

## Identificación paramétrica y control de un sistema de evaluación de sensores de gases Parametric Identification and Control of a Gas Sensor Evaluation System

V. D. Ortega Guerrero <sup>a</sup>, R. Villafuerte-Segura  <sup>a,\*</sup>, A. M. Bolarín-Miró  <sup>b</sup>, K. F. Maya-Gress  <sup>b</sup>, F. Sánchez-De Jesús  <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42186, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

<sup>b</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42186, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

### Resumen

La detección de gases tóxicos es de suma importancia para salvaguardar la integridad física de los seres vivos. Los sensores de estado sólido son dispositivos capaces de detectar trazas de estos gases al modificar su resistencia eléctrica cuando se altera la composición química de la atmósfera que los rodea. Aquí, controlar la temperatura de forma eficaz a través de la resistencia eléctrica de los semiconductores es indispensable, para minimizar la incertidumbre y/o las perturbaciones externas y garantizar la confiabilidad de los resultados que arroja el sistema de detección de gases. En este trabajo, se presenta el diseño, la identificación paramétrica y el control de temperatura de un sistema de sensores de estado sólido. El sistema de sensores consta de una cámara hermética a la cual se le introduce un gas para cambiar las condiciones atmosféricas y una resistencia eléctrica como elemento calefactor para variar su temperatura. La adquisición de datos se realiza con una tarjeta de desarrollo de bajo costo (Arduino UNO). Además, se construyó una interfaz gráfica amigable con el usuario, empleando LabView, para manipular el sistema de detección propuesto. La identificación paramétrica coadyuva a la obtención de un modelo matemático de dicho sistema, visto como un sistema térmico. Este modelo, favorece el diseño y la sintonización de un controlador PID que garantiza el establecimiento de la temperatura en un rango de 30 a 150 °C, incluso ante perturbaciones externas. Finalmente, los resultados experimentales muestran que la temperatura de la cámara interna del sistema de detección de gases converge a una temperatura deseada con un error absoluto de ±0.5°C. Por lo que nuestra propuesta es una sugerente alternativa al uso de sistemas de laboratorio similares y comerciales, que evita la dependencia tecnológica y reducir significativamente los costos de adquisición y mantenimiento del equipo.

*Palabras Clave:* Sistema de evaluación, sensores de gases, controlador PID, sistema térmico.

### Abstract

The detection of toxic gases is of paramount importance for safeguarding the physical integrity of living beings. Solid-state sensors are devices capable of detecting traces of these gases by modifying their electrical resistance when the chemical composition of the surrounding atmosphere changes. Here, effectively controlling the temperature and its effect on the electrical resistance of the semiconductors is essential to minimize uncertainty and/or external disturbances and ensure the reliability of the results produced by the gas detection system. This paper presents the design, parametric identification, and temperature control of a solid-state sensor system. The sensor system consists of a hermetically sealed chamber into which a gas is introduced to alter the atmospheric conditions, and an electrical resistor as a heating element to vary its temperature. Data acquisition is performed using a low-cost development board (Arduino UNO). Furthermore, a user-friendly graphical interface was developed using LabVIEW to manipulate the proposed detection system. Parametric identification helps in obtaining a mathematical model of the system, viewed as a thermal system. This model facilitates the design and tuning of a PID controller that ensures the temperature is maintained within a range of 30 to 150 °C, even in the face of external disturbances. Finally, the experimental results show that the temperature of the internal chamber of the gas detection system converges to a desired temperature with an absolute error of ±0.5°C. Therefore, our proposal is a compelling alternative to the use of similar commercial laboratory systems, avoiding technological dependence and significantly reducing equipment acquisition and maintenance costs.

*Keywords:* Evaluation system, gas sensors, PID controller, thermal system.

## 1. Introducción

Los gases son ampliamente utilizados en sectores como la electrónica, la industria alimentaria o la farmacéutica; debido

a que desempeñan un papel fundamental en múltiples procesos. No obstante, estos gases pueden ser peligrosos, ya que en altas concentraciones pueden provocar explosiones en ambientes cerrados (Jualayba, 2018), y/o puede desplazar al

\*Autor para la correspondencia:

Correo electrónico: or403343@uaeh.edu.mx (Víctor David Ortega-Guerrero), villafruerte@uaeh.edu.mx (Raúl Villafuerte-Segura), abolarin@uaeh.edu.mx (Ana María Bolarín-Miró), kndrgma@gmail.com (Kristian Freyri Maya-Gress), fsanchez@uaeh.edu.mx (Félix Sánchez-De Jesús).

**Historial del manuscrito:** recibido el 22/09/2025, última versión-revisada recibida el 31/10/2025, aceptado el 03/11/2025, publicado el 12/12/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.16103>



oxígeno y provocar efectos nocivos para la salud (Rashid, 2024).

Lo anterior es solo una pequeña muestra de la importancia de la fabricación de sensores de gases más eficientes para la detección y medición de un gas en específico. En este contexto, existen diferentes métodos para el monitoreo de gases, algunos varían ciertos parámetros, como los basados en métodos ópticos con su principio de funcionamiento en la espectroscopía de absorción y emisión; los basados en métodos calorimétricos como los sensores de tipo pellistor; o los basados en la cromatografía de gases. Sin embargo, a pesar de que estos puedan tener una muy alta sensibilidad y estabilidad, presentan numerosas desventajas, entre las que destacan la dificultad para su miniaturización y su alto costo; no obstante, existen otros tipos de sensores los cuales basan su capacidad para detección de gas en la variación de propiedades eléctricas, entre estos se encuentran los sensores de semiconductores de óxidos metálicos (MOX), los cuales cuentan con una alta sensibilidad y versatilidad; mientras que su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia eléctrica cuando los gases interactúan con la superficie del material (Liu, 2012). Estos sensores cuentan con amplias ventajas, como su portabilidad, alta sensibilidad, larga vida útil, estabilidad operativa y bajo costo de fabricación. Sin embargo, presentan algunos retos para optimizar su funcionamiento como la selectividad limitada, ya que muchos óxidos reaccionan con múltiples gases o su alta temperatura de operación, elevando su coste energético (Liu, 2012). Por lo que es de suma importancia el investigar formas para reducir estas desventajas intrínsecas en los actuales materiales. Algunos esfuerzos se centran en desarrollar nuevas tecnologías como los "Sensirion Gas Platform (SGP)" los cuales ofrecen una alta estabilidad, integración digital y resistencia a contaminantes como el siloxano (Rüffer, 2018). Otra alternativa es la investigación de diferentes materiales, los cuales tengan una mejor respuesta a gases específicos en temperaturas de operación inferiores, por ejemplo, los sensores de gas resistivos basados en nanoláminas de óxido de zinc ZnO, estos se caracterizan por una excelente sensibilidad al dióxido de Carbono CO<sub>2</sub> y una velocidad de respuesta rápida. Sin embargo, este sensor tiene un alto coste energético ya que la temperatura de operación del mismo está en los 250°C (Kanaparthi & Singh, 2019).

Para lo anterior, se requiere de sistemas eficaces los cuales tengan la capacidad de analizar las propiedades de interés de diferentes materiales para la fabricación de sensores de gases. Algunos sistemas que se encuentran actualmente en el mercado, son de coste elevado e incentivan una dependencia tecnológica del mercado extranjero. Una alternativa a la adquisición de estos equipos comerciales y esenciales para la fabricación e investigación de los sensores de gases, son el diseño y la puesta en marcha de equipos propios. En la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo se fabricó uno de estos sistemas capaz de brindarnos una lectura precisa de la variación resistiva del material analizado en presencia de una atmósfera controlada, no obstante, el control de la temperatura de este sistema es deficiente y presenta una variación de ± 5°C con un sobre impulso excesivo, que, por la naturaleza del sistema, tarda demasiado en volver al punto de referencia por la respuesta de enfriamiento lenta del sistema (Bolarín M. A.,

2024), por lo que es necesario la implementación de sistemas de control de temperatura más precisos. Para abordar este desafío de control, es útil revisar la evolución de la teoría y su aplicación en procesos térmicos.

El control de temperatura es uno de los procesos industriales más fundamentales para garantizar calidad, seguridad y eficiencia en la producción de bienes y servicios. Desde los primeros experimentos en retroalimentación hasta los sistemas modernos basados en algoritmos avanzados, su evolución refleja la necesidad de adaptar la teoría del control a entornos industriales cada vez más complejos.

En muchas aplicaciones prácticas, el diseñador se enfrenta a sistemas cuyo modelo matemático no está disponible o es difícil de obtener. En este escenario, tradicionalmente se ha trabajado de manera cualitativa, proponiendo controladores basados en la experiencia del operador o en el conocimiento empírico de la planta. La sintonización se realiza a prueba y error, lo cual suele ser un proceso exhaustivo, costoso y complejo, especialmente en plantas no triviales y con dinámicas lentas, donde la adquisición de datos experimentales requiere múltiples iteraciones (Bennett, 1993).

La historia del control de temperatura se remonta al siglo XVII, cuando Cornelius Drebbel diseñó uno de los primeros sistemas de retroalimentación para mantener la temperatura de un horno, constituyendo un antecedente de los sistemas automáticos (García de Marina Bayo, 2009). Posteriormente, en el siglo XX, surgieron los controladores proporcionales (P), integrales (I) y proporcionales-integrales-derivativos (PID). Estos controladores, junto con los métodos de sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon, se convirtieron en estándares industriales para procesos térmicos, dada su simplicidad de implementación y aceptable desempeño en sistemas lineales (Cohen, 1953). De 1970 a 1980, el uso de controladores neumáticos y electrónicos permitió consolidar la aplicación del PID en industrias de combustión, petroquímicas y de generación de energía (Prett, 2013).

A pesar de estas ventajas, los controladores PID presentan limitaciones importantes cuando se aplican en procesos con tiempos muertos (retardos temporales), no linealidades o restricciones físicas; fenómenos comunes en hornos industriales, sistemas HVAC (siglas del inglés Heating, Ventilation and Air Conditioning), procesos químicos y cámaras de crecimiento cristalino (Åström, (1995)). La búsqueda de métodos más robustos llevó de 1980 a 1990 al desarrollo de controladores basados en teoría óptima, como el Regulador Cuadrático Lineal (LQR, Linear Quadratic Regulator en inglés), que permite diseñar leyes de control óptimas minimizando un criterio de desempeño (Doyle, 2003). En paralelo, se desarrolló la teoría de funciones de Lyapunov y funciones de control-Lyapunov (CLF, Control-Lyapunov Function en inglés), que garantizan estabilidad en sistemas no lineales y sentaron las bases para el diseño de controladores robustos con propiedades de estabilidad formalmente probadas (Sontag, 1989).

A partir de la década de 1990, el Control Predictivo Basado en Modelo (MPC, Model Predictive Control en inglés) comenzó a ganar protagonismo en procesos con múltiples variables y restricciones. Su capacidad para anticipar el comportamiento futuro del sistema, manejar retardos y considerar limitaciones de actuadores lo convirtió en una técnica fundamental en sectores como el químico, el farmacéutico y el energético (Rawlings, 2009). En comparación con PID, MPC ofrece un desempeño superior en procesos multivariables, aunque a costa de mayor complejidad computacional.

En paralelo, se exploraron otras estrategias de control, como la implementación de algoritmos evolutivos en controladores industriales. Un ejemplo temprano fue la incorporación de algoritmos genéticos en PLCs (siglas del inglés programmable logic controller) para optimizar parámetros de controladores, lo que permitió una mejora significativa en la adaptación de los sistemas industriales (Dadone & VanLandingham, 1998). Los PLC, gracias a su flexibilidad en programación, lógica y comunicación, se consolidaron como herramientas centrales en el control de temperatura, aunque en muchas aplicaciones industriales aún predominan estrategias simples como el control ON-OFF (Amosun & Adedeji, 2023). Más recientemente, los PLC se han integrado con sistemas SCADA (siglas del inglés Supervisory Control and Data Acquisition) y dispositivos PID industriales dentro de arquitecturas distribuidas, lo que permite monitoreo y control centralizado de procesos de mayor escala (Thepmanee, Pongswatt, Asadi, & Uakimaparn, 2022).

El interés en mejorar el PID continúa vigente, se han propuesto modificaciones para mejorar su robustez frente a perturbaciones y no linealidades (Blevins, 2012), además de integraciones con técnicas avanzadas. Por ejemplo, se han diseñado controladores sub-óptimos no lineales basados en enfoques de programación dinámica y teoría de Lyapunov, con el fin de extender la simplicidad del LQR al caso no lineal (Ordaz-Oliver & Santos-Sánchez, 2023). Asimismo, se han incorporado técnicas de inteligencia artificial y lógica difusa para el control de temperatura en sistemas con alta variabilidad. En este sentido, el control difuso ha demostrado ser eficaz en sistemas térmicos no lineales, donde la linealización convencional resulta insuficiente (ASinghala, 2014).

La investigación reciente también ha mostrado avances en la aplicación de métodos modernos en sistemas de refrigeración. Por ejemplo, en sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) de compresión de vapor, se ha empleado el control con modelo interno (IMC-Internal Model Control) para mejorar la regulación de temperatura (Shukla & Mishra, 2018). De manera complementaria, se han introducido enfoques basados en optimización bayesiana contextual para la sintonización automática de parámetros PID en sistemas HVAC, logrando reducir costos energéticos hasta en un 32% sin comprometer el confort de los usuarios (Fiducioso, (2019)).

En procesos más especializados, como la sinterización asistida por plasma, se ha implementado control PID considerando explícitamente la inercia térmica y los retardos inherentes al proceso, alcanzando una precisión en la regulación de  $\pm 4$  K

(Manière, (2017)). Finalmente, investigaciones recientes han explorado esquemas híbridos como la integración de PID con LQR optimizado en sistemas de refrigeración, mostrando un mejor balance entre robustez, estabilidad y capacidad de seguimiento ante variaciones en el setpoint (valor deseado) (Ekengwu, (2024)).

En conjunto, estos avances evidencian que, aunque el PID sigue siendo el algoritmo dominante en la industria, la evolución hacia enfoques híbridos y predictivos es cada vez más relevante. El control de temperatura ha transitado de métodos empíricos y heurísticos a técnicas robustas y predictivas apoyadas en teoría matemática y optimización, con una tendencia clara hacia la integración de inteligencia artificial y control avanzado en plataformas industriales modernas.

El presente trabajo de investigación describe la identificación paramétrica de un sistema de evaluación de sensores de gases utilizando técnicas clásicas, con el fin de proponer un modelo matemático el cual servirá para el diseño y la sintonización de una ley de control para regular la temperatura de dicho sistema en un rango de 30 a 150 °C, ante perturbaciones externas. Además, se propone el diseño de una interfaz amigable con el usuario mediante LabView para el monitoreo del sistema.

Lo que resta del manuscrito está constituido de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la descripción del sistema de evaluación de gases, así como todo el sistema para la adquisición y procesamiento de datos. En la Sección 3 se muestra el modelo matemático propuesto que emula la plataforma de evaluación de gases, mientras que en la Sección 4 se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos. Las conclusiones de este trabajo de investigación se pueden leer en la Sección 5, seguida por las referencias. Por último, se muestra un apéndice donde se describen los algoritmos desarrollados en LabView.

## 2. Sistema de evaluación de sensores de gases

A continuación, se presenta una descripción general del sistema/plataforma propuesta para la evaluación de sensores de gases, del cual se muestra una macrofoto en la Figura 1.

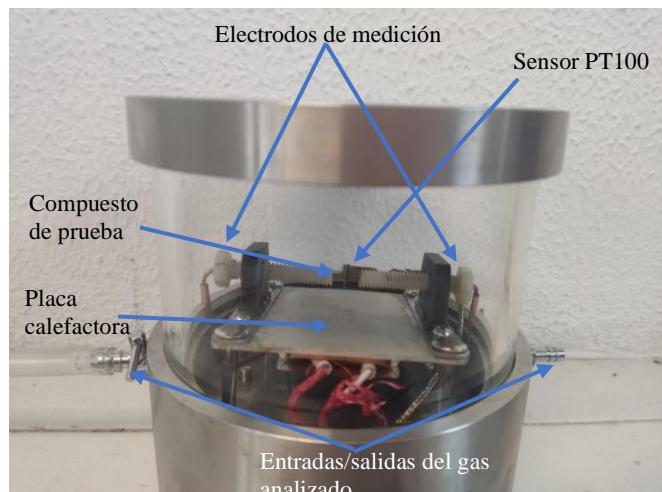


Figura 1. Cámara de evaluación de sensores de gases.

## 2.1 Descripción de la plataforma

Tal como se aprecia en la Figura 1, el sistema de evaluación de sensores de gases propuesto es una cámara construida con cuarzo y herméticamente sellada, la cual cuenta con 2 electrodos encargados de sostener la pastilla del material y a su vez permitir la medición de la resistencia del material, también cuenta con dos orificios laterales (entrada/salida); por el primero se ingresa el gas que proporcionará la atmósfera deseada para el estudio, mientras que el segundo se emplea para generar el vacío dentro de la cámara apoyada de una bomba de vacío. Para la medición de la temperatura se empleó un sensor tipo PT100 ubicado lo más cerca posible de la pastilla del material a estudiar, con el objetivo de tener una medición de temperatura más precisa y exacta; para la variación de esta temperatura se empleará una placa calefactora en el fondo de la cámara.

## 2.2 Adquisición y procesamiento de datos

Para la adquisición de datos se emplearon un conjunto de equipos con tareas específicas, mostrado en la Figura 2. El primero de ellos es un miliohmímetro, marca GW Instek modelo GOM 804, responsable de la adquisición de los datos experimentales, por lo que los electrodos se conectaron a cada uno de los extremos o caras del material que actúa como sensor, y por lo tanto, toma mediciones de los cambios en la resistencia eléctrica del material, a través de sus puntas de medición. El segundo sistema es el sensor de temperatura PT100, que toma medidas de temperatura y envía los datos a través de comunicación serial a la computadora con el programa de LabView, la cual es la encargada de la interpretación y procesamiento de los mismos. Adicionalmente, envía la señal de control a la tarjeta Arduino UNO y la etapa de potencia compuesta por el relevador de estado sólido, estas son las encargadas de activar y desactivar la planta, la cual varía la temperatura y cierra a su vez el sistema.

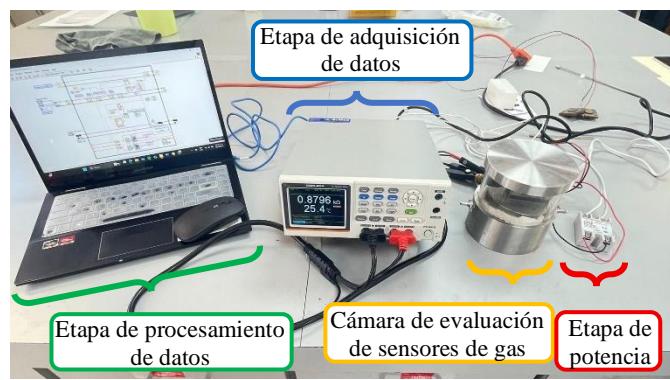


Figura 2. Sistema de evaluación de sensores de gases.

### 2.2.1 Sensor de temperatura

Para el monitoreo y la lectura de la temperatura, dentro de la cámara de análisis de materiales expuestos a diferentes gases, se implementó un sensor PT100. Este dispositivo es adecuado para la cámara de gases, dado que su rango de operación abarca desde -50 °C hasta 250 °C, cubriendo el

intervalo operativo de temperatura de la cámara, el cual se encuentra entre 50°C y 120°C (Genebre, S. A., 2025).

### 2.2.2 Lectura de la temperatura

La interpretación del sensor PT100 y su posterior conversión de la resistencia a una lectura de temperatura se gestionó a través de un miliohmímetro de alta precisión. Una ventaja significativa de este instrumento es su capacidad para efectuar mediciones duales: no únicamente puede determinar con exactitud la temperatura de la cámara interpretando la variación de resistencia del sensor PT100 conectado, sino que también está diseñado para realizar mediciones directas de la resistencia eléctrica del material que se encuentra bajo análisis en el interior de la cámara. Esta doble funcionalidad se habilita mediante la configuración del miliohmímetro. En particular, para obtener la lectura de temperatura, se activa la función específica para termometría, a través del botón *TEMP*, y se conecta el sensor PT100. Es crucial destacar que, para garantizar la máxima exactitud en la lectura de temperatura, el sensor PT100 empleado debe ser de tres terminales. Esta configuración de tres hilos es fundamental ya que permite implementar una compensación efectiva de la resistencia inherente a los cables de conexión del sensor (Good Will Instrument Co., Ltd., 2025), minimizando el error en la medición.

### 2.2.3 Comunicación entre el miliohmímetro y la computadora.

Para lograr la adquisición y registro automatizado de datos provenientes del miliohmímetro en alguna base de datos, es fundamental establecer una conexión directa y fiable con el instrumento. Esto es viable debido a que el miliohmímetro posee una funcionalidad específica diseñada para la transmisión de datos a través de su puerto USB integrado. La configuración para habilitar esta interfaz del miliohmímetro es la siguiente: se debe navegar a través del menú principal, seleccionando primero la opción "System", luego accediendo al submenú "Utilities", y finalmente eligiendo la configuración "USB". Dentro de esta última opción, la selección clave es "+RX +TX", la cual habilita explícitamente las líneas de recepción (RX) y transmisión (TX) de datos seriales a través de la interfaz USB del dispositivo.

Al aplicar esta configuración, el miliohmímetro queda preparado para establecer una comunicación de tipo serial con una computadora a través del cable USB, siempre y cuando la computadora cuente con el controlador específico para el equipo específico empleado. Una vez establecida esta comunicación, se pueden enviar comandos específicos desde la computadora al miliohmímetro para solicitar datos; por ejemplo, utilizando el comando "READ?" para obtener la lectura de resistencia actual, o el comando "TEMP:DATA?" para consultar los datos de temperatura. Mediante el envío de estos comandos y la recepción de las respuestas correspondientes a través de la comunicación serial, se establece un canal bidireccional efectivo entre el miliohmímetro y la PC. Esto permite la lectura de datos en tiempo real y facilita su eficiente almacenamiento directo en una base de datos, estableciendo las bases para su posterior procesamiento,

análisis estadístico o visualización detallada (Good Will Instrument Co., Ltd., 2025).

### 3. Modelo Matemático

En esta sección se proponen dos métodos para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico del sistema: 1) método de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010), 2) método de identificación paramétrica (Nise, 2019).

#### 3.1 Método de Ziegler-Nichols

Para la aplicación del algoritmo de Ziegler-Nichols (Z-N) se necesita obtener la respuesta de la planta a una entrada escalón (se obtiene de manera experimental), este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Si lo anterior ocurre, entonces se puede suponer que la función de transferencia de la planta en cuestión es de la siguiente forma

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

donde los parámetros  $Ls$  y  $Ts$  son el tiempo de retardo y la constante de tiempo, respectivamente (Meshram & Kanajiya, 2012). Además, estos parámetros se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea de la referencia o su valor estacionario. Así, los valores de los parámetros obtenido son empleados para sintonizar una ley de control, como se describe en la Tabla 1, donde  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$  son las ganancias proporcional, integral y derivativo, respectivamente, de un control PID en cascada, ver (Ogata, 2010).

Tabla 1. Regla de sintonía de Z-N basada en la respuesta escalón de la planta (para un sistema de primer orden).

<i>Tipo de controlador</i>	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

A continuación, se emplea el método de Z-N para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de la planta, la cual servirá como base para el diseño y la sintonización de una ley de control.

Como ya se mencionó anteriormente, la planta a controlar corresponde a un sistema térmico compuesto por una placa calefactora, por lo tanto, cuando se le aplica una entrada escalón, con la máxima potencia que podrá disipar la planta (en este caso serán 120 V en corriente alterna), se observa una respuesta en forma de S, tal como se aprecia en la Figura 3, por lo cual, se le puede aplicar el método de Z-N.

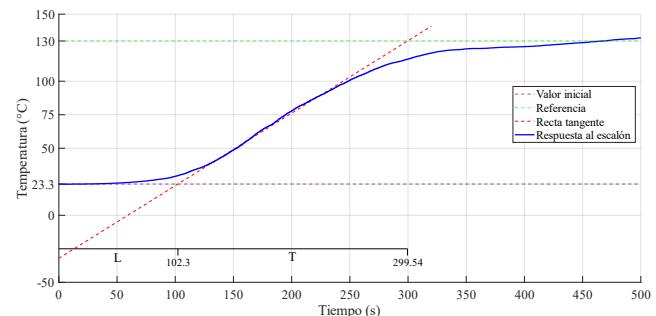


Figura 3. Parámetros L y T, recuperados en base a la recta tangente del punto de inflexión de la respuesta al escalón.

Como se ilustra en la Figura 3, la respuesta escalón muestra un ascenso inicial hasta alcanzar aproximadamente los 130 °C. A partir de los 130 °C, el incremento de la temperatura disminuye drásticamente, volviéndose considerablemente lento hasta alcanzar un valor de 130 °C. Este comportamiento indica que el sistema se está aproximando a su valor de estado estacionario. Dado que la tasa de cambio se reduce significativamente, a efectos prácticos para el análisis y la sintonización de control, se puede considerar que el sistema ha alcanzado un estado estacionario a los 130 °C, y además se observa que :

$$L = 102.3 \text{ y } T = 299.5.$$

Por lo cual, del método de Z-N y de la ecuación (1), se tiene que

$$G(S) = \frac{e^{-Ls}}{Ts + 1} = \frac{e^{-102.3s}}{299.5s + 1}. \quad (2)$$

Posteriormente, se corroborará la correspondencia entre el modelo matemático propuesto en la ecuación (2) y la planta real (sistema térmico). En la Figura 4 se presentan ambas respuestas para su respectiva comparación, donde se observa que la respuesta escalón del modelo (2) (-), es muy semejante a la respuesta escalón del sistema térmico (-).

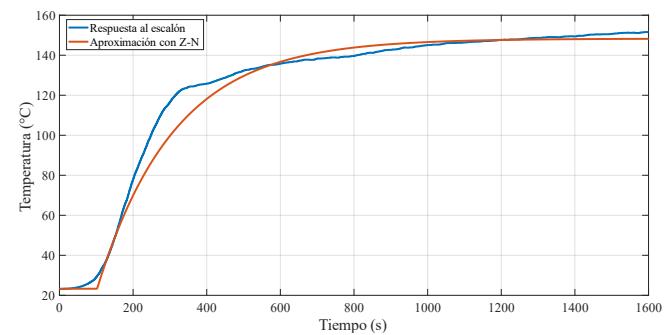


Figura 4. Comparación de la aproximación de Ziegler-Nichols con la respuesta en lazo abierto.

#### 3.2 Método de identificación paramétrica

Este análisis se llevó a cabo utilizando la misma respuesta experimental en lazo abierto con una entrada escalón descrita previamente en la Figura 3, pero bajo las siguientes consideraciones.

Se supone que la planta se puede representar mediante la siguiente función de transferencia siguiente:

$$G(s) = \frac{b}{as + 1}, \quad (3)$$

donde  $a$  y  $b$  son parámetros desconocidos, con esta condición la respuesta escalón es

$$X(s) = \frac{b}{as + 1} \cdot \frac{1}{s} = \frac{b}{s(as + 1)}. \quad (4)$$

Ahora, aplicando fracciones parciales a (4) tenemos que:

$$\begin{aligned} X(s) &= \frac{b}{s(as + 1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{as + 1}, \\ A &= \frac{b}{s(as + 1)} \cdot s, \text{ donde } s = 0. \text{ Así } A = b. \\ B &= \frac{b}{s(as + 1)} \cdot (as + 1), \text{ donde } s = -\frac{1}{a}. \text{ Así } B = -ab. \end{aligned}$$

Por lo cual, (4) se puede reescribir como:

$$X(s) = \frac{b}{s(as + 1)} = \frac{b}{s} - \frac{ab}{as + 1}. \quad (5)$$

Posteriormente, aplicando la transformada inversa de Laplace, para trasladarlo al dominio temporal, se tiene que

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1}\{X(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{b}{s} - \frac{ab}{as + 1}\right\} = b\left(1 - e^{-t/a}\right). \quad (6)$$

De ese modo se puede definir  $b$  como el valor máximo que puede alcanzar nuestra planta, en este caso 130°C, y con base a esto calcular el valor  $a$  del modelo es:

$$\begin{aligned} x(a) &= b(1 - e^{-1}) \\ &= 130(1 - 0.3678) \\ &= 82.173. \end{aligned} \quad (7)$$

Una vez conocido el valor de la planta en el punto  $a$ , solo se tiene que buscar dentro de los datos obtenidos experimentalmente en que tiempo la planta alcanza los 82.173 °C, el cual se determina específicamente como 208.175 s, por lo tanto, ya se puede describir la función de transferencia completa de acuerdo a la expresión siguiente:

$$G(s) = \frac{130}{82.173s + 1}. \quad (8)$$

Sin embargo, se debe de considerar el retardo, el cual se propondrá teniendo en cuenta la aproximación por Z-N ya que es bastante acertado como lo podemos observar de forma gráfica en la Figura 4 (brindando ajustes finos para obtener una respuesta todavía mejor); una vez realizado este, se puede usar la ecuación (9) para comparar la respuesta al escalón unitario en lazo abierto de la planta con el modelo matemático aproximado por identificación paramétrica, ver Figura 5.

$$G(s) = \frac{130e^{-85.3s}}{82.173s + 1}. \quad (9)$$

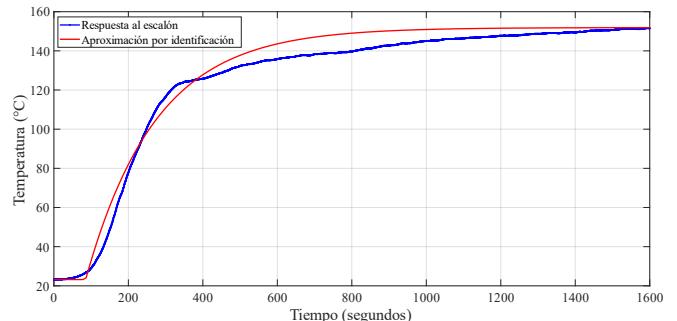


Figura 5. Comparación entre la aproximación paramétrica y la respuesta escalón de la planta real.

### 3.3 Comparación entre métodos

A continuación, se compararán ambos resultados, los obtenidos mediante la aproximación por Z-N y por identificación paramétrica:

$$\text{Ziegler - Nichols} \rightarrow G(s) = \frac{130e^{-102.3s}}{299.5s + 1}. \quad (10)$$

$$\text{Identificación param.} \rightarrow G(S) = \frac{130e^{-85.3s}}{82.173s + 1}. \quad (11)$$

Para lo cual, en la Figura 6 se muestran las respuestas de ambos sistemas en lazo abierto al escalón.

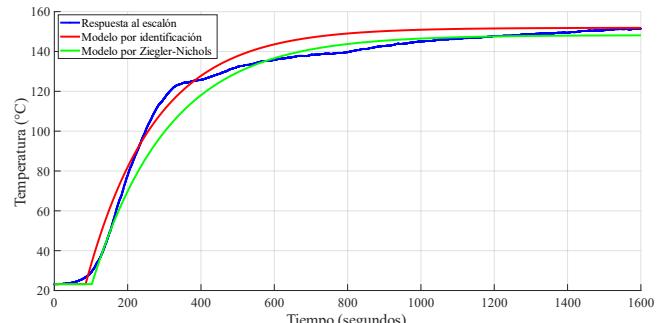


Figura 6. Comparación entre la respuesta escalón de la planta real, la aproximación por Z-N (13) y la aproximación por identificación paramétrica (14).

Para identificar la mejor propuesta entre (10) y (11), a las respuestas escalón mostradas en la Figura 6, se les calculó el error cuadrático medio (ECM) con respecto a la respuesta escalón en lazo abierto de la planta real, hasta los 125°C que es la temperatura de operación de la cámara, teniendo como resultado que la aproximación paramétrica tiene un error mucho menor (ECM=32.7515); con respecto a la aproximación por Z-N (ECM=102.7942).

### 3.4 Sintonización del control PID

Como lo marca el método de Z-N, obtenidos los parámetros  $L$  y  $T$ , se sintoniza un controlador PID, usando la Tabla 1, así se tiene que

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} = 1.2 \frac{299.5}{102.3} = 3.51, \quad (12)$$

$$K_d = 2L = 2(102.3) = 204.6, \quad (13)$$

$$K_i = 0.5(102.3) = 51.15. \quad (14)$$

Sin embargo, los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la implementación en la planta real mostraron un error en la convergencia, lo que se evidencia claramente en la Figura 7.

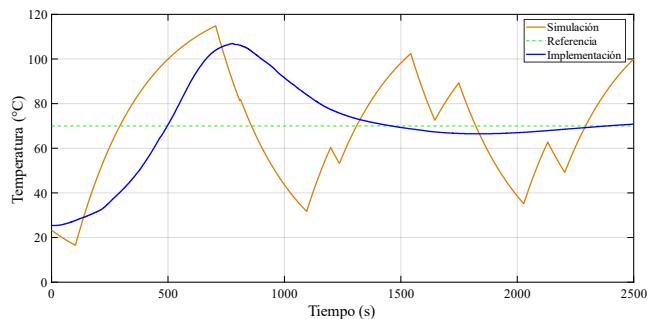


Figura 7. Control sintonizado con la regla de Ziegler-Nichols, con una referencia en 70°C.

Debido a ello, para lograr una representación matemática del sistema que sea considerablemente más precisa que la obtenida mediante el método de Z-N, se optó por realizar un proceso de identificación paramétrica.

A continuación, se propone la sintonización de un controlador clásico PID, usando el método conocido como asignación de polos.

Según el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz, los polos de la función de transferencia de un sistema en lazo cerrado deben de tener parte real negativa y para evitar que oscilen su parte imaginaria debe de ser cero (Nise, 2019).

Considere la función de transferencia del sistema dado en (6) en lazo cerrado con el control PID:

$$H(s) = \frac{(K_d s^2 + K_p s + K_i) \cdot b}{(a + bK_d)s^2 + (1 + bK_p)s + bK_i}. \quad (15)$$

Así, los polos de  $H(s)$  están dados por la siguiente ecuación característica:

$$p(s) = (a + bK_d)s^2 + (1 + bK_p)s + bK_i.$$

Ahora, se propone el siguiente polinomio deseado, con dos raíces puramente reales en  $-p$ ,  $p > 0$ :

$$p_d(s) = (s + p)^2 = s^2 + 2ps + p^2.$$

Observe que  $p_d(s) = p(s)$  si y solo si se cumple lo siguiente:

$$2p = \frac{(1+bK_p)}{(a+bK_d)} \quad \text{y} \quad p^2 = \frac{bK_i}{(a+bK_d)}. \quad (16)$$

Así, para encontrar las ganancias del controlador PID, basta con elegir un punto  $p$ , donde se desean colocar las raíces, así como proponer una ganancia  $K_p > 0$ , tal que la planta no sea saturada, entonces de (16) se tiene que

$$K_d = \frac{(1+bK_p)}{2pb} - \frac{a}{b}, \quad \text{y} \quad K_i = \frac{(a+bK_d)p^2}{b}. \quad (17)$$

#### 4. Resultados experimentales

En esta sección se realizan pruebas experimentales para mostrar la efectividad de la metodología propuesta anteriormente. Para ello, a partir del modelo matemático obtenido con identificación paramétrica en la ecuación (9), se sintonizará el control PID con los valores de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ . Así, proponiendo  $p = 0.008077$  y  $K_p = 0.0026$ , usando (17) se tiene que

$$K_d = \frac{(1 + bK_p)}{2pb} - \frac{a}{b} = \frac{(1 + (130)(0.0026))}{2(0.008077)130} - \frac{82.173}{125} = 0.005,$$

$$K_i = \frac{(bK_p + 1)^2}{4b \cdot (a + bK_d)} = \frac{(125(0.0026) + 1)^2}{4(130)(82.173 + 125(0.005))} = 0.00004.$$

Con estos valores se realizó una simulación de la planta dada en (9), en lazo cerrado con el controlador PID. En la Figura 8, se puede observar la respuesta del lazo cerrado para tres valores distintos de referencias (80, 90 y 100°C).

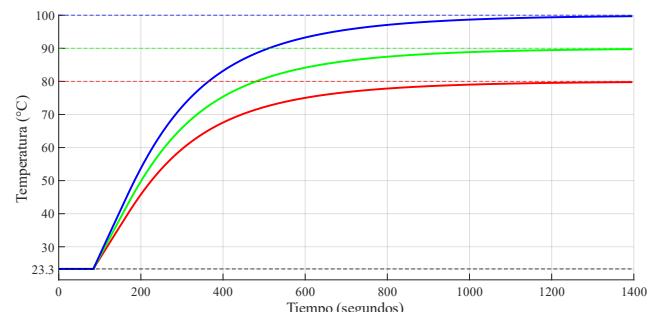


Figura 8. Comportamiento del control sintonizado por el método de identificación paramétrica y asignación de polos.

Cabe mencionar que, aunque la respuesta del lazo cerrado es adecuada en simulación, en la aplicación experimental se obtuvo un desempeño en la planta con baja eficiencia. Aquí, se pudo observar un error en estado estacionario, el cual se solventó al duplicar el valor original de  $K_i$  y  $K_p$ . Es decir, en la aplicación experimental se emplearon las ganancias  $K_p = 0.0052$ ,  $K_d = 0.005$  y  $K_i = 0.000084$ . Con estos valores la planta presentó una variación entre  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  y  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ , con respecto a la referencia (error absoluto), como se observa en la Figura 9. Mientras que, en la Figura 10 se pueden observar las señales de control suministradas a la planta real (sistema de evaluación de sensores de gases) para cada una de las referencias establecidas (80°C, 90°C y 100°C). Aquí se

observa que la temperatura de la planta converge a la referencia de forma suave.

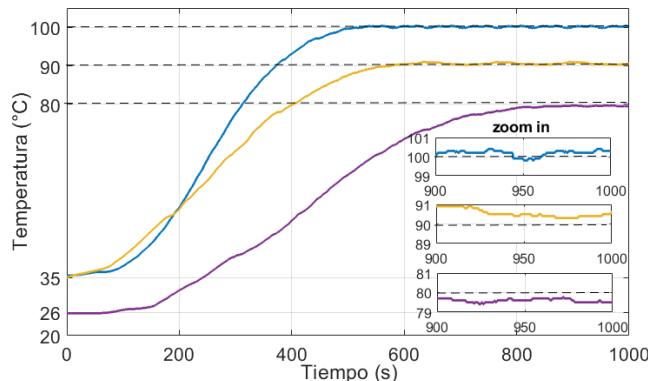


Figura 9. Respuesta de la planta real en lazo cerrado con control PID sintonizado usando asignación de polos ante diferentes referencias.

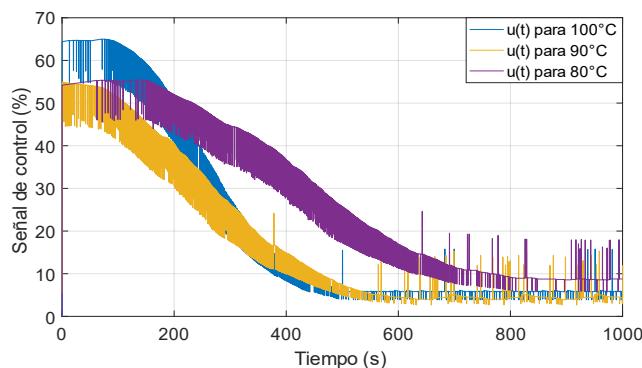


Figura 10. Señales de control suministradas a la planta real para diferentes temperaturas (80, 90 y 100 °C).

**Observación 1.** Es bien sabido que es usual encontrar variaciones entre los datos experimentales y su simulación, esto debido a que los experimentos son sistemas multifactoriales d. En el caso de estudio, se atribuye a la variación de la sintonización de la ganancia  $K_i$  y  $K_p$  a posibles errores de modelado al no considerar dinámicas presentes en la planta real e incertidumbre paramétrica. Recordando que se está proponiendo como modelo matemático una ecuación de orden uno, la cual es ideal y no se consideran incertidumbre, ni perturbaciones externas. Sin embargo, bastó con un pequeño ajuste para obtener un desempeño bastante aceptable en la respuesta de temperatura del sistema de evaluación de sensores de gases, presentado en la Figura 1.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño, la identificación paramétrica y el control de temperatura de un sistema de sensores de estado sólido. La propuesta de plataforma, así como la metodología para la identificación paramétrica y el control de la temperatura se validaron mediante pruebas vía simulación y experimentación. La plataforma consta de una cámara de evaluación de sensores de gases, una etapa para la adquisición, lectura, análisis y procesamiento de los datos, una interfaz amigable con el usuario realizada en LabVIEW y un sistema de control PID para la regulación de la temperatura en la cámara interna, en un rango de 50-120 °C. Para la identificación paramétrica, se obtuvo la respuesta escalón del sistema térmico en lazo abierto (sin controlador) y se

emplearon dos métodos para la propuesta de dos modelos matemáticos de primer orden con retardo de tiempo: uno mediante el método de Z-N y otro mediante una identificación paramétrica por respuesta analítica. Los modelos matemáticos seleccionados permitieron sintonizar un controlador PID. De acuerdo a los resultados arrojados en simulación y obtenidos en la experimentación, el segundo método fue el modelo que mejor describió el comportamiento del sistema y sirvió para sintonizar un controlador PID. A partir de simulaciones realizadas en Simulink de MATLAB, se evaluó el desempeño del controlador en lazo cerrado para converger a distintas referencias (80, 90 y 100 °C). Los resultados experimentales confirmaron que el controlador PID diseñado es capaz de llevar la temperatura del sistema a los valores de referencia deseados de forma suave y eficiente, demostrando un comportamiento estable, un sobreimpulso mínimo y un tiempo de establecimiento adecuado, con un error absoluto de  $\pm 0.5$  °C. Cabe señalar que el método de Z-N fue poco eficiente, tanto en simulación como en experimentación, por lo que una métrica comparativa parece innecesaria. Sin embargo, Z-N sirvió para estimar el retardo temporal que se utilizó en el método de identificación. Finalmente, los resultados mostrados en este trabajo validan la eficacia de la propuesta, y representan una base sólida para futuras investigaciones para evaluar nuevos materiales para la construcción de sensores de gases, lo cual amplía las posibilidades en el ámbito del diseño y desarrollo de nuevos materiales para su uso como sensores de gases sensibles, lo cual se deberá analizar en futuras investigaciones, dada la relevancia en el control de los gases para la vida humana. Además, este trabajo es una sugerente alternativa al uso de equipos de laboratorio similares y comerciales, evitando así dependencia tecnológica y reduciendo significativamente los costos de adquisición y mantenimiento del equipo.

## 6. Apéndice

Programa en LabView: El programa consta de cuatro secciones bien definidas, la primera es la que se encuentra en la parte superior donde se crea un archivo de texto en el cual se almacenar los datos de tiempo, temperatura y resistencia para su posterior análisis en otras aplicaciones en el caso de ser necesario, debajo de esta sección se encuentra la comunicación serial que hay entre la computadora y el miliohmímetro para la obtención de datos mediante comandos clave como *READ?* y *TEMP:DATA?* para ser agregados al archivo de texto y su posterior uso en el resto del programa, la sección inferior es el control PID que toma los datos obtenidos por la comunicación serial y da una salida hacia la interfaz *LINX* para su comunicación con el Arduino UNO y su posterior acción sobre la etapa de potencia y a su vez sobre la placa calefactora, y en la parte final se cuenta con las gráficas de la señal de control y la señal de temperatura, estas se pueden visualizar en el panel de control donde también se establece la referencia y se seleccionan los puertos de comunicación para el miliohmímetro y el Arduino UNO, en la Figura 11 se puede visualizar lo descrito con anterioridad.

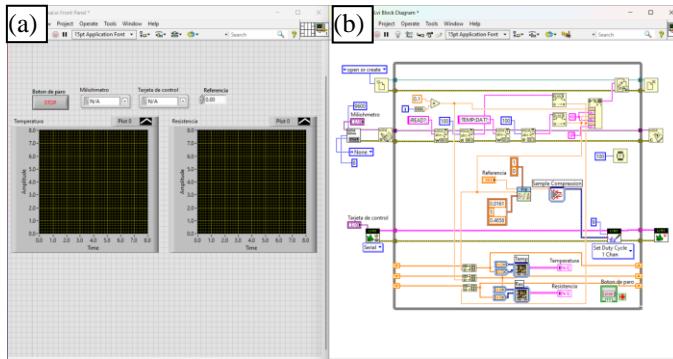


Figura 11 (a) Imagen general del programa en LabView y (b) panel de control.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México bajo el proyecto CF-2023-G-76.

## Referencias

- Almali, M. N. (2014). Fuzzy Logic Based Temperature Control of a Nonlinear System. *arXiv:1402.3654*, 1402.3654.(1402.3654.).
- Amosun, T. &—l. (2023). Design of a PLC based temperature controlled system. *REM Jurnal*, 8(2), 93–100.
- Åström, K. J. (1995). PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. *Instrument Society of America*.
- Bennett, S. (1993). Development of the PID Controller. *IEEE Control Systems Magazine*, 13(6), 58–65.
- Blevins, T. L. (2012). PID Advances in Industrial Control. *IFAC Proc.*, 45(3), 23–28.
- Bolarín M. A., T. C. ( 2024). Diseño y fabricación de un sistema para la evaluación de materiales sensores de gases. *Memorias del XXX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2024, 146-154.
- Cohen, G. H. (1953). Theoretical Consideration of Retarded Control.. *Trans. ASME*, 75,827–834.
- Dadone, P. &. (1998). PLC Implementation of a Genetic Algorithm for Controller Optimization. *JCIS'98*.
- Dadone, P. &. (1998). PLC Implementation of a Genetic Algorithm for Controller Optimization. *Computational Intelligence and Neuroscience*, *Proc. 3rd Int. Conf.* (Proc. 3rd Int. Conf.).
- Diseño y fabricación de un sistema para la evaluación de materiales sensores de gases, (2024). *Memorias del XXX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Querétaro: SOMIM.
- Doyle, J. C. (1981). Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis. *IEEE Trans. Autom. Control*, 26(1), 4–16.
- Ekengwu, B. O. (2024). Design of Robust Centralized PID Optimized LQR Controller for Temperature Control in Single-Stage Refrigeration System. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)*, 12(3), 726–738.
- Fiducioso, M. C. (2019). Safe contextual Bayesian optimization for sustainable room temperature PID control tuning. *arXiv*, 1906.12086., 1906.12086.
- Francis, W. &. (1980). Instrumentation and Control in the Process Industries. Butterworths. *Butterworths*.
- Genebre, S. A. (2025). *Termoresistencia PT100-RTD (clase B)*. Genebre, S. A.
- Good Will Instrument Co., Ltd. (2025). *GOM-804 & GOM-805 User Manual*. Good Will Instrument Co., Ltd.
- Jualayba, M., Regio, K., Quiozon, H., & Destreza, A. (2018). Hazardous gas detection and notification system. *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 1–4, IEEE.
- Kanaparthi, S., & Singh, S. G. (2019). Chemiresistive sensor based on zinc oxide nanoflakes for CO<sub>2</sub> detection. *ACS Applied Nano Materials*, 700–706.
- Lambrini, K., Christos, I., Petros, O., & Alexandros, M. (2018). Dangerous Gases and Poisoning: A. *ARCHIVOS DE MEDICINA*, 26.
- Liu, X. C. (2012). A survey on gas sensing technology. *Sensors*, , 12(7), 9635–9665.
- Manière, C. L. (2017). Proportional integral derivative, modeling and ways of stabilization for the spark plasma sintering process, *Results in physics*, 7, 2011.11633, 1494–1497.
- Meshram, P. M., & Kanajiya, R. G. (2012). Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor. In *IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)*, 117–122, Nagapattinam, India: IEEE.
- Nise, N. S. (2019). *Control systems engineering*. California, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Ogata, K. (2010). *Inginería de control moderna*. Pearson Educación.
- Ordaz-Oliver, M. O.-S.-R. (2023). Control sub-óptimo con desempeño robusto para regulación global de robots manipuladores.
- Rawlings, J. B. (2009). Model Predictive Control: Theory and Design. *Nob Hill*.
- Rüffer, D., Hoehne, F., & Bühler, J. (2018). New digital metal-oxide (MOx) sensor platform. *Sensors*, 1052.
- Shukla, R. &. (2018). MIMO Internal Model Control of Vapor Compression Refrigeration System. *arXiv:1810.06074*.
- Sontag, E. D. (1989). A “Universal” Construction of Artstein’s Theorem on Nonlinear Stabilization. *Systems & Control Letters*, 13(2), 117–123.
- Thepmanee, T. E. (2022). Implementation of control and SCADA system: Case study of Allen Bradley PLC by using WirelessHART to temperature control. *Energy Reports*, 8, 934–941.
- X., L., S., C., H., L., S., H., D., Z., & Ning, H. (2012). A survey on gas sensing technology. *Sensors*, 9635–9665.