



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

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

**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**

Autores:

Rocha Pullopaxi, Víctor Israel

Rocha Rocha, Kevin Raúl

Director:

Ing. Edwin Patricio Pruna Panchi



Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación 3D

4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

6 Conclusiones y recomendaciones



Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación 3D

4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

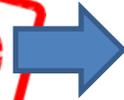
6 Conclusiones y recomendaciones



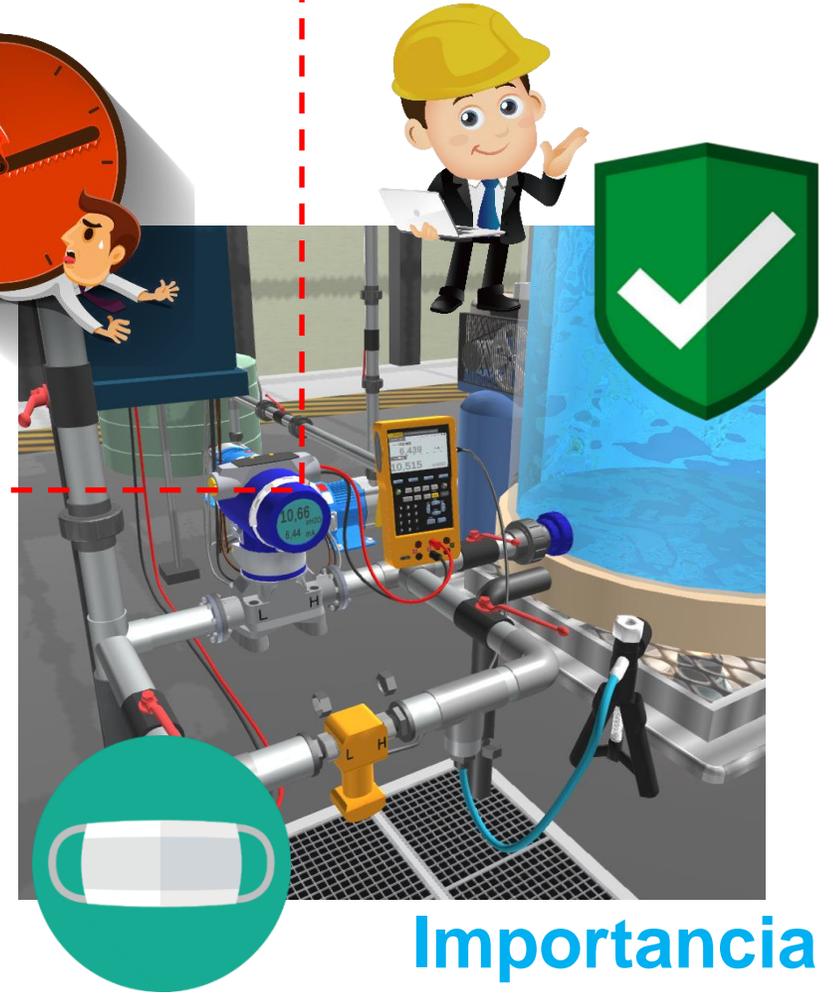
INTRODUCCIÓN

Antecedentes

 **ESPE** Sede Latacunga
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Problema



Importancia



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

INTRODUCCIÓN

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.



INTRODUCCIÓN

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.



INTRODUCCIÓN

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.



Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación

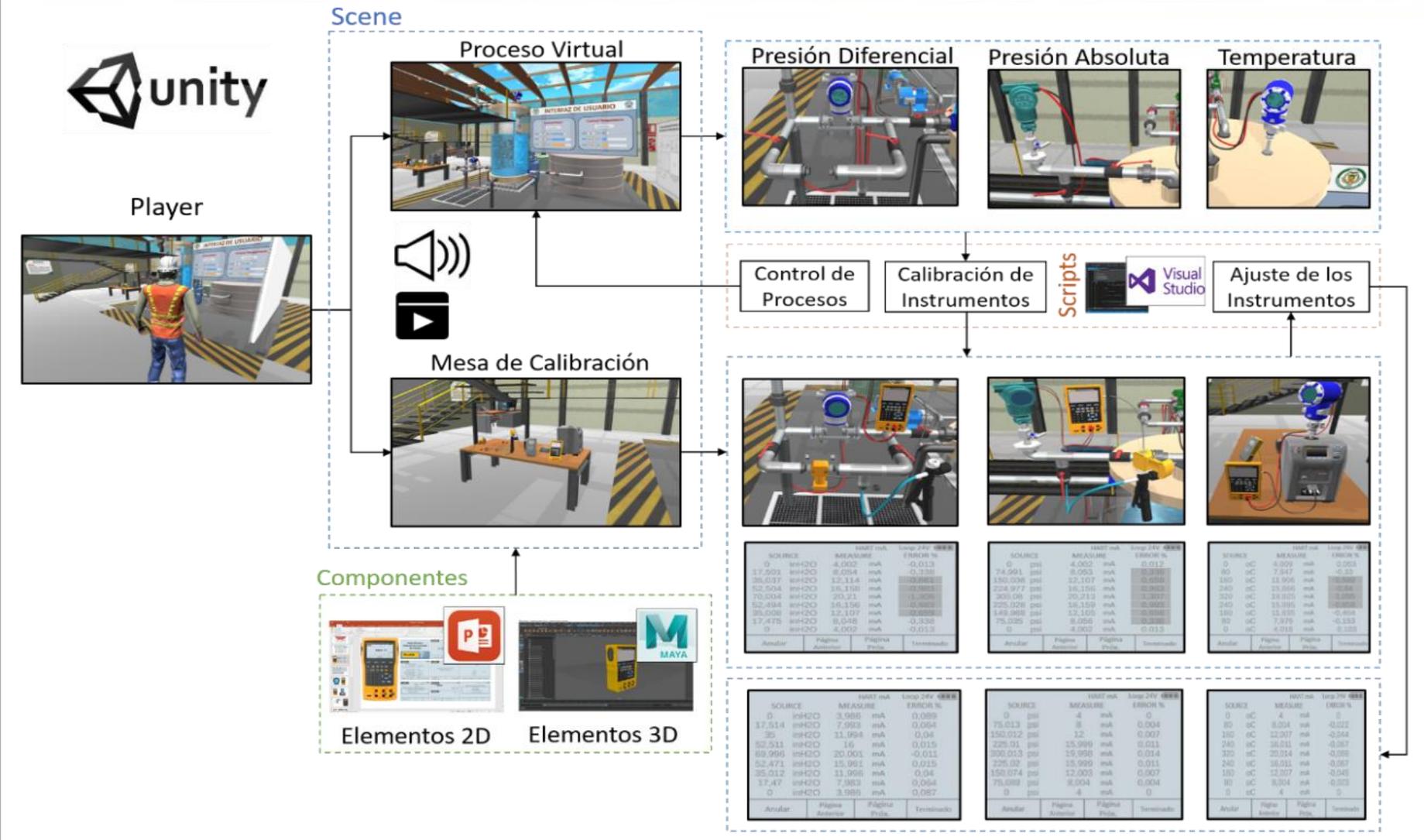
4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

6 Conclusiones y recomendaciones

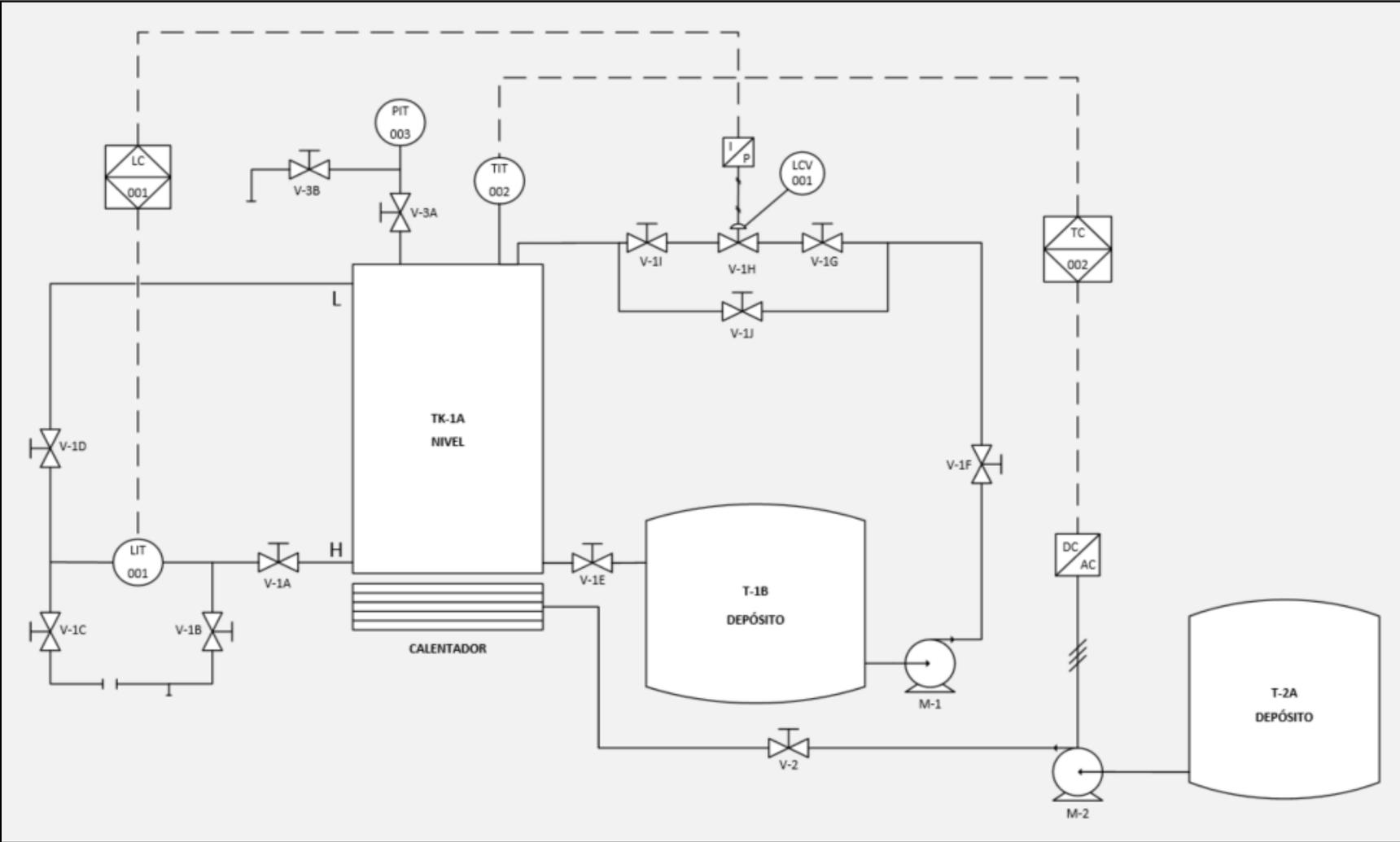


IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL



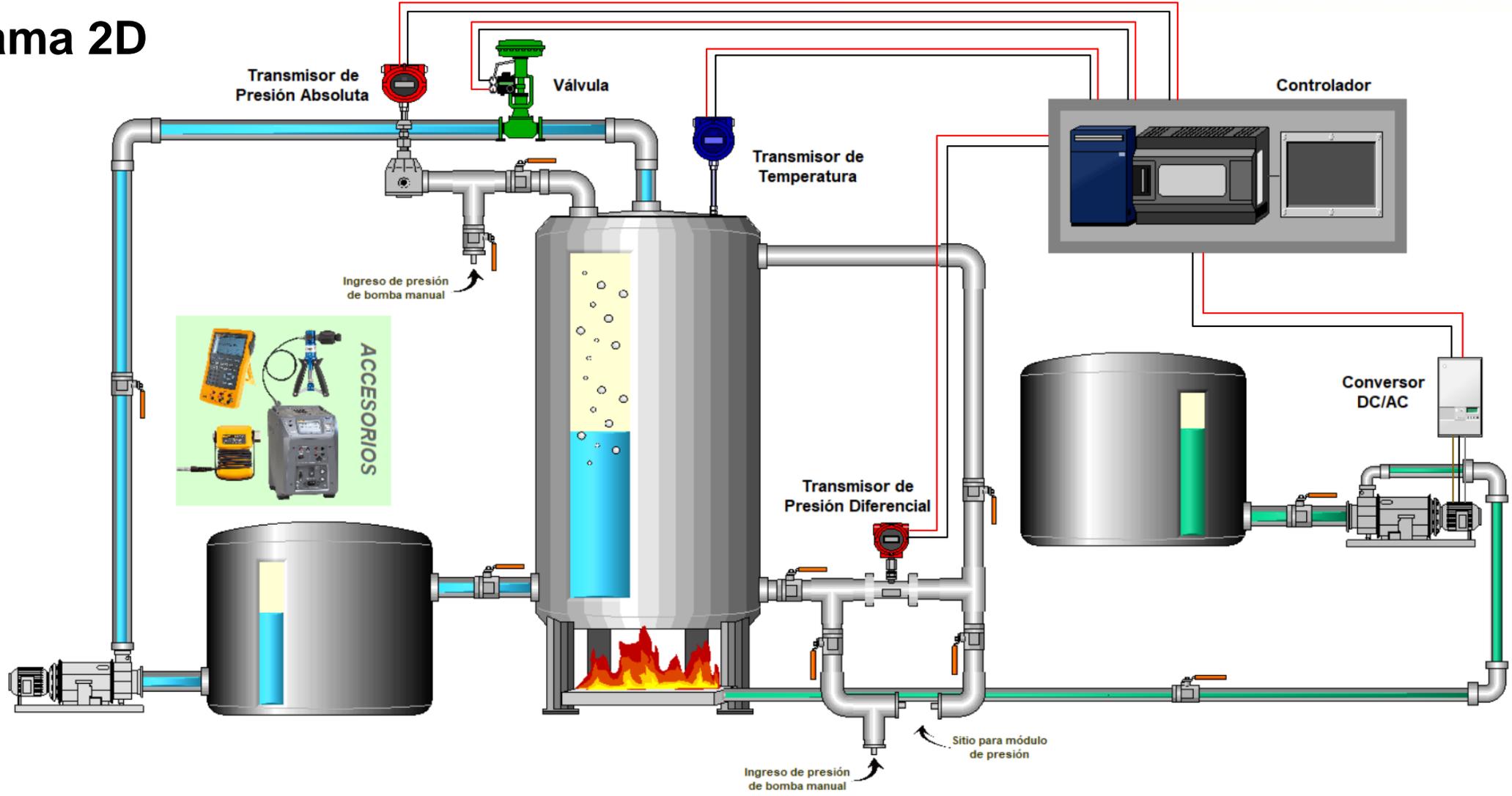
IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

P&ID



IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

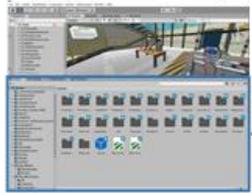
Diagrama 2D



IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

Entorno 3D

Motor Gráfico



Elementos 3D



Elementos 2D



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

Dinámica de los procesos virtuales

Nivel

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



$$L^{-1}\{G(s)\}$$



$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{0.9 * x(t - 1.5) - h(t)}{2.3}$$



Temperatura

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



$$L^{-1}\{G(s)\}$$



$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{0.61 * x(t - 1.5) - T(t)}{100.7}$$

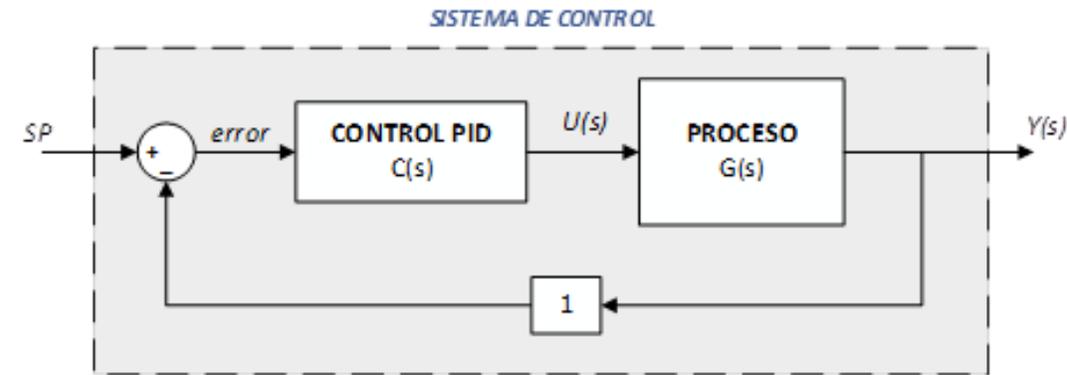
Donde:

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

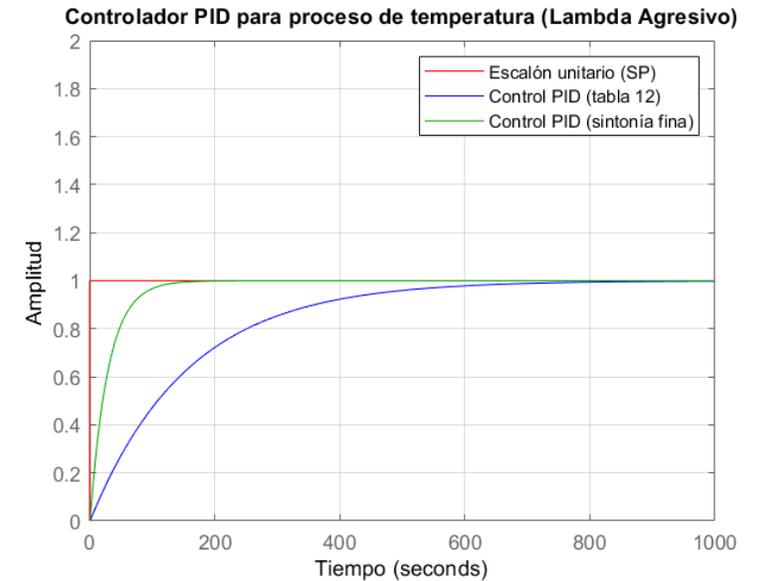
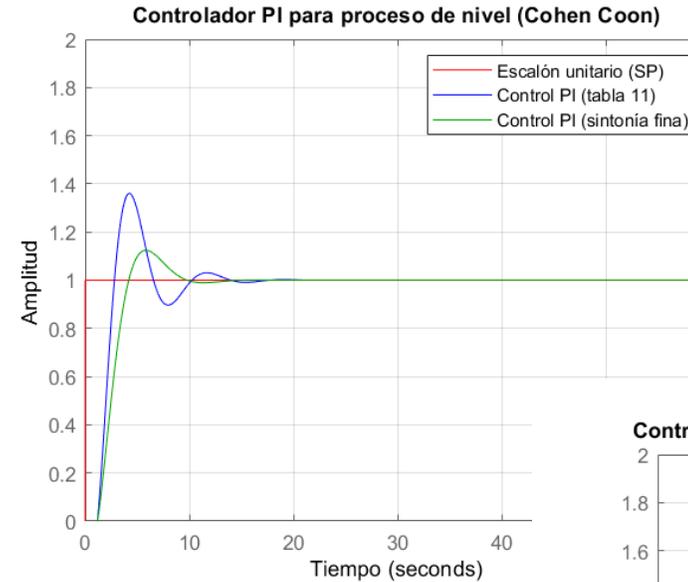


IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

Control de los procesos virtuales



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



IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

Rango de operación de los procesos virtuales

Nivel

$$\Delta P = P_H - P_L$$

$$P = SG * h$$



Rango: (0 – 66.93 inH₂O)

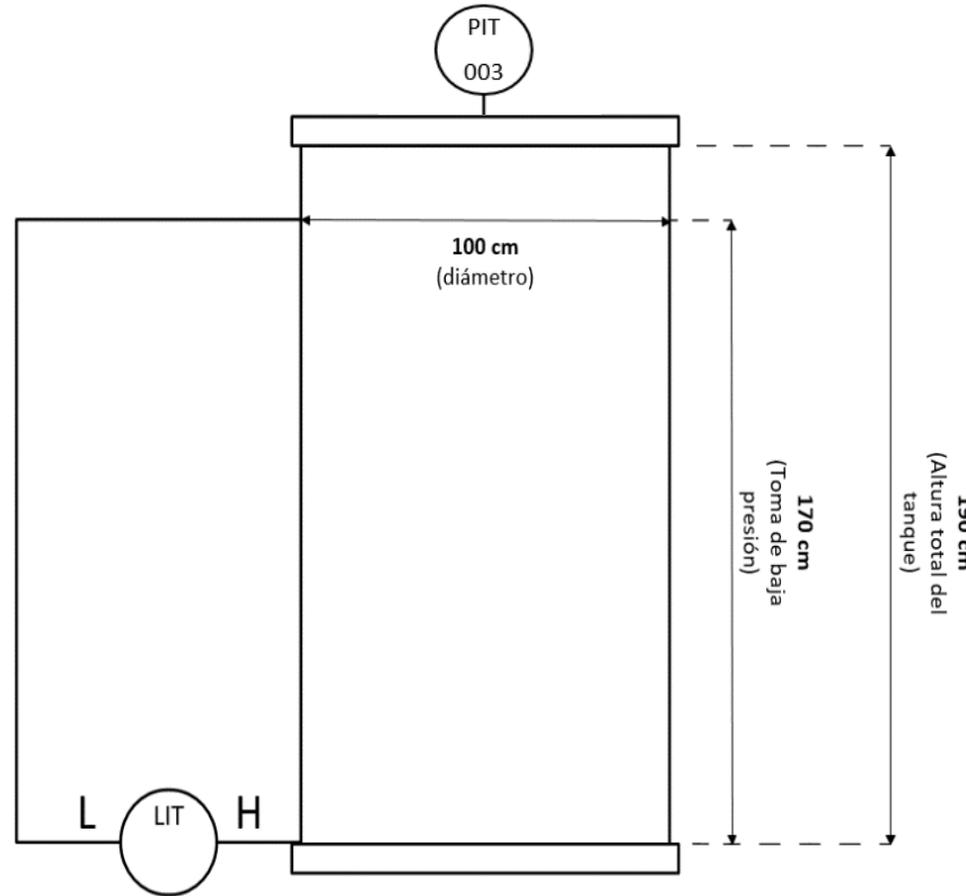
Rango LIT: (0 – 70 inH₂O)

Temperatura



Rango: (15 – 320 °C)

Rango TIT: (0 – 320 °C)



Presión

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

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2$$

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

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



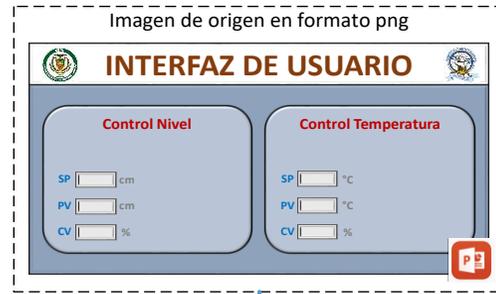
Rango: (14.7 a 287.45 psi)

Rango PIT: (0 – 300 psi)

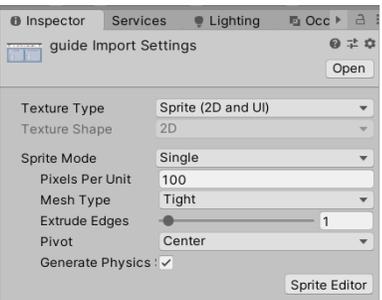


IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN VIRTUAL

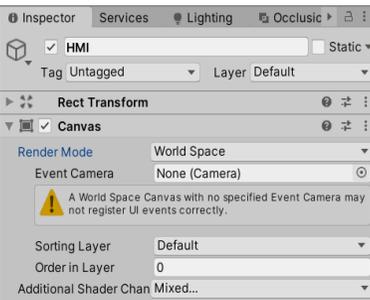
Rango de operación de los procesos virtuales



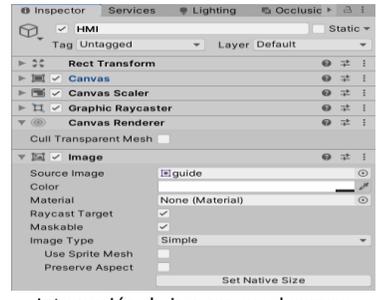
Configuraciones en la imagen .png (conversión a sprite)



Configuraciones en el canvas



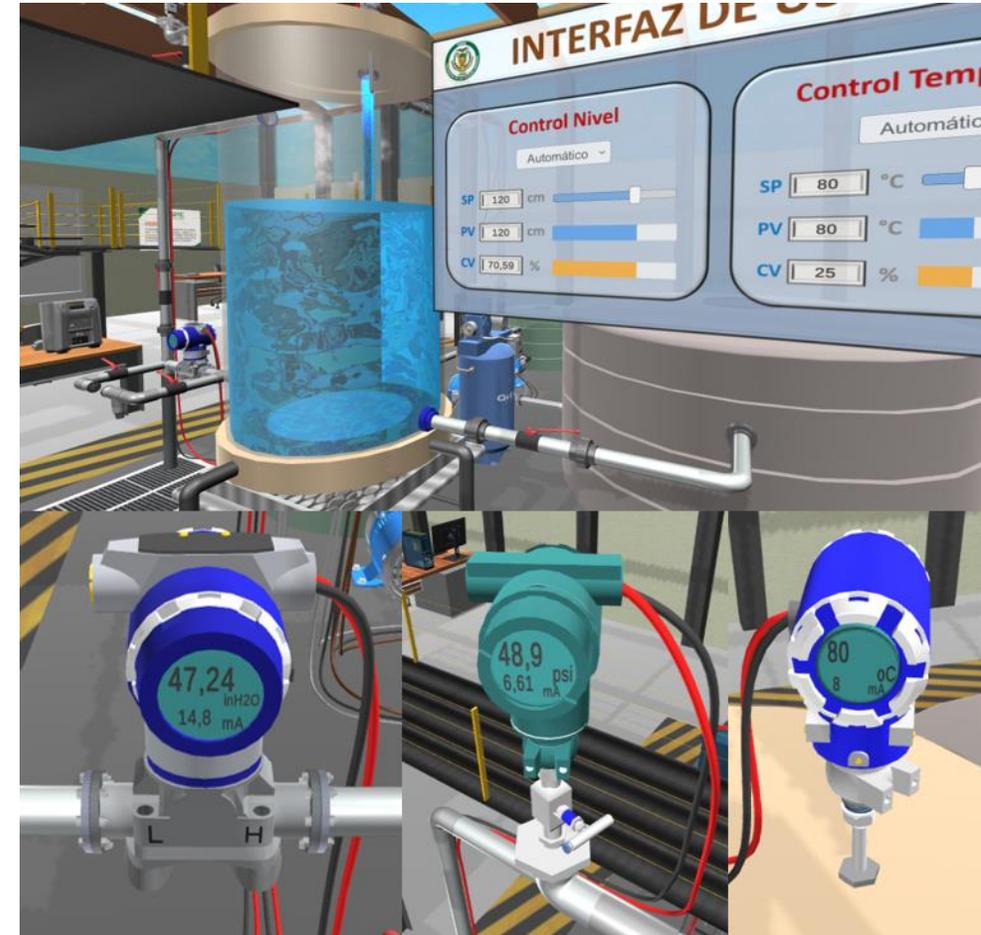
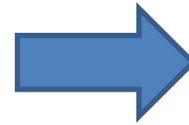
Integración de imagen en el canvas



Ubicación en la escena



unity



Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación 3D

4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

6 Conclusiones y recomendaciones



CALIBRACIÓN EN EL ENTORNO VIRTUAL

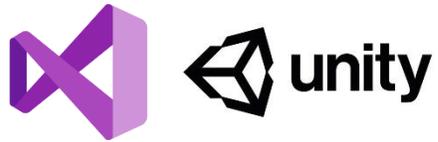
Instrumentos virtuales para la calibración

- Calibrador de Procesos
- Bomba manual
- Módulo de presión absoluta
- Módulo de presión diferencial
- Pozo Seco de metrología



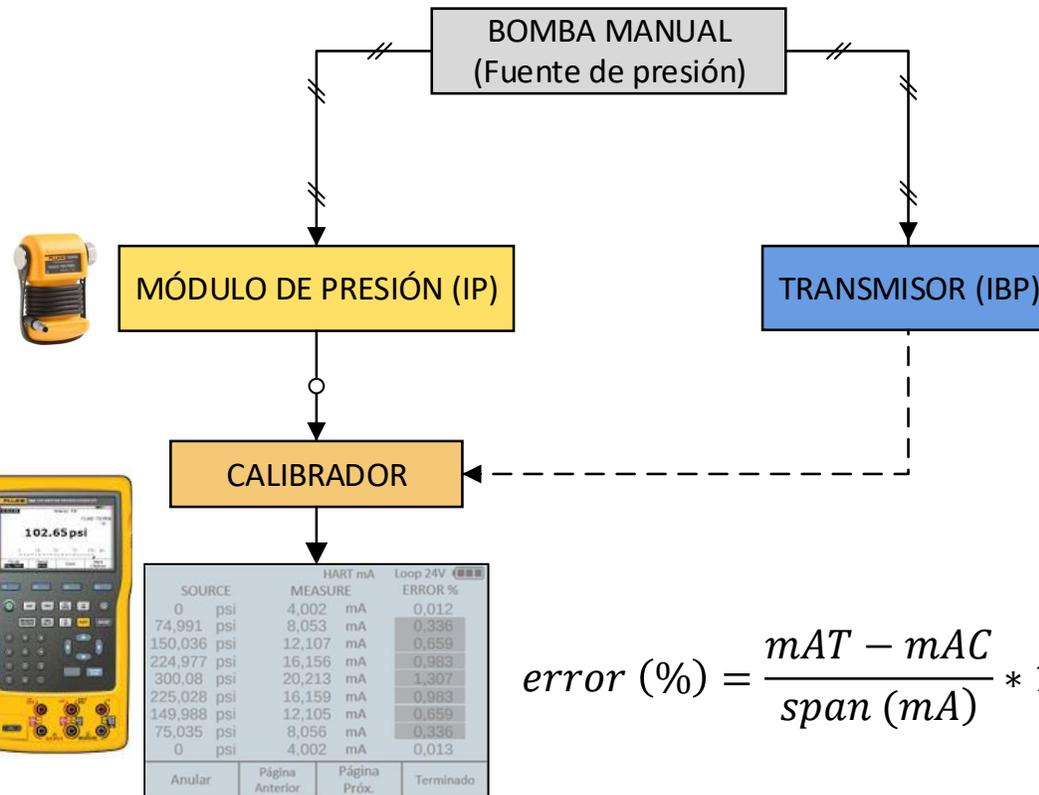
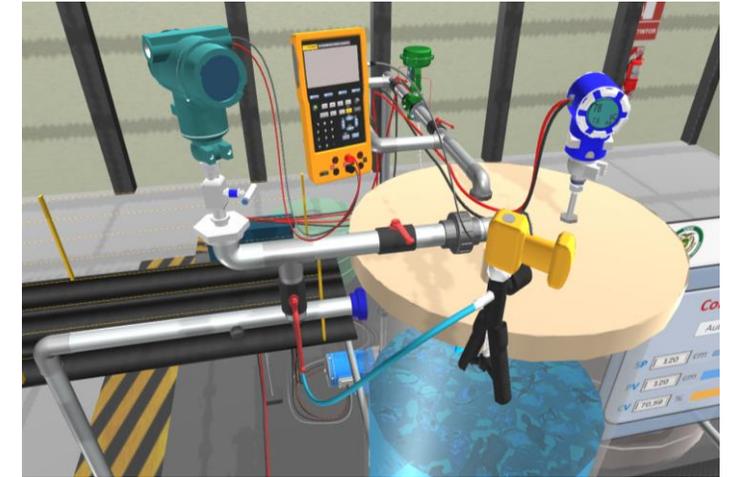
CALIBRACIÓN EN EL ENTORNO VIRTUAL

Calibración del transmisor de presión absoluta



$$Pres = Pres + 1.511 - Aj$$

$Aj \rightarrow$ Perillas de ajuste



$$Gc(s) = \frac{1}{0.8s + 1}$$

↓

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1 * x(t) - y(t)}{0.8}$$

$$Gt(s) = \frac{1.013}{1.0s + 1}$$

↓

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1.013 * x(t) - y(t)}{1.0}$$

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



SOURCE	MEASURE	HART mA	Loop 24V	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

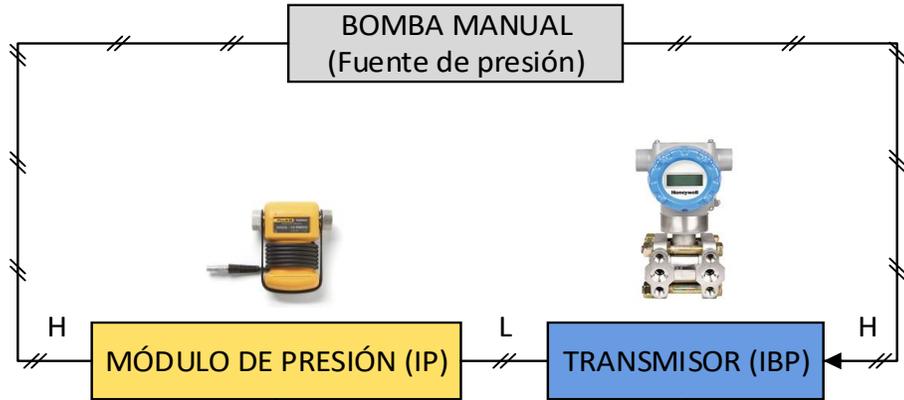
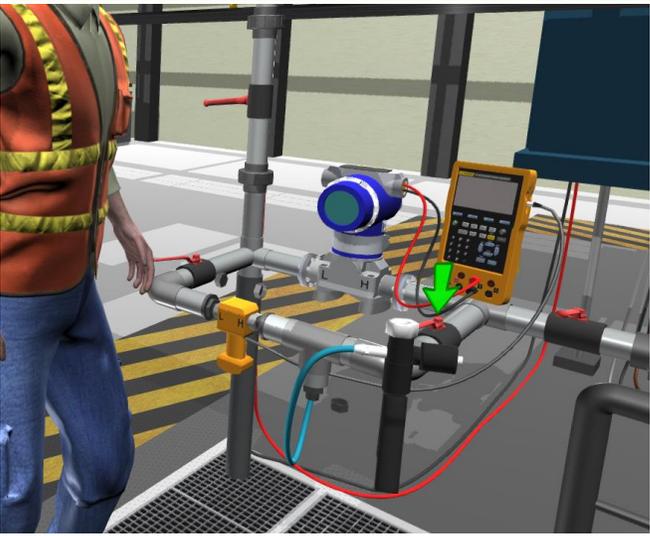
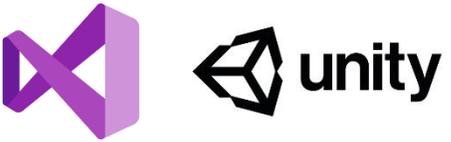


CALIBRACIÓN EN EL ENTORNO VIRTUAL

Calibración del transmisor de presión diferencial

$$Pres = Pres + 1.511 - Aj$$

Aj → Perillas de ajuste



$$Gc(s) = \frac{1}{0.8s + 1}$$

↓

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1 * x(t) - y(t)}{0.8}$$

$$Gt(s) = \frac{1.014}{1.0s + 1}$$

↓

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1.014 * x(t) - y(t)}{1.0}$$



CALIBRADOR

SOURCE	MEASURE	HART mA	Loop 24V	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

$$error (\%) = \frac{mA_T - mA_C}{span (mA)} * 100\%$$

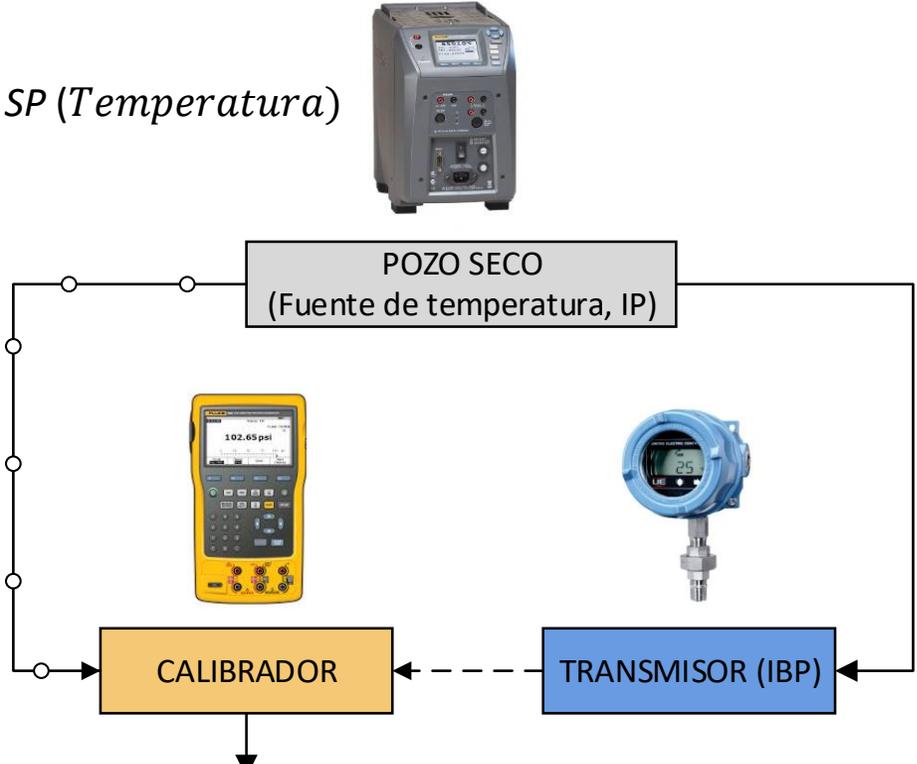


CALIBRACIÓN EN EL ENTORNO VIRTUAL

Calibración del transmisor de temperatura

$$Gc(s) = \frac{1}{1.8s + 1}$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1 * x(t) - y(t)}{1.8}$$



SOURCE	MEASURE	HART mA	Loop 24V	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

$$error (\%) = \frac{mA_T - mA_C}{span (mA)} * 100\%$$



$$Gt(s) = \frac{0.9899}{4.6s + 1}$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{0.9899 * x(t) - y(t)}{4.6}$$

CALIBRACIÓN EN EL ENTORNO VIRTUAL

Ventanas de calibración 2D

Temperatura



Presión



Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación 3D

4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

6 Conclusiones y recomendaciones

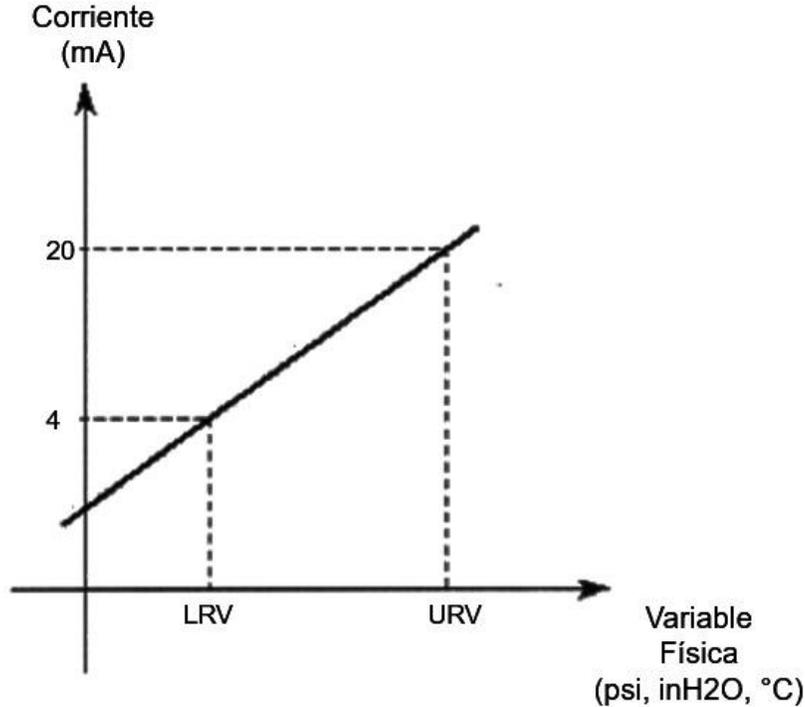


AJUSTE EN EL ENTORNO VIRTUAL

Ecuaciones para el ajuste de los transmisores



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



$$\text{corrienteC (mA)} = \frac{16 * (\text{Vmed} - \text{LRV})}{(\text{URV} - \text{LRV})} + 4 \rightarrow \text{Instrumento Patrón}$$

$$\text{corrienteT (mA)} = \frac{(\text{URVmA} - \text{LRVmA}) * (\text{Vmed} - \text{LRVaj})}{(\text{URVaj} - \text{LRVaj})} + \text{LRVmA} \rightarrow \text{Transmisor}$$

Ajuste Sensor

$$\text{VmedT} = \text{Vmed} * C$$

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

Ajuste Corriente

$$\text{LRVmA} = \text{mAT} - \text{error}(\%) * 0.16$$

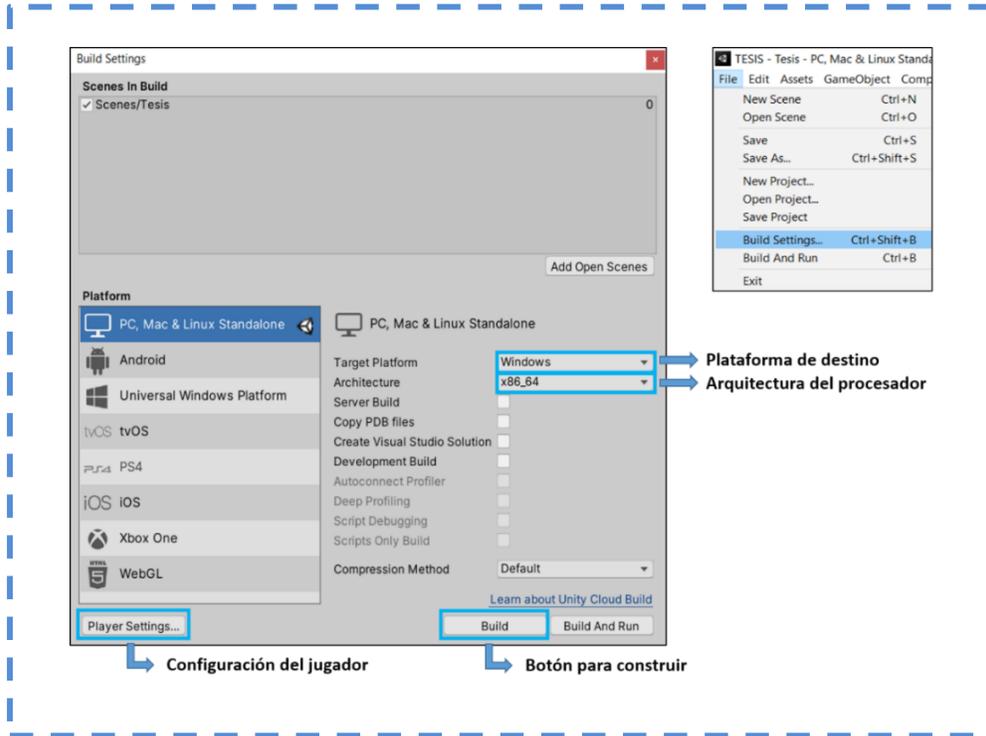
$$\text{URVmA} = \text{mAT} - \text{error}(\%) * 0.16$$

Donde:

- Vmed → Valor de la variable física medida (inH2O, psi, °C)
- C → Factor de corrección
- URVmA → Valor superior de rango en mA
- LRVmA → Valor inferior de rango en mA
- VmedT → Valor de la variable física que muestra el transmisor
- URVaj → Valor superior de rango ajustado
- LRVaj → Valor inferior de rango ajustado



CONSTRUCCIÓN DE LA APLICACIÓN



VIDEO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación 3D

4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

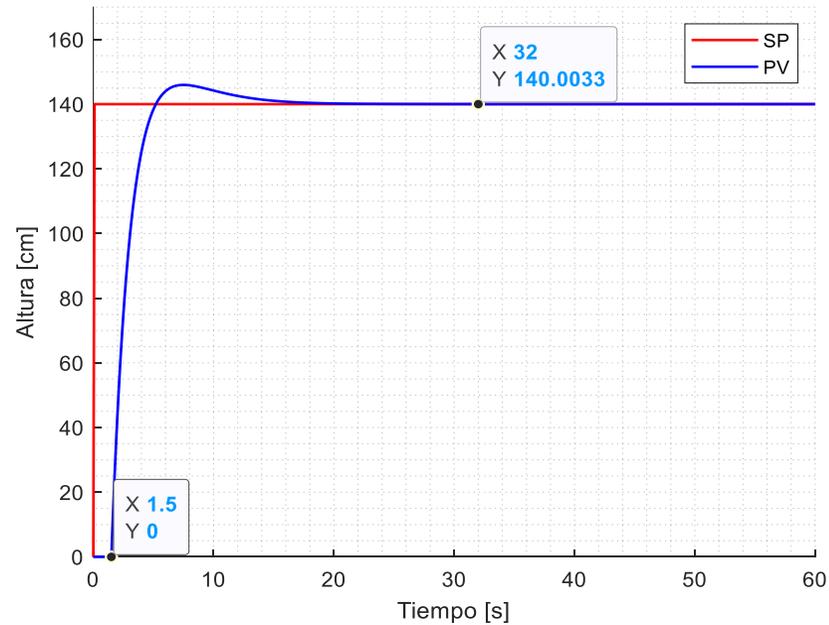
6 Conclusiones y recomendaciones



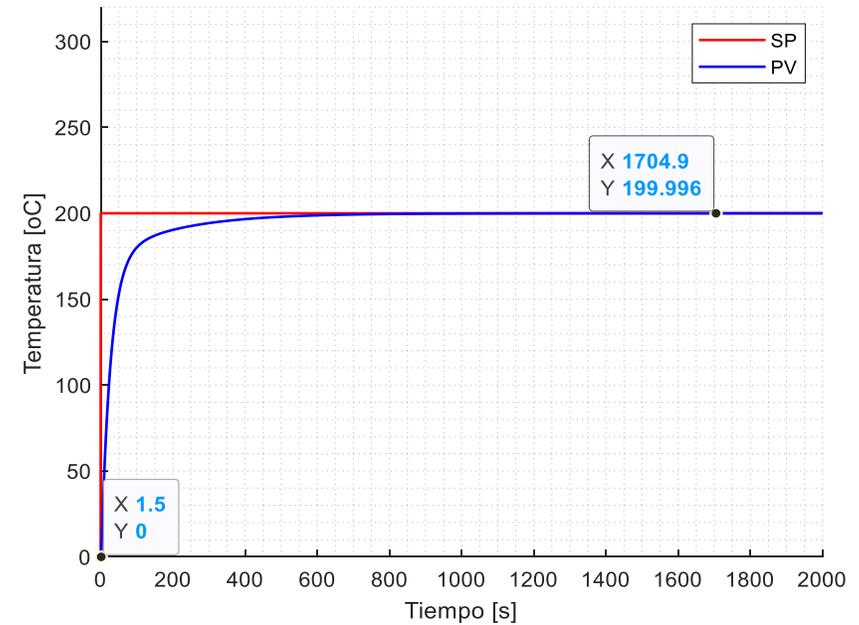
RESULTADOS

Control de los procesos dentro de la aplicación virtual

Nivel



Temperatura



RESULTADOS

Calibración del transmisor de presión absoluta

Usuario 1

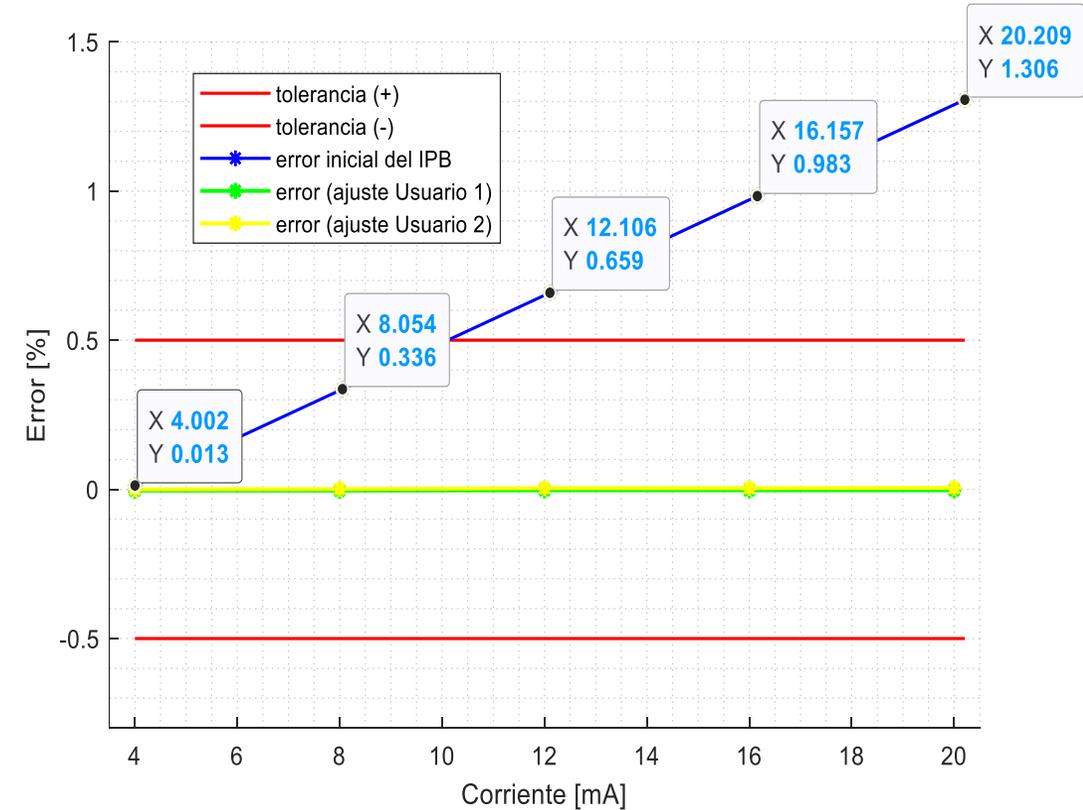
Usuario 2

Antes de ajustar

HART mA				Loop 24V	HART mA				Loop 24V
SOURCE		MEASURE	ERROR %		SOURCE		MEASURE	ERROR %	
0	psi	4,002	mA	0,013	0	psi	4,002	mA	0,012
75	psi	8,054	mA	0,336	75,004	psi	8,054	mA	0,336
150,001	psi	12,106	mA	0,659	150	psi	12,106	mA	0,659
225,001	psi	16,157	mA	0,983	225,005	psi	16,158	mA	0,983
300,001	psi	20,209	mA	1,306	300,001	psi	20,209	mA	1,306
225,001	psi	16,157	mA	0,983	225,003	psi	16,157	mA	0,983
149,999	psi	12,106	mA	0,66	150,001	psi	12,106	mA	0,659
74,999	psi	8,054	mA	0,336	76,004	psi	8,108	mA	0,34
0	psi	4,002	mA	0,013	0	psi	4,003	mA	0,019

Ajustado

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



RESULTADOS

Mediciones antes y después ajuste del transmisor de presión absoluta



➔ Antes de ajustar

➔ Ajuste (Usuario 1)

➔ Ajuste (Usuario 2)



RESULTADOS

Calibración del transmisor de presión diferencial

Usuario 1

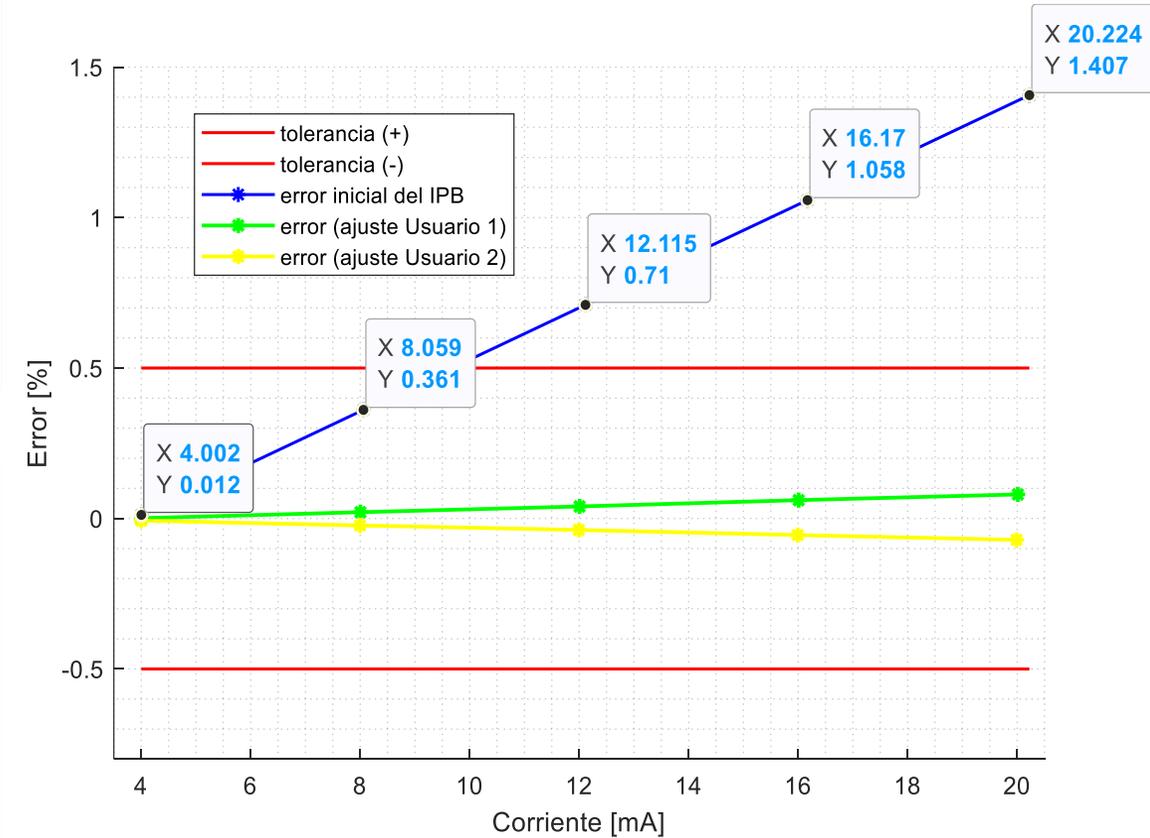
Usuario 2

Antes de ajustar

HART mA				Loop 24V	HART mA				Loop 24V
SOURCE	MEASURE		ERROR %		SOURCE	MEASURE		ERROR %	
0	inH2O	4,002	mA	0,012	0	inH2O	4,002	mA	0,012
17,505	inH2O	8,059	mA	0,361	17,499	inH2O	8,058	mA	0,364
35,004	inH2O	12,115	mA	0,71	35,003	inH2O	12,114	mA	0,71
52,503	inH2O	16,17	mA	1,058	52,494	inH2O	16,168	mA	1,058
69,995	inH2O	20,224	mA	1,407	70	inH2O	20,225	mA	1,406
52,499	inH2O	16,17	mA	1,062	52,499	inH2O	16,169	mA	1,058
35,005	inH2O	12,115	mA	0,71	35	inH2O	12,114	mA	0,71
17,504	inH2O	8,059	mA	0,362	17,501	inH2O	8,058	mA	0,361
0	inH2O	4,002	mA	0,015	0	inH2O	4,002	mA	0,013

Ajustado

HART mA				Loop 24V	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



RESULTADOS

Calibración del transmisor de presión diferencial (Cambio de rango)

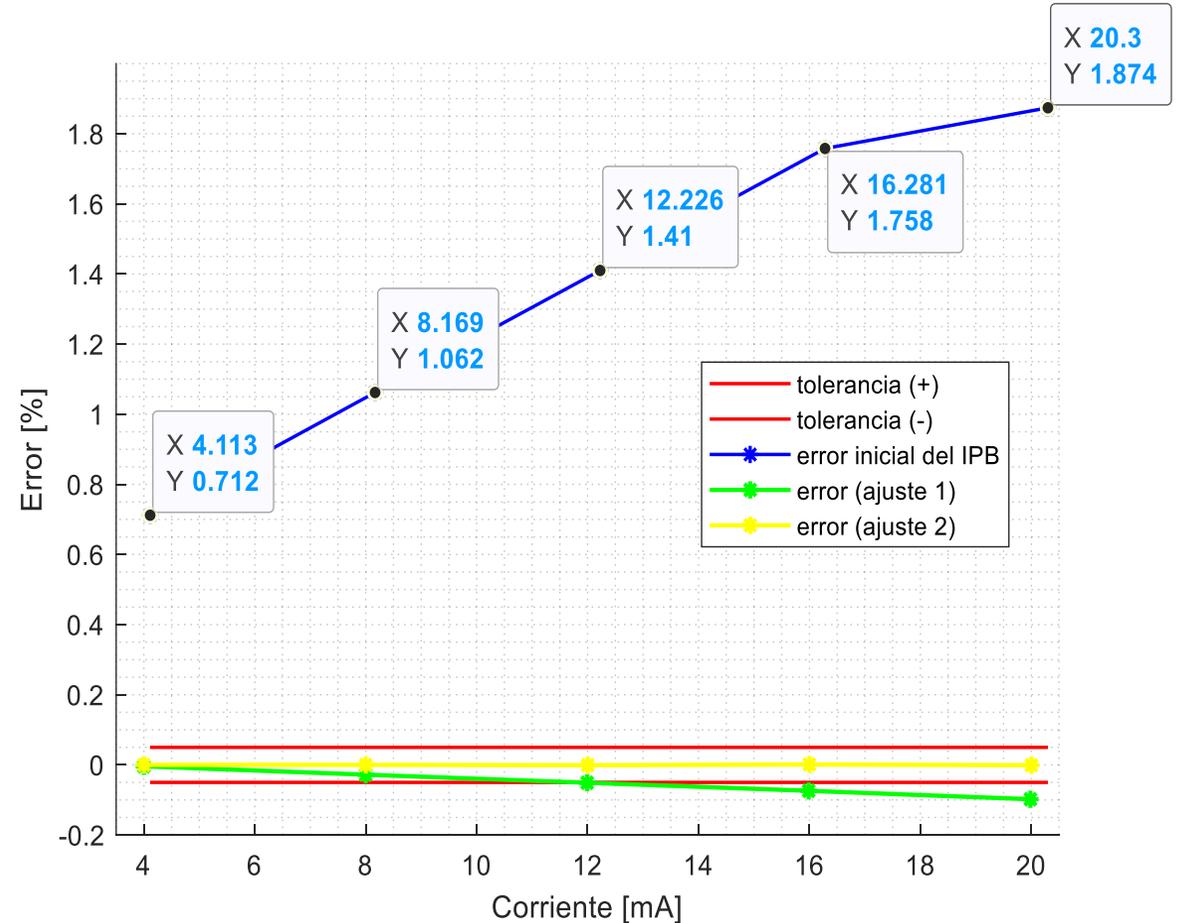
Antes de ajustar

HART mA				Loop 24V					
SOURCE	MEASURE	HART mA	Loop 24V	SOURCE	MEASURE	HART mA	Loop 24V		
			ERROR %				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

Primer ajuste

Segundo ajuste

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



RESULTADOS

Mediciones antes y después ajuste del transmisor de presión diferencial

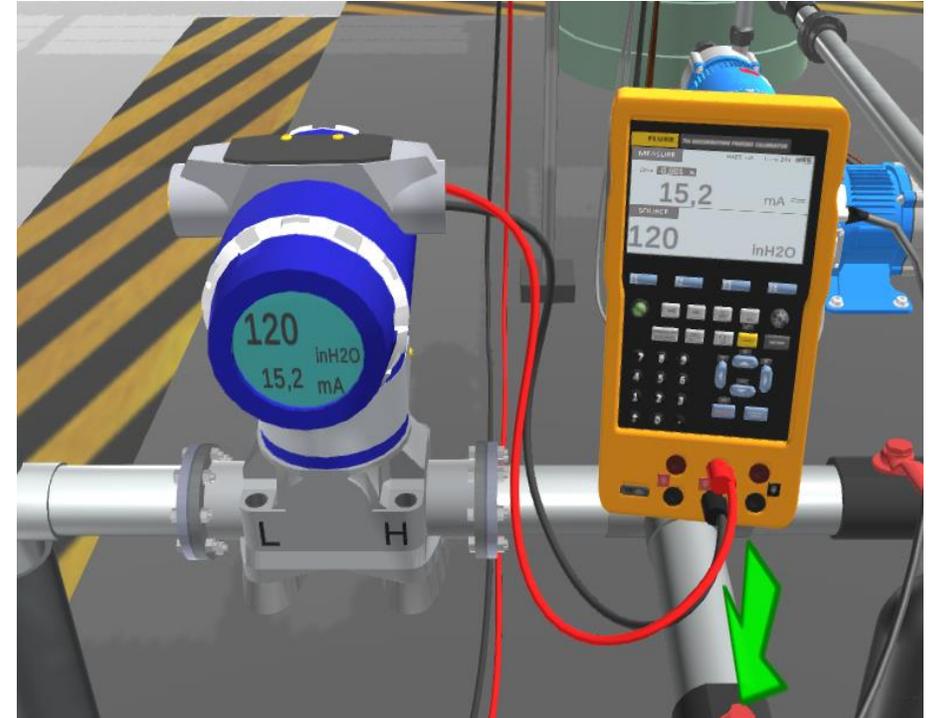
Antes de ajustar



Ajuste (Usuario 1)



Ajuste (Usuario 2)



RESULTADOS

Calibración del transmisor de temperatura

Antes de ajustar

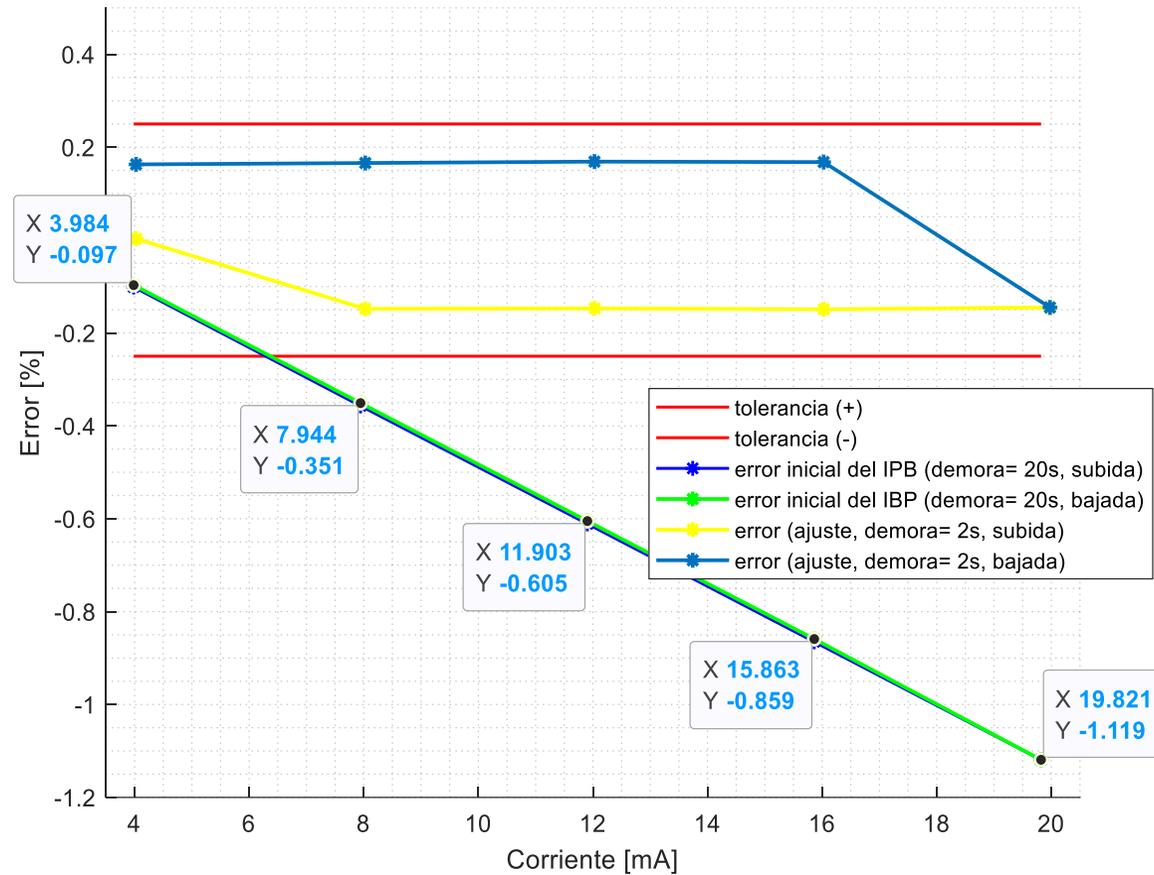
SOURCE		HART mA		Loop 24V	MEASURE	ERROR %
50	oC	3,984	mA			-0,101
162,5	oC	7,943	mA			-0,357
275	oC	11,902	mA			-0,611
387,5	oC	15,862	mA			-0,865
500	oC	19,821	mA			-1,119
387,5	oC	15,863	mA			-0,859
275	oC	11,903	mA			-0,605
162,5	oC	7,944	mA			-0,351
50	oC	3,984	mA			-0,097

Anular Página Anterior Página Próx. Terminado

Ajustado

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



RESULTADOS

Mediciones antes y después ajuste del transmisor de temperatura

Antes de ajustar



Ajustado



Agenda

1 Introducción

2 Implementación de la estación virtual

3 Procedimientos de calibración en la aplicación 3D

4 Procedimientos de ajuste en la aplicación 3D

5 Resultados

6 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.



CONCLUSIONES

- 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.



NUESTROS AGRADECIMIENTOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA