

# CONESCAPANHONDURAS2025paper130.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

---

## Document Details

### Submission ID

trn:oid:::14348:477751119

### Submission Date

Jul 31, 2025, 10:12 PM CST

### Download Date

Aug 12, 2025, 6:29 PM CST

### File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper130.pdf

### File Size

486.4 KB

5 Pages




2,647 Words

14,706 Characters

# 13% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

## Top Sources

- 13%  Internet sources
- 4%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

## Integrity Flags




### 0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

## Top Sources

- 13%  Internet sources
- 4%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

## Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	www.coursehero.com	2%
2	Internet	es.scribd.com	2%
3	Internet	irobotics.aalto.fi	1%
4	Internet	hdl.handle.net	1%
5	Internet	scholarbank.nus.edu.sg	1%
6	Internet	vsip.info	1%
7	Internet	dokumen.pub	<1%
8	Internet	1library.co	<1%
9	Internet	lajc.epn.edu.ec	<1%
10	Publication	Edwin Espinel Blanco, Armando Quintero Ardila, Carlos Acevedo Penaloza. "Desig...	<1%
11	Internet	abcscontrol2.blogspot.com	<1%

12	Internet	bibdigital.epn.edu.ec	<1%
13	Internet	issuu.com	<1%
14	Internet	www.rottronindustrial.com	<1%
15	Internet	www.scielo.org.co	<1%
16	Internet	www.solucioneszener.com	<1%
17	Internet	baixardoc.com	<1%
18	Internet	doczz.net	<1%
19	Internet	www.slideshare.net	<1%

# Diseño e implementación de un controlador PID analógico para un sistema de levitación magnética

**Resumen—** Este artículo presenta el desarrollo de un controlador PID analógico en tiempo real para un sistema de levitación magnética (maglev). El sistema consiste en una bobina electromagnética que levita un imán permanente, utilizando un sensor de efecto Hall para detectar la posición del imán. Se describe la teoría electromagnética subyacente, el modelado matemático del sistema, y se analizan los resultados experimentales obtenidos mediante el uso de controladores clásicos. Este trabajo busca destacar la aplicabilidad del diseño analógico de controladores en contextos educativos y de bajo costo.

**Palabras clave—** Control PID, levitación magnética, controlador analógico, electroimán, modelado de sistemas

## I. INTRODUCCIÓN

El diseño de sistemas de control es fundamental en la automatización de procesos físicos complejos, particularmente en aquellos donde la estabilidad no se alcanza de forma natural, como ocurre en la levitación magnética. Los sistemas maglev permiten suspender objetos mediante fuerzas electromagnéticas, eliminando el contacto mecánico y reduciendo el desgaste por fricción. Esta tecnología en ascenso ha sido aplicada en trenes de levitación magnética de alta velocidad, así como en sistemas de acoplamiento sin contacto en entornos industriales y médicos.

Este trabajo se centra en el diseño e implementación de un controlador PID analógico para un sistema maglev a pequeña escala, basado en una bobina electromagnética y un sensor de efecto Hall para la medición de posición.

Una etapa clave en el desarrollo del controlador es la obtención de un modelo matemático que describa la dinámica del sistema. En particular, la determinación de una función de transferencia permite establecer una relación clara y cuantificable entre la señal de entrada (voltaje al electroimán) y la salida (posición del objeto). Esta función es esencial para analizar la estabilidad del sistema, diseñar el controlador y predecir su comportamiento antes de implementarlo físicamente.

La importancia de contar con un modelo matemático preciso se observa en numerosos sistemas de control avanzados. Por ejemplo, en los vehículos autónomos, una modelación adecuada de la dinámica vehicular es indispensable para tareas como el seguimiento de trayectorias y la detección de obstáculos. Sin un modelo fiable, el sistema puede reaccionar de forma errónea ante cambios en el entorno, poniendo en riesgo la seguridad [Kong et al., 2015].

En el ámbito de la medicina, dispositivos como los ventiladores automáticos o los sistemas de infusión de insulina también dependen de modelos dinámicos exactos del cuerpo

humano. En estos casos, errores de modelado pueden derivar en sobre o subdosificación, afectando directamente la salud del paciente [Bequette, 2005].

Estos ejemplos demuestran que, incluso en aplicaciones críticas y altamente tecnificadas, el modelado del sistema es un paso determinante para lograr un control eficiente y seguro. De manera similar, en sistemas de levitación magnética, el éxito del control depende estrechamente de la fidelidad del modelo utilizado. Si la función de transferencia no refleja adecuadamente el comportamiento físico del sistema, el controlador puede inducir oscilaciones, respuestas lentas o pérdida total de la suspensión.

Este proyecto, por tanto, no solo busca lograr una levitación estable mediante control PID, sino también poner en práctica un enfoque riguroso de modelado, análisis y diseño, tal como se aplica en sistemas reales de alta exigencia.

En este artículo se exponen los fundamentos teóricos pertinentes para su comprensión, la metodología utilizada para llevar a cabo el modelado e implementación. Así como los resultados experimentales alcanzados, las conclusiones recabadas y las referencias bibliográficas.

## II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### A. Modelado del sistema de levitación magnética

El sistema de levitación magnética estudiado consiste en un imán de neodimio suspendido por la fuerza de atracción generada por una bobina electromagnética. La posición del imán es medida mediante un sensor de efecto Hall, y el objetivo del control es mantenerla suspendida en equilibrio estable. El diagrama de cuerpo libre se presenta a continuación:

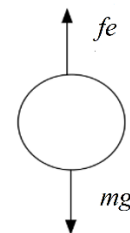


Fig. 1. Diagrama de cuerpo libre del imán suspendido.

La dinámica del sistema se describe mediante la segunda ley de Newton:

$$m\ddot{x} = mg - f_e \quad (1)$$

donde:

- $x$  es la distancia entre la esfera y el electroimán,
- $f_e$  es la fuerza electromagnética,
- $m$  es la masa del objeto,
- $g$  es la aceleración gravitacional.

La fuerza electromagnética se modela, mediante el principio de conservación de energía, como:

$$f_e = \frac{ki^2}{x^2} \quad (2)$$

donde:

- $i$  es la corriente en la bobina,
- $k$  es una constante positiva que depende de las características del sistema.

Sustituyendo, se obtiene el modelo no lineal:

$$m\ddot{x} = mg - \frac{ki^2}{x^2} \quad (3)$$

Este modelo es inherentemente inestable y no lineal. Para diseñar un controlador PID se procede a su **linealización** alrededor de un punto de equilibrio ( $x_0, i_0$ ), tal que:

$$mg = \frac{ki_0^2}{x_0^2} \quad (4)$$

Definiendo:

$$\Delta x = x - x_0, \quad \Delta i = i - i_0 \quad (5), (6)$$

y aplicando una expansión en series de Taylor, se obtiene el modelo linealizado:

$$\Delta\ddot{x} = -K_x\Delta x + K_i\Delta i \quad (7)$$

con:

- $K_x = \frac{2g}{x_0}$
- $K_i = \frac{2g}{i_0}$

En el dominio de Laplace, la **función de transferencia** que relaciona la corriente de entrada con la posición de la esfera es:

$$G(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta I(s)} = \frac{-K_i}{s^2 + K_x} \quad (8)$$

Este modelo lineal de segundo orden permite analizar el sistema con técnicas clásicas de control y diseñar un controlador PID.

## B. Controlador PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) se utiliza ampliamente por su capacidad de corregir errores presentes, pasados y futuros. Su expresión general en el dominio del tiempo es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

y en el dominio de Laplace:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (10)$$

donde:

- $e(t)$  es el error entre la posición deseada y la medida,
- $u(t)$  es la señal de control aplicada al sistema.

Cada término tiene un rol específico:

- $K_p$  mejora la respuesta rápida,
- $K_i$  elimina el error en estado estacionario,
- $K_d$  mejora la respuesta ante cambios bruscos.

## C. Ajuste con PID Tuner en MATLAB

Para seleccionar los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , se empleó la herramienta PID Tuner de MATLAB, la cual permite trabajar directamente con la función de transferencia obtenida.

Esta herramienta ofrece:

- Ajuste automático de parámetros basado en criterios de rendimiento (tiempo de subida, sobreimpulso, etc.),
- Visualización de la respuesta temporal del sistema controlado,
- Análisis en tiempo real del margen de ganancia y fase.

Los valores resultantes fueron validados posteriormente en la implementación física del sistema mediante un controlador analógico.

## III. METODOLOGÍA

### A. Configuración experimental

El sistema de levitación magnética está compuesto por una bobina electromagnética, un imán permanente y un sensor de efecto Hall KY-024. La bobina utilizada fue extraída de una electroválvula Burkert, debido a que los intentos iniciales de construir un electroimán desde cero presentaron problemas de sobrecalentamiento. El transistor de potencia encargado de accionar el electroimán es un TIP120, y la etapa de control se implementó con amplificadores operacionales TL082CP.

El montaje físico consiste en un arreglo vertical en el que el electroimán se encuentra en la parte superior, el imán levita justo debajo, y el sensor Hall está posicionado en la parte inferior, alineado con el eje vertical del imán. Esta configuración permite capturar los cambios de posición en función de la variación del campo magnético generado por el imán (ver Figura 2).

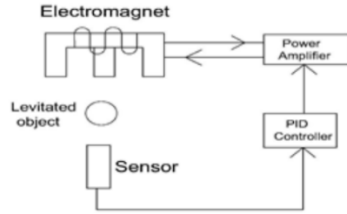


Fig. 2. Montaje físico del sistema de levitación magnética (electroimán, imán levitado y sensor Hall).

El sistema de control se basa en retroalimentación unitaria. El diagrama de bloques funcional incluye: una entrada de referencia que se compara con la señal del sensor para generar el error, el cual es procesado por un bloque PID analógico. La señal de salida del PID acciona la planta (electroimán) y la posición resultante es medida nuevamente por el sensor, cerrando así el lazo de control (ver Figura 3).

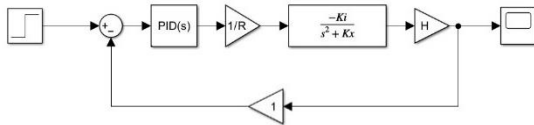


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema de control PID para levitación magnética

### B. Implementación del controlador analógico

El controlador PID fue implementado con cinco amplificadores operacionales: un comparador para obtener la señal de error, tres etapas correspondientes a las acciones proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), y una etapa sumadora que combina dichas señales. La señal de salida del controlador se aplica directamente a la base del transistor TIP120, que regula la corriente del electroimán (ver Figura 4).

Los valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , fueron determinados utilizando la herramienta PID Tuner de MATLAB, a partir del modelo lineal del sistema. Una vez definidos, estos parámetros fueron implementados físicamente mediante la selección adecuada de resistencias y capacitores en cada etapa del controlador, utilizando relaciones del tipo  $K_p = \frac{Rf}{Ri}$ ,  $K_i = \frac{1}{RC}$ ,  $K_d = RC$

### C. Calibración del sensor de efecto Hall

Para caracterizar la ganancia del sensor, se registró el voltaje de salida del KY-024 a distintas distancias verticales entre el imán y el sensor, medidas con una regla. Los datos obtenidos se tabularon y se seleccionó la región lineal de operación del sensor, correspondiente al rango de trabajo deseado. Sobre esta región se aplicó una regresión lineal, y la

pendiente de dicha recta se utilizó como ganancia del sensor (en V/m).

La tabla de datos y el gráfico con la regresión se presentan en la sección de Resultados.

### D. Determinación del punto de equilibrio

La linealización del modelo matemático requiere conocer la corriente de equilibrio  $i_0$  y la distancia de equilibrio  $x_0$ . Para ello, se incrementó progresivamente la corriente aplicada al electroimán hasta lograr una suspensión estable del imán, justo antes del punto en que es completamente atraído por la bobina. La corriente fue medida con un multímetro, y la distancia se determinó utilizando una plataforma ajustable que permitía fijar la posición del imán.

Con estos valores se aplicó la linealización alrededor del punto  $(x_0, i_0)$ , tal como se describió en la sección teórica, obteniendo así el modelo lineal de segundo orden que sirvió como base para el diseño del controlador PID.

### E. Validación del sistema

Para validar el funcionamiento del sistema de control, se utilizó un osciloscopio para observar simultáneamente la señal de referencia y la señal de retroalimentación del sensor. Se aplicó una entrada tipo escalón al sistema, y se analizó la respuesta del controlador PID ante dicho cambio. El comportamiento observado permitió verificar el seguimiento de referencia y la estabilidad del sistema.

Adicionalmente, se utilizó un microcontrolador Arduino para registrar los datos de voltaje de retroalimentación durante la aplicación del escalón. Estos datos fueron graficados y comparados con la respuesta teórica del modelo, permitiendo contrastar el comportamiento real del sistema con las predicciones del modelo linealizado.

## IV. RESULTADOS

### A. Determinación del punto de equilibrio

Para linealizar el modelo no lineal del sistema de levitación magnética, se determinó el punto de equilibrio empíricamente. Se aumentó gradualmente la corriente a través del electroimán hasta lograr que el imán quedara suspendido de forma estable, justo antes de ser completamente atraído. La corriente correspondiente a esa condición se registró como corriente de equilibrio  $i_0$ , y la distancia entre el imán y el electroimán como  $x_0$ . En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos:

TABLE I.

Corriente de equilibrio, distancia de equilibrio y resistencia de bobina.		
Parámetro	Valor	Unidad
$i_0$	0.360	A
$x_0$	0.03	m
$R$	50.19	$\Omega$

### B. Obtención de la función de transferencia

La función de transferencia lineal entre la posición y la corriente fue obtenida a partir del modelo físico linealizado:

$$Gi(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta I(s)} = \frac{-54.5}{s^2 + 654} \quad (11)$$

Para llevar esta función al dominio de voltaje como señal de entrada, se multiplicó por el inverso de la resistencia del electroimán. De esta forma, se obtuvo la siguiente función de transferencia entre la posición y el voltaje aplicado al electroimán:

$$Gv(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta V(s)} = \frac{-54.5}{50.19s^2 + 32824.26} \quad (12)$$

### C. Caracterización del sensor Hall

Para completar el modelo del sistema en lazo cerrado, fue necesario incorporar la ganancia del sensor de efecto Hall. Se realizó una caracterización experimental del sensor KY-024 midiendo el voltaje de salida a distintas distancias verticales del imán, registradas con una regla.

A partir de estos datos se construyó un gráfico de voltaje en función de la distancia, y se aplicó una regresión lineal sobre la región lineal del sensor. La pendiente de esta recta se interpretó como la ganancia del sensor H, expresada en V/m (ver Figura 5).

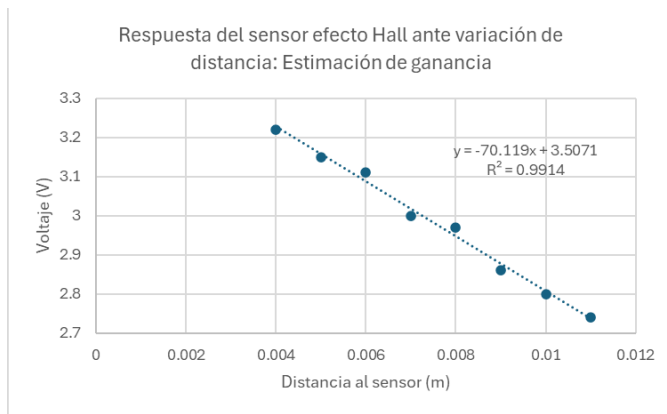


Fig. 4. Relación lineal entre voltaje del sensor y distancia del imán

$$H(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta X(s)} = -70.119 [V/m] \quad (11)$$

Para obtener la función de transferencia completa del sistema desde el voltaje de entrada hasta el voltaje de salida del sensor, se multiplicó la función  $Gv(s)$  por  $H(s)$ :

$$G(s) = \frac{\Delta V_{\text{sensor}}(s)}{\Delta V_{\text{entrada}}(s)} = \frac{3821}{50.19s^2 + 32824.26} \quad (11)$$

Esta función de segundo orden fue la utilizada como modelo de planta en la herramienta PID Tuner de MATLAB para el diseño inicial del controlador.

### D. Diseño del controlador mediante PID Tuner

Con la función de transferencia completa del sistema obtenida en la sección anterior, se utilizó la herramienta **PID Tuner** de MATLAB para diseñar el controlador. Esta herramienta permite realizar un ajuste interactivo de los

parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , observando simultáneamente la respuesta del sistema a una entrada escalón.

Se seleccionó un perfil de respuesta que privilegiara un equilibrio entre rapidez y estabilidad, con un sobreimpulso moderado y un tiempo de asentamiento razonable. La Figura 5 muestra la respuesta al escalón de la planta modelada bajo el control PID diseñado:

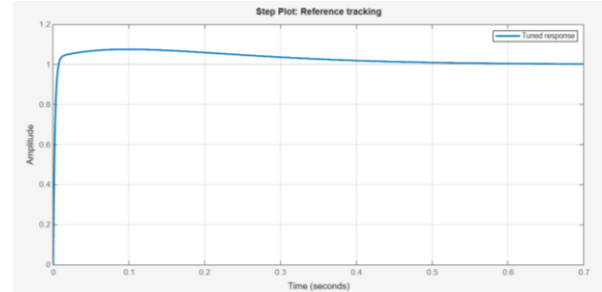


Fig. 5. Respuesta al escalón del sistema con el controlador PID ajustado en MATLAB PID Tuner.

Estos valores fueron utilizados para implementar el controlador PID en su versión analógica, mediante la selección apropiada de componentes pasivos (resistencias y capacitores) según las relaciones clásicas de diseño.

TABLE II.

Valores de parámetros obtenidos mediante PID Tuner	
Parámetro	Valor
$K_p$	25
$K_d$	1
$K_i$	75

Además, presenta los siguientes parámetros:

	Tuned
Rise time	0.0042 seconds
Settling time	0.388 seconds
Overshoot	7.45 %
Peak	1.07
Gain margin	-20.7 dB @ 8.26 rad/s
Phase margin	88 deg @ 472 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fig. 6. Tabla de rendimiento y robustez del sistema con el controlador PID ajustado en MATLAB PID Tuner.

La siguiente sección presenta los resultados experimentales de la implementación física del sistema controlado con estos parámetros.



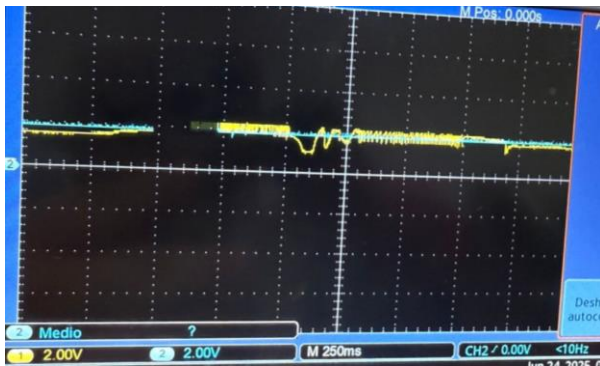


Fig. 7. Control de variable y estabilidad del sistema medido mediante osciloscopio.

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el desarrollo e implementación de un sistema de levitación magnética controlado mediante un controlador PID analógico. A lo largo del proyecto se logró construir un prototipo funcional capaz de mantener en suspensión un imán permanente, utilizando un electroimán, un sensor de efecto Hall y un controlador implementado con componentes electrónicos discretos.

Se obtuvo un modelo matemático linealizado a partir de las ecuaciones físicas del sistema, el cual permitió derivar una función de transferencia que relaciona la señal de control con la posición del imán. Dicha función fue calibrada empíricamente mediante la medición de parámetros clave como la corriente y la distancia de equilibrio, así como la resistencia del electroimán. Adicionalmente, se caracterizó la ganancia del sensor Hall mediante una regresión lineal en la región de operación más estable.

Los parámetros del controlador PID fueron obtenidos utilizando la herramienta PID Tuner de MATLAB, y posteriormente implementados en hardware mediante la selección adecuada de resistencias y capacitores. La respuesta simulada al escalón mostró un comportamiento estable.

Si bien no fue posible completar la comparación cuantitativa entre el modelo teórico y la respuesta experimental del sistema, los resultados obtenidos hasta esta etapa constituyen una validación preliminar satisfactoria del enfoque adoptado. Este trabajo sienta así las bases para futuras etapas de análisis, como la adquisición digital de datos y la evaluación rigurosa del desempeño dinámico.

En términos generales, el proyecto demuestra que es posible diseñar e implementar un sistema de control de levitación magnética empleando únicamente elementos analógicos de bajo costo, lo que lo convierte en una plataforma viable para propósitos educativos y de experimentación en ingeniería de control.

## REFERENCIAS

- [1] J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach and F. Borrelli, "Kinematic and Dynamic Vehicle Models for Autonomous Driving Control Design," in \*Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)\*, Seoul, South Korea, 2015, pp. 1094–1099. doi: 10.1109/IVS.2015.7225830.
- [2] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 5.<sup>a</sup> ed., México: Pearson Educación, 2010.
- [3] The MathWorks, Inc., "Tune PID Controller - MATLAB & Simulink," *MathWorks Documentation*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>
- [4] B. W. Bequette, "A critical assessment of algorithms and challenges in the development of closed-loop artificial pancreas systems," in \*Diabetes Technology & Therapeutics\*, vol. 7, no. 1, pp. 28–47, 2005. doi: 10.1089/dia.2005.7.28.