema es un modelo matemático que expresa la relación entre la variable controlada (variable de

salida) con la variable manipulada (variable de entrada). La función de transferencia típica para un proceso autorregulado es la siguiente:

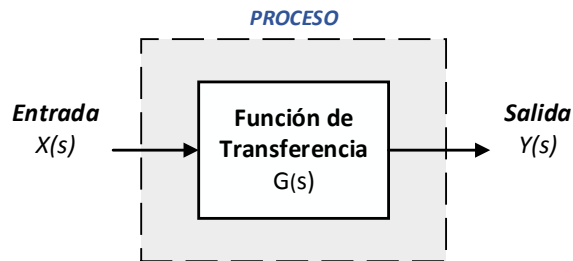
$$G(s) = \frac{Kp}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (18)$$

Donde:

- $Kp$  → Ganancia estática
- $T$  → Constante de tiempo en segundos
- $L$  → Tiempo muerto en segundos

### Figura 31

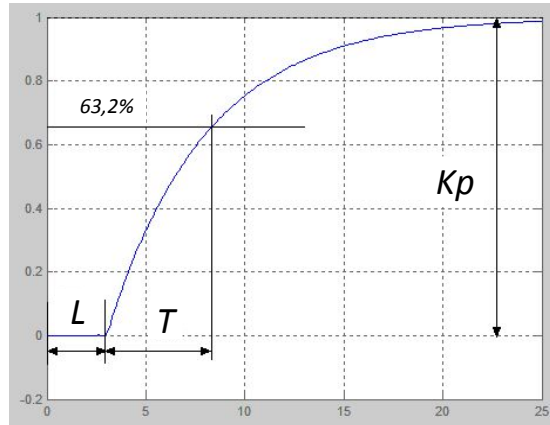
*Representación gráfica de la función de transferencia de un proceso.*



La función de transferencia se obtiene excitando al sistema o proceso mediante una señal escalón en su entrada. La curva de respuesta (Figura 32) obtenida (salida) permite identificar los parámetros descritos en la ecuación 18.

**Figura 32**

*Respuesta del sistema a un escalón unitario*



Mediante prácticas en el laboratorio de control de procesos se han obtenido modelos matemáticos de procesos de caudal, nivel, presión y temperatura, pudiendo identificar, caracterizar y diferenciar los comportamientos de los diferentes sistemas; a partir de los cuales se han propuesto dos modelos (uno para el proceso de Nivel y uno para el proceso de Temperatura) modificados para que puedan ser apreciados en el entorno virtual de una forma adecuada. Los modelos matemáticos propuestos son los siguientes:

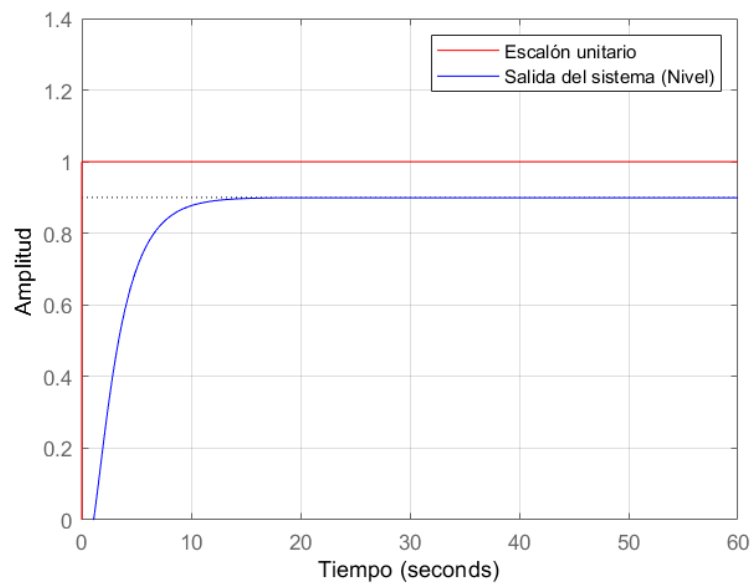
$$G(s) = \frac{0.9}{2.3s + 1} e^{-1.5s} \quad \rightarrow \quad \text{Para el proceso de Nivel} \quad (19)$$

$$G(s) = \frac{0.61}{100.7s + 1} e^{-1.5s} \quad \rightarrow \quad \text{Para el proceso de Temperatura} \quad (20)$$

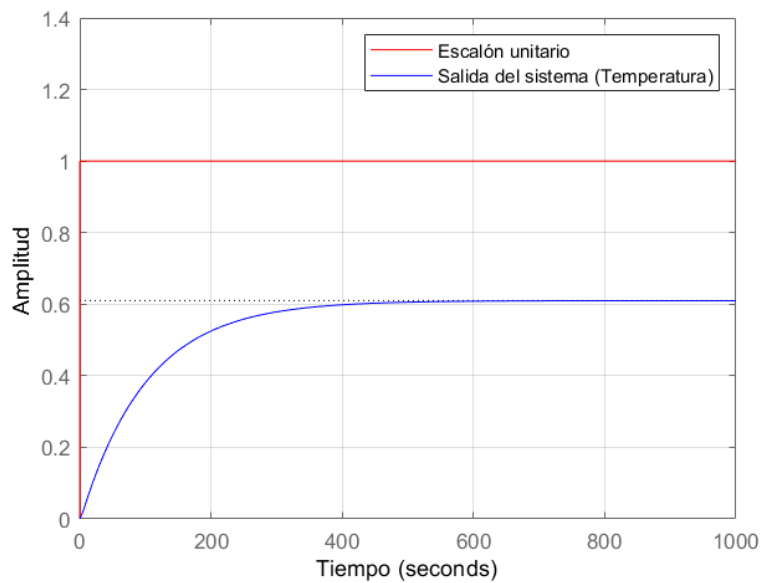
En la Figura 33 se puede observar la curva de respuesta del modelo propuesto para el proceso de nivel, y en la Figura 34 para el proceso de temperatura ante una entrada escalón unitario.

**Figura 33**

*Curva de comportamiento del proceso de nivel*

**Figura 34**

*Curva de comportamiento del proceso de temperatura*



La programación en el software Unity 3D se lo realiza mediante Visual Studio, el cual trabaja en el dominio del tiempo, por lo que, las funciones de transferencia, al estar en el dominio de la frecuencia “s” deben ser llevadas al dominio del tiempo “t”. Como ya se vio, la función de transferencia es la relación entre la salida y la entrada del sistema, por lo tanto:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (21)$$

Donde:

- $Y(s)$  → Salida del sistema (variable controlada)
- $X(s)$  → Entrada del sistema (variable manipulada)

Entonces, la ecuación 18 es equivalente a la ecuación 21 de la siguiente manera:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Kp}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (22)$$

Desarrollando la ecuación 22 se tiene:

$$Y(s) * (Ts + 1) = X(s) * Kp * e^{-Ls}$$

$$TY(s)s + Y(s) = X(s) * Kp * e^{-Ls}$$

$$Y(s)s = \frac{Kp * X(s) * e^{-Ls} - Y(s)}{T}$$

Finalmente, mediante la transformada inversa de Laplace se obtiene el modelo matemático (ecuación diferencia lineal invariante en el tiempo) en función del tiempo “t”:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{Kp * x(t - L) - y(t)}{T} \quad (23)$$

Por lo tanto, las ecuaciones 19 y 20 se representan en el dominio del tiempo mediante las ecuaciones 24 y 25:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{0.9 * x(t - 1.5) - h(t)}{2.3} \rightarrow \text{Para el proceso de Nivel} \quad (24)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{0.61 * x(t - 1.5) - T(t)}{100.7} \rightarrow \text{Para el proceso de Temperatura} \quad (25)$$

Donde:

- $h \rightarrow$  altura (variable controlada, proceso de nivel)
- $T \rightarrow$  temperatura (variable controlada, proceso de temperatura)
- $x \rightarrow$  Entrada del sistema (valor de control "CV")

Las ecuaciones 24 y 25 son ingresadas en el software de programación 3D para emular la evolución de los procesos en el tiempo.

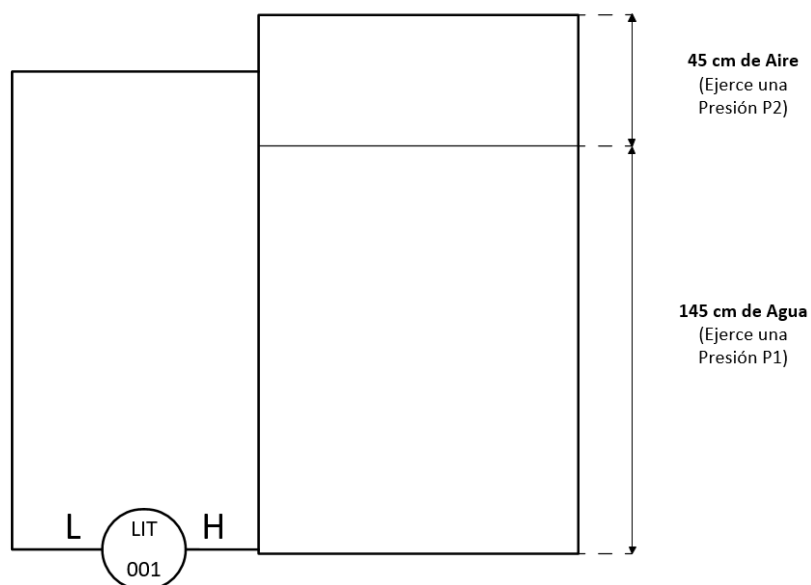
### ***Rango de operación de los procesos***

***Proceso de Nivel.*** Uno de los métodos para medir nivel es mediante la presión diferencial, en donde los transmisores utilizados miden la presión hidrostática. Esta presión es igual a la altura del líquido sobre la toma del proceso, multiplicada por la gravedad específica de dicho líquido y resulta ser independiente del volumen o forma del recipiente. En este caso se ha considerado un tanque cerrado de altura igual a 190 cm, de los cuales la altura máxima que alcanza el líquido (agua) es de 170 cm, dejando 20 cm de aire por encima de la columna de agua.

En tanques cerrados la presión por encima de la columna de líquido afecta a la presión que se mide en el fondo. Por lo tanto, la presión en el fondo del tanque es igual a la altura del líquido multiplicado por su gravedad específica más la presión en el tanque. Entonces, la medida de nivel por presión diferencial consiste en colocar una toma de presión en la parte superior e inferior del tanque y hallar la diferencia entre estas presiones como se observa en la Figura 35, obteniendo así, únicamente la presión ejercida por la columna de líquido, la cual es proporcional al nivel de líquido en el tanque. La toma de alta presión del Transmisor se coloca en el fondo del tanque y la toma de baja presión en la parte superior.

### Figura 35

*Medición de nivel mediante presión diferencial en tanque cerrado*



Para comprender cómo efectúa la medición el LIT (Transmisor Indicador de Nivel) se realizan las operaciones siguientes, donde la presión se calcula con la ecuación 26:



$$P = SG * h \quad (26)$$

$$SG = \frac{\text{densidad del fluido}}{\text{densidad del agua}} \quad (27)$$

Donde:

- P → Presión
- SG → Gravedad específica del fluido
- h → Altura

por lo tanto, a partir de las ecuaciones 26 y 27 se tiene:

$$P1 = SG_{\text{agua}} * h_{\text{agua}}$$

$$SG_{\text{agua}} = \frac{\text{densidad del fluido (agua)}}{\text{densidad del agua}} = 1$$

$$P1 = 1 * 145\text{cm} = 145 \text{ cmH}_2\text{O}$$

Ahora; el LIT mide presión diferencial para determinar el nivel en el tanque, es decir, el transmisor realiza la siguiente operación:

$$\Delta P = PH - PL \quad (28)$$

Donde:

- $\Delta P$  → Presión diferencial
- PH → Presión en la línea de Alta
- PL → Presión en la línea de Baja

En la línea de alta presión se ejerce tanto una presión P1 (del agua) como una presión P2 (del tanque, por encima de la columna de agua), por lo tanto:

$$PH = P1 + P2 \quad (29)$$

En la línea de baja presión se ejerce únicamente una presión P2, por lo tanto:

$$PL = P2$$

La medición en el LIT se calcula a partir de las ecuaciones 28 y 29:

$$\Delta P = PH - PL$$

$$\Delta P = (P1 + P2) - P2$$

$$\Delta P = P1$$

$$\Delta P = 145 \text{ cmH}_2\text{O}$$

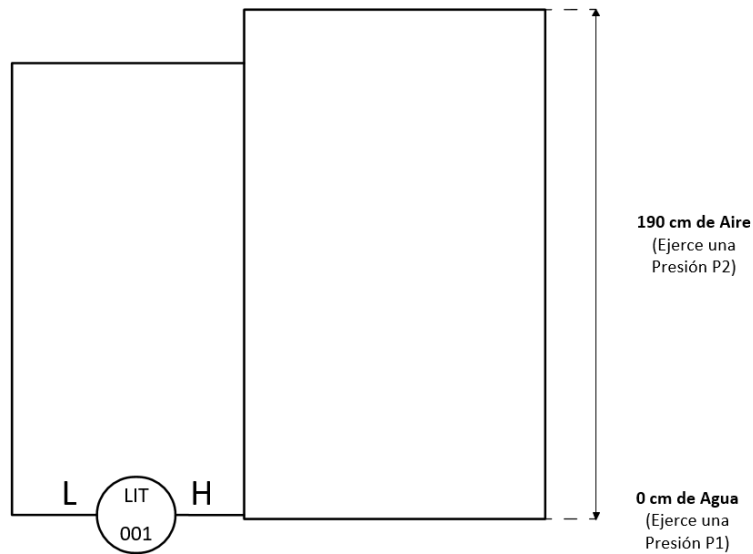
Una vez que se calcula la medición del LIT para el ejemplo de la Figura 34, se procede a determinar el rango de operación del proceso con la finalidad de obtener el rango de trabajo del transmisor para una salida de 4 a 20 mA.

### **Cálculo del LRV**

Los valores del LRV (Valor inferior de rango) y URV (valor superior de rango) se calculan para poder mostrar la medida de la variable del proceso y la corriente de lazo en el transmisor, obteniendo de esta manera, mayor realismo en el proceso virtual y a su vez que sea coherente con un proceso real. Para el cálculo del LRV se considera el mínimo nivel de líquido que puede haber en el tanque, en este caso 0 cm de agua como se muestra en la Figura 36.

**Figura 36**

Medición de nivel para determinar el LRV.



Como ya se vio en la sección anterior, para determinar el nivel por presión diferencial se utiliza la ecuación 28:

$$\Delta P = PH - PL$$

$$LRV = PH - PL$$

$$PH = 0 \text{ cmH}_2\text{O} + P2 = P2$$

$$PL = P2$$

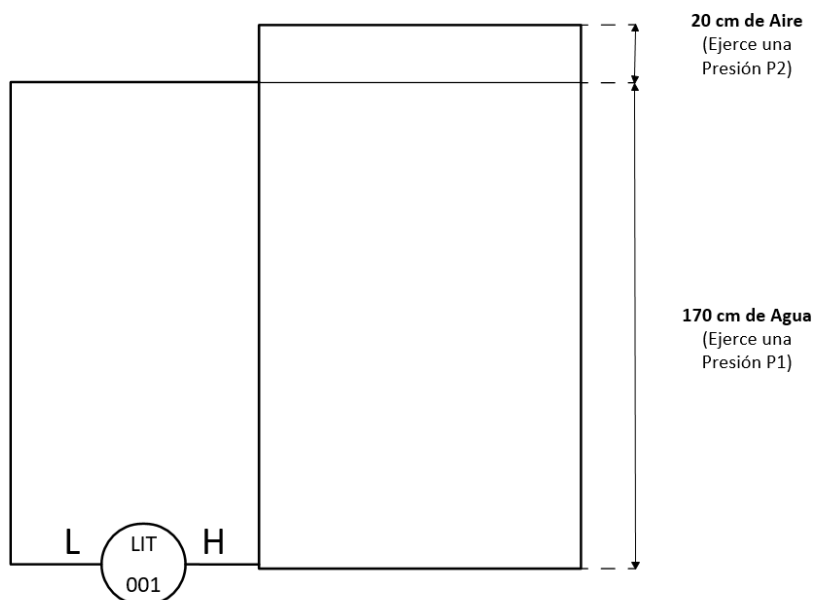
$$LRV = P2 - P2 = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$$

### **Cálculo del URV**

Para el cálculo del URV se considera el máximo nivel de líquido que puede haber en el tanque, en este caso 170 cm de agua como se muestra en la Figura 37.

**Figura 37**

*Medición de nivel para determinar el URV*



Para el cálculo del URV se procede de la misma manera como se calculó el LRV, mediante la ecuación 28:

$$\Delta P = PH - PL$$

$$URV = PH - PL$$

$$PH = 170 \text{ cmH}_2\text{O} + P2$$

$$PL = P2$$

$$URV = (170 \text{ cmH}_2\text{O} + P2) - P2 = 170 \text{ cmH}_2\text{O}$$

Por lo tanto, el proceso trabaja en un rango de 0 a 170 cmH<sub>2</sub>O, equivalente a un rango de 0 a 66.93 inH<sub>2</sub>O, siendo esta unidad una de las más utilizada en transmisores industriales de presión diferencial. Para facilitar los cálculos y el procedimiento de calibración, se trabaja en el transmisor con un rango de 0 a 70 inH<sub>2</sub>O, lo cual se visualiza en el display junto a la medida de corriente (4 a 20mA).

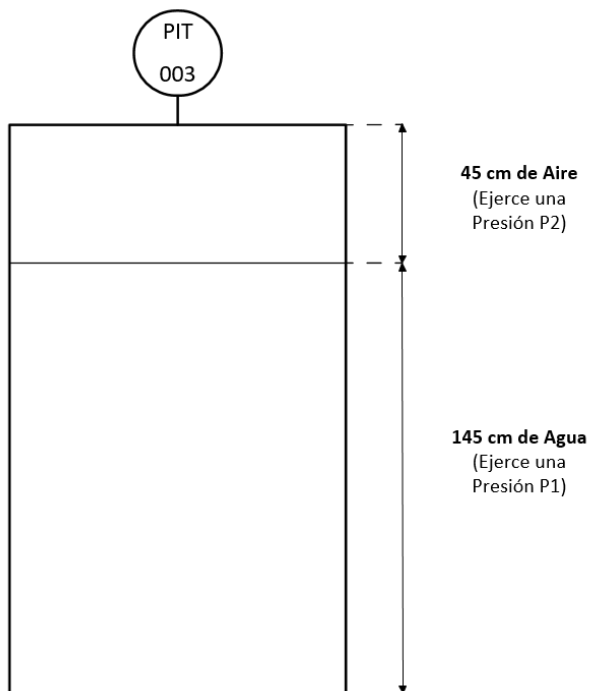
El valor de corriente es obtenido mediante la ecuación de la recta, ya que la relación de presión vs corriente en el transmisor es lineal. La ecuación 30 representa la relación entre presión y corriente en el LIT:

$$\text{corriente (mA)} = \frac{16}{70} * \text{Presión(inH}_2\text{O)} + 4 \quad (30)$$

**Proceso de presión absoluta.** Al ser un tanque cerrado existe presión que variará en función del nivel y la temperatura, para la medición de presión absoluta en la parte superior del tanque se utiliza el PIT (Transmisor Indicador de Presión), el mismo que mide la presión ejercida por encima de la columna de agua (P2) más la presión atmosférica, como se indica en la Figura 38.

### Figura 38

*Medición de presión absoluta en tanque cerrado.*



La presión que mide el transmisor se calcula con la ecuación 31:

$$P_{abs} = P_2 + P_{atm} \quad (31)$$

Donde:

- $P_{abs}$  → Presión absoluta
- $P_2$  → Presión ejercida por el aire en el tanque
- $P_{atm}$  → Presión atmosférica

Para calcular la presión  $P_2$  se utiliza la ecuación para el cálculo de la presión manométrica:

$$P_2 = \rho * g * h \quad (32)$$

Donde:

- $P_2$  → Presión ejercida por el aire
- $\rho$  → densidad del aire ( $1.225 \text{ Kg/m}^3$ )
- $g$  → gravedad
- $h$  → Altura

Por lo tanto, la presión absoluta medida en la parte superior del tanque sería:

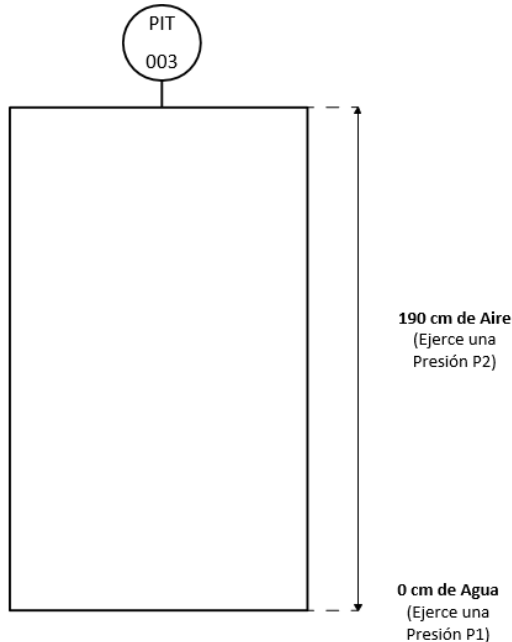
$$P_{abs} = \rho * g * h + P_{atm} \quad (33)$$

### ***Cálculo del LRV***

Para el cálculo del LRV se considera la presión inicial dentro del tanque cuando este se encuentra vacío (sin líquido) como se muestra en la Figura 39.

**Figura 39**

Medición de presión absoluta para determinar el LRV (tanque vacío)



La presión absoluta dentro del tanque para este caso se calcula mediante la ecuación 33, de la siguiente manera:

$$P_{abs} = \rho * g * h + P_{atm}$$

$$P_{abs} = 1.225 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 1.9 \text{ m} + 101325 \text{ Pa}$$

$$P_{abs} = 101347.833 \text{ Pa}$$

$$LRV = 101347.833 \text{ Pa} = 14.7 \text{ psi}$$

Se puede observar que prácticamente el aire no ejerce presión en el tanque cerrado, con lo que se puede decir que la presión ejercida dentro del tanque cuando este está vacío es la presión de la atmósfera. En adelante, a la presión ejercida dentro del tanque se le denomina "aire", con la finalidad de referirse a la presión contenida en el tanque cerrado.

### ***Cálculo del URV***

Para el cálculo del URV se considera que la presión absoluta medida por encima de la columna de líquido va a depender de dos factores. Uno de los factores es el cambio de nivel del líquido, lo cual implicaría un cambio en la presión ya que modificaría el volumen del aire contenido en el tanque; y el otro factor es por el cambio de temperatura dentro del tanque, lo que también provocaría un cambio en la medida de presión absoluta.

- **Variación de presión por variación de volumen:**

Al variar el nivel del líquido dentro del tanque se varía también el volumen del aire contenido dentro de este, lo que implica un cambio en su presión. Para calcular este valor de presión se considera la Ley de Boyle - Mariotte para gases ideales a una temperatura constante, que se describe en la ecuación 34.

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \tag{34}$$

Donde:

- P1 → Presión inicial
- P2 → Presión final
- V1 → Volumen inicial
- V2 → Volumen final

La Figura 39 indica el estado inicial en el tanque, y la Figura 40 el estado final; por ende, la presión inicial P1 resulta ser el valor de LRV calculado en la sección anterior (101347.833 Pa = 14.7 psi). La presión final P2 se obtiene una vez que el líquido en el tanque alcance la altura máxima posible, con lo cual el volumen del aire se reduce (V2) aumentando su presión.



Para el cálculo del volumen  $V_1$  y  $V_2$  se utiliza las dimensiones del tanque, que al ser cilíndrico se lo realiza mediante la ecuación 35.

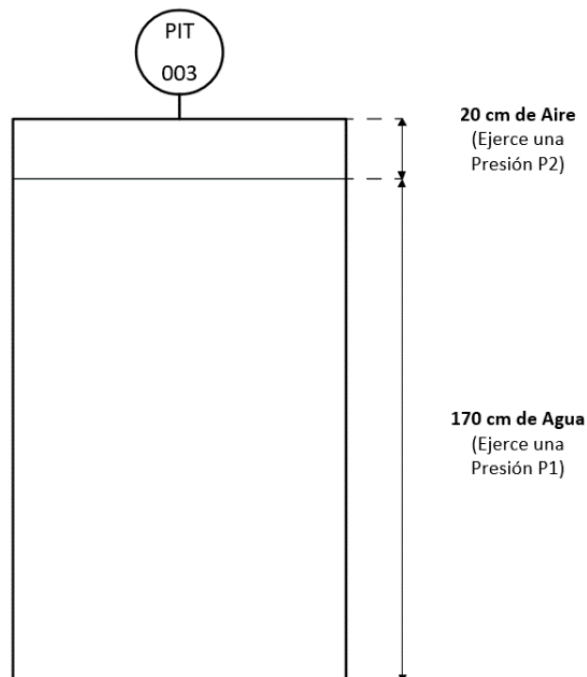
$$V = \pi * r^2 * h \quad (35)$$

Donde:

- $V$  → Volumen de aire en el tanque en metros cúbicos
- $\pi$  → Valor constante ( $\pi$ )
- $r$  → radio del tanque (0.5 m)
- $h$  → altura en metros

#### Figura 40

*Medición de presión absoluta para determinar el URV.*



Entonces, mediante la ecuación 35 se tiene:

$$V_1 = \pi * (0.5 \text{ m})^2 * (1.9 \text{ m}) = 1.4923 \text{ m}^3 = 1492.26 \text{ L}$$

$$V_2 = \pi * (0.5 \text{ m})^2 * (0.2 \text{ m}) = 0.1571 \text{ m}^3 = 157.08 \text{ L}$$

Una vez que se conoce los valores de volumen, se calcula la presión final ejercida (P2) mediante la ecuación 34:

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1 * V_1}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{101347.833 \text{ Pa} * 1492.26 \text{ L}}{157.08 \text{ L}}$$

$$P_2 = 962804.41 \text{ Pa} = 139.64 \text{ psi}$$

El valor de presión obtenida únicamente responde al cambio de volumen de aire en el tanque, sin embargo, el proceso en la estación didáctica también calienta el líquido, por ende, aumenta la temperatura en el tanque y a su vez la presión.

- **Variación de presión por variación de temperatura:**

Para calcular este valor de presión se considera la Ley de Charles para gases ideales a un volumen constante. La ley de Charles indica que al aumentar la temperatura se aumenta la presión ejercida dentro del recipiente, siempre y cuando el volumen sea constante. La ecuación 36 describe la Ley de Charles.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \tag{36}$$

Donde:

- P1 → Presión inicial
- P2 → Presión final

- T1 → Temperatura inicial
- T2 → Temperatura final

La presión inicial P1 se considera la presión calculada en la sección anterior (962804.41 Pa = 139.64 psi), ya que es la máxima presión que se obtiene por variación de volumen y el objetivo es determinar el URV. La presión P2 será la presión obtenida a una temperatura final T2. Para este caso se considera que el proceso de temperatura trabaja en un rango de 15 a 320 °C, entonces:

$$T_1 = 15 \text{ } ^\circ\text{C} = 288.15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 320 \text{ } ^\circ\text{C} = 593.15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Aplicando la ecuación 36 se tiene:

$$P_2 = \frac{P_1 * T_2}{T_1}$$

$$P_2 = \frac{139.64 \text{ } psi * 593.15 \text{ } ^\circ\text{K}}{288.15 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$P_2 = 287.446 \text{ } psi$$

Por lo tanto, el proceso trabaja en un rango de 14.7 a 287.45 psi; para facilitar los cálculos y el procedimiento de calibración, en el transmisor se trabaja con un rango de 0 a 300 psi, lo cual se visualiza en el display junto a la medida de corriente (4 a 20mA).

El valor de corriente es obtenido mediante la ecuación de la recta, ya que la relación de presión vs corriente en el transmisor es lineal. La ecuación 37 representa la relación entre presión y corriente en el PIT:

$$corriente (mA) = \frac{4}{75} * Presión(psi) + 4 \quad (37)$$

A partir de las ecuaciones 34 y 36, se plantea el modelo matemático para el proceso de presión Absoluta, el cual depende de la variación de nivel de líquido en el tanque y de su temperatura. La ecuación que describe el comportamiento del proceso de presión absoluta es la siguiente:

$$P_2 = \frac{P_1 * V_1 * T_2}{V_2 * T_1} \quad (38)$$

Donde:

- P1 → Presión inicial (14.7 psi)
- P2 → Presión final
- T1 → Temperatura inicial (288.15 °K)
- T2 → Temperatura final
- V1 → Volumen inicial (1.49225 m<sup>3</sup>)
- V2 → Volumen final (ecuación 35)

En la ecuación 38 se puede ver que la presión en el tanque va a depender de la variación de temperatura y de la variación de volumen. P1 es constante, ya que es la presión inicial con la que parte el proceso, al igual que T1; los valores de temperatura se expresan en grados Kelvin. El valor de V1 también es constante, puesto que es el valor inicial de volumen de aire con el que parte el proceso; el volumen V2 se obtiene mediante la ecuación 35, en donde se observa que va a depender de la altura o nivel de líquido en el tanque, dicha altura expresada en metros; entonces, resolviendo la ecuación 38 se tiene:

$$P_2 = \frac{14.7 \text{ psi} * 1.49225 \text{ m}^3 * T_2 \text{ }^\circ\text{K}}{\pi * (0.5 \text{ m})^2 * (1.9 \text{ m} - h \text{ m}) * 288.15 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$$P_2 = \frac{0.0969283 * T_2 \text{ }^\circ\text{K}}{(1.9 - h)m} \quad (39)$$

Se puede observar que P2 es la variación de presión en el tanque, y depende de T2 (temperatura en grados Kelvin) y de h (nivel de líquido en metros), por lo que se puede expresar en función del tiempo mediante la ecuación 40.

$$P(t) = \frac{0.0969283 * T(t)}{1.9 - h(t)} \quad (40)$$

La ecuación 40 es ingresada en el software de programación 3D para emular la evolución del proceso de medición de presión absoluta.

**Proceso de temperatura.** Para el proceso de temperatura, al ser una estación de tipo industrial se considera un rango de temperatura alto, en este caso de 15 a 320 °C, configurando en el transmisor un rango de 0 a 320 °C para facilidad de cálculos y calibración. El valor de corriente es obtenido mediante la ecuación de la recta, ya que la relación de temperatura vs corriente en el transmisor es lineal. La ecuación 41 representa la relación entre temperatura y corriente en el TIT:

$$\text{corriente (mA)} = \frac{1}{20} * \text{Temperatura(}^\circ\text{C)} + 4 \quad (41)$$

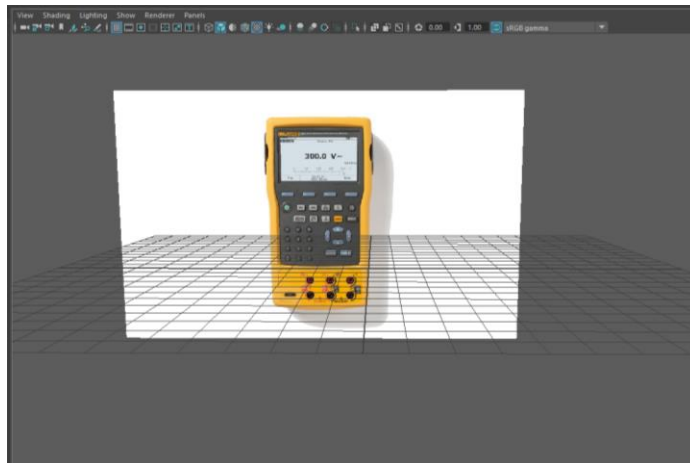
### ***Modelado 3D de componentes necesarios en software Maya***

El modelado 3D es un conjunto de operaciones matemáticas para representar de forma tridimensional un objeto. Se debe seguir una serie de pasos para modelar un objeto en el software Autodesk Maya:

- Se puede ingresar una imagen de referencia para poder hacer el modelamiento 3D del objeto. Esta imagen se puede ingresar desde la ventana de trabajo en la pestaña VIEW, Image PLane, Import Image.

### **Figura 41**

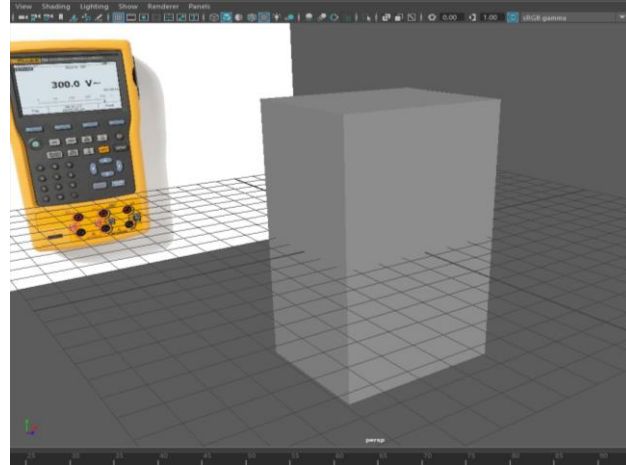
*Imagen de referencia en MAYA*



- Se puede modelar el objeto a partir de un cubo. Estas figuras son polígonos primitivos propios del Maya, que nos sirven para iniciar un modelado 3D.

**Figura 42**

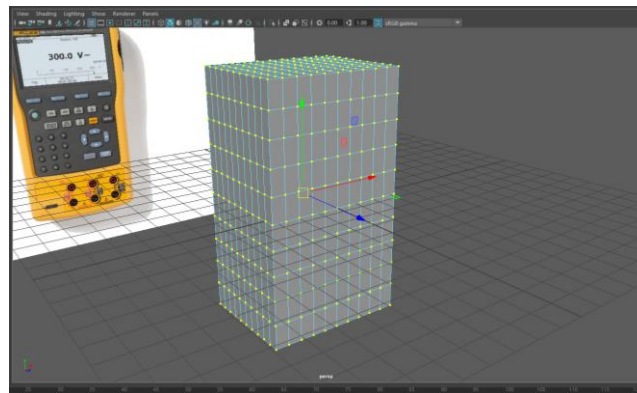
*Modelado 3D a partir de un cubo.*



- El modelado 3D se puede iniciar con la manipulación de los vértices del polígono para dar la forma inicial del objeto

**Figura 43**

*Manipulación de los vértices para el modelado 3D.*



- Además de los vértices se puede manipular las caras y los lados para modelar con el fin de que sea más sencillo darle forma al objeto. El objeto modelado se puede suavizar con el número 3 en maya, para que sea más agradable a la vista.

**Figura 44**

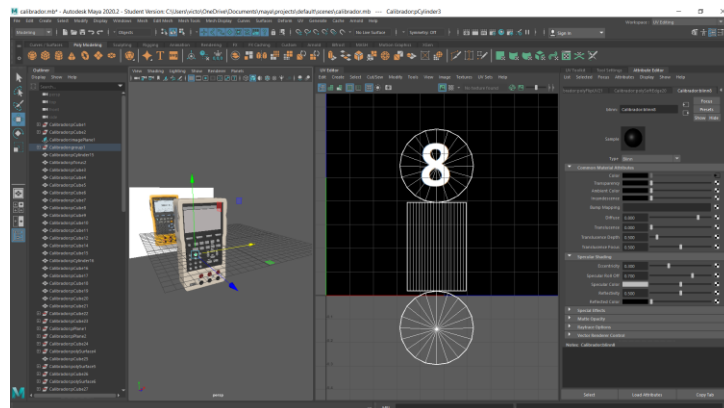
*Suavizado del objeto 3D.*



- Los botones y demás accesorios del modelo 3D son objetos propios del Maya. Estos objetos son polígonos primitivos como cilindros, cubos, conos, etc.
- Para los botones y demás complementos del modelo 3D se le dan texturas las cuales pueden ser imágenes en formato jpg. Estas imágenes pueden ser insertadas gracias a un espacio de trabajo que tiene el software Maya llamado UV editing.

**Figura 45**

*UV editing para texturas.*

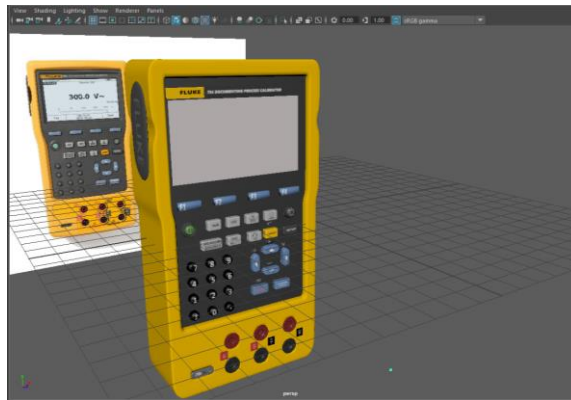




- Una vez puestas las texturas en cada uno de los botones y elementos del objeto 3d se visualizará tal como se muestra en la Figura 46. Este proceso se realiza para todos los objetos 3D que se deseen modelar.

**Figura 46**

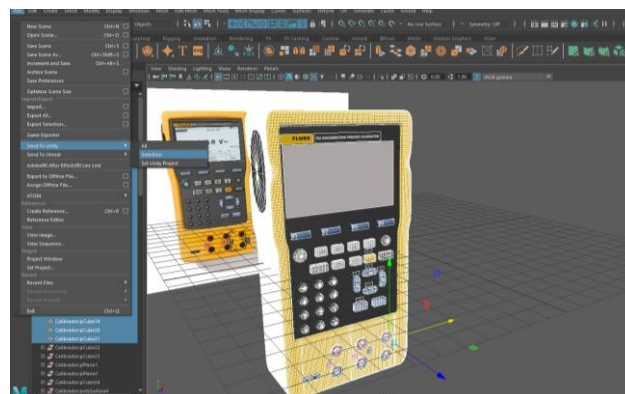
*Modelo 3d Calibrador FLUKE 754.*



- Una vez el objeto 3D listo se procede a exportar a Unity. Maya tiene una opción la cual permite exportar los modelos 3D en un formato que reconozca el software Unity, para realizar las animaciones correspondientes al equipo que se requiera.

**Figura 47**

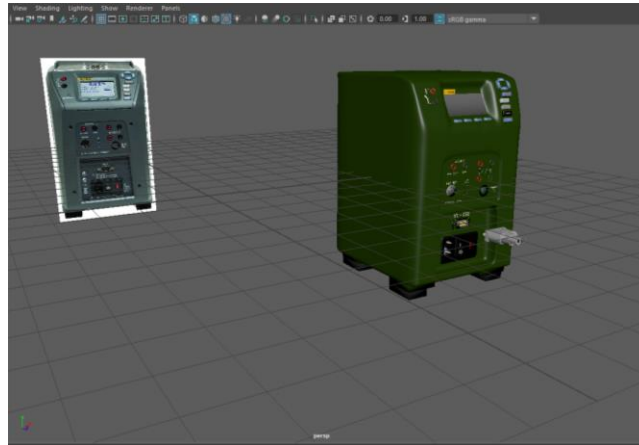
*Exportar a Unity el Modelo 3d Calibrador FLUKE 754.*



- En el software maya se han modelado los diferentes equipos que se utilizan para la calibración virtual de transmisores “Smart”, siguiendo el procedimiento anterior, algunos de estos son:

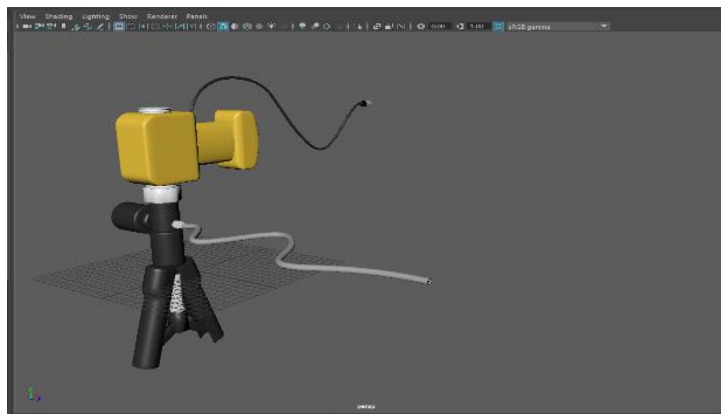
**Figura 48**

*Pozo de metrología FLUKE 9144.*



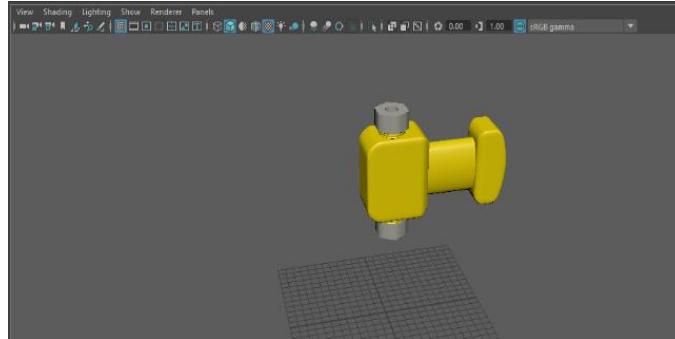
**Figura 49**

*Bomba Manual y módulo de presión absoluta.*

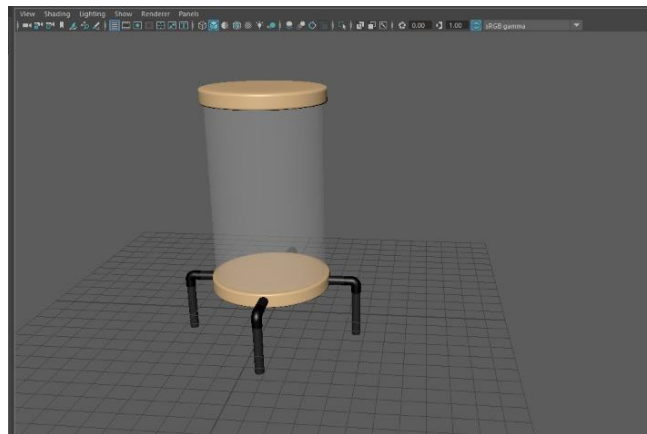


**Figura 50**

*Módulo de presión diferencial.*

**Figura 51**

*Tanque para el proceso de nivel.*



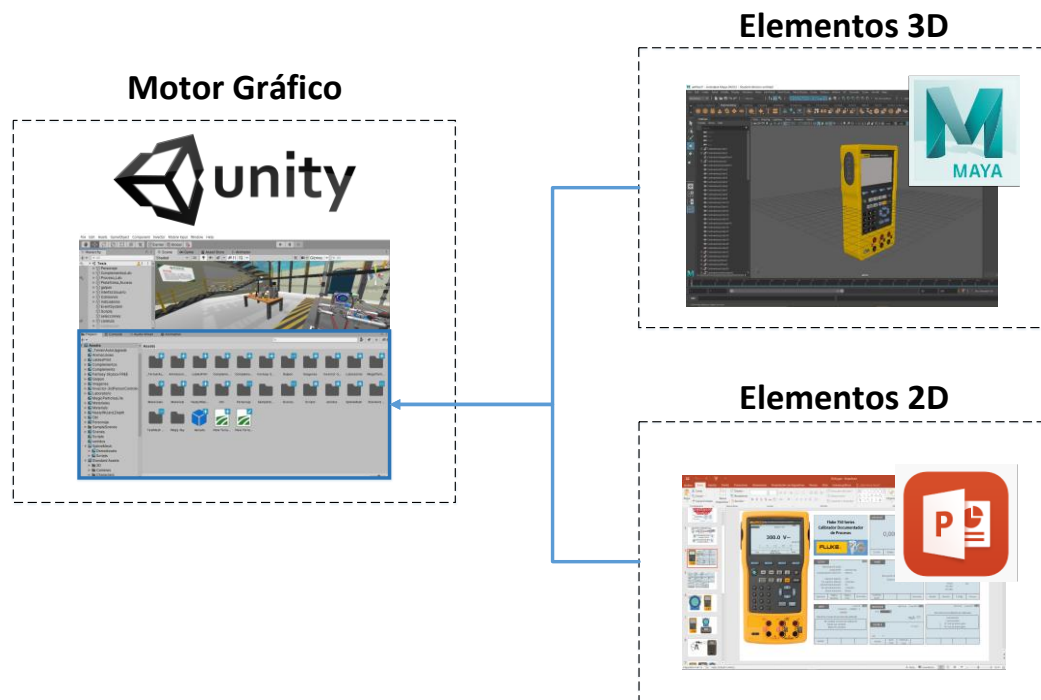
### **Implementación del entorno virtual en Unity 3D**

Los modelos tridimensionales construidos en el software Maya son importados al software Unity 3D para formar el entorno virtual; también, otros componentes extras necesarios se descargan de la web y se integran en el escenario con la finalidad de complementar y dar más realismo en el entorno 3D. En el escenario virtual también se utilizan componentes 2D (UI, pantallas, indicaciones, mensajes, diagramas, etc).

Estos elementos inicialmente se crean como imágenes en formato png en el software PowerPoint. Tanto los componentes 3D como los 2D se arrastran inicialmente a la sección Assets en la ventana Project del Unity 3D.

**Figura 52**

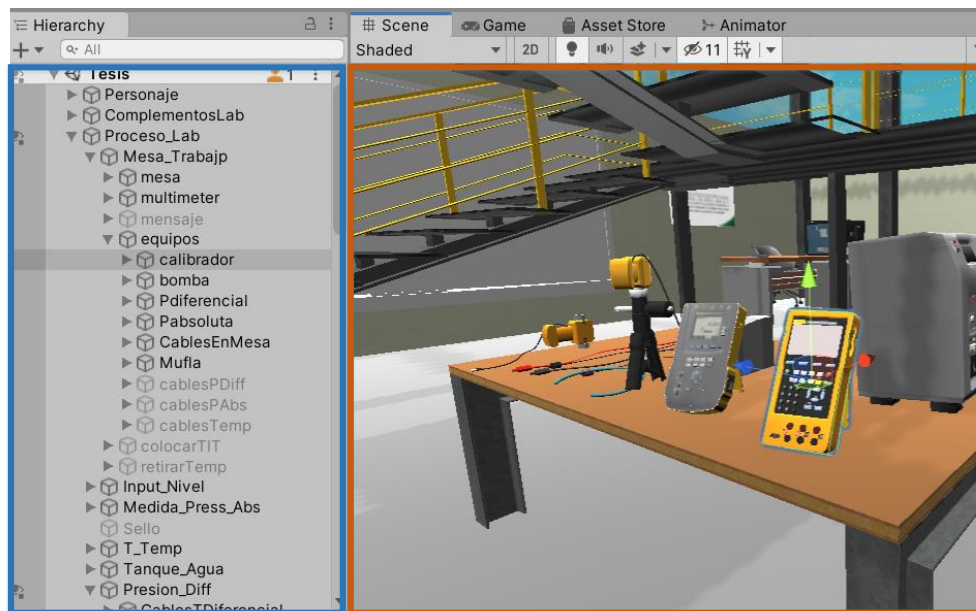
*Integración de componentes gráficos en el software Unity 3D.*



Los elementos en Unity 3D se denominan “Assets”, estos son parte del proyecto, mas no del escenario virtual, es necesario arrastrarlos a la escena “Scene” y ubicarlos de acuerdo a lo necesitado, dichos Assets pasarán a formar parte de la Jerarquía “Hierarchy”. Los Assets (componentes 3D, 2D, códigos, sonidos, animaciones, etc) que están presentes en la Jerarquía son los que implementan la aplicación.

**Figura 53**

*Integración de Assets en la escena.*



**Hierarchy**

**Scene**

Entonces, para formar la aplicación objetivo, se crea o importa cada assets en la sección Project, se los arrastra a la jerarquía o a la escena y se los ubica. En cada sección de la implementación de los procesos virtuales se explica con mayor detalle este procedimiento de acuerdo a las necesidades pertinentes.

### ***Implementación de la estación virtual de procesos***

La implementación de la estación virtual se hace en base al diagrama P&ID de la Figura 28, también se toma como referencia los gráficos en 2D de las Figuras 27 y 29. Al escenario del Unity 3D se arrastra cada modelo tridimensional, se los dimensiona y ubica de acuerdo al diseño previamente realizado, obteniendo una estación virtual 3D como se muestra en la Figura 54.

**Figura 54**

*Vista general de la estación didáctica virtual*



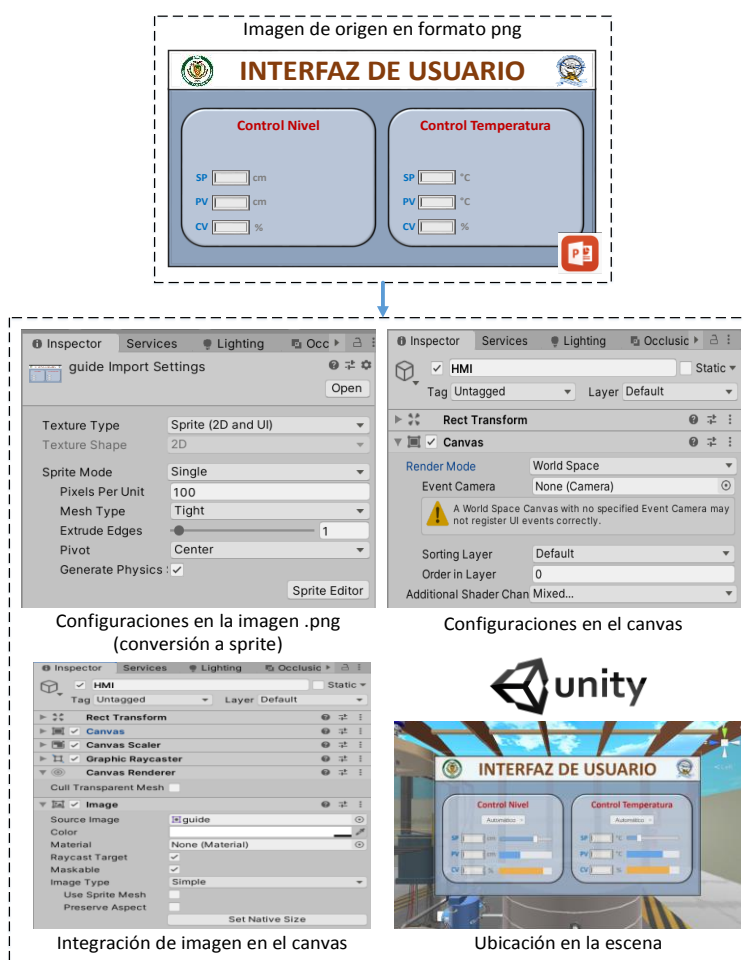
Descripción del proceso: Este proceso tiene la finalidad de controlar el nivel de un tanque y su temperatura, es decir mantener las variables del proceso a una referencia o SetPoint que el usuario disponga. El proceso de nivel (Lazo 1) consta de un transmisor de presión diferencial, el cual va a medir el nivel, para luego enviar una señal de corriente al controlador (Control PID), este a su vez enviará una señal a un actuador (convertidor I/P) que accionará el elemento final de control (válvula). También se cuenta con un tanque para el depósito del líquido.

El proceso de temperatura (Lazo 2) consta de un transmisor de temperatura que mide la variable del proceso, un controlador (Control PID) que recibe la señal del transmisor y envía una señal de control al Variador de Frecuencia que accionará una bomba para inyectar combustible desde el depósito hacia el calentador y así mantener la referencia. En el lazo 3 se encuentra un transmisor de presión absoluta que está midiendo la presión que se genera dentro del tanque. Para interactuar con el proceso se

implementa una Interfaz de Usuario (UI); ésta es creada como imagen png inicialmente y luego es llevada al Unity 3D. Unity permite la creación de Interfaces de Usuario mediante canvas; para esto es necesario que los assets 2D sean de tipo “sprite”. En la jerarquía se crea un objeto de tipo UI-Canvas y en éste se agrega la imagen previamente convertida a objeto de tipo sprite. En el canvas se configura el modo de renderizado como “World Space” para poder moverlo y ubicarlo en la escena 3D. En la Figura 55 se observa la imagen inicial (png) y las configuraciones que se realizan para que sea integrada en la escena virtual.

### Figura 55

*Implementación de UI en el escenario 3D.*



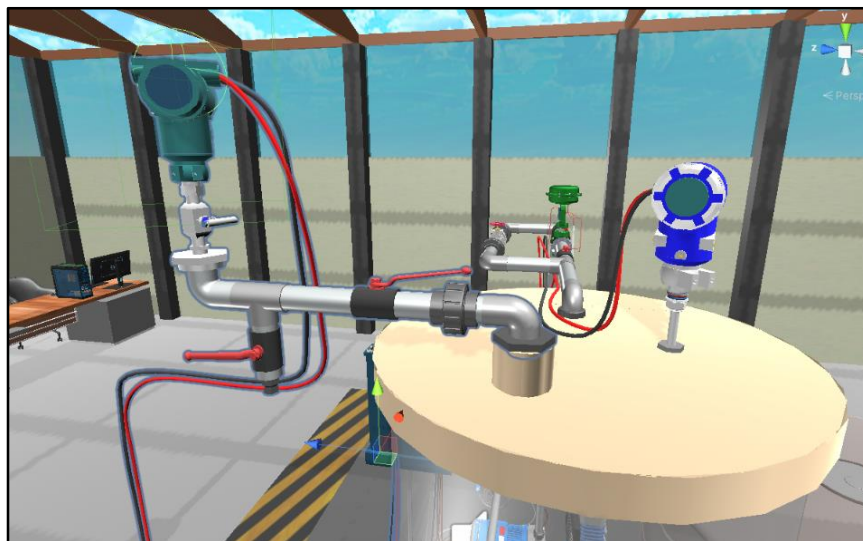
Una vez que se tiene la imagen en el escenario, se integra en ésta: selectores para el paso del modo de control, sliders para variar los valores del SetPoint en el modo de control automático y el Control Value en el modo de control manual, barras de progreso y finalmente objetos de tipo texto para visualizar los valores de los procesos de Nivel y Temperatura.

### ***Implementación del sistema de medición virtual de presión absoluta***

El sistema de medición virtual de presión absoluta está constituido por el transmisor de presión absoluta (PIT), la tubería de toma del proceso y las válvulas de paso. En la Figura 56 se observa el sistema virtual 3D.

### **Figura 56**

*Vista general del sistema virtual de presión absoluta*

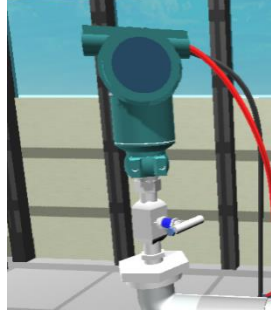

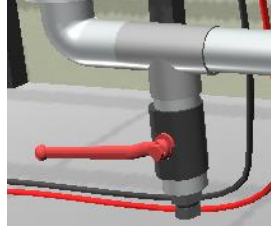


El sistema de medición virtual de presión absoluta en el diagrama P&ID pertenece al Lazo 3, en la Tabla 4 se identifica los elementos que constituyen el Lazo y se integran en el entorno 3D.



**Tabla 4**

*Identificación de los elementos virtuales del Lazo 3 de acuerdo al diagrama P&ID*

Simbología	Significado	Elemento 3D
PIT 003	Transmisor indicador de presión Lazo 3	
V-3A	Válvula manual Lazo 3, válvula A	
V-3B	Válvula manual Lazo 3, válvula B	

Para la calibración virtual se integra una ventana de ayuda en 2D con los instrumentos necesarios (Calibrador, transmisor, bomba manual), en la cual se puede efectuar el procedimiento y visualizar la información de mejor manera. Se crea la ventana mediante una imagen png y se integra en el Unity, seguido se convierte en tipo sprite y se agrega a un objeto de tipo canvas, como se vio en la Figura 54. La ventana cubre toda la pantalla del computador, para esto se configura el modo de renderizado en el canvas como “Screen Space - Overlay”. En la Figura 57 se observa la ventana 2D y la configuración que se realiza en el canvas.

**Figura 57**

*Ventana de calibración 2D y configuración del Canvas*



Todas las pantallas que proyecta el equipo calibrador (Fluke 754) durante el procedimiento de calibración se crean así mismo en formato png y se integran al Unity; estas imágenes se agregan al mismo canvas (Figura 57), posteriormente se programan de acuerdo al funcionamiento del DPC real.

**Figura 58**

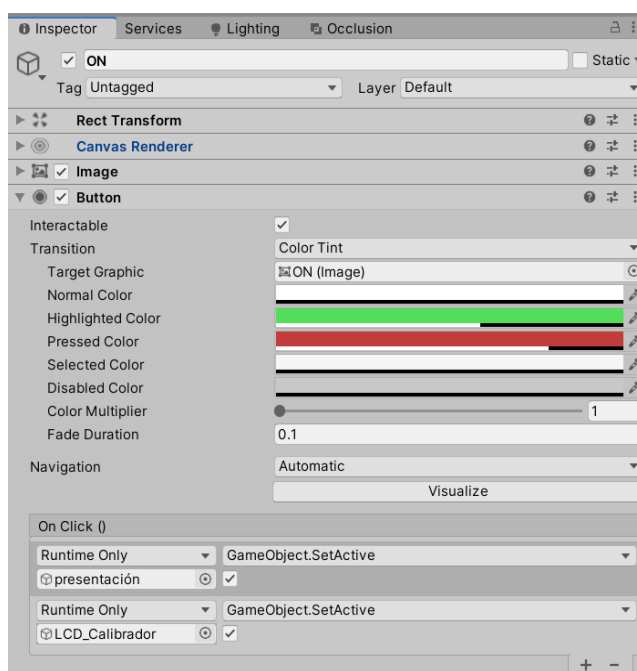
*Creación de pantallas del equipo calibrador Fluke 754*



Se integran también botones para interactuar con los instrumentos en la ventana 2D, en estos se programan el despliegue de las pantallas mediante la función “On Click()”, en la cual se agrega scripts o funciones necesarias. También se configura los colores para lograr el efecto requerido al presionarlos. En la Figura 59 se observa el botón “ON” del calibrador y sus configuraciones.

**Figura 59**

*Configuración del botón de encendido del calibrador*



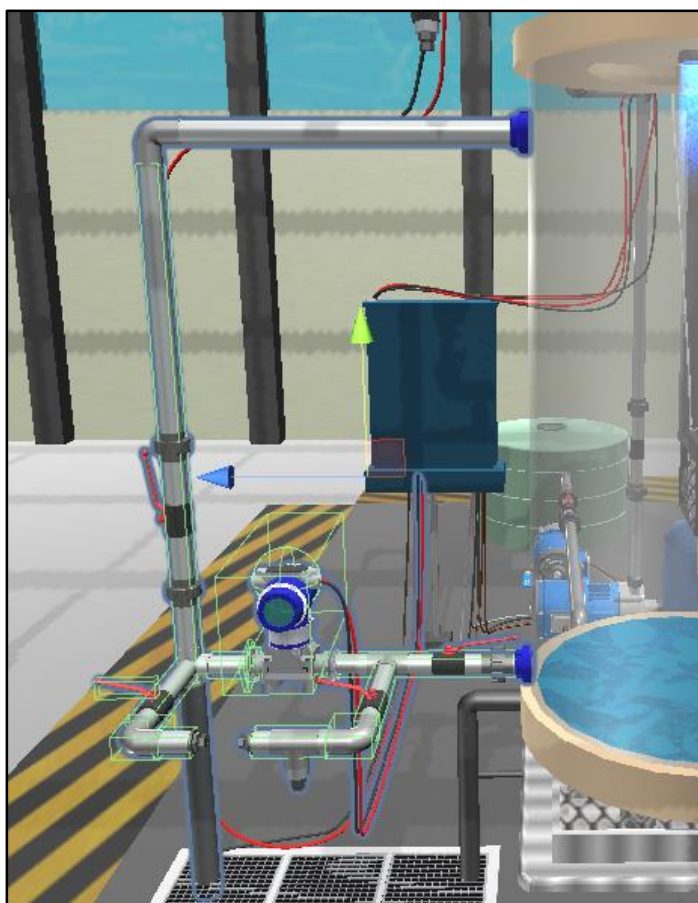
De la misma manera se configuran cada uno de los botones en la ventana 2D de acuerdo a la función que realicen. El funcionamiento del calibrador virtual en cuanto a navegación en el procedimiento de calibración es similar al equipo real, por lo que se puede revisar su manual para la realización de las prácticas de calibración virtuales.

### ***Implementación del sistema de medición virtual de presión diferencial***

El sistema de medición virtual de presión diferencial está constituido por el transmisor de nivel (LIT), las tuberías de toma del proceso y las válvulas de paso. En la Figura 60 se observa el sistema virtual 3D.

#### **Figura 60**

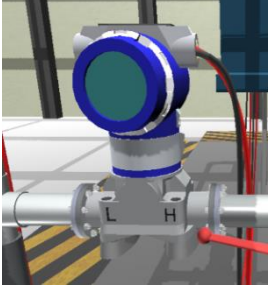
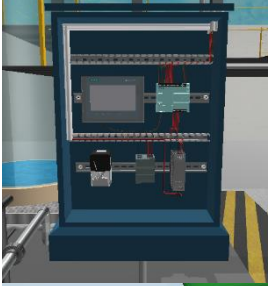
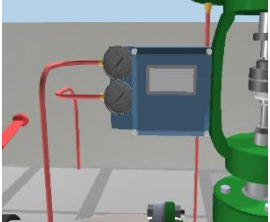
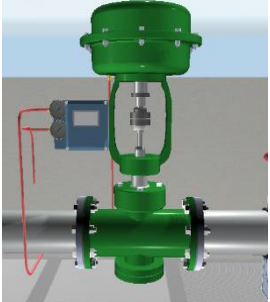
*Vista general del sistema virtual de presión diferencial.*

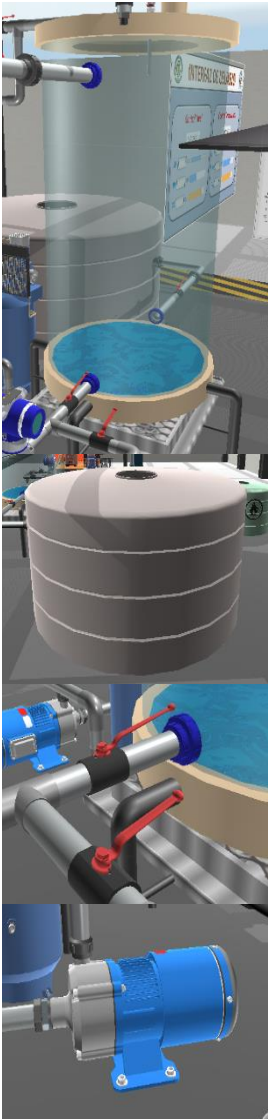


El sistema de medición virtual de presión diferencial en el diagrama P&ID pertenece al Lazo 1, en la Tabla 5 se identifica los elementos que constituyen el Lazo y se integran en el entorno 3D.

**Tabla 5**

*Identificación de los elementos virtuales del Lazo 1 de acuerdo al diagrama P&ID.*

Simbología	Significado	Elemento 3D
LIT 001	Transmisor indicador de nivel Lazo 1	
LC 001	Controlador de nivel Lazo1	
I/P	Convertor de corriente a presión	
LCV 001	Válvula de control de nivel Lazo 1	

Simbología	Significado	Elemento 3D
TK-1A NIVEL	Tanque de control de nivel Lazo1, tanque A	
T-1B DEPÓSITO	Tanque de depósito Lazo 1, tanque B	
V-1X	Válvulas Manuales Lazo1 (válvula X)	
M-1	Motor, Lazo 1	

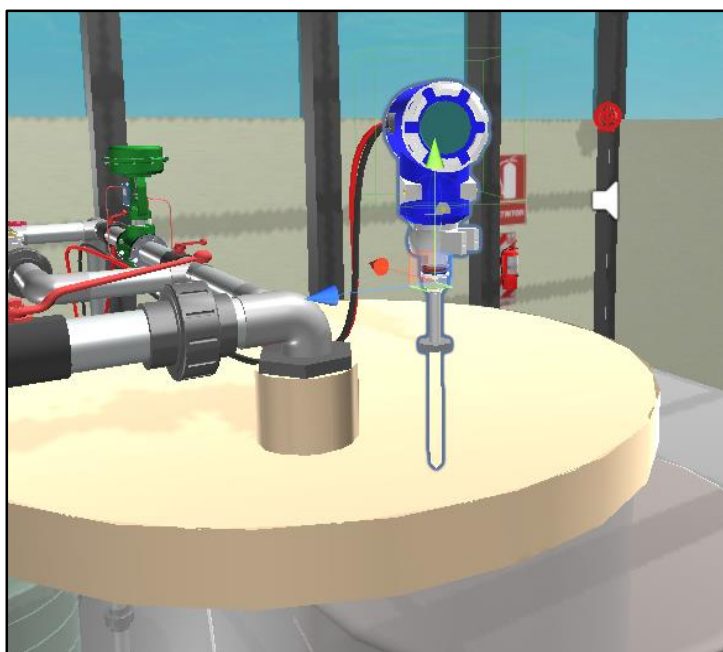
Así mismo, para la calibración virtual se integra una ventana de ayuda en 2D con los instrumentos necesarios, en este caso se reutiliza la ventana 2D del sistema de presión Absoluta (Figura 57) ya que el procedimiento en cuanto al manejo del equipo calibrador es el mismo. Únicamente se realiza el cambio en el despliegue de la información durante el procedimiento de calibración virtual (mediciones, unidades de medida, datos del transmisor, etc).

### ***Implementación del sistema de medición virtual de temperatura***

El sistema de medición virtual de temperatura está constituido por el transmisor de temperatura colocado sobre el tanque del proceso. En la Figura 61 se observa el sistema virtual 3D.

#### **Figura 61**




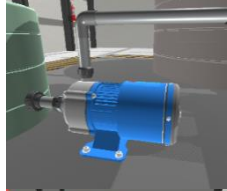


*Vista general del sistema virtual de presión absoluta*



El sistema de medición virtual de temperatura en el diagrama P&ID pertenece al Lazo 2, en la Tabla 6 se identifica los elementos que constituyen el Lazo y se integran en el entorno 3D.

**Tabla 6**

*Identificación de los elementos virtuales del Lazo 2 de acuerdo al diagrama P&ID*

Simbología	Significado	Elemento 3D
TIT 002	Transmisor indicador de temperatura Lazo 2	
TC 002	Controlador de temperatura Lazo 2	
DC/AC	Convertor DC/AC	
M-2	Motor, Lazo 2	
T-2A DEPÓSITO	Tanque de depósito Lazo 2, tanque A	
V-2	Válvula manual, Lazo 2	



En este caso también se integra una ventana de ayuda en 2D con los instrumentos necesarios (Calibrador, transmisor, pozo seco), en la cual se puede efectuar el procedimiento y visualizar la información de mejor manera. La configuración del canvas para esta ventana de ayuda es la misma de la Figura 62.

### Figura 62

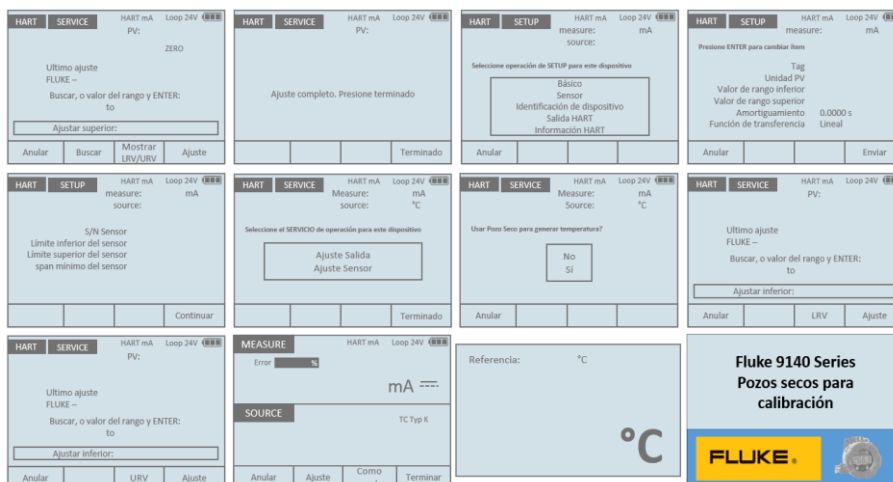
*Ventana de calibración 2D*



También, las pantallas que proyecta el equipo calibrador (Fluke 754) durante el procedimiento de calibración se crean en formato png y se integran al Unity para posteriormente programar de acuerdo al funcionamiento del DPC real.

**Figura 63**

*Creación de pantallas para los instrumentos en la ventana 2D.*



En este sistema también se integran botones para el despliegue de las pantallas. El funcionamiento del calibrador virtual en cuanto a navegación en el procedimiento de calibración es similar al equipo real, por lo que se puede revisar su manual para la realización de las prácticas de calibración virtuales.

### **Desarrollo de procedimientos de calibración en el entorno virtual**

Para los procedimientos de calibración, los equipos se diseñan en base a instrumentos de la marca Fluke, sin embargo, esto no garantiza que, en la aplicación, los instrumentos virtuales funcionen igual a dichos equipos, sino de manera semejante, con la finalidad que los usuarios puedan comprender como se realiza un procedimiento de calibración de transmisores “Smart”. El equipo calibrador virtual en la aplicación se diseñó en base al calibrador y documentador de procesos Fluke 754, por ende, se puede revisar el manual de calibración mediante el modo HART del Calibrador antes de realizar las prácticas virtuales.

En la Figura 64 se muestra la mesa virtual de trabajo en donde se encuentran los instrumentos para la realización de los procedimientos de calibración de los transmisores.

### Figura 64

*Vista general de los instrumentos virtuales de calibración.*

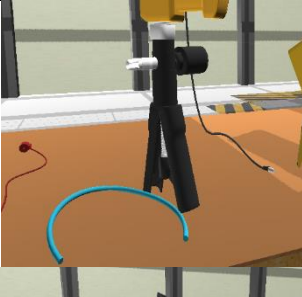

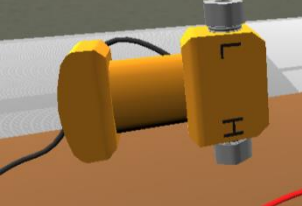



En la Tabla 7 se identifican los instrumentos de la mesa virtual de trabajo.

### Tabla 7

*Identificación de los instrumentos virtuales para la calibración*

Instrumento	Elemento 3D
Calibrador de procesos	

Instrumento	Elemento 3D
Bomba manual	
Módulo de presión absoluta	
Módulo de presión diferencial	
Pozo Seco	

### **Calibración**

Los procedimientos virtuales de calibración que se pueden realizar son:

- Calibración in situ del transmisor “Smart” de presión absoluta.
- Calibración in situ del transmisor “Smart” de presión diferencial.
- Calibración en mesa del transmisor de temperatura.

El procedimiento de calibración consiste en contrastar un IPB (Instrumento bajo prueba) con un IP (Instrumento Patrón) de mejor exactitud en la medida, y obtener el error que presenta el IBP. En este caso el IBP son los transmisores de procesos, los cuales se van a comparar con el equipo patrón. El error calculado lo muestra el equipo calibrador (DPC Fluke 754), y se lo obtiene mediante la ecuación 42.

$$error (\%) = \frac{mAT - mAC}{span (mA)} * 100\% \quad (42)$$

Donde:

- mAC → Corriente del instrumento patrón en mA
- mAT → Corriente del transmisor en mA
- span → span del rango (16 mA)

En el caso de los transmisores es común calibrar en corriente, ya que los transmisores de procesos son diseñados para enviar el valor de la variable física medida en un valor de corriente proporcional hacia otro dispositivo (generalmente un controlador).

En este caso, para la calibración, se aplica la variable física (presión, temperatura) al IPB y al IP y se lee o registra corriente en mA. Los transmisores entregan el valor medido en un rango de corriente de 4 a 20 mA, por lo tanto, el span de medida es de 16 mA, por lo que la ecuación 42 se reduce a lo siguiente:

$$error (\%) = (mAT - mAC) * 6.25 \quad (43)$$

La ecuación 43 es ingresada en el software de programación 3D para calcular el error en la medida y mostrar en la pantalla del calibrador.

La forma de generar el error en la medida es transparente para el usuario, sin embargo, lo que se realiza en el software de programación 3D es generar dos modelos matemáticos de primer orden, uno para el IBP y otro para el IP, dando una ganancia y un tiempo de establecimiento ligeramente diferente al uno del otro y generar una señal de entrada común para ambos modelos. Esto se explica con mayor detalle en los siguientes ítems.

### **Ajuste**

El ajuste se realiza con la finalidad de minimizar los errores que se encuentren fuera de la tolerancia seleccionada (error máximo permitido), para esto, se realiza el ajuste en la salida (corriente) y el ajuste en el sensor o entrada (variable física del proceso), una vez que se ajusta el transmisor es necesario repetir el procedimiento de calibración y observar si se redujeron los errores, en caso de que éstos sigan fuera de la tolerancia permitida es necesario repetir los procedimientos.

En el procedimiento de calibración, el valor medido tanto en el calibrador como en el transmisor se expresan en forma de corriente mediante la siguiente ecuación:

$$corriente (mA) = \frac{(URVmA - LRVmA) * (Vmed - LRV)}{(URV - LRV)} + LRVmA \quad (44)$$

Donde:

- URVmA → Valor superior de rango en mA
- LRVmA → Valor inferior de rango en mA
- Vmed → Valor de la variable física medida (inH<sub>2</sub>O, psi, °C)
- URV → Valor superior de rango de la variable física de medición
- LRV → Valor inferior de rango de la variable física de medición

El valor de corriente es obtenido mediante la ecuación de la recta, ya que la relación entre la variable del proceso vs corriente en el transmisor es lineal. En el calibrador, ya que este contiene la medida del patrón, el valor de corriente es el “real”, por lo tanto, los valores de URVmA y LRVmA son conocidos y constantes: 20 y 4 mA respectivamente, entonces la ecuación 34 se reduce a la siguiente:

$$\text{corriente}C \text{ (mA)} = \frac{16 * (V_{med} - LRV)}{(URV - LRV)} + 4 \quad (45)$$

La ecuación 45 es ingresada en el software de programación 3D para calcular la “corriente patrón”. En el caso del transmisor, con la finalidad de “ajustar” la medición se agrega un factor de corrección “**C**” (que parte con un valor inicial de 1) a la variable física medida. Esta corrección permite “ajustar” el sensor. La ecuación de medición de la variable del proceso en el transmisor es la siguiente:

$$V_{medT} = V_{med} * C \quad (46)$$

Donde:

- $V_{medT}$  → Valor de la variable física que muestra el transmisor
- $V_{med}$  → Valor de la variable física medida (inH<sub>2</sub>O, psi, °C)
- $C$  → Factor de corrección

El factor de corrección únicamente se aplica al transmisor, ya que este es el instrumento que se debe ajustar. El valor de la variable medida es convertida en corriente mediante la ecuación 47.

$$\text{corriente}T \text{ (mA)} = \frac{(URVmA - LRVmA) * (V_{med} - LRVaj)}{(URVaj - LRVaj)} + LRVmA \quad (47)$$

Donde:

- URVmA → Valor superior de rango en mA
- LRVmA → Valor inferior de rango en mA
- Vmed → Valor de la variable medida por el transmisor (inH<sub>2</sub>O, psi, °C)
- URVaj → Valor superior de rango ajustado
- LRVaj → Valor inferior de rango ajustado

Tanto la ecuación 46 como la ecuación 47 son ingresadas en el software de programación 3D para calcular y ajustar tanto la “variable medida” como la “corriente del transmisor” y mostrar en el calibrador y en el transmisor. El error se calcula con la ecuación 43 vista anteriormente, en donde *mAT* corresponde a *corrienteT* y *mAC* a *corrienteC*.

El Ajuste es dependiente completamente de la calibración, por lo tanto, si no se realiza correctamente el procedimiento de calibración no se ajustará el equipo. Esto se explica mediante la ecuación 47 de corriente en el Transmisor, ya que los valores para su cálculo se obtienen de la siguiente manera:

- **Factor de Corrección (C):** El factor de corrección se obtiene mediante la ecuación 48.

$$C = \frac{URV}{URVmed} = \frac{Valor\ real\ (IP)}{Valor\ medido\ (IBP)} \quad (48)$$

El valor de “*URVmed*” es el valor que mide el transmisor y se captura en el momento que se realiza el ajuste del sensor en el valor de rango superior.

Entonces, el factor de corrección es el cálculo de la relación que existe entre el valor “real” y el valor medido. Este cálculo se puede realizar en cualquier punto



(excepto el cero), sin embargo, se lo realiza en el URV por disponibilidad de función en el calibrador.

- **Valor inferior de rango en mA (*LRVmA*):** este valor se obtiene aplicando la corrección a partir del error calculado, es decir, se halla el valor real de la corriente en el punto inferior del rango (LRV). Dicho valor se obtiene mediante la ecuación 49:

$$LRVmA = mA_T - error(\%) * 0.16 \quad (49)$$

El valor de *mA<sub>T</sub>* es el valor que mide el transmisor en corriente en el punto inferior del rango.

- **Valor superior de rango en mA (*URVmA*):** este valor se obtiene aplicando la corrección a partir del error calculado, es decir, se halla el valor real de la corriente en el punto superior del rango (URV). Dicho valor se obtiene también mediante la ecuación 49:

$$URVmA = mA_T - error(\%) * 0.16 \quad (50)$$

El valor de *mA<sub>T</sub>* es el valor que mide el transmisor en corriente en el punto superior del rango.

- **Valor superior de rango ajustado (*URVaj*):** es el valor de la variable física del proceso que mide el transmisor en el punto superior del rango. Este valor se obtiene en el ajuste sensor del URV.
- **Valor inferior de rango ajustado (*LRVaj*):** es el valor de la variable física del proceso que mide el transmisor en el punto inferior del rango. Este valor se obtiene en el ajuste sensor del LRV.

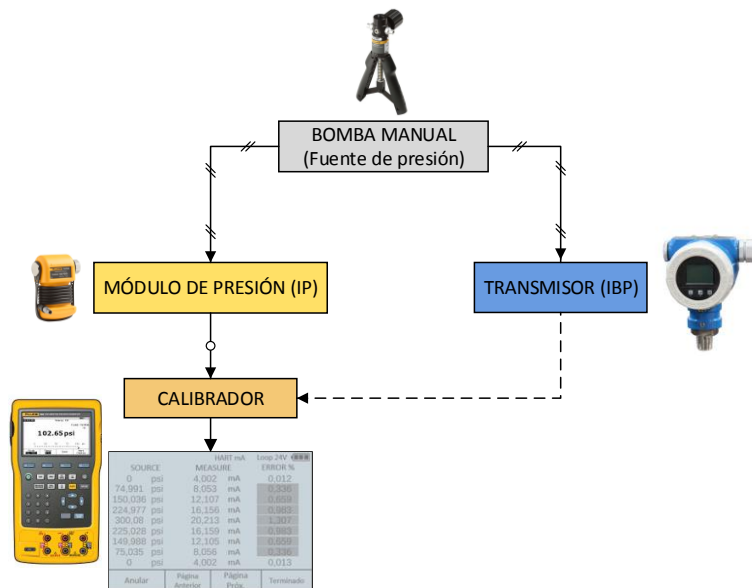
Es así que se utiliza los valores de corriente del transmisor y del equipo patrón obtenidos en la calibración, para ajustar el transmisor en la salida, y se utiliza los valores de la variable física medidos en el calibrador por el patrón y el transmisor en el procedimiento de ajuste para ajustar el sensor; de esta manera asegurar que se realice de manera correcta, tanto el procedimiento de calibración como el de ajuste.

***Animaciones e interacciones para la calibración del transmisor de presión absoluta***

Para realizar la calibración virtual del transmisor de presión absoluta se necesita una fuente de “presión”, en este caso “presión neumática” mediante la bomba manual (virtual), esta presión ingresa tanto en el módulo de presión como en el transmisor. El equipo calibrador documentador de procesos (DPC 754) recibe las mediciones del IP (módulo de presión) y del IBP (transmisor), realiza el cálculo del error y muestra al finalizar una tabla con los resultados obtenidos. La Figura 65 muestra el diagrama de flujo del procedimiento.

**Figura 65**

*Diagrama de flujo del procedimiento de calibración del transmisor de presión absoluta.*



Para generar la evolución del procedimiento en el tiempo se utiliza modelos dinámicos de primer orden (Función de transferencia, ecuación 18). Tanto el transmisor como el módulo de presión tienen un modelo dinámico, y para generar el error en la medida se asigna una ganancia y un tiempo de establecimiento ligeramente diferentes. Así, la “presión” de la bomba ingresa a ambos equipos (IP e IBP), cada uno tiene su comportamiento propio y por ende su medida. En la ecuación 51 se observa el modelo dinámico del calibrador y en la ecuación 52 del transmisor, para ambos se considera sin un tiempo muerto.

$$G_c(s) = \frac{1}{0.8s + 1} \rightarrow \text{Para el módulo de presión} \quad (51)$$

$$G_t(s) = \frac{1.013}{1.0s + 1} \rightarrow \text{Para el transmisor} \quad (52)$$

La programación en el software Unity 3D se realiza mediante Visual Studio, el cual trabaja en el dominio del tiempo, por lo que, las ecuaciones 51 y 52, al estar en el dominio de la frecuencia “s” deben ser llevadas al dominio del tiempo “t”. Por lo tanto, se aplica la ecuación 23, y se obtiene:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1 * x(t) - y(t)}{0.8} \rightarrow \text{Para el módulo de presión} \quad (53)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1.013 * x(t) - y(t)}{1.0} \rightarrow \text{Para el transmisor} \quad (54)$$

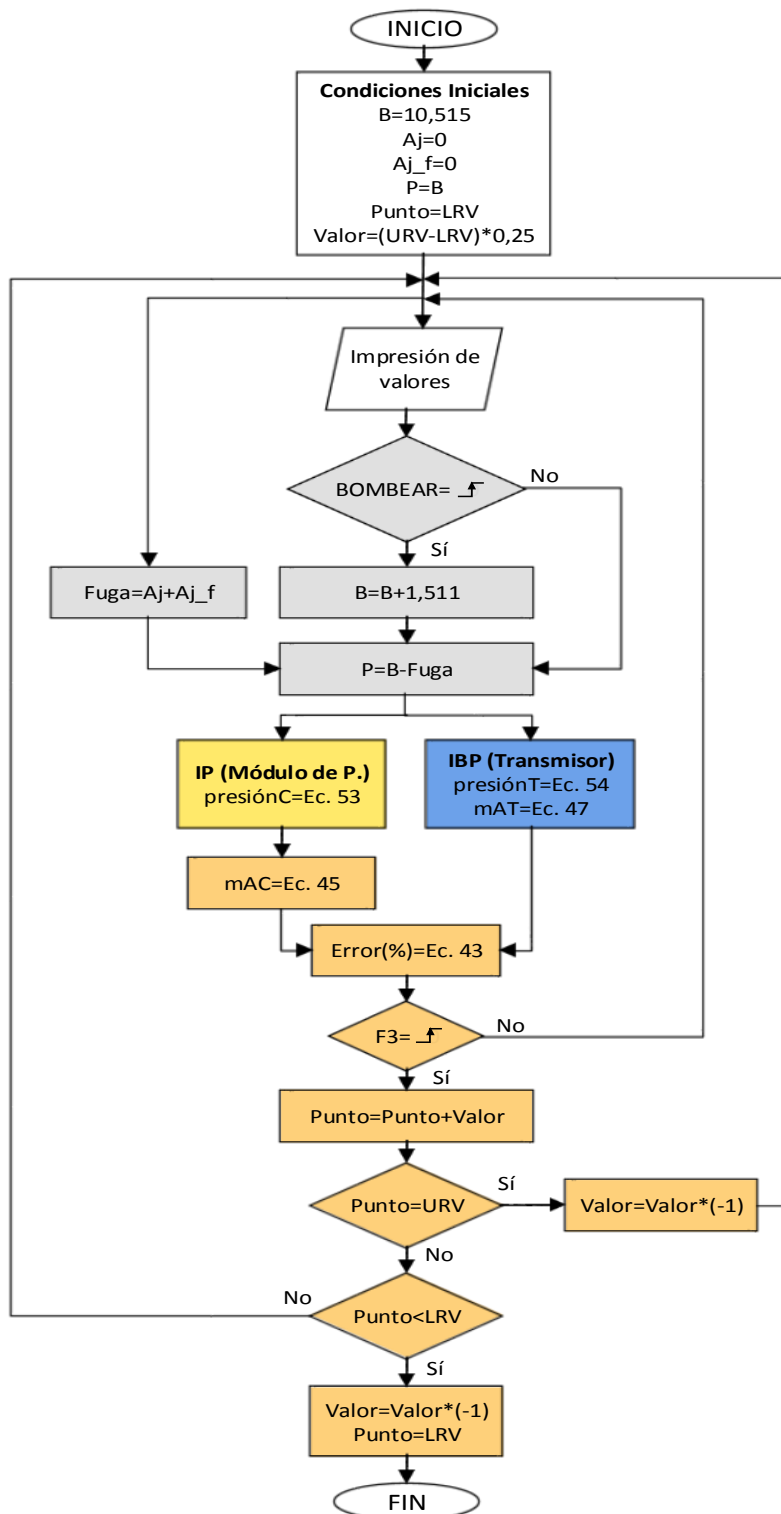
Donde:

- $y(t)$  → Salida del sistema (presión de salida o medida de presión)
- $x(t)$  → Entrada del sistema (presión de entrada)

Las ecuaciones 53 y 54 se ingresan en el software de programación 3D para emular la evolución de los procesos (IP e IBP) en el tiempo y generar el error en la medida. El procedimiento de calibración del diagrama de flujo de la Figura 64 se programa dentro del IDE del software 3D (Visual Studio 2019). Las líneas de código siguen la secuencia lógica del diagrama de flujo en la Figura 66, en donde los colores representan a cada instrumento, es decir, los cuadros de plomo son las operaciones que realizaría la bomba manual (fuente), los de amarillo el módulo de presión (IP), los naranjas el calibrador (DPC) y el cuadro de color azul el transmisor (IBP).

Figura 66

Diagrama de flujo de la programación en Visual Studio del procedimiento de calibración.



En el diagrama de flujo se observa que, inicialmente se cargan las condiciones iniciales en las variables, enseguida se imprimen dichos valores. El proceso de calibración inicia “bombeando” (bomba manual), el proceso de bombeo consiste en acumular un valor cada que se bombea y “desfogar” la bomba mediante los ajustes (sliders). Esta presión generada ingresa tanto al IP como al IBP, estos envían su medición al calibrador y éste calcula el error.

El procedimiento se realiza hasta completar la estrategia de calibración, en este caso se establece una estrategia de 5 puntos ascendentes y 4 descendentes (9 puntos en total). En el diagrama de flujo se observa también dos reglas de decisión importantes: “Bombear” y “F3”, estas representan a botones que están presentes en la ventana 2D de calibración (Figura 67). El botón “BOMBPEAR” se encarga de “generar” la presión al accionar la bomba manual, y el botón “F3” es el botón en el calibrador para aceptar la medición obtenida y guardarla; ambos botones realizan las acciones destinadas en el flanco de subida al hacer clic con el mouse.

**Figura 67**

*Ventana de calibración 2D*



En el diagrama se observa también variables de operación; la Tabla 8 describe el significado de cada variable.

**Tabla 8**

*Descripción de variables de operación.*

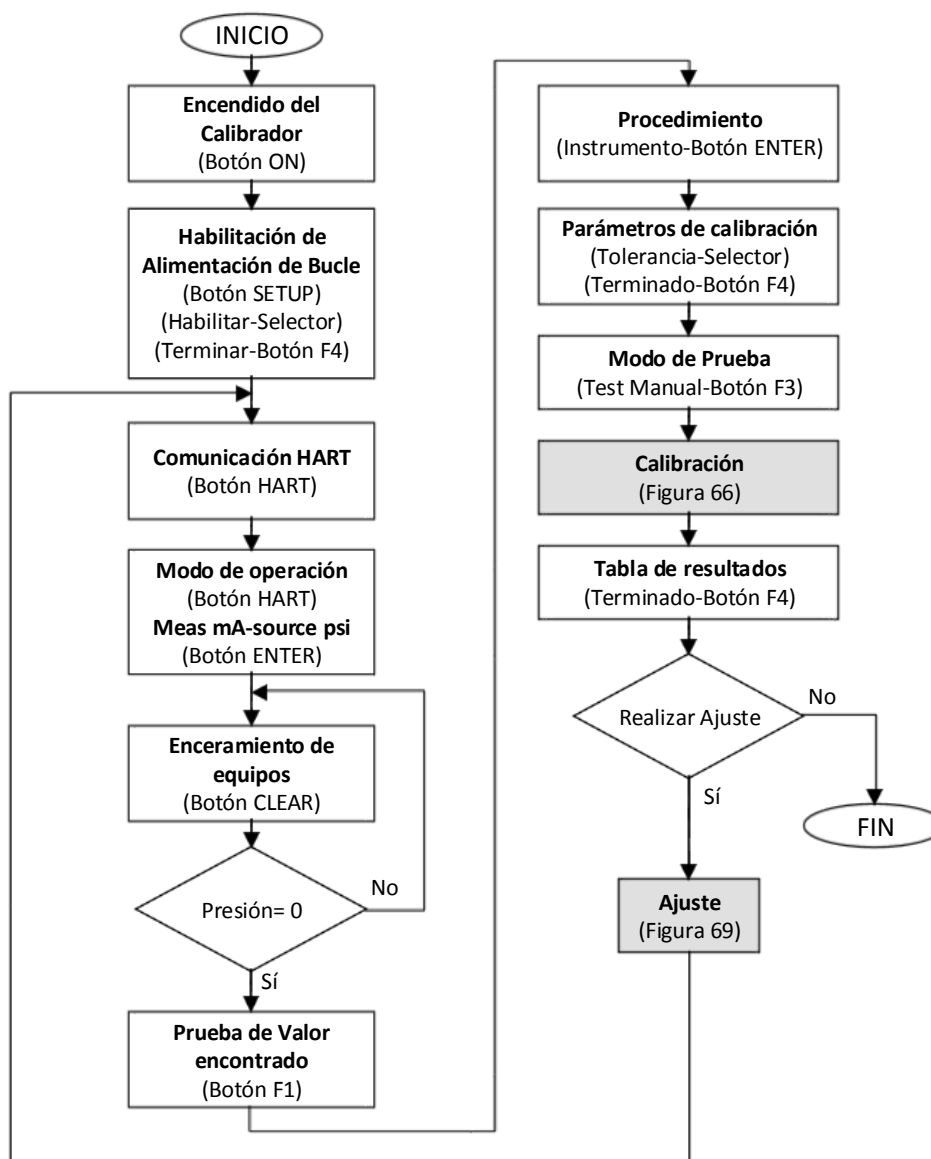
<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<b>B</b>	Variable de “bombeo”, representa el valor en la bomba manual (mango). Inicia con un valor de 10.515 psi
<b>Aj</b>	Perilla de ajuste en la bomba manual, representa la cantidad de “aire” que se libera (variación grande, de 0 a 5 psi). Inicia con un valor de 0 psi.
<b>Aj_f</b>	Perilla de ajuste fino en la bomba manual, representa la cantidad de “aire” que se libera (variación pequeña, de 0 a 0.05 psi). Inicia con un valor de 0 psi.
<b>P</b>	Presión que ingresa en el IP y el IBP, este valor es la suma de la presión “B” menos los ajustes “Aj” y “Aj_f”.
<b>Punto</b>	Esta variable se encarga de generar e indicar el punto de calibración. Inicia con el valor del LRV.
<b>Valor</b>	Esta variable es el valor que se suma al punto de calibración actual para generar el punto siguiente. Al ser 9 puntos de calibración (5 ascendentes y 4 descendentes) se calcula restando el URV menos el LRV y dividiendo para 4.

El procedimiento de calibración virtual se inicia al activar la ventana 2D (Figura 67); esta ventana se despliega presionando la tecla “Z” del teclado de la PC una vez que se haya completado el procedimiento previo. El procedimiento a realizarse antes de activar la ventana 2D consiste en cerrar la llave de toma del proceso, abrir la llave de purga, retirar la tapa para purgar la tubería, y colocar los instrumentos.

En las guías de usuario se detalla paso a paso el procedimiento para la realización de la calibración virtual. La utilización del equipo calibrador en la ventana 2D sigue la secuencia lógica del diagrama de flujo de la Figura 68.

**Figura 68**

*Diagrama de flujo del funcionamiento del calibrador virtual.*

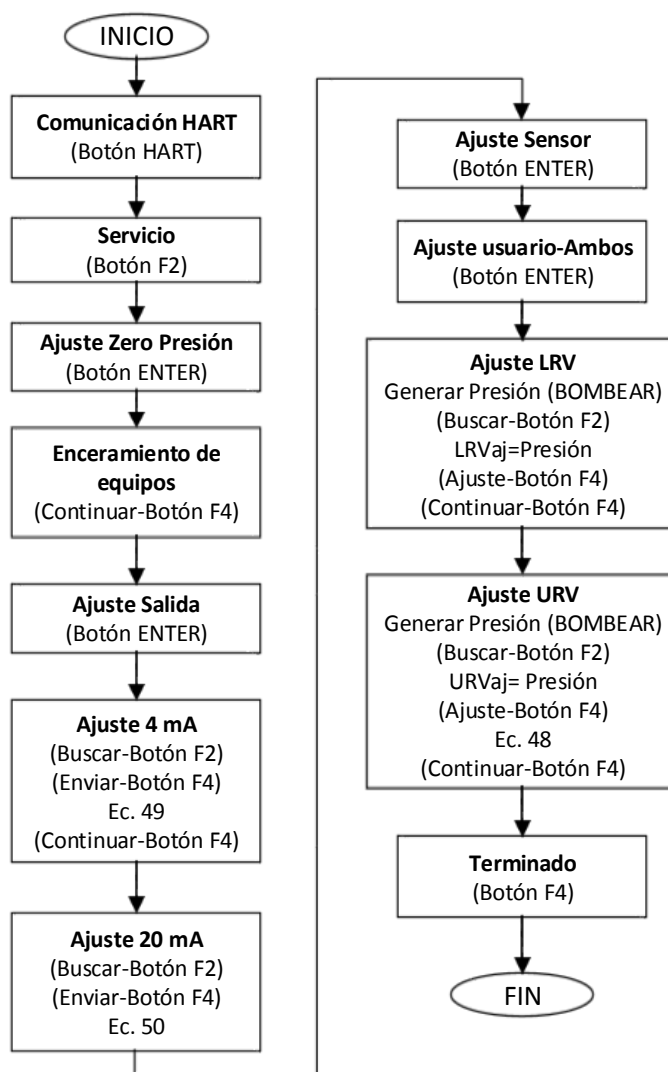




Cada bloque del diagrama de flujo de la Figura 68 corresponde a una pantalla del calibrador virtual, en cada uno se indica los botones que interactúan en dichas pantallas. Se observa el bloque de calibración (gris), el cual corresponde al diagrama de flujo de la Figura 66, también se observa el bloque de Ajuste; en la Figura 69 se detalla el diagrama de flujo de este procedimiento.

**Figura 69**

*Diagrama de flujo del procedimiento de ajuste en el calibrador virtual.*



La ventana 2D y los objetos 3D en el escenario virtual son utilizados para interactuar durante el procedimiento de calibración. Para el desarrollo de la práctica se han implementado diferentes animaciones, tales como: movimientos, mediciones dinámicas, efectos, sonidos, etc.

### ***Animaciones e interacciones 3D.***

En el entorno virtual 3D se integra un Avatar (Player) para que se pueda navegar dentro del laboratorio virtual e identificar los elementos que lo componen. Se integran mensajes indicativos y una flecha para identificar con qué objeto se puede interactuar o qué acción se puede realizar. En la Figura 70 se puede observar la toma de los equipos.

### **Figura 70**

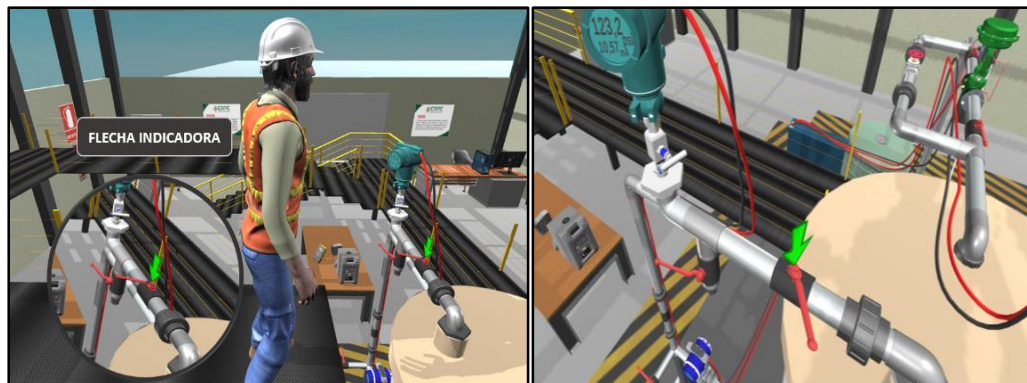
*Mesa con los equipos necesarios para la calibración.*



Se realiza la animación del giro de las válvulas como se observa en la Figura 71. Únicamente se puede interactuar con éstas cuando aparece la flecha indicadora.

**Figura 71**

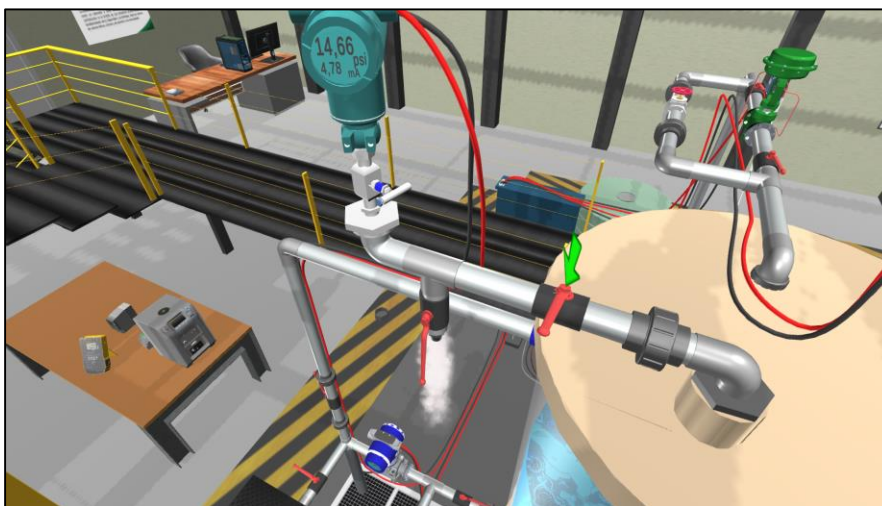
*Animaciones en apertura y cierre de las válvulas.*



Se realiza la animación del purgado de la tubería y se visualiza las conexiones de los instrumentos para la calibración, es decir que los instrumentos aparecen colocados y conectados automáticamente de manera correcta, con la finalidad que se observe e identifique las conexiones.

**Figura 72**

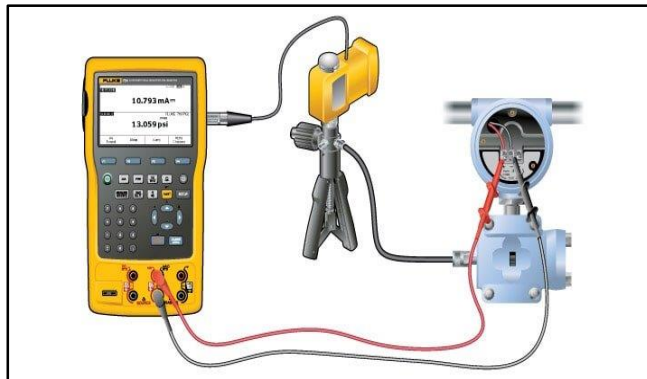
*Animación del purgado de las tuberías.*



En la Figura 73 se detalla las conexiones para entender de mejor manera.

**Figura 73**

*Conexión de instrumentos para calibración*

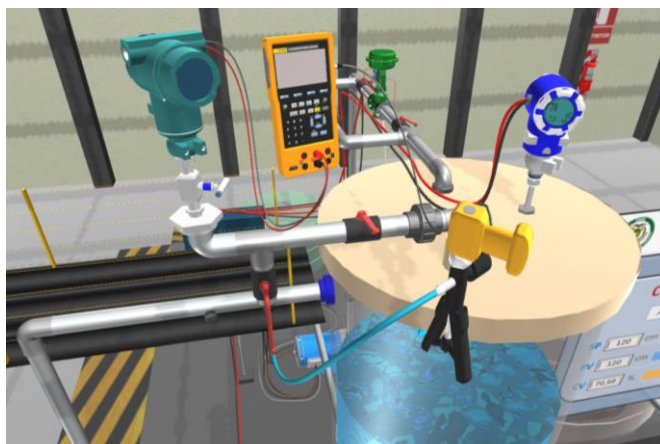


Nota. Tomado de (Fluke, 2017)

El transmisor se desconecta del proceso y se conecta al calibrador mediante los terminales de mA del calibrador y los cables de alimentación del transmisor. La bomba manual se conecta al transmisor de presión absoluta por medio de una manguera. El módulo de presión se conecta al puerto de presión del DPC. En la Figura 74 se observa dichas conexiones en el entorno 3D.

**Figura 74**

*Conexión de instrumentos para la calibración del transmisor de presión absoluta en el entorno 3D*



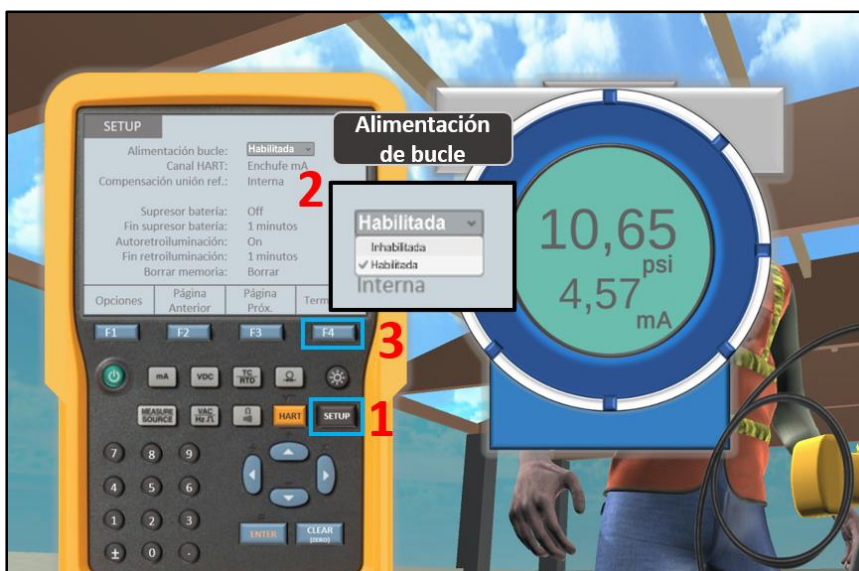
### **Animaciones e interacciones 2D.**

La pantalla 2D (Figura 67) se utiliza para interactuar con el calibrador, la bomba y el transmisor durante el proceso de calibración. En esta ventana el elemento más importante es el calibrador, puesto que con este se puede recoger las mediciones y mostrar los resultados finales. Se han implementado pantallas en base a las que originalmente muestra el DPC Fluke 754, por ende, para realizar la calibración se siguen los mismos pasos que se indica en el manual del equipo real. La presentación de las pantallas sigue la secuencia lógica del diagrama de flujo de la Figura 68 para la calibración y de la Figura 69 para el ajuste.

Se implementa la habilitación de la alimentación de bucle para visualizar el encendido del transmisor y por ende la “comunicación” entre el PIT y el DPC como se observa en la Figura 75. Esta acción también se visualiza en los elementos 3D.

### **Figura 75**

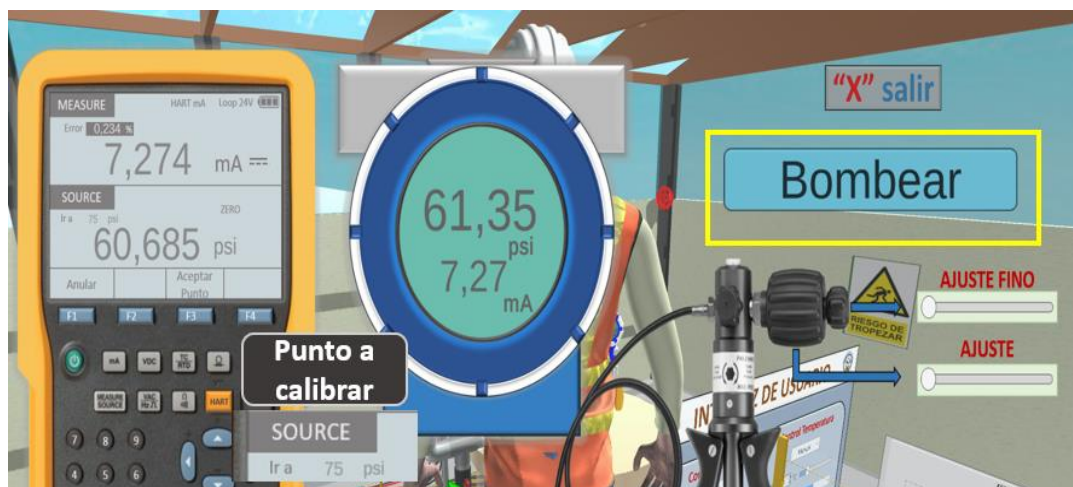
*Alimentación de bucle habilitada.*



Se implementa la prueba de VALOR ENCONTRADO para realizar el procedimiento de calibración del transmisor, en donde seguido se selecciona la tolerancia que se desee para el cálculo de los errores. La estrategia de prueba como ya se mencionó, se realiza con 5 puntos ascendentes y 4 puntos descendentes. Para este caso se implementa la prueba manual, en donde se integra el botón F3 para aceptar la medición y pasar al siguiente punto de calibración (Figura 66). El calibrador muestra un punto de presión determinado al cual se debe llegar con la bomba. Para esto se integra el botón BOMBLEAR, el cual acciona la bomba manual y se dará clic cuantas veces sea necesario para llegar a dicho punto, se procede a aceptar el mismo dando clic en la tecla F3 cuando el valor sea el correcto. También, se implementa las perillas de ajuste de la bomba manual para el “desfogue” de presión.

### Figura 76

*Calibración del transmisor de presión absoluta*



Se implementa la tabla final con los resultados de la calibración una vez que se termine con el procedimiento. Si algún error no se encuentra dentro de la tolerancia que se ha seleccionado se presentan marcados.

**Figura 77**

*Tabla de puntos de calibración y errores.*

SOURCE		HART mA		Loop 24V
		MEASURE		ERROR %
0	psi	4,002	mA	0,012
74,991	psi	8,053	mA	0,336
150,036	psi	12,107	mA	0,659
224,977	psi	16,156	mA	0,983
300,08	psi	20,213	mA	1,307
225,028	psi	16,159	mA	0,983
149,988	psi	12,105	mA	0,659
75,035	psi	8,056	mA	0,336
0	psi	4,002	mA	0,013

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------

Se implementa también las pantallas de ajuste. Se integra los procedimientos de Ajuste Cero Presión, Ajuste Salida y Ajuste Sensor. También, se habilita la pantalla para la configuración del rango del transmisor con fines prácticos en la opción HART – CONFIG, en donde se puede cambiar el rango de trabajo del Transmisor y repetir los procedimientos de calibración y Ajuste.

**Figura 78**

*Pantalla de configuración de rango del transmisor.*

HART		SETUP		HART mA	Loop 24V
measure: 170.515 mA					
Presione ENTER para cambiar ítem					
Tag	378951bj5				
Unidad PV	inH2O				
Valor de rango inferior	00,000	psi			
Valor de rango superior	300,00	psi			
Amortiguamiento	0.0000 s				
Función de transferencia	Lineal				

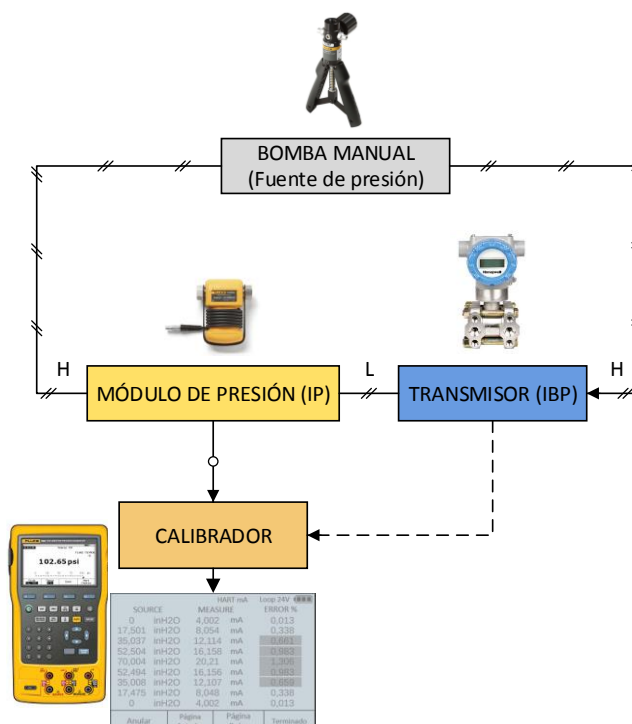
Anular			Enviar
--------	--	--	--------

## ***Animaciones e interacciones para la calibración del transmisor de presión diferencial***

La calibración virtual del transmisor de presión diferencial sigue la misma lógica del procedimiento de calibración de presión absoluta, visto en el punto anterior. En este caso la “presión” generada por la bomba manual se aplica a la toma de alta presión del transmisor y del módulo de presión; las tomas de baja presión del transmisor y del módulo se conectan entre sí. La Figura 79 muestra el diagrama de flujo del procedimiento.

**Figura 79**

*Diagrama de flujo del procedimiento de calibración virtual.*



Como ya se vio, se utiliza modelos dinámicos de primer orden para generar la evolución del procedimiento en el tiempo y el error en la medida.



Así, la “presión” de la bomba ingresa a ambos equipos (IP e IBP), cada uno tiene su comportamiento propio y por ende su medida. Los modelos dinámicos del calibrador y del transmisor son los mismos que se vieron en las ecuaciones 53 y 54, salvo la ganancia en el modelo del transmisor, que para este caso se ha asignado un valor de 1.014. Estas ecuaciones se ingresan en el software de programación 3D.

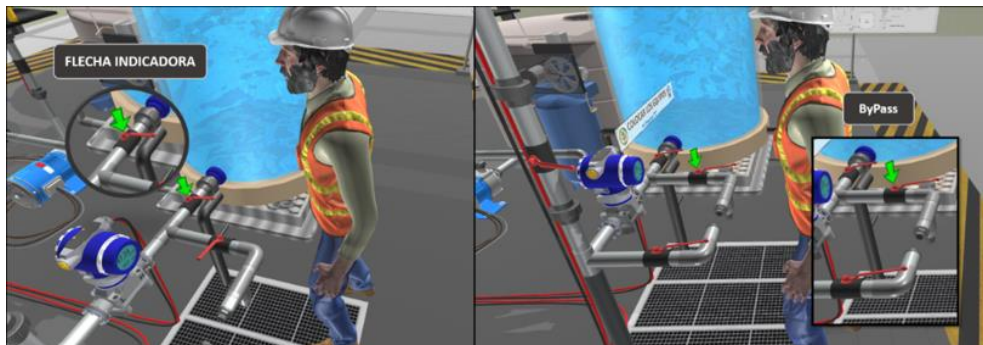
Las líneas de código para el diagrama de flujo de la figura 79 siguen la misma secuencia lógica del diagrama de flujo en la Figura 66 pero con los parámetros de diseño del sistema de presión diferencial. Así mismo, el procedimiento de calibración virtual se inicia al activar la ventana 2D. El procedimiento a realizarse antes de activar la ventana 2D consiste en cerrar la válvula de conexión a proceso (alta presión), cerrar la válvula de conexión a proceso (baja presión), abrir la válvula de ByPass de alta presión, abrir la válvula de ByPass de baja presión, retirar la tapa de purga, purgar la tubería, y colocar los instrumentos. En las guías de usuario se detalla paso a paso el procedimiento para la realización de la calibración virtual.

### ***Animaciones e interacciones 3D***

Se realiza la animación del giro de las válvulas (Figura 80), como procedimiento previo a colocar los instrumentos de calibración.

**Figura 80**

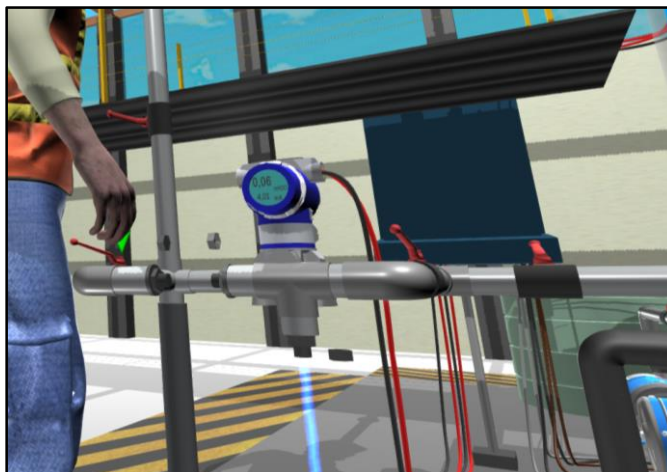
*Animaciones de apertura y cierre de válvulas en el sistema de presión diferencial*



Se realiza la animación del purgado de la tubería y se visualiza las conexiones de los instrumentos para la calibración, es decir que los instrumentos aparecen colocados y conectados automáticamente de manera correcta.

**Figura 81**

*Animación del purgado de las tuberías.*

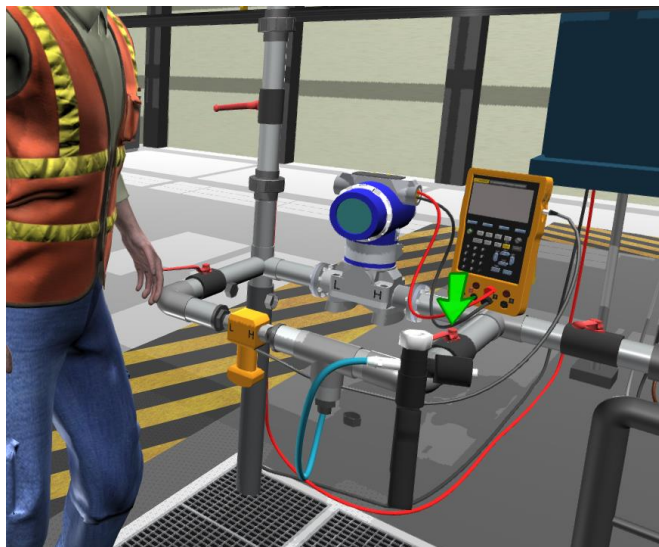


El transmisor se desconecta del proceso y se conecta al calibrador mediante los terminales de mA del calibrador y los cables de alimentación del transmisor. La bomba manual se conecta a la toma de alta presión del transmisor de presión diferencial y del

módulo de presión. El módulo de presión se conecta al puerto de comunicación del DPC. En la Figura 82 se observa dichas conexiones en el entorno 3D.

### **Figura 82**

*Conexión para la calibración del transmisor*



### ***Animaciones e interacciones 2D***

La misma pantalla 2D del sistema de presión absoluta (Figura 67) se utiliza para interactuar con el calibrador, la bomba y el transmisor durante el proceso de calibración. La presentación de las pantallas sigue la secuencia lógica del diagrama de flujo de la Figura 68 para la calibración y de la Figura 69 para el ajuste. Se implementa la habilitación de la alimentación de bucle para visualizar el encendido del transmisor y por ende la “comunicación” entre el PIT y el DPC, los datos que se despliegan en la pantalla del calibrador son los establecidos para el proceso de presión diferencial como se observa en la Figura 83. Esta acción también se visualiza en los elementos 3D.

**Figura 83**

*Alimentación de bucle habilitada.*




Se implementa la prueba de VALOR ENCONTRADO para realizar el procedimiento de calibración del transmisor, que funciona de la misma manera que en el procedimiento de presión absoluta, en donde seguido se selecciona la tolerancia que se desee para el cálculo de los errores. La estrategia también se realiza con 5 puntos ascendentes y 4 puntos descendentes.

Se implementa también la tabla final con los resultados de la calibración una vez que se termine con el procedimiento. Si algún error no se encuentra dentro de la tolerancia que se ha seleccionado se presentan resultados.

**Figura 84**

*Tabla de puntos de calibración y errores.*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	inH2O	4,002	mA	0,013
17,501	inH2O	8,054	mA	0,338
35,037	inH2O	12,114	mA	0,661
52,504	inH2O	16,158	mA	0,983
70,004	inH2O	20,21	mA	1,306
52,494	inH2O	16,156	mA	0,983
35,008	inH2O	12,107	mA	0,659
17,475	inH2O	8,048	mA	0,338
0	inH2O	4,002	mA	0,013
Anular		Página Anterior		Página Próx.
				Terminado

Se implementa también las pantallas de ajuste. Se integra los procedimientos de Ajuste Cero presión, Ajuste Salida y Ajuste Sensor. También, se habilita la pantalla para la configuración del rango del transmisor con fines prácticos en la opción HART – CONFIG, en donde se puede cambiar el rango de trabajo del Transmisor y repetir los procedimientos de calibración y Ajuste.

**Figura 85**

*Ventana de ajuste sensor en el URV.*

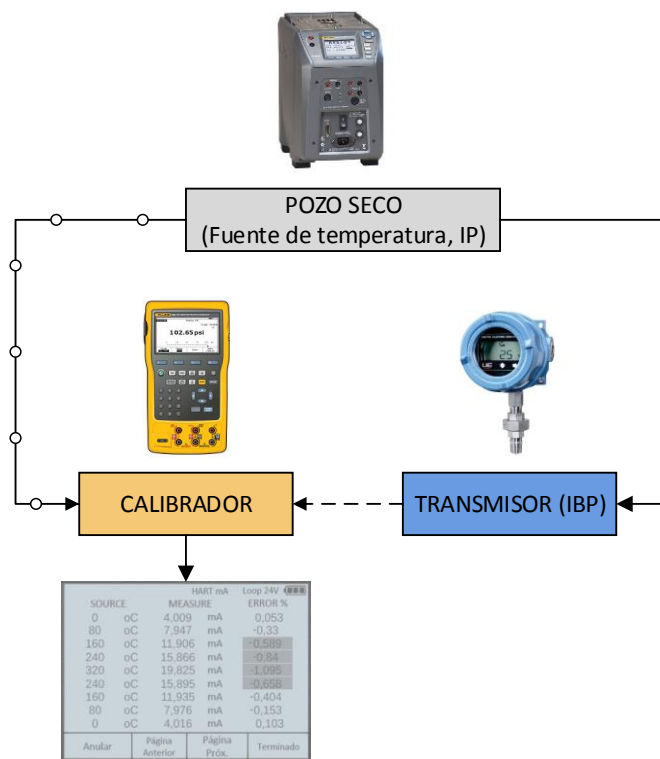


### ***Animaciones e interacciones para la calibración del transmisor de temperatura***

Para realizar la calibración virtual del transmisor de temperatura se necesita una fuente de temperatura, en este caso se obtiene mediante el pozo seco, esta temperatura es medida por el transmisor y enviada al calibrador. El equipo calibrador (DPC 754) recibe también la medida de temperatura del pozo seco, realiza el cálculo del error y muestra al finalizar una tabla con los resultados obtenidos. La Figura 86 muestra el diagrama de flujo del procedimiento.

**Figura 86**

*Diagrama de flujo del procedimiento de calibración virtual.*



Se observa que en este caso la fuente de temperatura también es el Instrumento Patrón; esto se debe a que el pozo es capaz de generar temperatura, estabilizarla y mantenerla constante en el transcurso del tiempo, también, se puede

visualizar la temperatura en la pantalla LCD del pozo y adicionalmente envía la medida al DPC.

Como se vio anteriormente, para generar la evolución del procedimiento en el tiempo se utiliza modelos dinámicos de primer orden. Tanto el IP como el IBP tienen un modelo dinámico con una ganancia y un tiempo de establecimiento ligeramente diferente el uno del otro. Así, ambos tienen su comportamiento propio y por ende su medida. En la ecuación 55 se observa el modelo dinámico en función del tiempo “t” del pozo seco (IP) y en la ecuación 56 del transmisor (IBP), para ambos se considera un tiempo muerto de cero.

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1 * x(t) - y(t)}{1.8} \rightarrow \text{Para el pozo seco} \quad (55)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{0.9899 * x(t) - y(t)}{4.6} \rightarrow \text{Para el transmisor} \quad (56)$$

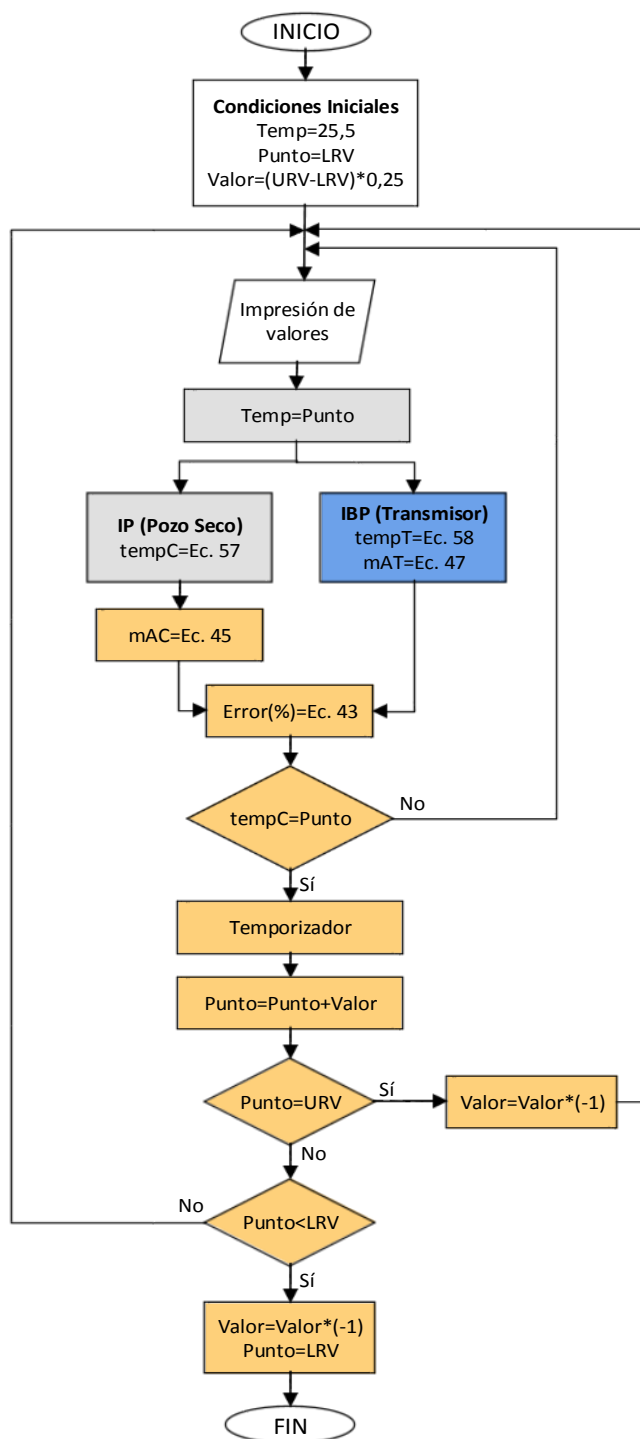
Donde:

- $y(t)$  → Salida del sistema (temperatura de salida)
- $x(t)$  → Entrada del sistema (temperatura de entrada)

Las ecuaciones 55 y 56 se ingresan en el software de programación 3D. El procedimiento de calibración del diagrama de flujo de la Figura 79 se programa dentro del IDE del software 3D (Visual Studio 2019). Las líneas de código siguen la secuencia lógica del diagrama de flujo en la Figura 87, en donde los colores representan a cada instrumento, es decir, los cuadros de plomo son las operaciones que realizaría el pozo seco, los de amarillo el equipo calibrador y el cuadro de color azul el transmisor.

**Figura 87**

Diagrama de flujo de la programación en Visual Studio para la calibración del transmisor de temperatura.





En el diagrama de flujo se observa que, inicialmente se cargan las condiciones iniciales en las variables, seguido se imprimen dichos valores. El proceso de calibración inicia seteando un valor de temperatura para ser “generado” en el Pozo, esta temperatura es medida por el Transmisor y enviada al calibrador para que se calcule el error.

Este procedimiento se realiza hasta completar la estrategia de calibración: 5 puntos ascendentes y 4 descendentes (9 puntos en total). Este procedimiento es automático, por lo que, una vez que se inicie, el punto siguiente de calibración se generará después de estabilizar el actual y tras un tiempo (Temporizador) elegido previamente. En el diagrama se observa también variables de operación; la Tabla 9 describe a qué hace relación cada variable.

**Tabla 9**

*Descripción de variables de operación.*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<b>Temp</b>	Esta variable se encarga de recibir el valor del punto a calibrar y setear en el pozo seco.
<b>Punto</b>	Esta variable se encarga de generar e indicar el punto de calibración. Inicia con el valor del LRV.
<b>Valor</b>	Esta variable es el valor que se suma al punto de calibración actual para generar el punto siguiente. Al ser 9 puntos de calibración (5 ascendentes y 4 descendentes) se calcula restando el URV menos el LRV dividiendo para 4.

El procedimiento de calibración virtual se inicia al activar la ventana 2D (Figura 88); ésta ventana se despliega presionando la tecla “Z” del teclado de la PC una vez que se haya completado el procedimiento previo.

El procedimiento a realizarse antes de activar la ventana 2D consiste en retirar el transmisor del proceso, llevarlo a la mesa de calibración, y colocarlo en el pozo seco. En las guías de usuario se detalla paso a paso el procedimiento para la realización de la calibración virtual. La ventana 2D y los objetos 3D en el escenario virtual son utilizados para interactuar durante el procedimiento de calibración. Para el desarrollo de la práctica se han implementado diferentes animaciones, tales como: movimientos, mediciones dinámicas, efectos, sonidos, etc.

### Figura 88

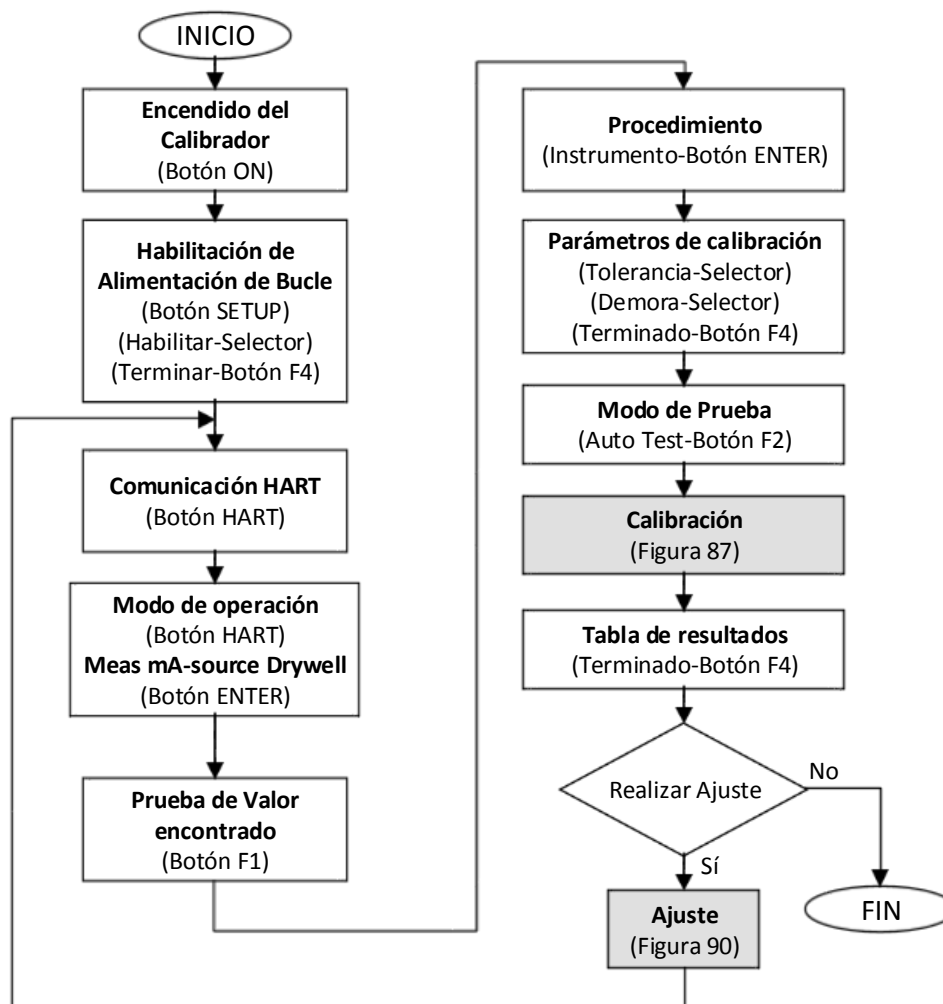
#### *Ventana de calibración 2D*



La utilización del equipo calibrador en la ventana 2D sigue la secuencia lógica del diagrama de flujo de la Figura 89.

**Figura 89**

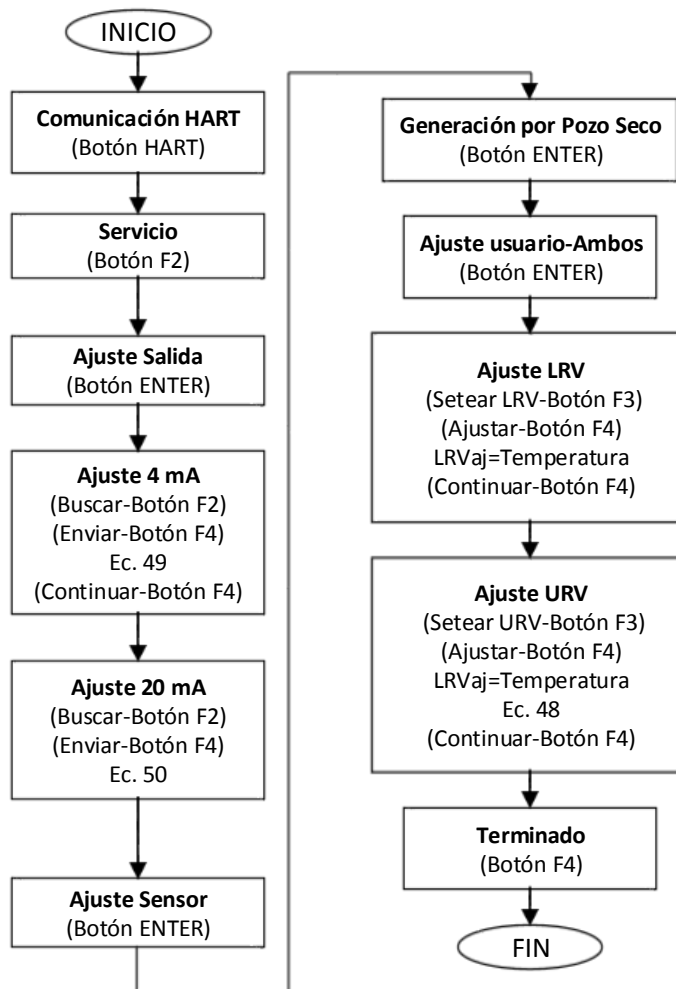
*Diagrama de flujo del funcionamiento del calibrador virtual en el procedimiento de temperatura.*



Cada bloque del diagrama de flujo de la Figura 89 corresponde a una pantalla del calibrador virtual, en cada uno se indica los botones que interactúan en dichas pantallas. Se observa el bloque de calibración (gris), el cual corresponde al diagrama de flujo de la Figura 87, también se observa el bloque de Ajuste; en la figura 90 se detalla el diagrama de flujo de este procedimiento.

**Figura 90**

*Diagrama de flujo del procedimiento de Ajuste en el calibrador virtual*



### ***Animaciones e interacciones 3D***

Se visualiza las conexiones de los instrumentos para la calibración, es decir que los instrumentos aparecen colocados y conectados automáticamente de manera correcta, con la finalidad que se observe e identifique las conexiones, también se observan las mediciones en “tiempo real” en todos los equipos (calibrador, pozo seco, transmisor). En la Figura 91 se detalla las conexiones para entender de mejor manera.

**Figura 91**

*Conexión de instrumentos para calibración*



*Nota.* Tomado de (Fluke, 2015)

El transmisor se conecta al calibrador mediante los terminales de mA del calibrador y los puertos (tornillos en la parte trasera) de alimentación del transmisor. El transmisor se inserta en el pozo seco. El pozo seco se conecta al puerto de comunicación del DPC. En la Figura 92 se observa dichas conexiones en el entorno 3D.

**Figura 92**

*Conexión de instrumentos en el entorno 3D*



### **Animaciones e interacciones 2D**

La pantalla 2D (Figura 88) se utiliza para interactuar con el calibrador, el pozo seco y el transmisor durante el proceso de calibración. En esta ventana el elemento más importante es el calibrador, puesto que con este se puede recoger las mediciones y mostrar los resultados finales. Se han implementado pantallas en base a las que originalmente muestra el DPC Fluke 754 en el proceso de calibración de transmisores de temperatura, por ende, para realizar la calibración se siguen los mismos pasos que se indica en el manual del equipo real. La presentación de las pantallas sigue la secuencia lógica del diagrama de flujo de la Figura 89 para la calibración y de la Figura 90 para el ajuste.

Se implementa la habilitación de la alimentación de bucle para visualizar el encendido del transmisor y por ende la “comunicación” entre el PIT y el DPC. Esta acción también se visualiza en los elementos 3D.

### **Figura 93**

*Alimentación de bucle habilitada*




Se implementa la prueba de VALOR ENCONTRADO para realizar el procedimiento de calibración del transmisor, en donde seguido se selecciona la

tolerancia que se desee para el cálculo de los errores. La estrategia de prueba se realiza con 5 puntos ascendentes y 5 puntos descendentes. Para este caso se implementa la prueba automática, en donde las mediciones del transmisor se tomarán automáticamente una vez que el pozo seco estabilice su temperatura generada y tras un tiempo de demora seleccionado. Se implementa la tabla final con los resultados de la calibración una vez que se termine con el procedimiento. Si algún error no se encuentra dentro de la tolerancia que se ha seleccionado se presentan resaltados.

#### Figura 94

*Tabla de puntos de calibración y errores.*

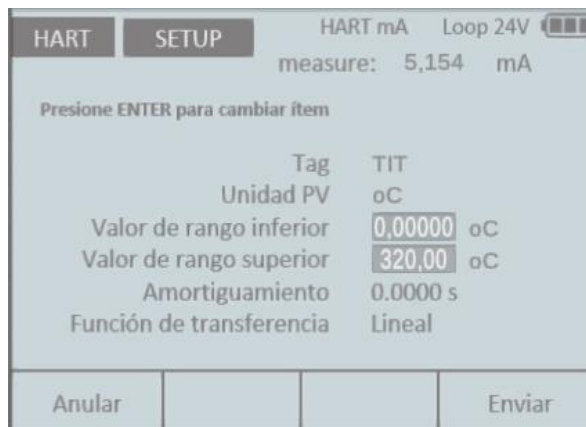
SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	oC	4,009	mA	0,053
80	oC	7,947	mA	-0,33
160	oC	11,906	mA	-0,589
240	oC	15,866	mA	-0,84
320	oC	19,825	mA	-1,095
240	oC	15,895	mA	-0,658
160	oC	11,935	mA	-0,404
80	oC	7,976	mA	-0,153
0	oC	4,016	mA	0,103

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------

Se implementa también las pantallas de ajuste. Se integra los procedimientos de Ajuste Salida y Ajuste Sensor. También, se habilita la pantalla para la configuración del rango del transmisor con fines prácticos en la opción HART – CONFIG, en donde se puede cambiar el rango de trabajo del Transmisor y repetir los procedimientos de calibración y Ajuste.

**Figura 95**

*Pantalla de configuración de rango del transmisor.*



### **Animaciones generales para interacción con el entorno virtual**

Para navegar en el entorno virtual 3D se dispone de un avatar o “Player”, el cual puede ser direccionado de acuerdo a lo que se detalla en la Tabla 10. El avatar es utilizado para identificar los elementos que componen el escenario virtual, también, el avatar es el objeto de “juego”, puesto que este habilita el elemento con el cual se va a interactuar, es decir que cuando este se encuentre junto a algún elemento de interacción, dicho elemento se habilitará para poder usarlo. En el avatar se integra una cámara de 360 grados, con la cual se tiene un libre movimiento alrededor del mismo para poder visualizar todos los elementos dentro del escenario.

**Tabla 10**

*Teclas para uso del avatar o Player*

<b>Teclas</b>	<b>Función con el Player</b>
<b>Tab</b>	Cambiar el modo de desplazamiento
<b>W</b>	Caminar hacia adelante
<b>A</b>	Caminar hacia la izquierda
<b>S</b>	Caminar hacia atrás o regresa (según el modo de desplazamiento)



Teclas	Función con el Player
D	Caminar hacia la derecha
C	Acercar la vista del player (zoom)
V	Regresar al modo de vista por defecto
Espacio	Saltar

Quando se acerque al Player a algún lugar del proceso, una flecha (Figura 96) indicará con qué objeto se puede interactuar. Así mismo a medida que se realice los procedimientos de calibración se muestra mensajes con indicaciones pertinentes, se habilitan teclas y funciones de acuerdo al desarrollo de la práctica. Siempre se puede acceder a una ventana de ayuda presionando la tecla “H” del computador.

### Figura 96

a) Flecha de interacción, b) Mensajes indicativos.



### Teclas de interacción

Se puede interactuar con algunos elementos del entorno virtual, en la Tabla 11 se enlista las teclas de interacción disponibles y su funcionamiento. Únicamente se puede interactuar con el elemento que la flecha o el mensaje indiquen.

**Tabla 11**

*Teclas de interacción con el proceso virtual.*

<b>Teclas</b>	<b>Función con el Player</b>
<b>F</b>	Abrir las válvulas. También puede variar el SetPoint y Control Value en los procesos de manera Ascendente.
<b>G</b>	Cerrar las válvulas. También puede variar el SetPoint y Control Value en los procesos de manera Descendente.
<b>Q</b>	Colocar y retirar los equipos del proceso.
<b>E</b>	Purgar las tuberías.
<b>H</b>	Mostrar ventana de ayuda.
<b>Z</b>	Visualizar los equipos en 2D
<b>X</b>	Cerrar las ventanas de ayuda.

### **Configuraciones**

Se integra la opción de cambiar el rango de trabajo de los transmisores virtuales, para esto se define un rango de operación en cada uno, que es el rango máximo que puede medir el transmisor y dentro del cual se puede configurar su salida de 4 a 20 mA. En la Tabla 12 se observa la información y rangos asignados a cada transmisor.

**Tabla 12**

*Información asignada a cada transmisor.*

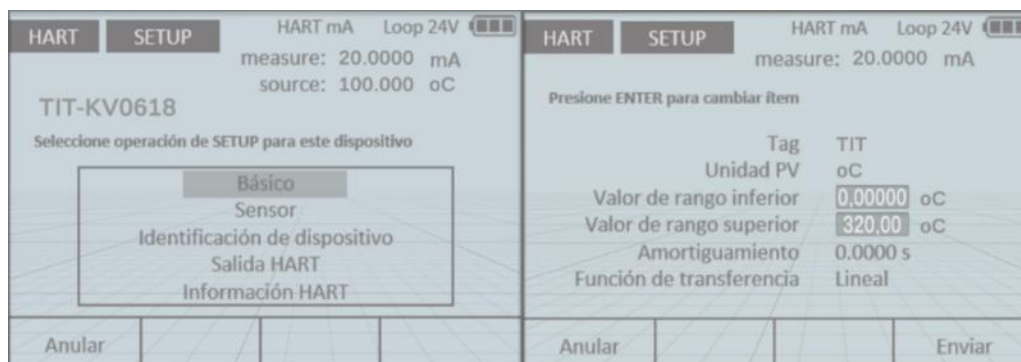
<b>Transmisor</b>	<b>Serie transmisor</b>	<b>Serie sensor</b>	<b>Rango de medición</b>	<b>Rango de trabajo</b>
<b>Presión Absoluta</b>	0504 PT-RV0618	VR050696	(0 a 500) psi	(0-300) psi
<b>Presión Diferencial</b>	1806 DPT-0405	KR180496	(-150 a 150) inH2O	(0-70) inH2O
<b>Temperatura</b>	0504 TIT-KV0618	184 TC-TypJ	(-25 a 650) °C	(0 a 320) °C

En la Tabla 12 se observa el rango de trabajo en cada transmisor, este es el rango en el que está configurado por defecto los transmisores, ya que, de acuerdo al diseño realizado, los procesos trabajan en dicho rango, es decir que en este rango la salida es de 4 a 20 mA; sin embargo, se puede cambiar el rango de trabajo por otro diferente dentro del rango de medición del transmisor, pero únicamente con fines prácticos para realizar los procedimientos de calibración.

Para cambiar el rango de trabajo en los transmisores se integra la opción “configuración” (SETUP) en el modo HART del calibrador, ingresando a la opción “Básico”; aquí se ingresa el nuevo rango mediante el teclado de la PC. Esta opción funciona de la misma manera para todos los transmisores.

**Figura 97**

a) Setup Menu(HART), b) Cambio de rango



### Desarrollo del algoritmo de control PID para el control del sistema virtual

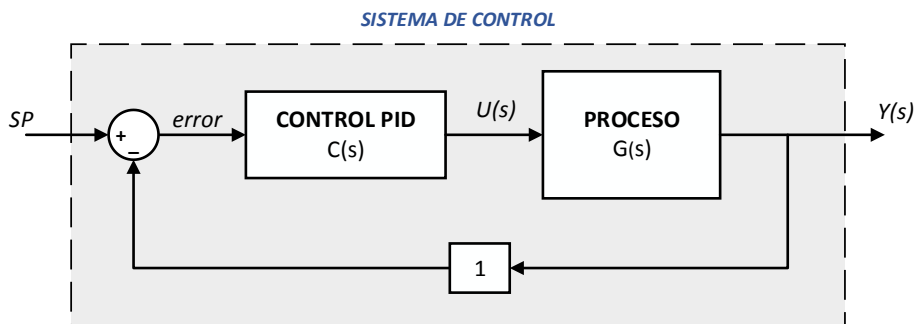
Se implementa un controlador PID para cada proceso virtual a controlar (temperatura y nivel), para esto se realiza la realimentación en la salida del sistema y a

partir de los modelos establecidos se calculan las constantes P, I, D. (Proporcional, Integral, Derivativa).

En la Figura 98 se observa el diagrama de bloques del sistema en el dominio de la frecuencia. En la realimentación se observa una ganancia de uno debido a la linealidad con la cual los transmisores entregan su medida.

### Figura 98

*Diagrama de Bloques del sistema de control implementado*



Ya que en el software de programación 3D se trabaja en el dominio del tiempo, al igual que los modelos de los procesos el controlador debe estar en el dominio del tiempo, por lo tanto, se utiliza el algoritmo PID descrito en la ecuación 57.

$$c(t) = K * \left[ e(t) + \frac{1}{Ti} \int e(t)dt + Td \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (57)$$

Se calcula las constantes: proporcional (K), integral (Ti) y derivativa (Td) mediante los métodos de Cohen Coon para el proceso de nivel, y Lambda agresivo para el proceso de temperatura, se evalúa su funcionamiento en el entorno virtual y se ajusta las constantes obtenidas para integrarse en el software de programación 3D.

### Control para el proceso de Nivel

Para calcular las constantes del PID se necesita la función de transferencia del proceso; la cual es descrita en la ecuación 19. Se obtiene el valor de las constantes para un controlador PI de Cohen Coon mediante las ecuaciones de la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Parámetros de sintonización de acuerdo al método de Cohen Coon*

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PI	$\frac{T}{K L} \left( 0.9 + \frac{L}{12 T} \right)$	$\frac{L (3 L + 30 T)}{20 L + 9 T}$	0

Se diseña el controlador para el proceso de Nivel en base al modelo correspondiente (ecuación 19).

$$G(s) = \frac{0.9}{2.3s + 1} e^{-1.5s}$$

Diseño del controlador PI de Cohen Coon:

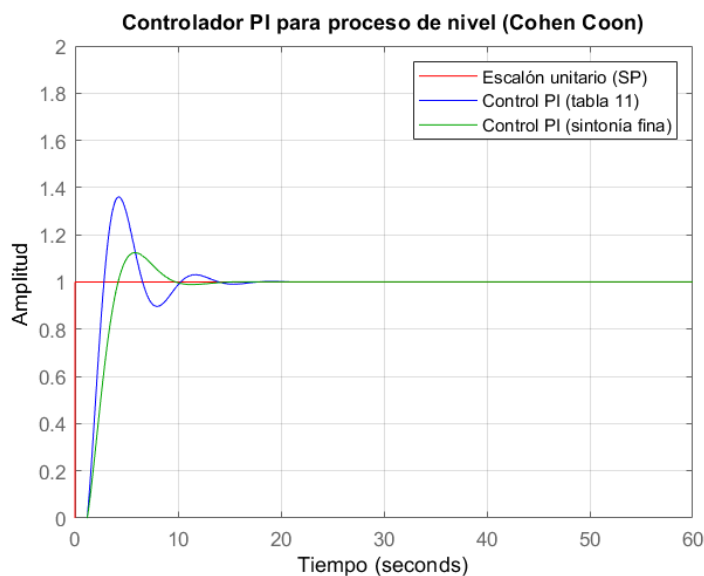
$$K_p = \frac{T}{K L} \left( 0.9 + \frac{L}{12 T} \right) = \frac{2.3}{0.9 * 1.5} \left( 0.9 + \frac{1.5}{12 * 2.3} \right) = 1.6259$$

$$T_i = \frac{L (3 L + 30 T)}{20 L + 9 T} = \frac{1.5 (3 * 1.5 + 30 * 2.3)}{20 * 1.5 + 9 * 2.3} = 2.17456 \text{ s}$$

Una vez obtenido las constantes del controlador se integran en el software de programación y se evalúa su comportamiento. Se realiza una sintonía fina en la ganancia del controlador ( $K_p$ ), obteniendo así las constantes definitivas ( $K_p=1.06259$ ,  $T_i=2.17456$ ). En la Figura 99 se observa la curva de comportamiento del sistema de control implementado.

**Figura 99**

*Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario.*



Dentro del software se programa para que la señal de control “CV” se muestre en valores porcentuales (0 al 100 %), en donde con el 100 % se llegue a obtener la altura de 170 cm de líquido en el tanque. Es decir que los 170 cm representan el 90% de la altura máxima (Ganancia  $K_p=0.9$  del modelo).

### ***Control para el proceso de Temperatura***

Para calcular las constantes del PID se necesita la función de transferencia del proceso; la cual es descrita en la ecuación 20. Se obtiene el valor de las constantes para un controlador PID agresivo de Lambda mediante las ecuaciones de la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Parámetros de sintonización de acuerdo al método de Lambda agresivo*

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>PID</b>	$\frac{1}{K}$	$T + \frac{L}{2}$	$\frac{T L}{L + 2 T}$

Se diseña el controlador para el proceso de temperatura en base al modelo correspondiente (ecuación 20).

$$G(s) = \frac{0.61}{100.7s + 1} e^{-1.5s}$$

Diseño del controlador PID Lambda agresivo.

$$K_p = \frac{1}{K} = \frac{1}{0.61} = 1.63934$$

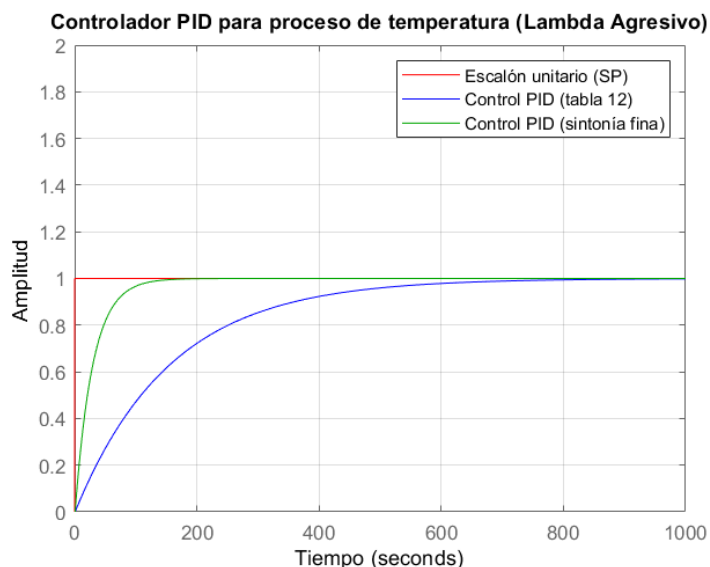
$$T_i = T + \frac{L}{2} = 100.7 + \frac{1.5}{2} = 101.45 \text{ s}$$

$$T_d = \frac{T L}{L + 2 T} = \frac{100.7 * 1.5}{1.5 + 2 * 100.7} = 0.744445 \text{ s}$$

Una vez obtenido las constantes del controlador se integran en el software de programación y se evalúa su comportamiento. Se realiza una sintonía fina en la ganancia del controlador ( $K_p$ ), obteniendo así las constantes definitivas ( $K_p=5.56$ ,  $T_i=101.45$ ). En la Figura 100 se observa la curva de comportamiento del sistema de control implementado.

### Figura 100

*Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario.*



Dentro del software se programa para que la señal de control “CV” se muestre en valores porcentuales (0 al 100 %), en donde con el 100 % se llegue a obtener la temperatura de 320 °C dentro del tanque. Es decir que los 320 °C representan el 61% de la temperatura máxima (Ganancia  $K_p=0.61$  del modelo).

### ***Integración numérica***

La ecuación 23 representa el modelo dinámico típico de un proceso autorregulado en función del tiempo, la cual se obtuvo a partir de la función de transferencia. El algoritmo de control PID entrega una señal  $U(s)$  de acuerdo al diagrama de la Figura 98, esta señal en el dominio del tiempo se representa como  $u(t)$  y es entregada por la ecuación 57, la cual resulta ser la señal de entrada al proceso, obteniendo así la ecuación 58.



$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{Kp * u(t - L) - y(t)}{T} \quad (58)$$

Como se observa, la ecuación 58 es una ecuación diferencial, por lo que es necesario resolverla para obtener el valor de la salida del proceso  $y(t)$ , ya que es la variable del proceso (PV). La solución de la ecuación 58 se la obtiene mediante la integración numérica de Euler.

$$Y_{t+1} = Y_t + h * f(t, Y_t) \quad (59)$$

Donde:

- $Y_{t+1}$  → Salida del sistema en el instante de tiempo  $t + 1$
- $Y_t$  → Salida del sistema en el instante  $t$
- $h$  → Paso de integración
- $f(t, Y_t)$  → Valor de la EDO en el instante  $t$

El parámetro  $h$ , denominado paso de integración, define la distancia entre dos instantes de tiempo donde se calcula la solución, es decir el tiempo de muestreo.

Entonces, reemplazando la ecuación 58 en la 59 se obtiene:

$$Y_{t+1} = Y_t + h * \frac{Kp * u(t - L) - y(t)}{T} \quad (60)$$

La ecuación 60 se ingresa en el software de programación 3D para resolver la ecuación diferencial de todos los modelos planteados para la evolución de los procesos y así obtener el valor numérico en la salida.

## **Guías de prácticas virtuales para la calibración de los transmisores “Smart”**

Para el desarrollo de las prácticas virtuales de calibración de los transmisores se realizan guías tipo manuales. Se han descrito 4 guías, una guía general en donde se explica la instalación, iniciación y reconocimiento de la herramienta desarrollada (Aplicación de escritorio EVIC-2R), una segunda guía en dónde se detalla el procedimiento completo para la calibración del transmisor de presión absoluta, una tercera guía en dónde se detalla el procedimiento completo para la calibración del transmisor de presión diferencial, y una cuarta guía en dónde se detalla el procedimiento completo para la calibración del transmisor de temperatura. Todas las guías desarrolladas se encuentran completas en la sección de anexos del presente documento.

### ***Guía General de Usuario***

La primera guía (Guía General), se describe bajo el formato siguiente:

#### **TÍTULO DEL PROYECTO**

#### **NOMBRE DE LA GUÍA**

#### **INTRODUCCIÓN**

Se describe brevemente los elementos que componen el laboratorio virtual y los procedimientos que se pueden realizar.

#### **INDICACIONES GENERALES**

Se dan lineamientos de iniciación.

#### **OBJETIVO.**

Se describe el objetivo de la guía general.

## **1. INSTALACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN.**

Se describe la manera de instalar y ejecutar la aplicación (EVIC-2R)

## **2. AVATAR/PLAYER.**

Se describe la función del Avatar dentro de la aplicación y su forma de utilización.

## **3. TECLAS DE INTERACCIÓN**

Se indica las teclas que permiten interactuar con los elementos del entorno 3D.

## **4. RECONOCIMIENTO DEL ENTORNO**

Se describen 3 procedimientos para realizar el reconocimiento del entorno virtual, estos son:

- Identificación de componentes de la estación virtual
- Identificación de instrumentos de calibración
- Interacción con el entorno

## **5. VENTANAS DE CALIBRACIÓN 2D**

Se describe la forma de acceder a las ventanas de calibración 2D y el contenido de las mismas.

## **6. CAMBIO DE RANGO EN LOS TRANSMISORES**

Se describe cómo realizar el cambio de rango en los transmisores.

## **7. VENTANAS DE AYUDA Y CIERRE.**

Se describe la manera de acceder a la ventana de ayuda y el contenido de la misma.

**Guía de usuario (Presión Absoluta)**

La segunda guía (Guía de usuario para la calibración virtual del transmisor de presión absoluta), se describe bajo el formato siguiente:

**TÍTULO DEL PROYECTO****NOMBRE DE LA GUÍA****INTRODUCCIÓN**

Se describe brevemente los elementos que se integran en la aplicación para la realización del procedimiento de calibración del transmisor de presión absoluta.

**INDICACIONES GENERALES**

Se dan lineamientos previos antes de iniciar la práctica virtual.

**OBJETIVO**

Se describe el objetivo de la guía de usuario.

**DESARROLLO**

Se describe detalladamente todos los pasos para la realización de la práctica virtual de calibración.

Dichos pasos son:

- Iniciar la aplicación.
- Tomar los equipos de la mesa de trabajo.
- Localizar el transmisor de presión absoluta.
- Cerrar la válvula que conecta el transmisor con el tanque del proceso.
- Abrir la válvula de purga y purgar la tubería.
- Colocar los instrumentos e identificar las conexiones.
- Desplegar la pantalla de calibración 2D y encender el calibrador.

- Habilitar la alimentación de bucle
- Establecer la comunicación HART.
- Ingresar al modo Medición/Fuente (medición en mA, fuente en psi).
- Encerar los equipos.
- Seleccionar la prueba de VALOR ENCONTRADO
- Seleccionar la tolerancia e identificar la estrategia de prueba establecida.
- Seleccionar el Test Manual.
- Realizar las mediciones en los puntos de calibración.
- Identificar y evaluar los errores en las mediciones.

También, se describe detalladamente todos los pasos para la realización de la práctica virtual de ajuste.

Dichos pasos son:

- Ingresar a la opción SERVICIO en el modo HART.
- Realizar ajuste Cero Presión.
- Ingresar a la opción de Ajuste Salida y realizar el ajuste en 4 y 20 mA.
- Ingresar a la opción de Ajuste Sensor y realizar el ajuste en el LRV y el URV del rango de trabajo.
- Repetir el procedimiento de calibración.

Por último, se describen los pasos finales de la práctica:

- Deshabilitar la alimentación de bucle en el calibrador
- Apagar el calibrador y retirar los instrumentos
- Cerrar la válvula de purga.
- Abrir la válvula de toma del proceso

**Guía de usuario (Presión Diferencial)**

La tercera guía (Guía de usuario para la calibración virtual del transmisor de presión diferencial), se describe bajo el formato siguiente:

**TÍTULO DEL PROYECTO****NOMBRE DE LA GUÍA****INTRODUCCIÓN**

Se describe brevemente los elementos que se integran en la aplicación para la realización del procedimiento de calibración del transmisor de presión diferencial.

**INDICACIONES GENERALES**

Se dan lineamientos previos antes de iniciar la práctica virtual.

**OBJETIVO**

Se describe el objetivo de la guía de usuario.

**DESARROLLO**

Se describe detalladamente todos los pasos para la realización de la práctica virtual de calibración.

Dichos pasos son:

- Iniciar la aplicación.
- Tomar los equipos de la mesa de trabajo.
- Localizar el transmisor de presión diferencial.
- Cerrar la válvula de la toma de alta presión del proceso.
- Cerrar la válvula de la toma de baja presión del proceso.
- Abrir las válvulas de ByPass
- Realizar la purga de la tubería

- Colocar los instrumentos e identificar las conexiones.
- Desplegar la pantalla de calibración 2D y encender el calibrador.
- Habilitar la alimentación de bucle
- Establecer la comunicación HART.
- Ingresar al modo Medición/Fuente (medición en mA, fuente en inH<sub>2</sub>O).
- Encerar los equipos.
- Seleccionar la prueba de VALOR ENCONTRADO
- Seleccionar la tolerancia e identificar la estrategia de prueba establecida.
- Seleccionar el Test Manual.
- Realizar las mediciones en los puntos de calibración.
- Identificar y evaluar los errores en las mediciones.

También, se describe detalladamente todos los pasos para la realización de la práctica virtual de ajuste.

Dichos pasos son:

- Ingresar a la opción SERVICIO en el modo HART.
- Realizar ajuste Cero Presión.
- Ingresar a la opción de Ajuste Salida y realizar el ajuste en 4 y 20 mA.
- Ingresar a la opción de Ajuste Sensor y realizar el ajuste en el LRV y el URV del rango de trabajo.
- Repetir el procedimiento de calibración.

Por último, se describen los pasos finales de la práctica:

- Deshabilitar la alimentación de bucle en el calibrador
- Apagar el calibrador y retirar los instrumentos

- Cerrar las válvulas de ByPass.
- Abrir la válvula de la toma de baja presión del proceso.
- Abrir la válvula de la toma de alta presión del proceso.

### ***Guía de usuario (Temperatura)***

La cuarta guía (Guía de usuario para la calibración virtual del transmisor de temperatura), se describe bajo el formato siguiente:

#### **TÍTULO DEL PROYECTO**

#### **NOMBRE DE LA GUÍA**

#### **INTRODUCCIÓN**

Se describe brevemente los elementos que se integran en la aplicación para la realización del procedimiento de calibración del transmisor de temperatura.

#### **INDICACIONES GENERALES**

Se dan lineamientos previos antes de iniciar la práctica virtual.

#### **OBJETIVO**

Se describe el objetivo de la guía de usuario.

#### **DESARROLLO**

Se describe detalladamente todos los pasos para la realización de la práctica virtual de calibración.

Dichos pasos son:

- Iniciar la aplicación.
- Tomar los equipos de la mesa de trabajo.
- Localizar el transmisor de temperatura.



- Retirar el transmisor del proceso y llevarlo hacia la mesa de trabajo.
- Colocar los instrumentos en la mesa de calibración.
- Identificar las conexiones.
- Desplegar la pantalla de calibración 2D.
- Encender el pozo seco y el calibrador.
- Habilitar la alimentación de bucle
- Establecer la comunicación HART.
- Ingresar al modo Medición/Fuente (medición en mA, fuente Drywell).
- Seleccionar la prueba de VALOR ENCONTRADO
- Seleccionar la tolerancia, el tiempo de demora e identificar la estrategia de prueba establecida.
- Seleccionar el Test Automático.
- Visualizar las mediciones automáticas en los puntos de calibración.
- Identificar y evaluar los errores en las mediciones.

También, se describe detalladamente todos los pasos para la realización de la práctica virtual de ajuste.

Dichos pasos son:

- Ingresar a la opción SERVICIO en el modo HART.
- Ingresar a la opción de Ajuste Salida y realizar el ajuste en 4 y 20 mA.
- Ingresar a la opción de Ajuste Sensor y realizar el ajuste en el LRV y el URV del rango de trabajo.
- Repetir el procedimiento de calibración.

Por último, se describen los pasos finales de la práctica:

- Deshabilitar la alimentación de bucle en el calibrador
- Apagar el calibrador y el pozo seco
- Retirar los instrumentos de la mesa de trabajo

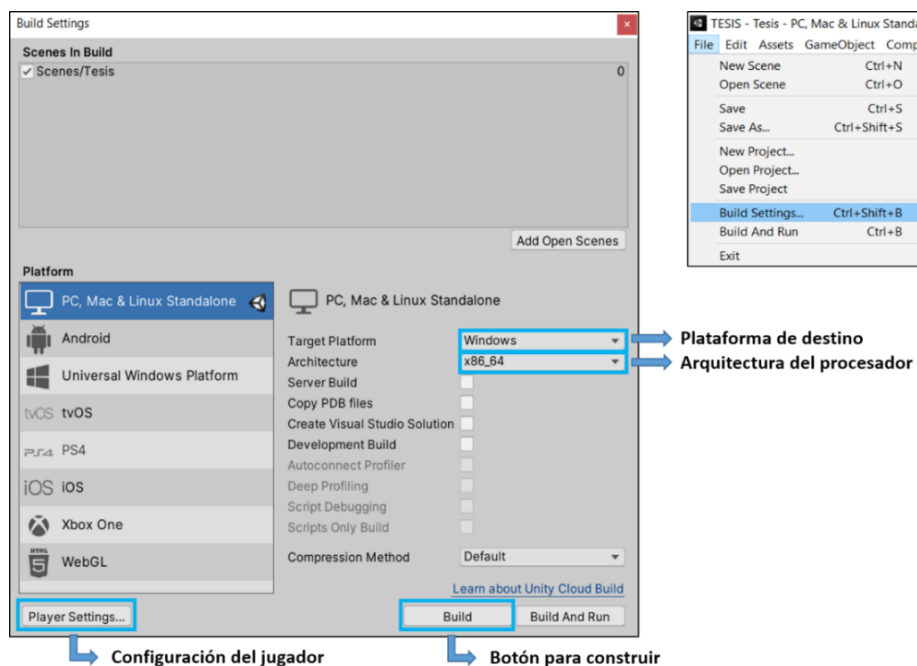
## **Realización de la aplicación ejecutable para computadores con sistema operativo**

### **Windows**

El objetivo principal del presente proyecto es que los estudiantes de electrónica e instrumentación y electrónica en automatización puedan emular la ejecución de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart”, por tal motivo generar una aplicación ejecutable para computador es una alternativa muy conveniente. Una vez que se concluye con el desarrollo de la herramienta en el software Unity 3D, se procede a construir la aplicación ejecutable. El software Unity 3D cuenta con la herramienta para realizarlo; en la barra de tareas, sobre la opción File, al hacer clic se despliega varias opciones, entre ellas “Build Settings”, esta opción muestra un asistente para la construcción de la aplicación. Las configuraciones realizadas se visualizan en la Figura 101.

**Figura 101**

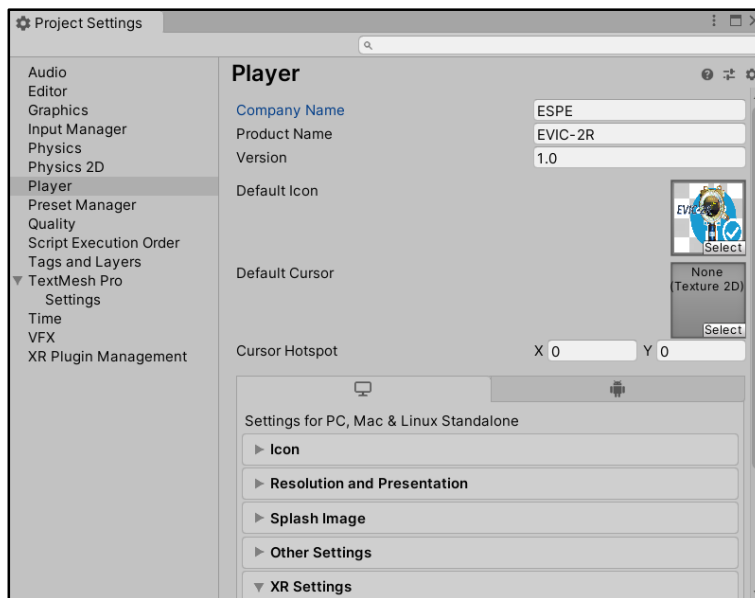
*Configuraciones para construcción del ejecutable.*



El sistema operativo que se selecciona es Windows, y la arquitectura del procesador son dos existentes en el mercado (32 y 64 bits). Al dar clic en el botón de “Player Settings” se despliega otra ventana asistente en la cual se configuran opciones para el usuario de la aplicación; en este caso se selecciona los valores por defecto (estándar), únicamente se asigna un nombre a la aplicación (EVIC-2R), una versión y un ícono como se muestra en la Figura 102.

**Figura 102**

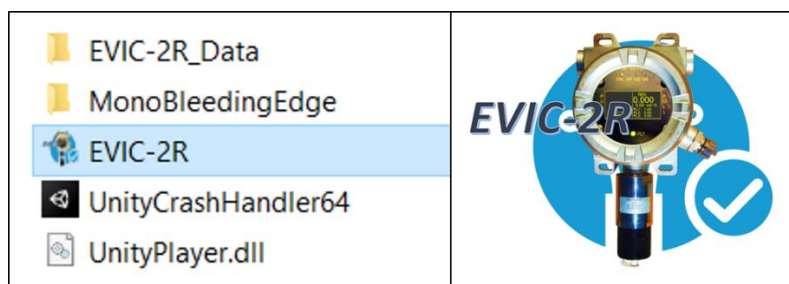
*Configuraciones en el asistente “Player Settings”*



Para construir el proyecto, luego de realizarse las configuraciones se da clic sobre el botón “Build”, se selecciona una carpeta en donde guardar y automáticamente se construye el proyecto. Al final se obtiene un ejecutable con los archivos necesarios para poder utilizarlo. Para iniciar la aplicación únicamente es necesario hacer doble clic sobre el ícono EVIC-2R.

**Figura 103**

*Ejecutable de la aplicación (EVIC-2R)*



## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y RESULTADOS**

En este capítulo se realizan las diferentes pruebas para la validación del funcionamiento de la aplicación, por lo que se presentan los resultados obtenidos al interactuar con la estación virtual de procesos y al desarrollar los procedimientos virtuales de calibración; posteriormente se muestran los resultados una vez que se realiza el procedimiento virtual de ajuste.

#### **Interacción general en el entorno virtual**

Para validar la interacción general con el entorno virtual se considera el funcionamiento del proceso industrial virtual, la similitud de los equipos virtuales de calibración con equipos reales, y el funcionamiento de los equipos durante el proceso de calibración.

#### ***Funcionamiento del proceso industrial virtual***

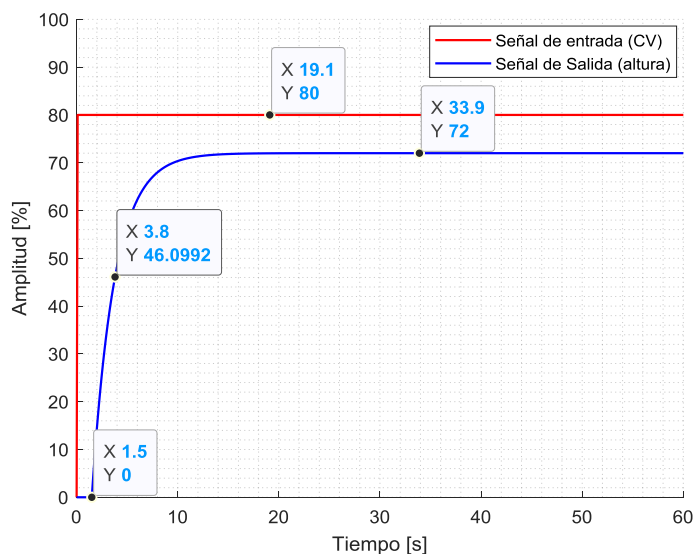
Se realiza las pruebas de funcionamiento de los procesos virtuales mediante la Interfaz de Usuario (UI) implementada, en donde se verifica el comportamiento del proceso en el modo manual y su control en el modo automático.

- **Proceso virtual de nivel:**

En la Figura 104 se observa el comportamiento del proceso virtual de nivel en el modo manual dentro de la aplicación.

**Figura 104**

*Comportamiento del proceso de nivel manual dentro de la aplicación*

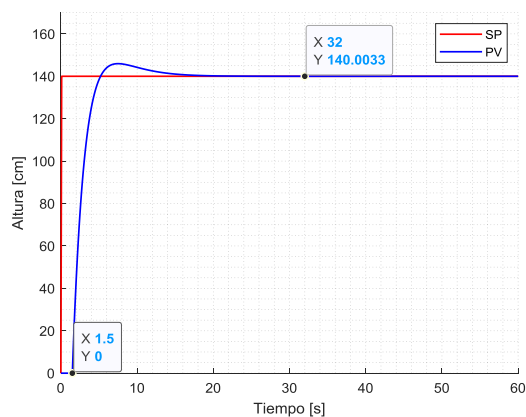


La Figura 104 corresponde a la respuesta del modelo del proceso de nivel en el dominio del tiempo (ecuación 24) dentro de la aplicación. Para esta prueba, en la UI, en el modo de control manual se setea un valor de control “CV” del 80 %, obteniendo una altura del 72 %, es decir que se obtiene una altura de 136 cm. En la curva generada se puede observar los parámetros de la función de transferencia, los cuales corresponden con gran aproximación a los planteados en el diseño ( $K_p=0.9$ ,  $T=2.3$  s,  $L=1.5$  s), también, se observa que la curva responde de la misma manera que la función de transferencia “G(s)”.

Para el control del proceso virtual de nivel se utiliza un controlador PI sintonizado por el método de Cohen Coon y aplicando sintonía fina en la constante  $K_p$ , en la Figura 105 se observa el comportamiento del controlador dentro de la aplicación.

**Figura 105**

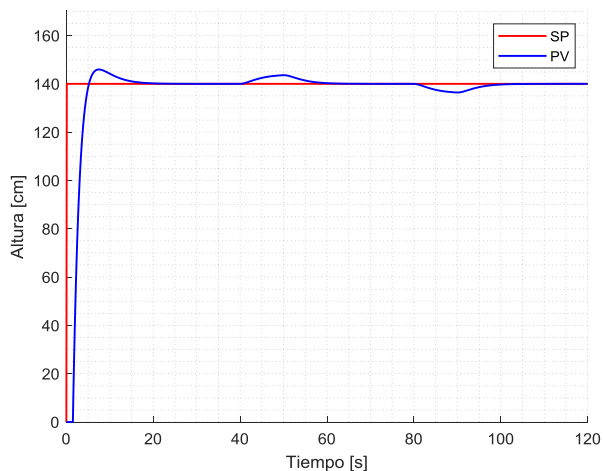
*Control del proceso de nivel automático dentro de la aplicación*



Para esta prueba, en la UI en el modo de control automático, se establece un Set Point “SP” de 140 cm, se obtiene la curva de respuesta de la Figura 105. Se observa que el proceso alcanza la referencia o Set Point aproximadamente a los 32 segundos. En la aplicación se implementa la posibilidad de perturbar el sistema, en la Figura 106 se observa la respuesta del controlador ante dicha perturbación.

**Figura 106**

*Respuesta del control de nivel ante una perturbación*

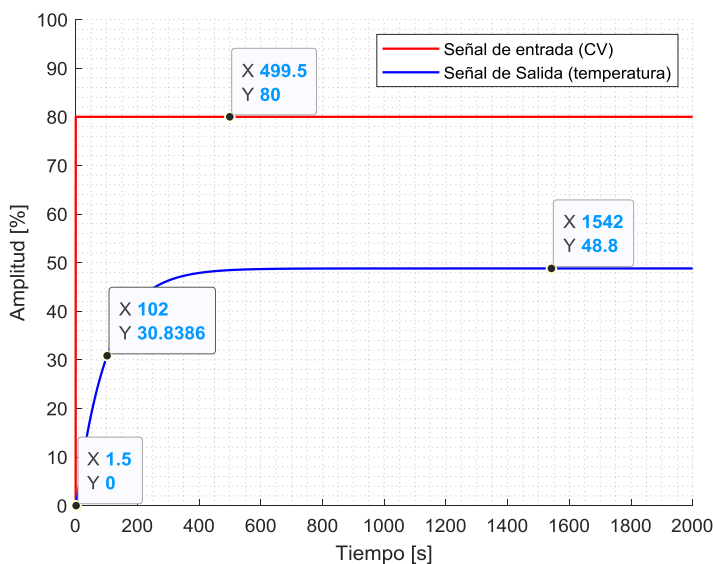


- **Proceso virtual de temperatura:**

El comportamiento del proceso virtual de temperatura dentro de la aplicación se evalúa de la misma manera que con el proceso de nivel, en la UI se selecciona el modo de control manual y se setea un valor de control “CV” del 80 % obteniendo una temperatura del 48.8 %, es decir, se obtiene una temperatura de 256 °C.

### Figura 107

*Comportamiento del proceso de temperatura manual dentro de la aplicación*



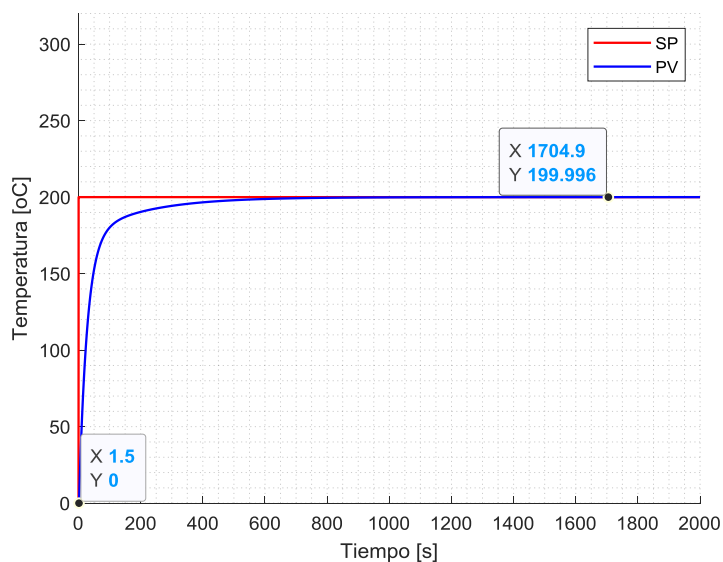
En la Figura 107 se observa la respuesta del modelo del proceso de temperatura en el dominio del tiempo (ecuación 25). En la curva generada se puede observar los parámetros de la función de transferencia, los cuales corresponden con bastante aproximación a los planteados en el diseño ( $K_p=0.61$ ,  $T=100.7s$ ,  $L=1.5 s$ ), también, se observa que la curva responde de la misma manera que la función de transferencia “G(s)”.



Para el control del proceso virtual de temperatura se utiliza un controlador PID sintonizado por el método de Lambda Agresivo y aplicando sintonía fina en la constante  $K_p$ , en la Figura 108 se observa el comportamiento del controlador dentro de la aplicación.

### Figura 108

*Control del proceso de temperatura automático dentro de la aplicación*



Para esta prueba, en la UI en el modo de control automático, se setea un Set Point “SP” de 200 °C, se obtiene la curva de respuesta de la Figura 108. Se observa que el proceso alcanza la referencia o Set Point aproximadamente a los 1705 segundos, equivalente a un aproximado de 29 minutos.

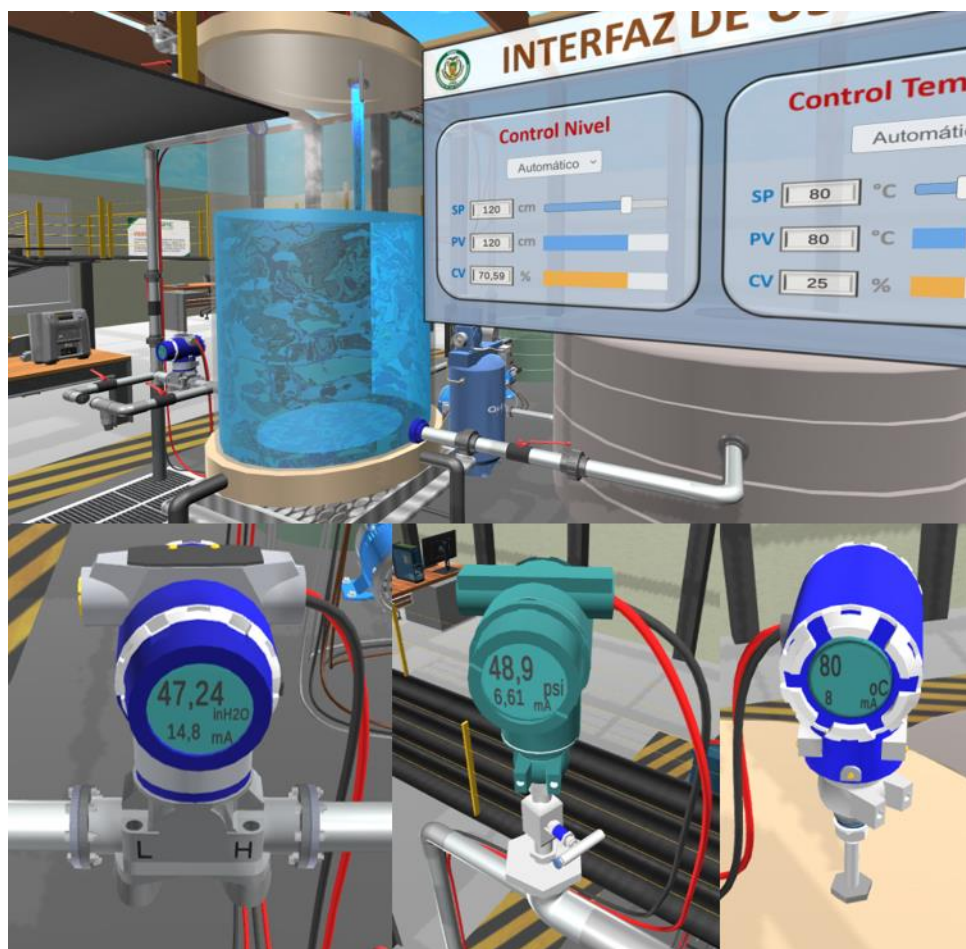
Se observa que los modelos programados en el software responden al diseño realizado (Figura 32 y Figura 33), también, se observa que la sintonización de los controladores para los procesos virtuales responde de una manera adecuada, con una ligera diferencia con respecto al diseño (Figura 98 y Figura 99).

- **Mediciones en los transmisores:**

En el entorno virtual 3D se observa la evolución del proceso en el tiempo y las mediciones en los transmisores; dichas mediciones responden al diseño realizado.

**Figura 109**

*Evolución del proceso virtual y mediciones en los transmisores*



Se observa que el nivel de líquido en el tanque es de 120 cm, con una temperatura de 80 °C. De acuerdo a la ecuación 28 y 30 la medida del transmisor de presión diferencial es de 47.244 inH<sub>2</sub>O y 14.798 mA, que es lo que muestra el transmisor virtual, la presión absoluta en el tanque responde a la ecuación 40, en donde

a partir del nivel de líquido en el tanque y su temperatura se obtiene, una presión de 48,900 psi y una corriente (ecuación 37) de 6,608 mA que es lo que muestra el transmisor virtual. El transmisor virtual de temperatura muestra su medida de 80 °C y una corriente (ecuación 41) de 8.000 mA. Las ecuaciones mencionadas son ecuaciones reales para mediciones de los fenómenos físicos de presión absoluta y diferencial que han sido utilizadas para el diseño del proceso virtual.



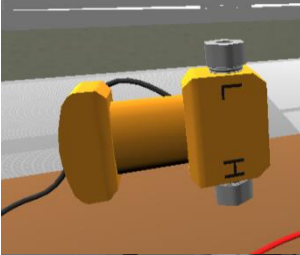



### ***Similitud de los equipos virtuales de calibración con equipos reales***

Se modela los equipos de calibración en base a equipos reales de la marca Fluke, utilizando imágenes de dichos equipos como plantillas dentro del software de modelado (Maya 2020), obteniendo un alto grado de semejanza en cuanto al aspecto visual de los instrumentos virtuales, en la Tabla 15 se observa la comparación entre los equipos virtuales con los reales.

**Tabla 15**

*Comparación de equipos virtuales con equipos reales*

Instrumento	Elemento 3D	Equipo real
Calibrador de procesos		

Instrumento	Elemento 3D	Equipo real
Bomba manual		
Módulo de presión absoluta		
Módulo de presión diferencial		
Pozo Seco		

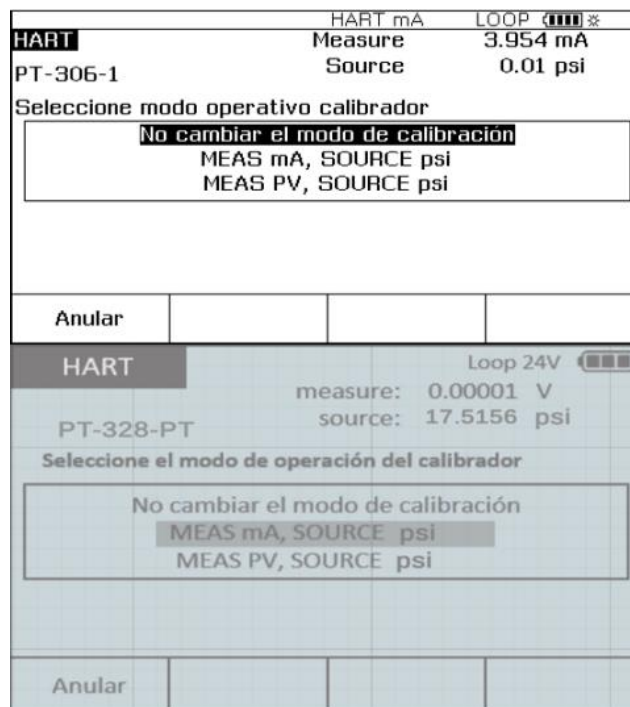
### ***Funcionamiento de los equipos durante el proceso de calibración***

Para validar el funcionamiento de los equipos durante el proceso de calibración se realizaron guías de usuario, en las cuales, a partir del encendido del equipo calibrador el uso de éste corresponde al funcionamiento descrito en el manual de Calibración de un transmisor HART soportado del equipo real (Fluke 754). También, el

despliegue de pantallas en el DPC es idénticas a las mostradas en el equipo real como se observa en la Figura 110.

### Figura 110

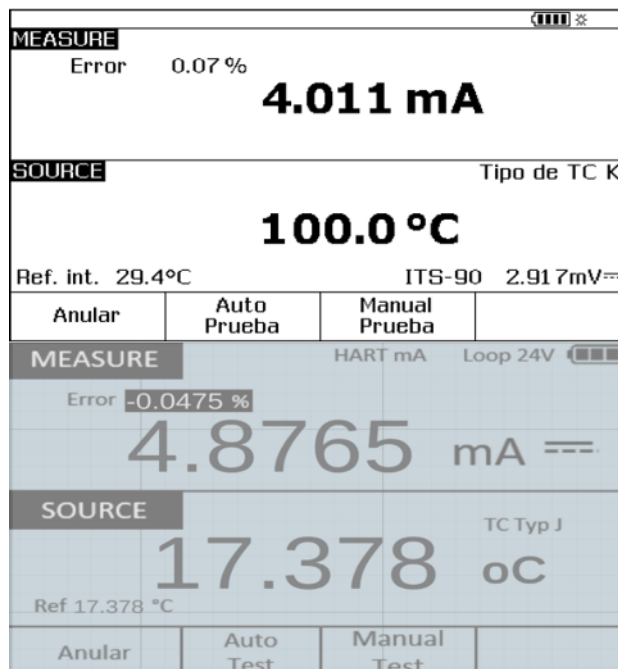
*Pantalla de modo de operación del calibrador. a) Equipo real, b) Equipo virtual*



Una de las pantallas más importantes en el equipo calibrador es la de fuente y medición, en donde se muestra el valor de referencia y de medición del transmisor, En la Figura 111 se observa la comparación entre la pantalla del calibrador real y del virtual.

Figura 111

Pantalla fuente/medición. a) Equipo real, b) Equipo virtual



Al finalizar el procedimiento de calibración se obtiene una tabla con los resultados obtenidos, en la Figura 112 se puede observar la pantalla del equipo real, en la siguiente sección se podrá observar la pantalla del equipo virtual.

Figura 112

Pantalla de resultados de la calibración en el equipo real

FUENTE	MEDIDA	ERROR %
100.0 °C	3.904 mA	-0.60
150.0 °C	7.965 mA	-0.22
200.0 °C	12.053 mA	0.33
250.0 °C	16.094 mA	0.59
300.0 °C	20.175 mA	1.09

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------

## Desarrollo de práctica virtual de calibración de transmisores “Smart” de presión absoluta


Para validar el procedimiento virtual de calibración de transmisores “Smart” de presión absoluta en la herramienta desarrollada se realizaron cuatro pruebas diferentes. Los resultados se muestran a continuación.

### **Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 %**

Se realiza el procedimiento de calibración seleccionando una tolerancia de error del 0.5%, dos usuarios desarrollan la calibración, en la Figura 113 se observa los resultados entregados en la pantalla del equipo calibrador.


#### **Figura 113**

*Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 1)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	psi	4,002	mA	0,013
75	psi	8,054	mA	0,336
150,001	psi	12,106	mA	0,659
225,001	psi	16,157	mA	0,983
300,001	psi	20,209	mA	1,306
225,001	psi	16,157	mA	0,983
149,999	psi	12,106	mA	0,66
74,999	psi	8,054	mA	0,336
0	psi	4,002	mA	0,013
Anular		Página Anterior	Página Próx.	Terminado

Se puede observar que los errores que están fuera de la tolerancia de error seleccionada aparecen marcados. Se repite el procedimiento cambiando de usuario y computador. Los resultados se muestran en la Figura 114.

**Figura 114***Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 2)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	psi	4,002	mA	0,012
75,004	psi	8,054	mA	0,336
150	psi	12,106	mA	0,659
225,005	psi	16,158	mA	0,983
300,001	psi	20,209	mA	1,306
225,003	psi	16,157	mA	0,983
150,001	psi	12,106	mA	0,659
76,004	psi	8,108	mA	0,34
0	psi	4,003	mA	0,019
Anular		Página Anterior	Página Próx.	Terminado


Se puede observar que los resultados obtenidos son similares a los presentados en la Figura 113; también, ya que el procedimiento es manual, se observa que va a depender del usuario los valores generados de presión y por ende los resultados obtenidos, sin embargo, los errores en ambos procedimientos prácticamente son los mismos, debido a que este es propio del “instrumento” inicialmente. Otra observación importante se obtiene en las mediciones descendentes, se observa que los errores son los mismos que en el procedimiento ascendente, ya que el tiempo de estabilización de presión es rápido, y adicionalmente los usuarios han permitido que la medida se estabilice antes de tomarla.

***Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.25 %***

Se repite el procedimiento de calibración seleccionando una tolerancia de error del 0.25%, en la Figura 115 se observan los resultados obtenidos.



**Figura 115***Tabla final de resultados en el DPC (Tolerancia=0.25%)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	psi	4,002	mA	0,012
75,004	psi	8,054	mA	0,336
149,991	psi	12,105	mA	0,659
225	psi	16,157	mA	0,983
300,003	psi	20,209	mA	1,306
225,002	psi	16,157	mA	0,983
150,007	psi	12,106	mA	0,659
74,999	psi	8,054	mA	0,336
0	psi	4,002	mA	0,014
Anular		Página Anterior	Página Próx.	Terminado

Se puede observar que los resultados obtenidos son similares a los presentados en la Figura 113 y 114, sin embargo, aparecen dos mediciones adicionales marcadas, ya que la tolerancia de error seleccionada es menor. Mediante esta prueba se confirma que los valores generados de presión y los resultados obtenidos dependen del usuario, pero los errores son propios del “instrumento”.

***Procedimiento de ajuste***

Este procedimiento se ejecuta a partir de la calibración realizada por dos usuarios. Cada usuario, tras realizar la calibración procede a efectuar el ajuste de los transmisores (ajuste cero presión, ajuste salida, ajuste sensor). Una vez que se realiza el procedimiento de ajuste se repite la calibración (tolerancia=0.5%). En la Figura 116 se observa los resultados obtenidos.

**Figura 116**

a) Ajuste realizado por usuario 1, b) Ajuste realizado por usuario 2

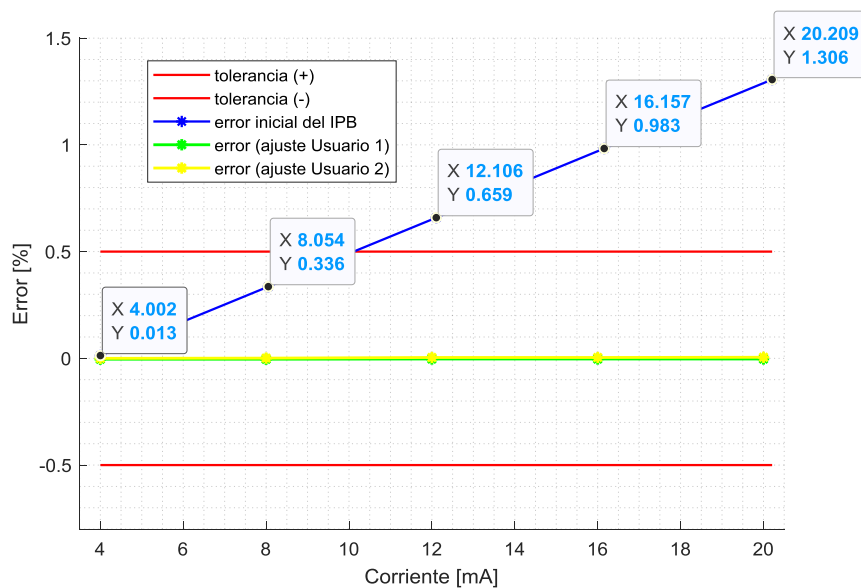
HART mA				Loop 24V	HART mA				Loop 24V
SOURCE		MEASURE		ERROR %	SOURCE		MEASURE		ERROR %
0	psi	3,999	mA	-0,004	0	psi	4	mA	0
75,001	psi	7,999	mA	-0,004	75,001	psi	8	mA	0,001
149,997	psi	11,999	mA	-0,003	149,994	psi	12	mA	0,004
225,001	psi	16	mA	-0,003	225,007	psi	16,001	mA	0,004
300	psi	20	mA	-0,003	300,004	psi	20,001	mA	0,005
225	psi	16	mA	-0,003	225,005	psi	16,001	mA	0,004
150	psi	11,999	mA	-0,003	150	psi	12	mA	0,003
75,001	psi	7,999	mA	-0,004	74,999	psi	8	mA	0,002
0	psi	3,999	mA	-0,004	0	psi	4,001	mA	0,005
Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado		Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	

Se puede observar que ninguno de los errores aparece marcado, es decir que los errores en las mediciones están dentro de la tolerancia de error seleccionada. También se observa que en este caso todos los resultados dependen del usuario, ya que el procedimiento de ajuste es manual.

El error que inicialmente era propio del “instrumento” ahora es fijado por el usuario en el procedimiento de ajuste. Es decir, que va a depender del usuario la corrección que se da al transmisor tras el ajuste del mismo. En la Figura 117 se observa las curvas de calibración antes y después del ajuste.

**Figura 117**

*Curvas de calibración antes y después del ajuste.*



En la Figura 117 se puede observar los límites del error máximo permitido en porcentaje (tolerancia de error) de color rojo; Se observa el error del IBP en la primera calibración (línea azul), es decir, antes de ser ajustado. Las curvas de color verde y amarillo representan la calibración del usuario 1 y 2 respectivamente luego de realizar el procedimiento de ajuste; se observa que ambas curvas están contenidas por la tolerancia de error y son muy cercanas al 0 % de error. Se puede observar también las mediciones en la ventana de calibración 2D antes y después del ajuste (Figura 118).

**Figura 118**

a) Mediciones sin ajuste, b) Mediciones con ajuste (usuario 1), c) Mediciones con ajuste (usuario 2)



### ***Procedimiento de calibración en otro rango***

Para esta prueba se cambia el rango de trabajo del transmisor, se lo configura en su rango completo (0 a 500) psi, se realiza el procedimiento de calibración (tolerancia=0.25 %) y ajuste, la Figura 119 muestra los resultados obtenidos.

**Figura 119**

*Resultados obtenidos antes y después del ajuste*

HART mA Loop 24V				HART mA Loop 24V			
SOURCE	MEASURE	ERROR %		SOURCE	MEASURE	ERROR %	
0 psi	4,002 mA	0,012		0 psi	4 mA	0	
125,069 psi	8,056 mA	0,336		125,033 psi	8,001 mA	0	
249,97 psi	12,105 mA	0,66		250,041 psi	12,001 mA	0	
375 psi	16,157 mA	0,983		374,999 psi	16 mA	0,001	
500,001 psi	20,209 mA	1,307		500,007 psi	20 mA	0,001	
375,112 psi	16,161 mA	0,983		375,077 psi	16,003 mA	0,001	
250,201 psi	12,112 mA	0,66		249,864 psi	11,996 mA	0	
125,027 psi	8,055 mA	0,336		124,934 psi	7,998 mA	0	
0 psi	4,003 mA	0,022		0 psi	4 mA	0	
Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado

Se puede observar que las mediciones cuyos errores sobrepasan al 0.25 % de tolerancia de error aparecen marcados tras la primera calibración; luego, una vez que se realiza el ajuste se observa que los errores han disminuido significativamente, siendo casi nulos, estos resultados dependen del usuario. También se observa las mediciones en la ventana de calibración 2D.

**Figura 120**

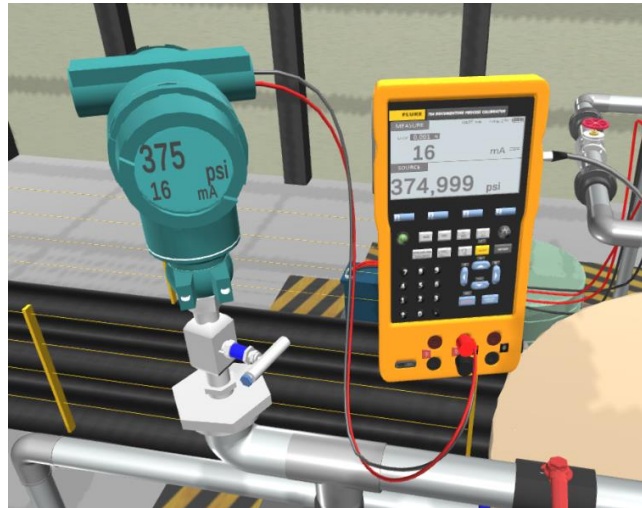
*Mediciones en los equipos antes y después del ajuste*



Las mediciones que se observan en los equipos dentro de la ventana 2D también se reflejan en los instrumentos tridimensionales, dando más realismo a la experiencia del usuario.

### **Figura 121**

*Mediciones en los equipos 3D durante la calibración*




### **Desarrollo de práctica virtual de calibración de transmisores de presión diferencial**

Para validar el procedimiento virtual de calibración de transmisores “Smart” de presión diferencial en la herramienta desarrollada se realizaron cuatro pruebas diferentes. Los resultados se muestran a continuación.

#### ***Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 %***


Se realiza el procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 %, en la Figura 122 se observa los resultados entregados en la pantalla del equipo calibrador.

**Figura 122***Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 1)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	inH2O	4,002	mA	0,012
17,505	inH2O	8,059	mA	0,361
35,004	inH2O	12,115	mA	0,71
52,503	inH2O	16,17	mA	1,058
69,995	inH2O	20,224	mA	1,407
52,499	inH2O	16,17	mA	1,062
35,005	inH2O	12,115	mA	0,71
17,504	inH2O	8,059	mA	0,362
0	inH2O	4,002	mA	0,015
Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	

Se puede observar que los errores que se encuentran fuera de la tolerancia de error seleccionada aparecen resaltados. Se repite este procedimiento cambiando de usuario y computador. Los resultados se muestran en la Figura 123.

**Figura 123***Tabla final de resultados en el DPC (Usuario 2)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	inH2O	4,002	mA	0,012
17,499	inH2O	8,058	mA	0,364
35,003	inH2O	12,114	mA	0,71
52,494	inH2O	16,168	mA	1,058
70	inH2O	20,225	mA	1,406
52,499	inH2O	16,169	mA	1,058
35	inH2O	12,114	mA	0,71
17,501	inH2O	8,058	mA	0,361
0	inH2O	4,002	mA	0,013
Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	

Se puede observar que los resultados obtenidos son similares a los presentados en la Figura 122; también, ya que el procedimiento es manual, se observa que va a depender del usuario los valores generados de presión y por ende los resultados


obtenidos, sin embargo, los errores en ambos procedimientos prácticamente son los mismos, debido a que, como ya se dijo, este es propio del “instrumento” inicialmente.

***Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.25 %***

Se repite el procedimiento de calibración seleccionando una tolerancia de error del 0.25%, en la Figura 124 se observan los resultados obtenidos.

**Figura 124**

*Tabla final de resultados en el DPC (Tolerancia = 0.25%)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	inH2O	4,002	mA	0,012
17,5	inH2O	8,058	mA	0,362
35,003	inH2O	12,114	mA	0,71
52,501	inH2O	16,169	mA	1,058
70,001	inH2O	20,225	mA	1,406
52,501	inH2O	16,17	mA	1,058
35,004	inH2O	12,115	mA	0,71
17,494	inH2O	8,057	mA	0,362
0	inH2O	4,002	mA	0,014
Anular		Página Anterior	Página Próx.	Terminado

Se puede observar que los resultados obtenidos son similares a los presentados en la Figura 122 y 123, sin embargo, aparecen dos mediciones adicionales marcadas, ya que la tolerancia de error seleccionada en este caso es menor. Mediante esta prueba se confirma que los valores generados de presión y los resultados obtenidos dependen del usuario, pero los errores son propios del “instrumento”, también, que los errores van a ser los mismos tanto ascendentes como descendentes siempre y cuando el usuario establezca la medida antes de tomarla.




### Procedimiento de ajuste

Este procedimiento se ejecuta a partir de la calibración realizada por dos usuarios. Cada usuario, tras realizar la calibración procede a efectuar el ajuste del transmisor (ajuste cero presión, ajuste salida, ajuste sensor). Una vez que se realiza el procedimiento de ajuste se repite la calibración (tolerancia=0.5%). En la Figura 125 se observa los resultados obtenidos.

**Figura 125**

a) Ajuste realizado por usuario 1, b) Ajuste realizado por usuario 2

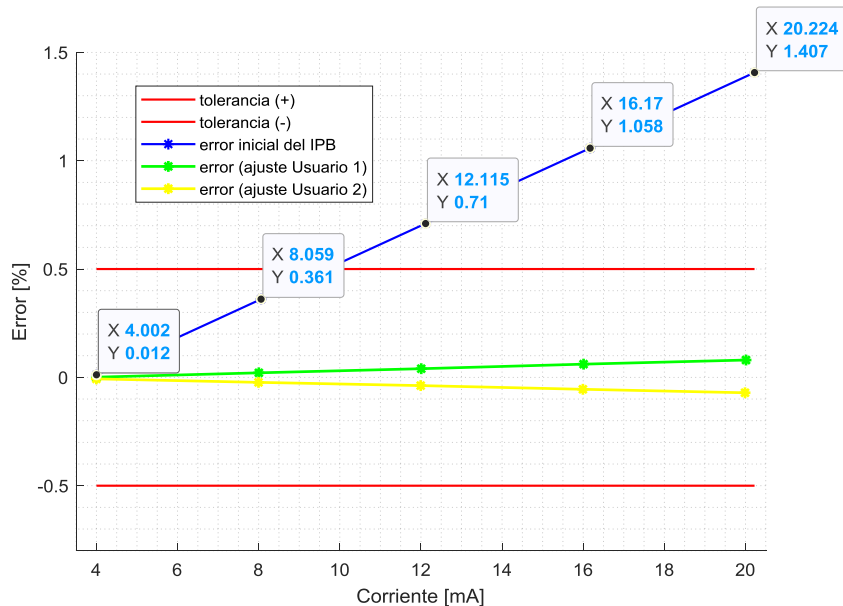
HART mA					Loop 24V 				
SOURCE		MEASURE		ERROR %	SOURCE		MEASURE		ERROR %
0	inH2O	4	mA	0,001	0	inH2O	3,999	mA	-0,007
17,502	inH2O	8,004	mA	0,021	17,5	inH2O	7,996	mA	-0,023
35,002	inH2O	12,007	mA	0,04	34,998	inH2O	11,994	mA	-0,038
52,499	inH2O	16,009	mA	0,061	52,502	inH2O	15,992	mA	-0,055
69,999	inH2O	20,013	mA	0,08	70	inH2O	19,989	mA	-0,071
52,51	inH2O	16,012	mA	0,06	52,499	inH2O	15,991	mA	-0,055
35,004	inH2O	12,008	mA	0,041	35,003	inH2O	11,994	mA	-0,039
17,498	inH2O	8,003	mA	0,022	17,501	inH2O	7,996	mA	-0,023
0	inH2O	4	mA	0	0	inH2O	3,999	mA	-0,005

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------	--------	-----------------	--------------	-----------

Se puede observar que ninguno de los errores aparece marcado, es decir que los errores en las mediciones están dentro de la tolerancia de error seleccionada. También, se puede observar que en este caso todos los resultados dependen del usuario, ya que el procedimiento de ajuste es manual. El error que inicialmente era propio del “instrumento” ahora es fijado por el usuario en el procedimiento de ajuste. Es decir, que va a depender del usuario la corrección que se da al transmisor tras el ajuste del mismo. En la Figura 126 se observa las curvas de calibración antes y después del ajuste.

**Figura 126**

*Curvas de calibración antes y después del ajuste*



En la Figura 126 se puede observar los límites del error máximo permitido en porcentaje (tolerancia de error) de color rojo; Se observa el error del IBP en la primera calibración (línea azul), es decir, antes de ser ajustado. Las curvas de color verde y amarillo representan la calibración del usuario 1 y 2 respectivamente luego de realizar el procedimiento de ajuste; se observa que ambas curvas están contenidas por la tolerancia de error, pero difieren una de la otra. Se puede observar también las mediciones en la ventana de calibración 2D antes y después del ajuste (Figura 127).

**Figura 127**

a) Mediciones sin ajuste, b) Mediciones con ajuste (usuario 1), c) Mediciones con ajuste (usuario 2)



### **Procedimiento de calibración en otro rango**

Para esta prueba se cambia el rango de trabajo del transmisor, se configura un rango de 50 a 150 inH2O, se realiza el procedimiento de calibración (tolerancia=0.05 %) y ajuste, la Figura 128 muestra los resultados obtenidos.

**Figura 128**

*Resultados obtenidos antes y después del ajuste*

HART mA				Loop 24V	HART mA				Loop 24V
SOURCE	MEASURE		ERROR %		SOURCE	MEASURE		ERROR %	
49,995	inH2O	4,113	mA	0,712	50	inH2O	3,999	mA	-0,004
74,998	inH2O	8,169	mA	1,062	75,02	inH2O	7,999	mA	-0,028
100	inH2O	12,226	mA	1,41	100,007	inH2O	11,993	mA	-0,051
124,999	inH2O	16,281	mA	1,758	124,995	inH2O	15,987	mA	-0,074
150,001	inH2O	20,3	mA	1,874	150	inH2O	19,984	mA	-0,098
125,002	inH2O	16,282	mA	1,758	124,999	inH2O	15,988	mA	-0,074
100,003	inH2O	12,226	mA	1,41	100,004	inH2O	11,992	mA	-0,051
74,996	inH2O	8,169	mA	1,062	75,011	inH2O	7,997	mA	-0,028
50	inH2O	4,114	mA	0,713	50,002	inH2O	4	mA	-0,005
Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado		Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	

Se puede observar que tras el ajuste los errores han disminuido notablemente, sin embargo 5 aparecen marcados, ya que la tolerancia de error seleccionada es bastante pequeña. En un caso práctico real, los errores obtenidos pueden ser aceptados, sin embargo, para este caso se vuelve a realizar el ajuste, obteniendo los resultados de la Figura 129.

**Figura 129**

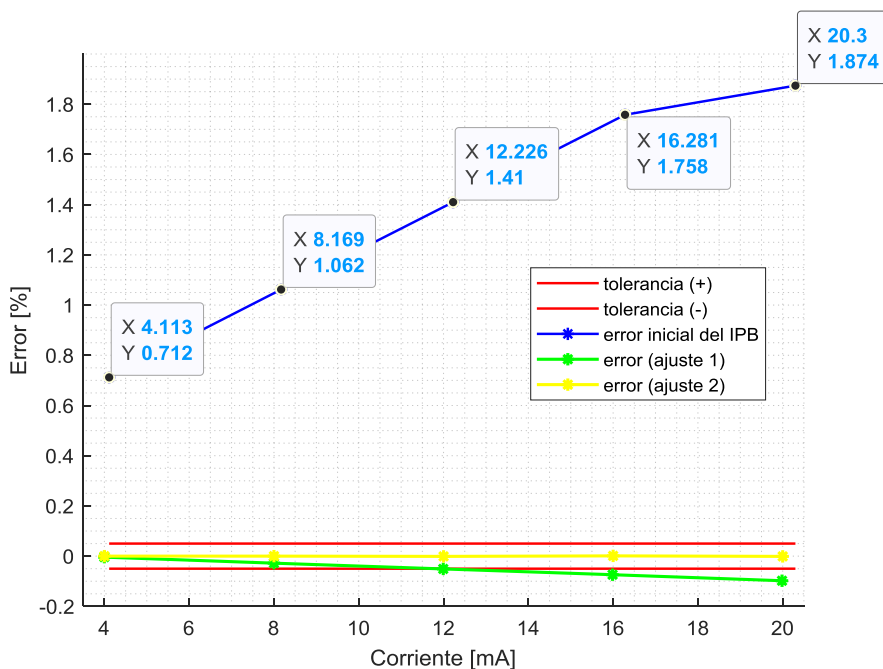
*Resultados obtenidos tras un segundo ajuste.*

HART mA				Loop 24V
SOURCE	MEASURE		ERROR %	
50,001	inH2O	4	mA	0
75	inH2O	8	mA	0
100,004	inH2O	12,001	mA	-0,001
124,997	inH2O	16	mA	0,001
150,002	inH2O	20	mA	-0,001
125,005	inH2O	16,001	mA	-0,001
100,005	inH2O	12,001	mA	0
74,993	inH2O	7,999	mA	0
50,002	inH2O	4	mA	0
Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado	

Se puede observar que tras un segundo ajuste los errores han disminuido mucho más, logrando entrar en la estrecha tolerancia de error del 0.05 %. En la Figura 130 se observa las curvas de calibración antes y después del primer y segundo ajuste.

**Figura 130**

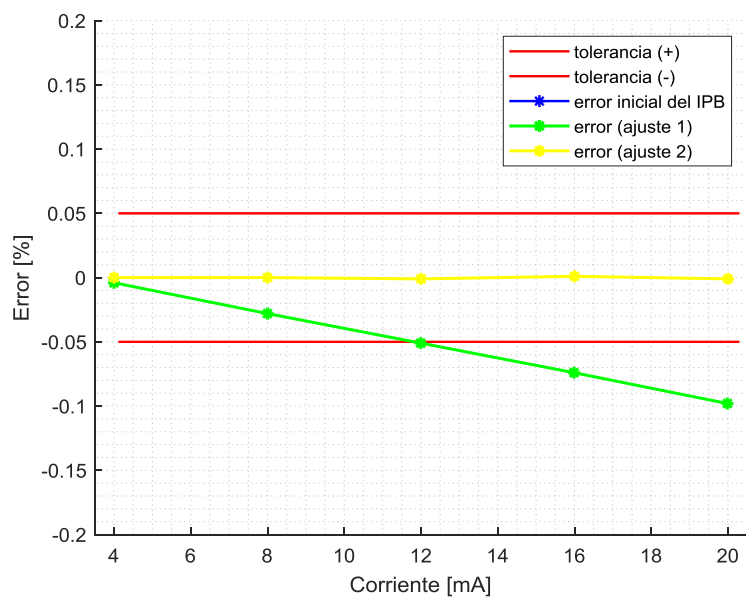
*Curvas de calibración antes y después del ajuste*



En la Figura 130 se puede observar los límites del error máximo permitido en porcentaje (tolerancia de error) de color rojo; Se observa el error del IBP en la primera calibración (línea azul), es decir, antes de ser ajustado. Las curvas de color verde y amarillo representan la calibración luego de realizar el procedimiento de ajuste 1 y 2 respectivamente; se observa que en tras el primer ajuste la curva de errores no entra en los límites de la tolerancia de error, y que tras un segundo ajuste dichos errores ingresan en la tolerancia de error del 0.05 %. En la Figura 131 se observa las curvas de calibración tras los ajustes de manera ampliada.

**Figura 131**

*Curvas de calibración antes y después del ajuste (zoom)*



En la ventana de calibración 2D también se observan las mediciones antes y después del ajuste.

**Figura 132**

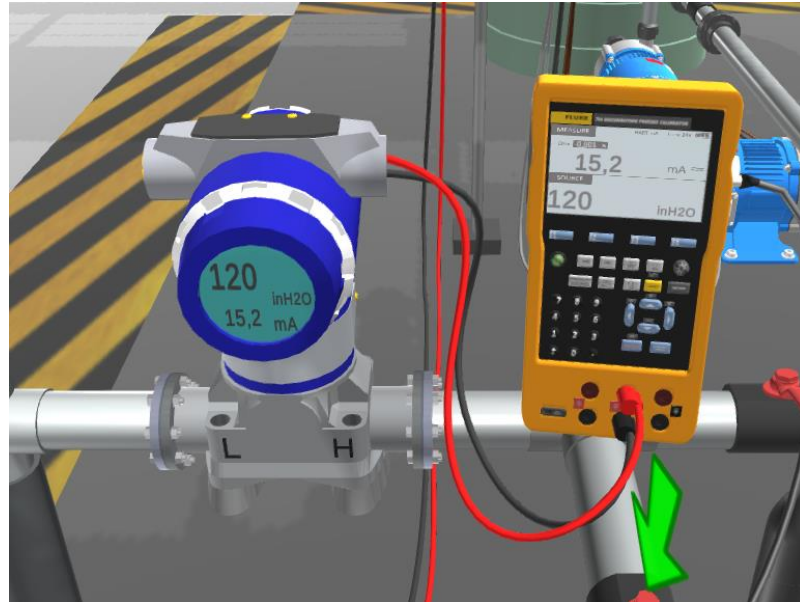
*Mediciones en los equipos antes y después del ajuste.*



Las mediciones que se observan en los equipos dentro de la ventana 2D también se reflejan en los instrumentos tridimensionales, dando más realismo a la experiencia del usuario.

**Figura 133**

*Mediciones en los equipos 3D durante la calibración*



### **Desarrollo de práctica virtual de calibración de transmisores de temperatura**

Para validar el procedimiento virtual de calibración de transmisores “Smart” de temperatura en la herramienta desarrollada se realizaron cuatro pruebas diferentes. Los resultados se muestran a continuación.


#### ***Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 % y 2 segundos de demora***

Se realiza el procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.5 % y un tiempo de demora de 2 segundos, este tiempo transcurre una vez que el pozo seco genera el valor de temperatura a calibrar. En la Figura 134 se observa los resultados entregados en la pantalla del equipo calibrador.



**Figura 134**

*Resultados obtenidos en el calibrador virtual*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	oC	4,014	mA	0,09
80	oC	7,934	mA	-0,412
160	oC	11,892	mA	-0,676
240	oC	15,852	mA	-0,927
320	oC	19,811	mA	-1,181
240	oC	15,908	mA	-0,575
160	oC	11,949	mA	-0,319
80	oC	7,989	mA	-0,067
0	oC	4,03	mA	0,19

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------

Se observa que los errores que se encuentran fuera de la tolerancia de error seleccionada aparecen resaltados.

***Procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.05 % y 2 segundos de demora***

Se realiza el procedimiento de calibración con una tolerancia de error del 0.05 % y un tiempo de demora de 2 segundos. En la Figura 135 se observa los resultados entregados en la pantalla del equipo calibrador.

### Figura 135

*Resultados obtenidos en el calibrador virtual*

SOURCE		HART mA		Loop 24V
		MEASURE		ERROR %
0	oC	4,014	mA	0,085
80	oC	7,934	mA	-0,411
160	oC	11,892	mA	-0,673
240	oC	15,852	mA	-0,925
320	oC	19,812	mA	-1,176
240	oC	15,908	mA	-0,575
160	oC	11,949	mA	-0,321
80	oC	7,99	mA	-0,065
0	oC	4,03	mA	0,187

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------


Se observa que los resultados obtenidos son similares a los de Figura 134, ya que el procedimiento es automático y el error es propio del “instrumento” inicialmente. En este caso aparecen todos los errores marcados ya que la tolerancia de error seleccionada es más estrecha. También se observa que los errores en las mediciones ascendentes difieren de los errores en las mediciones descendentes, cosa que no ocurría en los procedimientos de presión.

#### ***Procedimiento de ajuste***

Este procedimiento se ejecuta a partir de la calibración con tolerancia de error del 0.05 % y demora de 2 segundos. Tras realizarse el procedimiento de calibración se procede a efectuar el ajuste del transmisor (ajuste salida, ajuste sensor). Una vez que se realiza el procedimiento de ajuste se repite la calibración (tolerancia de error =0.05%, demora de 2 segundos). En la Figura 136 se observa los resultados obtenidos.

**Figura 136**

*Resultados después de ajustar (demora de 2 segundos)*


SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	oC	4,027	mA	0,168
80	oC	7,972	mA	-0,177
160	oC	11,972	mA	-0,177
240	oC	15,973	mA	-0,171
320	oC	19,973	mA	-0,17
240	oC	16,029	mA	0,179
160	oC	12,029	mA	0,181
80	oC	8,028	mA	0,175
0	oC	4,028	mA	0,173

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------

Se puede observar que tras el ajuste los errores han disminuido notablemente, sin embargo, se encuentran fuera de la tolerancia de error seleccionada, ya que ésta es estrecha (0,05 %). La Temperatura es una variable física lenta, por lo que el tiempo de demora seleccionado es muy corto y no permite que el transmisor establezca su medida, por lo que, a más de generar mayor error, se observa que éstos difieren en las mediciones ascendentes y descendentes. Se repite la prueba seleccionando una demora de 20 segundos, la Figura 137 muestra los resultados obtenidos.

**Figura 137**

*Resultados después de ajustar (demora de 20 segundos)*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
0	oC	3,999	mA	-0,005
80	oC	7,999	mA	-0,006
160	oC	12	mA	-0,002
240	oC	16	mA	0,003
320	oC	20,001	mA	0,007
240	oC	16,001	mA	0,009
160	oC	12,001	mA	0,005
80	oC	8	mA	0,001
0	oC	3,999	mA	-0,003

Anular	Página Anterior	Página Próx.	Terminado
--------	-----------------	--------------	-----------

Se puede observar que al seleccionar un tiempo de demora más grande las mediciones en el transmisor se estabilizan llegando a obtener el valor de medida real, con lo cual los errores entran en la estrecha tolerancia de error seleccionada (0.05 %). En la Figura 138 se observa las curvas de calibración antes y después del ajuste en las mediciones ascendentes y en la Figura 139 en las mediciones descendentes.

Figura 138

Curvas de calibración (mediciones ascendentes)

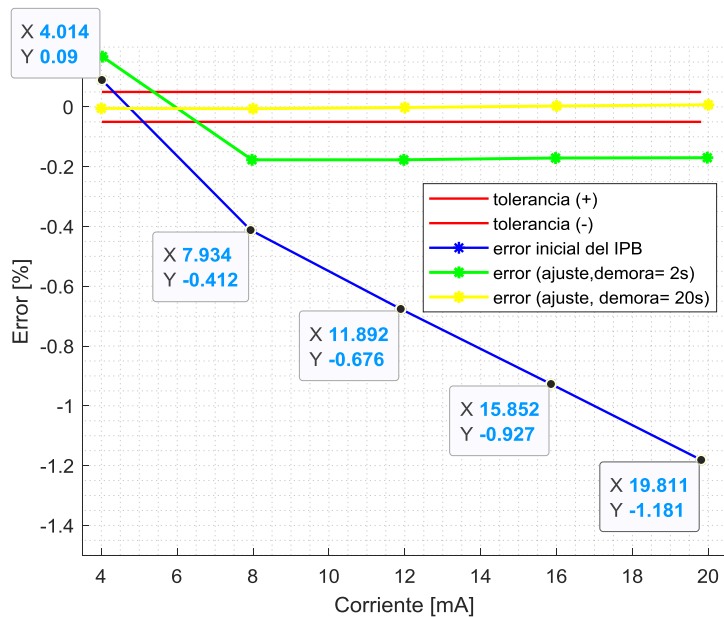
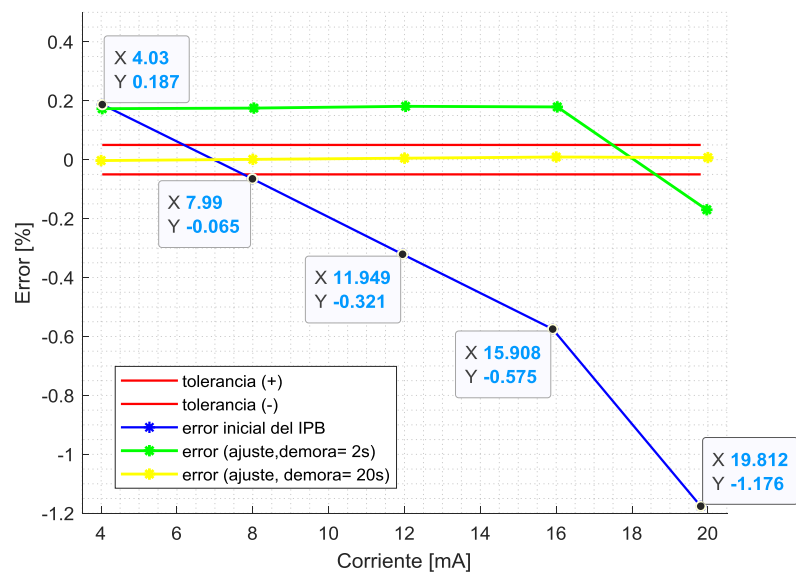


Figura 139

Curvas de calibración (mediciones descendentes)



Mediante las curvas de calibración se observa que a menor tiempo de demora mayor son los errores y éstos difieren cuando se miden ascendentes y descendentes; a diferencia que cuando se selecciona un tiempo de demora más grande, la medición del transmisor se estabiliza y es más exacta, como se observa en la Figura 138 y 139, en la calibración a un tiempo de demora de 20 segundos, tras el ajuste (línea amarilla) los errores prácticamente no difieren cuando se miden en ascendentes y descendentes. Por lo que, en este caso, al ser un procedimiento automático y al ser una variable lenta, los resultados van a depender de las configuraciones que se realice en los equipos, como en este caso al configurar el tiempo de demora. En la Figura 140 se puede observar las mediciones en los equipos antes y después del procedimiento de ajuste.

### Figura 140

*Mediciones en los equipos antes y después del ajuste*



Las mediciones también se observan en los equipos 3D como se muestra en la Figura 141.

### **Figura 141**

*Mediciones en los equipos virtuales 3D*




### ***Procedimiento de calibración en otro rango***

Para esta prueba se configura al transmisor en un rango de trabajo de 50 a 500 °C. Se realiza la calibración con una tolerancia de error del 0,25% y un tiempo de demora de 20 segundos. Los resultados se muestran en la Figura 142.

**Figura 142**


*Resultados obtenidos tras la calibración*

SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
50	oC	3,984	mA	-0,101
162,5	oC	7,943	mA	-0,357
275	oC	11,902	mA	-0,611
387,5	oC	15,862	mA	-0,865
500	oC	19,821	mA	-1,119
387,5	oC	15,863	mA	-0,859
275	oC	11,903	mA	-0,605
162,5	oC	7,944	mA	-0,351
50	oC	3,984	mA	-0,097
Anular		Página Anterior	Página Próx.	Terminado

Se observa que los errores marcados son aquellos que pasan del 0.25 % de tolerancia de error. Se realiza el ajuste y se repite el procedimiento de calibración, pero esta vez con una demora de 2 segundos. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 143.

**Figura 143**

*Resultados de la calibración después del ajuste (tolerancia de 0.25% y demora de 2 segundos)*

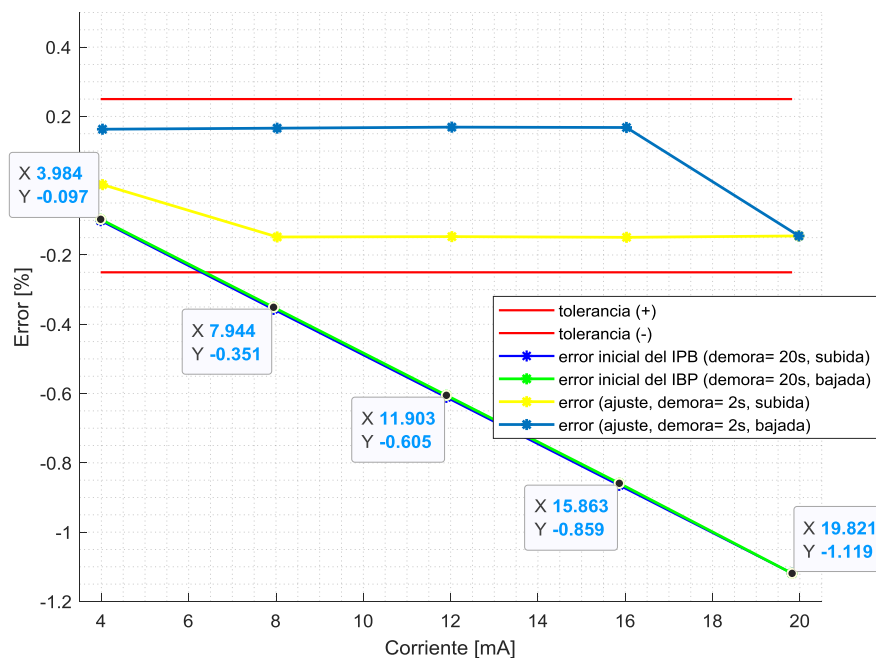
SOURCE		HART mA		Loop 24V 
		MEASURE		ERROR %
50	oC	4	mA	0,003
162,5	oC	7,976	mA	-0,148
275	oC	11,977	mA	-0,147
387,5	oC	15,976	mA	-0,149
500	oC	19,977	mA	-0,145
387,5	oC	16,027	mA	0,168
275	oC	12,027	mA	0,169
162,5	oC	8,026	mA	0,166
50	oC	4,026	mA	0,163
Anular		Página Anterior	Página Próx.	Terminado



Se puede observar que, al realizar el ajuste tras un procedimiento de calibración con un tiempo de demora más grande, se tiene mejores resultados, que incluso al repetir la calibración a un tiempo de demora menor los errores se mantienen por debajo de la tolerancia de error. De la misma manera, se confirma que a mayor tiempo de demora los resultados son los mismos tanto en las mediciones ascendentes como descendentes. En la Figura 144 se observa la curva de calibración antes y después del procedimiento de ajuste.

**Figura 144**

*Curvas de calibración antes y después del ajuste*



Mediante las curvas de calibración se observa el error “real” del IBP antes de ser ajustado, ya que se realiza la primera calibración a un tiempo de demora de 20 segundos, obteniendo los mismos resultados tanto en las mediciones ascendentes como descendentes. También, se observa que, ya que el procedimiento de calibración

se realizó a mayor tiempo de demora, los resultados tras el ajuste se hallan dentro de la tolerancia de error seleccionada, siendo esta muy estrecha (0.25 %), sin embargo, tras repetir la calibración después del ajuste a un tiempo de demora menor (2 segundos) los errores difieren en las mediciones ascendentes y descendentes, puesto que como ya se dijo, el transmisor no logra estabilizar su medida en un periodo corto de tiempo.

### **Comprobación de la Hipótesis**

La hipótesis planteada ha sido comprobada realizando la validación de los procedimientos virtuales de calibración y ajuste de transmisores “Smart” mediante las diferentes pruebas realizadas, obteniendo los resultados que se consiguen en un procedimiento real de calibración de transmisores “Smart”. En resumen:

- Al finalizar el procedimiento virtual de calibración se obtienen los errores en las mediciones del transmisor.
- Los errores obtenidos en la calibración corresponden a la diferencia entre las mediciones del transmisor con respecto a un valor de referencia dada por un equipo patrón.
- Los errores mostrados en el equipo calibrador virtual se calculan de la misma manera en que lo hace el equipo real.
- El procedimiento virtual de ajuste consigue minimizar los errores en las mediciones del transmisor.
- Los resultados obtenidos en los procedimientos manuales dependen en su mayor parte del usuario.
- Los resultados obtenidos en el procedimiento automático dependen en su mayor parte de la configuración que se realice en los equipos y de la variable física a medir.

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos de manera resumida en un procedimiento ideal en la herramienta desarrollada:

**Tabla 16**

*Resultados obtenidos para la validación de la Hipótesis*

FUENTE	MEASURE (mA)		ERROR (%)	
	Sin ajuste	Con ajuste	Sin ajuste	Con ajuste
<b>Transmisor de presión absoluta (psi)</b>				
0	4.002	4.000	0.013	0.000
75	8.054	8.003	0.338	0.019
150	12.105	12.005	0.656	0.031
225	16.157	16.008	0.981	0.050
300	20.209	20.010	1.306	0.063
<b>Transmisor de presión diferencial (inH2O)</b>				
0	4.002	4.000	0.013	0.000
17.5	8.058	7.997	0.363	-0.019
35	12.113	11.994	0.706	-0.038
52.5	16.169	15.992	1.056	-0.050
70	20.225	19.989	1.406	-0.069
<b>Transmisor de temperatura (°C)</b>				
0	4.002	4.000	0.013	0.000
80	7.961	8.003	-0.244	0.019
160	11.921	12.007	-0.494	0.044
240	15.880	16.010	-0.750	0.063
320	19.839	20.014	-1.006	0.088

Por ende, el diseño e implementación de una estación virtual de instrumentación y control de procesos industriales, permite el desarrollo de prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.

### **Alcances**

- La aplicación desarrollada permite emular las prácticas de calibración de transmisores “Smart” que se realizan en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en el área de Instrumentación Industrial.
- Los transmisores virtuales implementados permiten configurar su rango de trabajo mediante el equipo calibrador en la ventana de calibración 2D.
- Los procedimientos de calibración permiten seleccionar tres valores de tolerancia de error: 0.5, 0.25 y 0.05 %.
- El procedimiento de calibración del transmisor de temperatura permite seleccionar 4 tiempos de demora: 2, 5, 10 y 20 segundos.
- La aplicación permite realizar el procedimiento de ajuste y evidenciar los resultados de la calibración antes y después de ajustar.
- Los procesos virtuales controlados (nivel y temperatura) permiten el cambio del modo de control de manual a automático en la UI, como procedimiento previo a la calibración de los transmisores.

### **Limitaciones**

- En el equipo calibrador virtual no están disponibles todas las funciones que el equipo real dispone, sino únicamente las necesarias para el procedimiento de calibración de los transmisores.
- En el control de los procesos se integran las constantes del controlador PID internamente en la programación, dichas constantes no pueden ser modificadas por el usuario.

- La aplicación desarrollada no permite realizar las conexiones de los instrumentos de calibración con los transmisores, éstos aparecen automáticamente conectados de manera correcta.
- La estación virtual 3D no reemplaza a una estación industrial real de laboratorio, únicamente es una herramienta de ayuda.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

- Mediante las pruebas realizadas, se concluye que la estación virtual de instrumentación y control de procesos permite desarrollar prácticas virtuales de calibración de transmisores “Smart” en el área de instrumentación industrial.
- Mediante las pruebas de interacción general en el entorno virtual se concluye que la estación virtual integra funciones primordiales de un laboratorio de prácticas para la calibración de transmisores “Smart”.
- Se concluye que es posible emular los procedimientos de calibración de los transmisores de presión absoluta, presión diferencial y temperatura en la aplicación desarrollada de manera semejante a un procedimiento real.
- Mediante la ejecución de los procedimientos de calibración en la aplicación desarrollada, se concluye que, tras el procedimiento de calibración únicamente se determina el error que presenta el transmisor en sus mediciones, tal como ocurre en un procedimiento de calibración real.
- Se concluye que el error del transmisor determinado en la calibración se obtiene al compararlo con un equipo patrón de mejor exactitud.
- Mediante la realización del ajuste en la aplicación desarrollada, se concluye que este procedimiento minimiza los errores en las mediciones del transmisor, tal como ocurre en un procedimiento de ajuste real.
- Mediante la calibración virtual del transmisor de temperatura se concluye que a mayor tiempo de demora (estabilización), mejores resultados se obtienen, ya

que el transmisor logra estabilizar su medida antes de que el DPC la registre, tal como ocurre en un procedimiento real.

- Mediante la visualización de las mediciones en los equipos virtuales 3D se concluye que existe diferencia entre las medidas indicadas por el transmisor antes y después de ser ajustado.
- Mediante las pruebas en la estación virtual se concluye que los controladores PID diseñados para el control de los procesos de nivel y temperatura permiten su regulación automática, manteniendo constante la consigna o referencia.

### **Recomendaciones**

- Para el uso de la aplicación, se recomienda, conectar el computador a su fuente o cargador y configurar el modo de energía en máximo rendimiento, ya que la aplicación necesita de algunos recursos para ejecutarse de manera fluida.
- Las características mínimas recomendadas que el computador debe tener para que la aplicación EVIC-2R se ejecute de manera correcta son: procesador Core I5 o Ryzen 5, 8 GB de memoria RAM y una tarjeta de video dedicada de 4 GB.
- Se recomienda revisar el manual de calibración y de modo HART del equipo calibrador documentador de procesos Fluke 754 conjuntamente con las guías de usuario de la aplicación implementada, ya que el proyecto se desarrolló en base a este equipo.
- Se recomienda leer las guías prácticas adjuntas en la sección de anexos antes de realizar los procedimientos virtuales de calibración.

**Bibliografía.**

- Aldemar, J. (2014). *Control Automático I: estrategias de control clásico*. Ibagué: Universidad de Tolima.
- Altertecnica. (21 de Diciembre de 2020). *Altertecnica*. Recuperado el 23 de Diciembre de 2020 de: <https://altertecnica.com/realidad-aumentada-realidad-virtual-industria-40/>
- Atkins, C. (2009). Virtual experience: Observations on Second Life. En M. Purvis y B. Savarimuthu (Eds.). *Computer Science: ComputerMediated social networking* (págs. 7-17). Berlin: Springer.
- Beamex. (1 de Mayo de 2016). *¿Cuándo se debe realizar una calibración en campo taller?*. Recuperado el 21 de Diciembre de 2020 de: <http://www.controlware.com.pe/beamex/Publicaciones/CalibracionEnCampoOtaller.pdf>
- Beck, H. a. (2009). Educational applications of virtual world environments. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, 36-44.
- Chang, R. (2010). Leyes de los gases. En R. Chang, *Química* (pág. 179). México, D.F.: Mcgraw Hill interamericana.
- Chang, R. (2010). Leyes de los Gases. En R. Chang, *Química* (pág. 181). México, D.F.: Mcgraw Hill interamericana.
- Chang, R. (2010). Relación presión volumen Ley de Boyle. En R. Chang, *Química* (pág. 181). México, D.F.: Mcgraw Hill interamericana.
- Chang, R. (2010). Relación presión volumen: ley de Boyle. En R. Chang, *Química* (pág. 182). México, D.F.: Mcgraw Hill interamericana.



- Chang, R. (2010). Relación temperatura-volumen:ley de Charles y de Gay-Lussac. En R. Chang, *Química* (págs. 182-183). México, D.F.: Mcgraw Hill interamericana.
- Chang, R. (2010). Relación temperatura-volumen:ley de Charles y de Gay-Lussac. En R. Chang, *Química* (págs. 183-184). México, D.F.: Mcgraw Hill interamericana.
- Córdoba Antonio, C. A. (2010). Diseño y Construcción de un Transmisor de Temperatura. *8TH Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (pág. 1). Arequipa: Innovation and Development for the Americas.
- Corporation, F. (2011). Calibración Hart. En F. Corporation, *754 Hart Mode* (págs. 12-13). Corporation, Fluke.
- De Freitas, S. (2008). Serious virtual worlds. A scoping guide. *UK: The Joint Information Systems Committee (JISC)*. .
- Ennys Amaya Isea, A. G. (1997). Aplicación de transmisores de nivel. En *Instrumentación Industrial* (pág. 65). Maracaibo: PCI Entrenamiento S.A.
- Ennys Amaya Isea, A. G. (1997). Aplicación para tanques abiertos. En *Instrumentación Industrial* (págs. 65-66). Maracaibo: PCI Entrenamiento S.A.
- Ennys Amaya Isea, A. G. (1997). Aplicación para Tanques Cerrados. En A. G. Ennys Amaya Isea, *Instrumentación Industrial* (págs. 66-67). Maracaibo: PCI Entrenamiento S.A.
- Esteve, F. y. (2013). Explorando el potencial educativo de los entornos virtuales 3D. *Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, págs. 302-319.
- Fällman, D. B. (1999). VR in Education: An Introduction to Multisensory Constructivist Learning Environments. . *Universitets pedagogisk konferens Umeåuniversitet*.

- FemtoCal. (02 de Enero de 2021). *FemtoCal*. Recuperado el 21 de Enero de 2021 de:  
<https://www.femto-calibracion.es/bombas-y-generadores-de-presion/>
- Fluke. (2011). Ajuste del modo Hart. En K. Corporation, *754 Hart Mode* (pág. 12). Kluge Corporation.
- Fluke. (2011). Diagram de bloques de un transmisor HART. En F. Corporation, *754 Hart Mode* (pág. 13). Fluke Corporation.
- Fluke. (02 de Enero de 2018). *Fluke*. Recuperado el 22 de Enero de 2021 de:  
<https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-multifuncion/fluke-754>
- Fluke. (2 de Enero de 2021). *Fluke*. Recuperado el 22 de Enero de 2021 de:  
<https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-de-temperatura/fluke-calibration-9142>
- Fluke. (02 de Enero de 2021). *Fluke*. Recuperado el 22 de Enero de 2021 de:  
<https://www.fluke.com/es-ec/producto/herramientas-de-calibracion/calibradores-de-presion/fluke-750p>
- Gahan, A. (2009). Game Art Complete. En A. Gahan, *Game Art Complete* (págs. 133-146). Toronto-Canadá: Elsevier.
- Gonzalo Méndez, A. d. (2005). Desarrollo de entornos virtuales para la Web. En *Ingeniería de la Web y Patrones de diseño* (pág. Chapter 6). Madrid: Pearson Educación. Recuperado el 23 de Enero de 2021 de:  
[https://www.researchgate.net/publication/280304213\\_Desarrollo\\_de\\_Entornos\\_Virtuales\\_para\\_Web](https://www.researchgate.net/publication/280304213_Desarrollo_de_Entornos_Virtuales_para_Web)
- Guinot, M. (2015). *Diseño y desarrollo de un videojuego en Unity 3D*. Recuperado el 23 de Enero de 2021 de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/48367>

HBK, c. (25 de Diciembre de 2020). *HBM*. Recuperado el 24 de Enero de 2021 de:

<https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/>

Hindawi Publishing Corporation. (2015). *Design and Implementation of Energy Efficiency in HVAC Systems Based on Robust PID Control for Industrial Applications*.

Turkey: Qing-An Zeng.

King. (2016). *Process Control*. *United Kingdom: Wiley*.

Klaudia Grechuta, B. R. (2019). *IBEC*. Recuperado el 24 de Enero de 2021 de:

<http://www.ibecbarcelona.eu/es/un-grupo-de-investigacion-del-ibec-ha-desarrollado-un-sistema-de-realidad-virtual-para-tratar-problemas-del-habla/>

Lerache, L. I. (Octubre de 2014). *Realidad Aumentada(RA) en el contexto de usuarios finales*. Recuperado el 25 de Enero de 2021 de:

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/41253>

Marllelis del Valle Gutiérrez Hinstroza, S. A. (2017). *Introducción a la Instrumentación y Normas*. En S. A. Marllelis del Valle Gutiérrez Hinstroza, *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (pág. 1). Santa Elena: Editorial UPSE.

Martín, J. C. (8 de Abril de 2020). *Segureskola*. Recuperado el 26 de Enero de 2021 de:

<https://gaptain.com/blog/beneficios-de-la-realidad-virtual-en-educacion-como-llevarla-al-aula/>

O'Dwyer, A. (2009). *HANDBOOK OF PI AND PID CONTROLLER TUNING RULES*.

*Singapore: B&JO Enterprise*.

Omega. (28 de Diciembre de 2020). *Omega*. Recuperado el 26 de Enero de 2021 de:

<https://cl.omega.com/technical-learning/metodologias-escalamiento-transmisor-temperatura.html#:~:text=El%20transmisor%20recibe%20la%20se%C3%B1al,aquellos%20en%20el%20extremo%20superior.>

- Peacock. (2017). *The ONE thing that separates the men from the PID tuning boys*.  
Recuperado el 26 de Enero de 2021 de: <https://www.pidtuning.net/article1-PID-Types.php>
- Pérez, F. R. (2014). *Modelado en 3D y composición de objetos*.
- Reality, T. (21 de Marzo de 2017). *Two Reality*. Recuperado el 27 de Enero de 2021 de: <https://www.tworeality.com/la-simulacion-virtual-como-metodo-de-formacion-de-personal/>
- Redecker, C. (2013). The use of ICT for the assessment of key competences. *Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. European Commission*.
- Ruiz, V. M. (2003). MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO SERVOMECANISMOS. *Universidad de Costa Rica*, 1-2.
- Santillán Romero, P. (2014). *Guía metodológica de modelado y animación 3D para mundos virtuales interactivos*. Recuperado el 27 de Enero de 2021 de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3332>
- Taichi. (1997). Teaching with Technology. *Reporte Técnico, University of Brown*.  
Obtenido de University of Brown.
- Terry, B. (15 de Abril de 2013). *Modelingandcontrol*. Recuperado el 27 de Enero de 2021 de: <https://modelingandcontrol.com/2013/04/on-demand-tuning/>
- Unity. (13 de Julio de 2020). *Unity*. Recuperado el 28 de Enero de 2021 de: <https://unity.com/es/how-to/beginner/using-blender-and-maya-unity>
- Unity. (19 de Noviembre de 2020). *Unity*. Recuperado el 28 de Enero de 2021 de: <https://unity.com/es>
- Vargas, J. J. (2006). La importancia de calibrar. *Sena*, 5-7.

# Anexos