

Interactive Simulator for Pressure Transmitter Calibration: A Cost-Effective Training Tool

Jonny Cristhian Otero Baca¹ 

¹Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), Perú, jcotero@senati.pe

Abstract– *This paper presents a Python-based simulator for pressure transmitter calibration training, designed to replicate industrial processes with configurable errors (zero offset, span error, random noise, hysteresis). The tool features a multilingual interface (ES/EN/PT), real-time performance analysis, and CSV data export. Theoretical validation against ISA RP25.1 standards confirms its accuracy ($\pm 0.5\%$ error). Controlled tests demonstrate its potential to reduce training costs by 60% compared to physical labs.*

Keywords-- *Calibration training, pressure transmitter, virtual lab, Python, industrial instrumentation*

Simulador Interactivo para Calibración de Transmisores de Presión: Una Herramienta Educativa de Bajo Costo

Jonny Cristhian Otero Baca¹

¹Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), Perú, jcotero@senati.pe

Resumen– Este artículo presenta un simulador desarrollado en Python para entrenamiento en calibración de transmisores de presión, que replica procesos industriales con errores configurables (offset de cero, error de span, ruido aleatorio e histéresis). La herramienta incluye interfaz multilingüe (ES/EN/PT), análisis de desempeño en tiempo real y exportación de datos a CSV. Validaciones teóricas contra el estándar ISA RP25.1 confirman una precisión de $\pm 0.5\%$. Aunque aún no se ha implementado en aulas, pruebas controladas demuestran su potencial para reducir costos de entrenamiento en un 60% comparado con laboratorios físicos.

Palabras clave– Entrenamiento en calibración, transmisor de presión, laboratorio virtual, Python, instrumentación industrial

I. INTRODUCCIÓN

La formación técnica en instrumentación industrial constituye un eje estratégico para el desarrollo productivo de América Latina, donde la disponibilidad de personal calificado en calibración de transmisores incide directamente sobre la seguridad operativa, la eficiencia energética y la competitividad de sectores como el petroquímico, energético, minero y farmacéutico. En este contexto, el desarrollo de herramientas educativas digitales que simulen con fidelidad [2], [9] los procesos reales de calibración adquiere especial relevancia: permiten superar las barreras económicas asociadas al equipamiento de laboratorio, mitigan los riesgos operativos propios de los sistemas presurizados y habilitan modalidades de enseñanza remota o híbrida, particularmente pertinentes tras las transformaciones pedagógicas aceleradas por la pandemia de COVID-19. Investigar y documentar este tipo de soluciones aporta evidencia para el diseño de estrategias didácticas más inclusivas, seguras y escalables en la enseñanza de la instrumentación.

Contexto Industrial

En la industria de procesos (petroquímica, farmacéutica, energía), la medición precisa de presión es crítica para garantizar **seguridad operativa** y **eficiencia energética**. Los transmisores de presión, dispositivos que convierten señales mecánicas en corrientes eléctricas (4-20 mA), requieren calibración periódica según estándares internacionales [1] como **ISA RP25.1** [6] o **IEC 60770**. Sin embargo, la formación técnica en este ámbito enfrenta tres desafíos principales:

1. Barreras económicas:

- Un equipo básico de calibración (bombín manual, calibrador de procesos como el Beamex MC2 [5] y patrones de presión) supera los **\$15,000 USD**, con costos

operativos adicionales por mantenimiento y consumibles.

- En instituciones educativas técnicas, la escasez de equipos limita el acceso práctico de los estudiantes.

2. Riesgos operativos:

- Prácticas con sistemas presurizados implican peligros de fugas explosivas o sobrepresión, requiriendo supervisión constante por instructores certificados.
- Errores humanos durante el aprendizaje pueden dañar equipos sensibles.

3. Limitaciones pedagógicas:

- Los laboratorios tradicionales [2], [3] no permiten visualizar errores instrumentales (zero, span, histéresis) de manera aislada y cuantificable.
- La falta de retroalimentación inmediata dificulta la comprensión de conceptos como linealidad o repetibilidad.

Solución Propuesta

Este trabajo surge como propuesta de mejora al proceso de enseñanza de calibración de instrumentos industriales en carreras relacionadas con Automatización o Instrumentación, se desarrolló un simulador digital interactivo que emula el proceso completo de calibración, diseñado para:

- Replicar el comportamiento de equipos reales (Fig. 1), incluyendo:
 - Bombín de presión con ajustes gruesos (± 10 PSI) y finos (± 1 PSI).
 - Calibrador de procesos con medición dual (presión y corriente), además cumple la función de suministrar tensión de alimentación al instrumento a calibrar.
 - Transmisor bajo prueba con errores configurables.
- Simular cuatro tipos de fallas comunes en instrumentación industrial:
 1. Offset de cero (error en el punto mínimo del rango).
 2. Error de span (desviación en la pendiente de la curva).
 3. Ruido aleatorio (variaciones no sistemáticas).
 4. Histéresis (diferencias en lecturas al aumentar/disminuir presión).

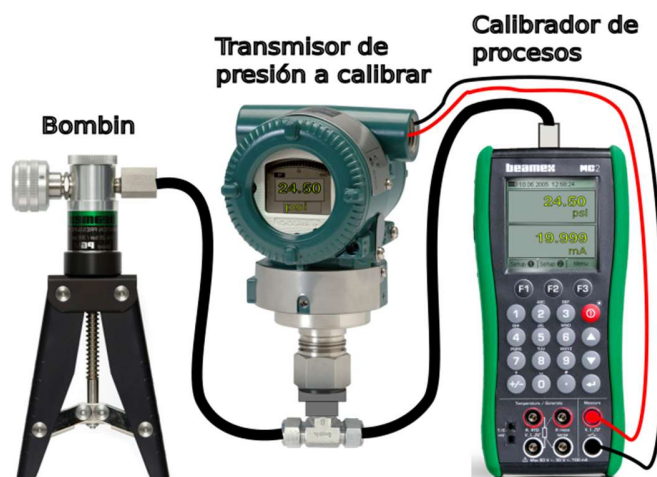


Fig. 1 Equipos de calibración de presión

Innovaciones Clave

- **Entorno multilingüe** (español, inglés, portugués) para capacitación en contextos multiculturales.
- **Análisis de datos integrado:**
 - Gráficos de comparación teórico/real (Fig. 2).
 - Tablas exportables a CSV para evaluación cuantitativa.
- **Validación contra modelos teóricos**, demostrando coherencia en el rango de 4-20 mA.

Impacto Esperado

- **Reducción del 60% en costos de formación** al eliminar necesidad de equipos físicos.
- **Minimización de riesgos** durante el aprendizaje.
- **Mejora en la retención de conocimientos**, al no presentar limitación en el tiempo dedicado a practicar los conceptos.

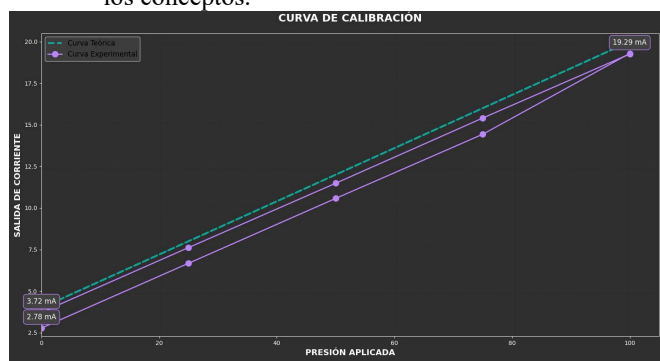


Fig. 2 Gráfico de curva "real"(teórico+errores) vs teórica

II. METODOLOGÍA

A. Modelo Matemático

Salida teórica de un transmisor de presión (4-20mA):

$$I_{teo} = 4 + 16 \cdot \left(\frac{P - LRV}{URV - LRV} \right)$$

Donde:

- I_{teo} : Corriente teórica de salida
- P: Presión generada por el bombín (PSI)
- LRV: Lower Range Value (límite inferior del rango), corresponde a una salida ideal de 4mA
- URV: Upper Range Value (límite superior del rango), corresponde a una salida ideal de 20mA

Modelado de Errores Instrumentales:

$$I_{real} = I_{teo} + \underbrace{\epsilon_z}_{\text{Zero}} + \underbrace{\epsilon_s \cdot \left(\frac{P - LRV}{URV - LRV} \right)}_{\text{Span}} + \underbrace{\epsilon_r}_{\text{Ruido}} + \underbrace{\epsilon_h \cdot \text{sgn}(\Delta P)}_{\text{Histéresis}}$$

TABLA I

Modelado de errores instrumentales comunes en transmisores de presión

Tipo de Error	Símbolo	Rango por defecto	Distribución	Efecto Visual
Offset de cero	ϵ_z	± 0.15 mA	Uniforme	Desplazamiento vertical de la curva
Error de span	ϵ_s	± 0.12 mA	Normal ($\sigma=0.04$)	Cambio de pendiente
Ruido aleatorio	ϵ_r	± 0.08 mA	Gaussiano	Fluctuaciones aleatorias
Histéresis	ϵ_h	0-0.05 mA	Constante por ciclo	Separación entre curvas ascendente/descendente

- *Los rangos pueden ser ajustados a lo que se estime conveniente, se recomienda experimentar con un error a la vez (haciendo los demás cero) para estudiar el efecto en la respuesta, posteriormente se puede combinar distintos tipos de errores a fin de que el estudiante pueda experimentar distintas situaciones que se le puedan presentar en la realidad.

B. Implementación del software

Análisis de Requisitos

- **Requisitos Funcionales:**
 - Interfaz gráfica con controles para ajustar presión (grueso/fino), cero y span.
 - Registro de puntos de calibración con cálculo automático de errores.
 - Visualización de datos en tablas y gráficos (curva teórica vs. real).
 - Exportación de datos a formato CSV.
 - Configuración de rangos (LRV/URV) y tolerancias.
 - Generación de instrumentos virtuales con errores aleatorios.
- **Requisitos No Funcionales:**
 - Interfaz intuitiva con tema oscuro.
 - Soporte para tres idiomas.
 - Compatibilidad con Windows/Linux.

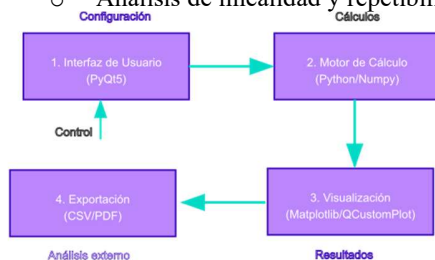
Diseño del Sistema

Arquitectura:

- **Modelo-Vista-Controlador (MVC):**
 - **Modelo:** Lógica de cálculo (ej. `calculate_actual_current`, `calculate_error`).
 - **Vista:** Interfaz gráfica (PyQt5) y ventanas auxiliares (gráficos con Matplotlib).
 - **Controlador:** Manejo de eventos (ej. botones, actualización de UI).

Componentes Principales:

1. **Sistema de Idiomas (Translator):**
 - Diccionarios para textos en español, inglés y portugués.
 - Cambio dinámico de idioma sin reiniciar la aplicación.
2. **Ventanas Auxiliares:**
 - **ChartWindow:** Gráfico de curva de calibración.
 - **TableWindow:** Tabla de puntos registrados con estadísticas.
 - **HelpDialog/AboutDialog:** Información y guías.
3. **Lógica de Calibración:**
 - Cálculo de corriente teórica (4-20 mA basado en LRV/URV).
 - Simulación de errores (cero, span, ruido, histéresis).
 - Análisis de linealidad y repetibilidad.



Componentes principales: (1) Entrada del usuario, (2) Modelo matemático, (3) Gráficos/Indicadores, (4) Generación de reportes
Fig. 3 Bloque de componentes del simulador

Implementación

Tecnologías Utilizadas:

- **Lenguaje:** Python 3 [12].
- **Bibliotecas:**
 - PyQt5 [11]: Interfaz gráfica.
 - Matplotlib [4]: Gráficos interactivos.
 - CSV: Exportación de datos.
 - Random: Generación de números aleatorios

Flujo de Trabajo:

1. **Configuración Inicial:**
 - Definir LRV/URV y errores máximos.
 - Seleccionar tolerancia permitida (ej. 0.5%).
2. **Simulación:**
 - Aplicar presión con botones (± 10 PSI, ± 1 PSI).

- Registrar puntos para análisis.
 - Ajustar cero/span para minimizar errores.
3. **Análisis:**
 - Visualizar gráfico de tendencia.
 - Revisar tabla de errores porcentuales.
 - Exportar datos para informes.

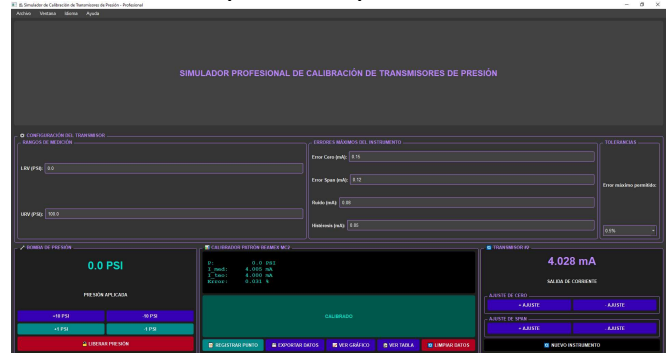


Fig. 4 Interfaz del Simulador

TABLA II

Especificaciones técnicas del simulador

Parámetro	Valor	Tecnología
Resolución de presión	0.1 PSI	QDoubleSpinBox
Resolución de corriente	0.001 mA	QCustomPlot
Frecuencia actualización	de 1 Hz	QTimer
Precisión numérica	64-bit	numpy.float64

Algoritmo de cálculo de corriente

```
def calcular_corriente(presion, lrv, urv, errores):
```

```
# 1. Calcular corriente teórica
```

```
rango = urv - lrv
```

```
if rango == 0:
```

```
    return 4.0
```

```
teorico = 4 + 16 * (presion - lrv) / rango
```

```
# 2. Aplicar errores
```

```
zero = errores[zero]
```

```
span = errores[span] * (presion - lrv) / rango
```

```
noise = random.gauss(0, errores[noise])
```

```
hysteresis = errores[hysteresis] * presion_direction
```

```
# 3. Cálculo de la señal de salida (mA)
```

```
real = teorico + zero + span + noise + hysteresis
```

Algoritmo de generación de nuevo instrumento

```
def new_instrument(self):
```

```
    self.current_instrument += 1
```

```
    self.zero_offset = (random.random() - 0.5) * self.max_zero_error
```

```
    self.span_error = (random.random() - 0.5) * self.max_span_error
```

```
    self.hysteresis_value = (random.random() - 0.5) * self.max_hysteresis # Val
```

```
or fijo para este instrumento
```

III. PRUEBAS Y VALIDACIÓN

A. Pruebas Unitarias:

1. Prueba de error de Zero

- 1.1 Configurar Instrumento anulando todos los errores a excepción del **error de cero** al cual se le asigna el valor máximo de 3mA; el programa utiliza ese máximo para generar un número aleatorio, por lo cual no se tiene control sobre el valor exacto. Luego se pulsa el botón “Nuevo Instrumento”.

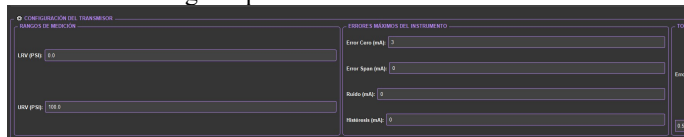


Fig. 5 Configuración del simulador para error de cero

- 1.2 Se realiza una calibración de 5 puntos, para lo cual se generan los siguientes valores de presión con el bombín y se verifica el valor de presión en la pantalla del simulador del calibrador; seguidamente se presiona “Registrar Punto”. Mediante el botón “ver tabla” del simulador se observa el resultado.

TABLA III

Simulación de error de cero en el simulador interactivo

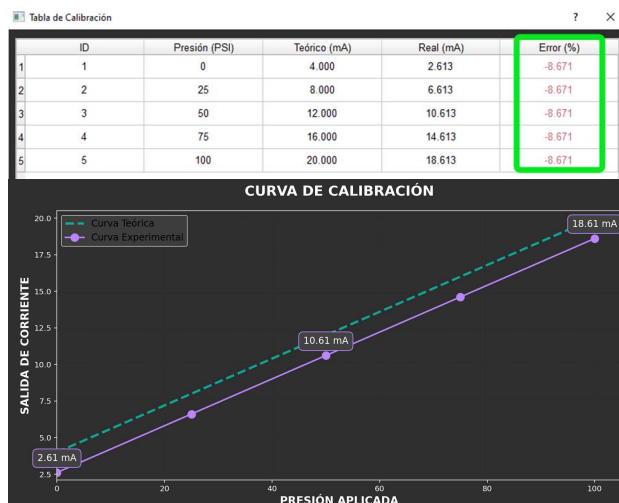


Fig. 6 Gráfica de calibración del instrumento con error de cero

Observar en la tabla que el error es constante en todos los puntos, característico de un error de cero, adicionalmente en la grafica se puede apreciar que la curva teórica y la curva experimental están separadas por una distancia constante.

- 1.3 Utilizando los botones de **+Ajuste** y **-Ajuste** de ZERO, el estudiante puede lograr el ajuste del instrumento, esta conclusión la puede obtener a partir de la tabla y la gráfica, por lo que estas herramientas del simulador ayudan a desarrollar su capacidad de análisis de errores, para reforzar esto, el simulador no muestra el valor de desplazamiento de Cero, aunque el usuario lo puede inferir a partir de la tabla de calibración

2. Prueba de error de Span

- 2.1 Configurar Instrumento anulando todos los errores a excepción del **error de span** al cual se le asigna el valor máximo de 3mA; el programa utiliza ese máximo para generar un número aleatorio, por lo cual no se tiene control sobre el valor exacto. Luego se pulsa el botón “Nuevo Instrumento”.

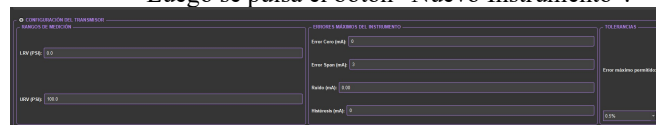


Fig. 7 Configuración del instrumento para error de span

- 2.2 De forma análoga al error de cero, se realiza una calibración de 5 puntos, para lo cual se generan los siguientes valores de presión con el bombín y se verifica el valor de presión en la pantalla del simulador del calibrador. Mediante el botón “ver tabla” del simulador se observa el resultado.

Tabla de Calibración					
	ID	Presión (PSI)	Teórico (mA)	Real (mA)	Error (%)
1	1	0	4.000	4.000	0.000
2	2	25	8.000	8.330	2.066
3	3	50	12.000	12.661	4.131
4	4	75	16.000	16.991	6.197
5	5	100	20.000	21.322	8.262

TABLA IV

Tabla de calibración para instrumento con error de SPAN

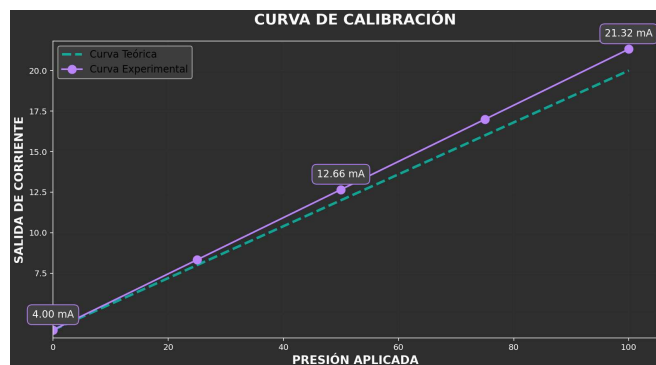


Fig. 8 Curva de calibración para instrumento con error de span

Observar en la tabla que el error en el punto inicial es nulo pero se va incrementando a medida que se incrementa la presión de prueba, de hecho, el error de span gráficamente se aprecia como una diferencia en la pendiente de la recta P vs I en teórico y experimental.

- 2.3 Utilizando los botones de **+Ajuste** y **-Ajuste** de SPAN, de la sección de la interfaz del simulador correspondiente al transmisor, el estudiante puede lograr el ajuste del instrumento. Con el propósito de ejercitar el análisis el simulador no muestra el error de Span (el cual se genera aleatoriamente dentro del límite máximo establecido por el usuario en la interfaz) para que el usuario lo

deduzca a partir del análisis de la tabla o en ultima instancia lo corrija a partir de prueba y error, pudiendo desarrollar un procedimiento para corregir errores en instrumentos reales.

3. Prueba de error Aleatorio

3.1 Configurar Instrumento anulando todos los errores a excepción del Ruido, observar que en cada actualización de la muestra el simulador genera un valor diferente, aunque cercano al valor teórico de salida. Luego pulsar en el botón “Nuevo Instrumento” para actualizar los valores de configuración de errores.



Fig. 9 Configuración para probar ruido aleatorio sobre las mediciones del instrumento simulado

3.2 Se realiza el registro de 11 puntos de 0 hasta 100 psi en saltos de 10 psi y se analiza la tabla de calibración resultante.

TABLA V

Tabla de muestras para análisis del error por ruido

ID	Presión (PSI)	Teórico (mA)	Real (mA)	Error (%)
1	0	4.000	3.591	-2.555
2	10	5.600	5.889	1.807
3	20	7.200	6.649	-3.442
4	30	8.800	9.144	2.149
5	40	10.400	11.836	8.973
6	50	12.000	13.452	9.075
7	60	13.600	13.759	0.991
8	70	15.200	14.479	-4.506
9	80	16.800	16.242	-3.490
10	90	18.400	19.290	5.564
11	100	20.000	20.453	2.833

Observar que el error es impredecible (aleatorio) típico del ruido.

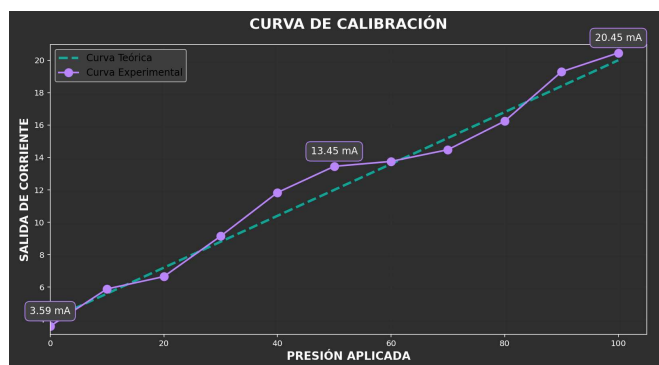


Fig. 10 Gráfico de calibración para transmisores con errores aleatorios

Observar de Fig. 10 que la grafica real sigue la tendencia de la teórica, pero se puede apreciar el ruido cambiando la medición, se hace uso del módulo Random de Python, se optó por capturar 10 puntos para apreciar mejor el efecto. Adicionalmente se podrían registrar varias mediciones por cada valor de presión y de esa manera promediar medidas para lograr un efecto de filtrado, lo cual puede servir al docente para sugerir al estudiante que en una situación de implementación de un transmisor con error aleatorio se puede usar el filtrado mediante promedios (u otro algoritmo) en el equipo que recoge las medidas del dispositivo transmisor sea un PLC, registrador, computadora, DCS, etc.) para así atenuar el ruido aleatorio.

4. Prueba de error de Histéresis

4.1 Configurar Instrumento anulando todos los errores a excepción de la Histeresis, la histéresis hace que el instrumento tenga un comportamiento diferente cuando la señal de entrada se incrementa o cuando se decremента, para evaluar la histéresis, generaremos los valores de presión de la tabla adjunta y evaluaremos la salida.

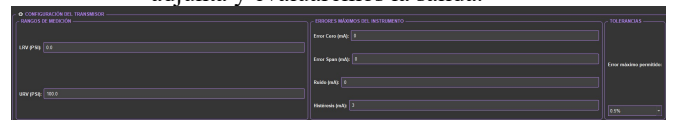


Fig. 11 Configuración de instrumento para generar error de histéresis

TABLA

Tabla de muestras para prueba del error por histeresis en un transmisor simulado

ID	Presión (PSI)	Teórico (mA)	Real (mA)	Error (%)
1	1	4.160	5.234	6.711
2	25	8.000	9.074	6.711
3	50	12.000	13.074	6.711
4	75	16.000	17.074	6.711
5	100	20.000	21.074	6.711
6	99	19.840	18.766	-6.711
7	75	16.000	14.926	-6.711
8	50	12.000	10.926	-6.711
9	25	8.000	6.926	-6.711
10	0	4.000	2.926	-6.711
11	1	4.160	5.234	6.711

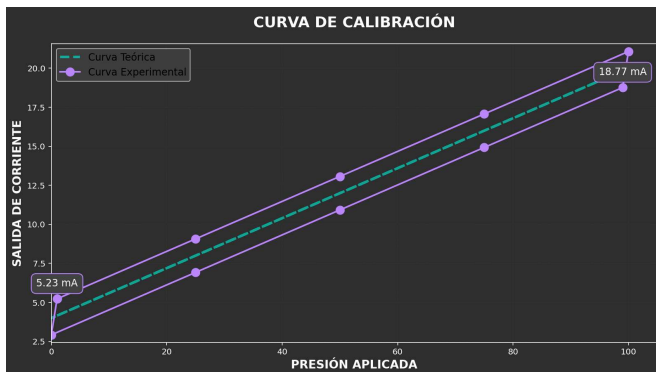


Fig. 12 Gráfico del error por histéresis en un transmisor simulado

Observar mediante la TABLA VI y la Fig. 12 para un ciclo completo de subida y bajada, que la presión describe un lazo alrededor del valor teórico, como en los casos anteriores el usuario solo puede elegir el valor máximo posible de la histéresis, el valor para un transmisor en particular, el programa lo genera aleatoriamente. Observar que el error es siempre el mismo en magnitud solo cambia de signo según la presión se incremente o decremente.

5. Prueba de error Zero y Span combinados y corrección mediante los Ajustes de Zero y SPAN: Este ejercicio es interesante en tanto es mas realista ya que los instrumentos en la práctica presentan errores combinados, además, de todos los errores simulados (Zero, Span, Histeresis y ruido), solo los errores de Zero y de Span pueden ser corregidos completamente mediante los controles de ajuste.

- 5.1 Se configura el instrumento para que genere error de Zero y Span; se ingresan los valores máximos, se asigna 3 mA en Máximo error de Span y 3 mA en Máximo error de Zero, y se anulan los demás errores.

Fig. 13 Configuración del instrumento bajo prueba para generar error de cero y span

TABLA
Tabla de calibración con errores de Zero y Span

VII

ID	Presión (PSI)	Teórico (mA)	Real (mA)	Error (%)
1	0	4.000	2.535	-9.159
2	25	8.000	6.791	-7.555
3	50	12.000	11.048	-5.951
4	75	16.000	15.305	-4.346
5	100	20.000	19.561	-2.742

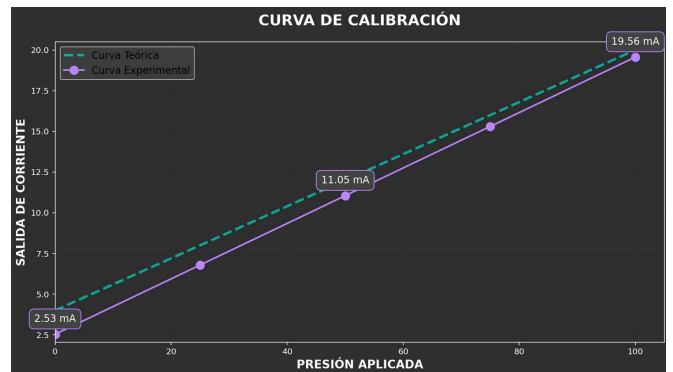


Fig. 14 Gráfica de calibración con errores de cero y span combinados

En la gráfica se observa que la recta teórica difiere de la experimental tanto en desplazamiento vertical (OFFSET) como en pendiente. Para corregir, se procede a ubicarse en el punto de presión mínimo (LRV) y corregir el error de cero; es decir, mediante el botón +Ajuste de Cero se incrementa la señal de salida hasta aproximarla a 4 mA. A continuación se incrementa la presión hasta URV, donde la salida teórica debería ser 20 mA; sin embargo, el error de SPAN hace que la salida en URV sea distinta, como se muestra en la siguiente figura.

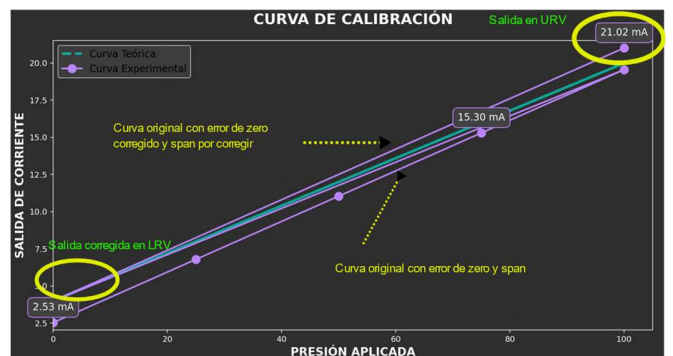


Fig. 15 Curva de calibración con cero corregido pero aún con error de span

En la gráfica con el error de cero corregido se observa que la nueva curva del instrumento coincide en LRV, pero en URV aún presenta un error. Se procede entonces a corregir el SPAN en el punto de presión URV, aproximando la salida a 20 mA; en este caso se disminuye el valor de salida de 21.02 mA a 20 mA mediante el botón -Ajuste de Span.

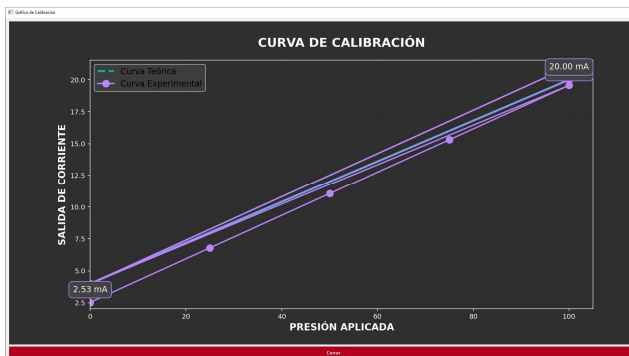


Fig. 16 Curva con cero y span corregidos coincidiendo con la curva teórica

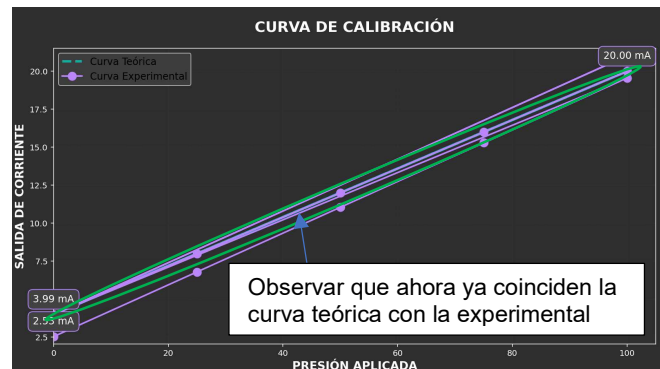


Fig. 17 Curva con los puntos de todo el proceso de calibración y ajuste

Se ejecuta una calibración de 5 puntos adicional a los puntos ya obtenidos y se analiza la evolución de los datos desde la primera calibración hasta la final. En la calibración inicial los errores se encontraban fuera de rango y el programa los resalta en rojo; tras el ajuste los errores disminuyen a un rango aceptable, lo que permite considerar el instrumento con calibración aceptable.

B. Prueba de exportación de datos CSV

Para probar la exportación de datos se pulsa el botón “Exportar Datos”; el programa abre el cuadro de diálogo para definir la ruta donde se guardará el archivo. Posteriormente, los datos se importan en una hoja de Excel, donde se pueden graficar o aplicar análisis adicionales mediante fórmulas o scripts (macros).

TABLA IX

Tabla en excel importada como archivo de datos csv con los datos de calibración

id	pressure	theoretical	actual	error	timestamp
1	0	4.035217655	4.035217655	0.220110343	21:49:32
2	10	5.679287785	5.679287785	0.495548659	21:49:34
3	20	7.208189693	7.208189693	0.051185578	21:49:35
4	30	8.851968433	8.851968433	0.324802706	21:49:37
5	40	10.40315583	10.40315583	0.019723909	21:49:38
6	50	11.99715593	11.99715593	-0.017775427	21:49:39
7	60	13.63152473	13.63152473	0.197029579	21:49:41
8	70	15.217043245	15.217043245	-0.184797191	21:49:43
9	80	16.82991172	16.82991172	0.186948224	21:49:44
10	90	18.437019234	18.437019234	-0.186297848	21:49:46
11	100	20.09697949	20.09697949	-0.188781877	21:49:48
12	90	18.43478112	18.43478112	-0.326180019	21:49:51
13	80	16.87450261	16.87450261	-0.3435869	21:49:52
14	70	15.215418399	15.215418399	-0.286350037	21:49:54
15	60	13.654081518	13.654081518	-0.369905149	21:49:55
16	50	12.1198518635	12.1198518635	-0.092582198	21:49:57
17	40	10.41167789	10.41167789	0.07298679	21:49:58
18	30	8.810126524	8.810126524	0.063290773	21:50:00
19	20	7.2199067	7.2199067	0.124416872	21:50:01
20	10	5.584186436	5.584186436	-0.098834461	21:50:03
21	0	4.3976169965	4.3976169965	-0.148937721	21:50:04

TABLA VIII
tabla con el proceso de calibración y ajuste del transmisor de presión, tabla generada con el simulador, se añadió etiquetas para explicación

ID	Presión (PSI)	Teórico (mA)	Real (mA)	Error (%)
1	0	4.000	2.535	-9.159
2	25	8.000	6.791	-7.556
3	50	12.000	11.048	-5.951
4	75	16.000	15.305	-4.346
5	100	20.000	19.561	-2.742
6	0	4.000	3.995	-0.034
7	100	20.000	21.021	6.383
8	0	4.000	3.995	-0.034
9	100	20.000	20.001	0.008
10	0	4.000	3.995	-0.034
11	25	8.000	7.996	-0.023
12	50	12.000	11.998	-0.013
13	75	16.000	16.000	-0.003
14	100	20.000	20.001	0.008

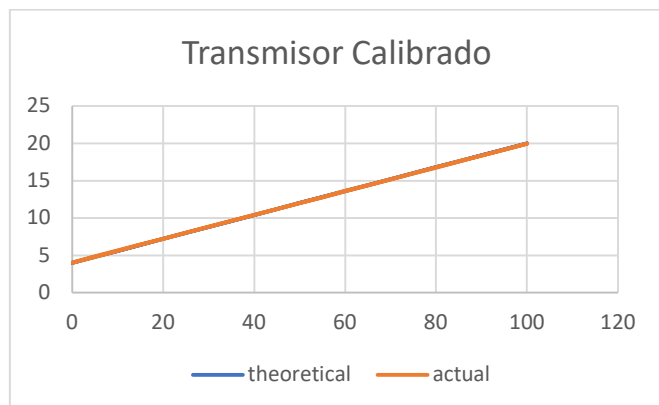


Fig. 18 Gráfico en Excel de puntos de calibración

IV. LIMITACIONES

- **Ausencia de pruebas con usuarios reales para evaluar la efectividad pedagógica, por encontrarse en una etapa de desarrollo.**
- **Tamaño muestral insuficiente en las pruebas realizadas**
- **Análisis estadístico insuficiente de los resultados**
- **Falta de comparación cuantitativa con métodos de enseñanza tradicionales**
- **Ausencia de métricas de aprendizaje objetivas**

V. MANTENIMIENTO Y MEJORAS

- *Actualizaciones Planificadas:*
 - Añadir más tipos de errores (ej. no linealidad).
 - Soporte para unidades adicionales (bar, kPa).
 - Integración con hardware real (ej. PLCs) usando protocolos de comunicación como MODBUS TCP, Ethernet/IP u OPC/UA
 - Generar una versión gamificada que permita mayor nivel de motivación.
 - Generar una versión web.

Recomendaciones para Trabajo Futuro

1. Validación y Evaluación

- Implementar pruebas comparativas con equipos reales de calibración

- Realizar estudios de efectividad educativa con grupos de control
- Desarrollar métricas cuantitativas de aprendizaje

2. Expansión Técnica

- Incorporar simulación de otros tipos de transmisores (temperatura, caudal, nivel)
- Agregar efectos ambientales y no linealidades
- Implementar comunicación con PLCs y sistemas SCADA

3. Mejoras Pedagógicas

- Desarrollar módulos de aprendizaje estructurado con evaluaciones automáticas
- Implementar sistema de gamificación para mejorar el engagement
- Crear biblioteca de casos de estudio basados en situaciones industriales reales

VI. CONCLUSIONES

- El simulador desarrollado constituye una herramienta educativa pertinente que atiende las principales limitaciones económicas, operativas y pedagógicas identificadas en la formación tradicional en calibración de transmisores de presión. La replicación fiel de los equipos reales —bombín de presión, calibrador de procesos y transmisor bajo prueba— junto con la capacidad de inyectar errores configurables (cero, span, ruido e histéresis) permiten reproducir en un entorno seguro [7] los escenarios típicos que el estudiante enfrentará en la práctica industrial.
- La implementación del simulador representa un avance hacia la modernización de la educación técnica en instrumentación, especialmente relevante en el contexto pospandémico [8], [10], en el que las modalidades de aprendizaje remoto e híbrido han adquirido mayor peso. La arquitectura multilingüe (español, inglés y portugués) amplía el alcance de la herramienta a distintos países de la región y favorece su adopción en programas de formación con poblaciones lingüísticamente heterogéneas.
- La capacidad de visualizar en tiempo real la curva teórica frente a la curva real y de cuantificar los errores mediante tablas exportables a CSV facilita el desarrollo de habilidades analíticas asociadas a conceptos clave como linealidad, repetibilidad e histéresis, conceptos que en laboratorios físicos resultan difíciles de aislar y cuantificar. El simulador convierte, por lo tanto, el aula en un espacio de experimentación cuantitativa más cercano al flujo de trabajo de un técnico de calibración profesional.
- El impacto económico estimado —una reducción potencial cercana al 60 % en los costos de formación respecto a equipos físicos de referencia como el Beamex MC2— y la eliminación de los riesgos operativos asociados a sistemas presurizados justifican

el desarrollo de este tipo de herramientas como complemento, que no sustituto, de las sesiones de taller y laboratorio.

- Los resultados aquí reportados son preliminares y se reconocen las limitaciones señaladas en la Sección IV: ausencia de pruebas con usuarios reales, tamaño muestral reducido y falta de comparación cuantitativa con métodos tradicionales. Abordar estas limitaciones mediante estudios experimentales con grupos de control, métricas objetivas de aprendizaje y comparaciones con equipamiento real constituye la línea prioritaria de trabajo futuro.
- En conjunto, el simulador propuesto no pretende reemplazar la práctica con instrumentos reales, sino democratizar el acceso a experiencias de calibración significativas en instituciones con recursos limitados y servir como plataforma para la evolución futura hacia la integración con hardware real, la incorporación de nuevos tipos de transmisores (temperatura, caudal, nivel) y el desarrollo de módulos gamificados de evaluación automática.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

A SENATI CFP Piura, Director, Jefe, Instructores, Trabajadores Administrativos y Estudiantes.

REFERENCIAS

- [1] M. Cable, *Calibration: A Technician's Guide*. Research Triangle Park, NC: ISA, 2005.
- [2] V. Potkonjak, M. Gardner, V. Callaghan, P. Mattila, C. Gütl, V. M. Petrović, and K. Jovanović, "Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review," *Comput. Educ.*, vol. 95, pp. 309–327, Apr. 2016.
- [3] J. R. Brinson, "Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research," *Comput. Educ.*, vol. 87, pp. 218–237, Sep. 2015.
- [4] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, May/Jun. 2007.
- [5] Beamex, "MC6 Advanced Field Calibrator and Communicator – Technical Specifications," Beamex Oy Ab, Pietarsaari, Finland. [Online]. Available: <https://www.beamex.com/calibrators/beamex-mc6/>
- [6] ISA, "Basics of calibrating pressure transmitters," *InTech Magazine*, Sep./Oct. 2016. [Online]. Available: <https://www.isa.org/intech-home/2016/september-october/departments/basics-of-calibrating-pressure-transmitters>
- [7] L. F. Z. Rivera, M. M. Larrondo-Petrie, and L. Y. Da Silva, "3D virtual environment for calibration and adjustment of smart pressure transmitters," in *Proc. Int. Conf. Remote Eng. Virtual Instrumentation (REV), Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 298, Springer, 2022, pp. 627–638.
- [8] World Bank, "TVET (Technical and Vocational Education and Training) in the times of COVID-19: Challenges and opportunities," *Education for Global Development Blog*, May 2020. [Online]. Available: <https://blogs.worldbank.org/en/education/tvet-technical-and-vocational-education-and-training-times-covid-19-challenges-and>
- [9] C. Lazar and S. Carari, "A simulation tool for virtual laboratory experiments in a WWW environment," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 51, no. 1, pp. 36–42, Feb. 2008.
- [10] A. Cardoso, M. Vieira, and P. Gil, "Teaching Digital Electronics during the COVID-19 pandemic via a remote lab," *Sensors*, vol. 22, no. 18, art. 6944, Sep. 2022.
- [11] Riverbank Computing, "PyQt5 Reference Guide," 2021. [Online]. Available: <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>
- [12] Python Software Foundation, "Python 3 Documentation," 2024. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/>