

# Modelado y Control de un Levitador Magnético en FPGA para Aplicaciones Robóticas de Alta Limpieza

## Modeling and Control of a Magnetic Levitator on FPGA for High-Cleanliness Robotic Applications

Walter Torrestiana-González<sup>a\*</sup>, Emmanuel González-Mendoza<sup>b</sup>, Leopoldo Adrián González-González<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx.

<sup>b</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CDMX, C.P. 04510

\*walmart@tese.edu.mx

### Resumen

Se presenta el modelado y control de un levitador magnético axial como parte de un sistema de rodamientos magnéticos activos (AMB) para robots SCARA en ambientes de cuartos limpios. El diseño utiliza un disco rotor suspendido mediante cuatro electroimanes dispuestos ortogonalmente, eliminando el contacto mecánico y reduciendo la generación de partículas contaminantes. Se desarrolla un modelo matemático no lineal basado en la ley de voltajes de Kirchhoff y la segunda ley de Newton, considerando las fuerzas gravitacional y electromagnética. Se implementa un controlador LQG en una FPGA utilizando VHDL, lo que permite control en tiempo real y alta velocidad de respuesta. Simulaciones en MATLAB/Simulink y ensayos experimentales con un prototipo físico validan el desempeño del sistema. Los resultados demuestran estabilidad y precisión en el control de posición axial, evidenciando su viabilidad para aplicaciones de baja velocidad y altos requerimientos de limpieza. Se identifican oportunidades para mejoras futuras mediante técnicas de control inteligente y optimización electromecánica.

### Abstract

This work presents the modeling and control of an axial magnetic levitator as part of an active magnetic bearing (AMB) system for SCARA robots in cleanroom environments. The design employs a rotor disk suspended by four orthogonally arranged electromagnets, eliminating mechanical contact and minimizing particle generation. A nonlinear mathematical model is developed based on Kirchhoff's voltage law and Newton's second law, considering gravitational and electromagnetic forces. An LQG controller is implemented on an FPGA using VHDL, enabling real-time control and fast response. MATLAB/Simulink simulations and experimental tests on a physical prototype validate the system's performance. Results show stability and high precision in axial position control, demonstrating its feasibility for low-speed, high-cleanliness applications. The study also identifies future improvement opportunities through intelligent control techniques and electromechanical optimization.

### Palabras clave:

Levitador magnético, Rodamientos magnéticos activos, Control en tiempo real, FPGA, Robots SCARA, Cuartos limpios

### Keywords:

Magnetic levitator, Active magnetic bearings, Real-time control, FPGA, SCARA robots, Clean-rooms.

### Introducción

Los sistemas de rodamientos magnéticos activos (AMB por sus siglas en inglés) han emergido como una tecnología clave para aplicaciones donde la ausencia de contacto mecánico, la alta precisión y la minimización de la generación de partículas son críticas, como en la industria farmacéutica, microelectrónica y de semiconductores [1, 2]. A diferencia de los rodamientos convencionales, los AMB eliminan la fricción y la necesidad de lubricación, lo que reduce los costos de mantenimiento y evita la contaminación por partículas [3, 4].

Dentro de los AMB, el rodamiento axial o levitador magnético axial es fundamental para mantener la posición vertical del rotor sin contacto, especialmente en configuraciones donde la carga axial es predominante [5-7]. El modelado preciso de las fuerzas electromagnéticas y de la dinámica mecánica no lineal es esencial para el diseño de controlado-

res robustos que garanticen estabilidad y desempeño ante perturbaciones [8-10].

Diversas estrategias de control han sido propuestas, incluyendo control PID, control adaptativo y técnicas óptimas como el regulador Lineal-Cuadrático-Gaussiano (LQG). En particular, el LQG ha demostrado mejorar la estabilidad posicional y la respuesta transitoria en sistemas AMB, comparado con esquemas PID clásicos [11-13]. Además, la implementación de estos algoritmos en dispositivos de lógica programable (FPGA) permite ejecutar la ley de control en tiempo real con alta velocidad de muestreo y baja latencia [14-16].

El uso de FPGA para el control de AMB ofrece ventajas como la paralelización del procesamiento, la flexibilidad en el diseño del hardware y la posibilidad de reconfiguración dinámica [17-18]. Trabajos recientes muestran la validación

experimental de controladores basados en FPGA en prototipos de rodamientos radiales y axiales, evidenciando mejoras en el ancho de banda de control y la robustez frente a perturbaciones [19-21].

El presente artículo se centra en el modelado, diseño e implementación de un levitador magnético axial para robots SCARA en ambientes de cuarto limpio. En la sección 2 se deriva un modelo matemático a partir de las ecuaciones de Kirchhoff y de Newton, incorporando las fuerzas gravitacional y electromagnética. En la sección 3 se diseña un controlador LQG para la estabilización del levitador magnético. En la sección 4 se presenta el proceso de implementación del algoritmo de control en la plataforma FPGA. En la sección 5 se muestra la validación experimental del desempeño del sistema. En la sección 6 se presenta un análisis de los resultados mediante simulaciones en MATLAB/Simulink y ensayos experimentales en un banco de pruebas específico para aplicaciones de baja velocidad y ultra limpieza [22-24].

Con esta contribución, se establecen las bases para futuras mejoras en la integración de control inteligente y optimizaciones electromecánicas en AMB axiales, orientadas a la robótica de precisión en entornos estrictamente controlados en nivel de limpieza.

### Modelado matemático del rodamiento axial

En este trabajo, el levitador magnético axial constituye la pieza central del estudio. Se basa en un disco acoplado al rotor sobre el cual actúan cuatro electroimanes dispuestos ortogonalmente encargados de generar la fuerza necesaria para sustentar el rotor sin contacto mecánico, minimizando la generación de partículas. En la Fig. 1 se presenta la estructura tradicional de un AMB vertical con dos rodamientos radiales y un solo rodamiento axial. En comparación, en la Fig. 2 se presenta el principio de funcionamiento del rodamiento axial propuesto en el presente trabajo, donde se puede observar que se utiliza la configuración de un solo rodamiento radial y al mismo nivel se configura el rodamiento axial con los 4 electroimanes.

Para centrar el análisis en la dinámica esencial del levitador, se adoptan las siguientes hipótesis:

- Operación en condiciones ideales, sin perturbaciones externas apreciables (fricción, corrientes parásitas o ruido electromagnético).
- Objeto levitado homogéneo, con su centro de masa coincidente con el centro geométrico del disco.
- Respuesta lineal continua de la inductancia y resistencia del electroimán en el rango operativo.

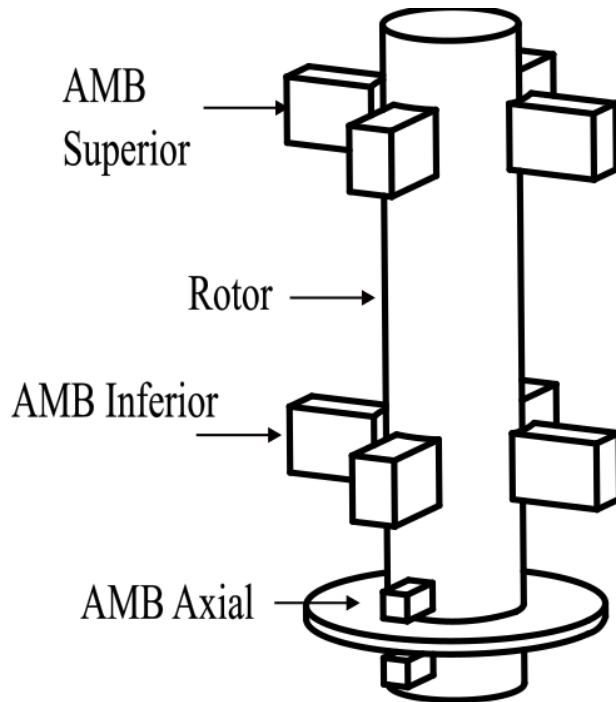


Figura 1 - Configuración típica de un AMB.

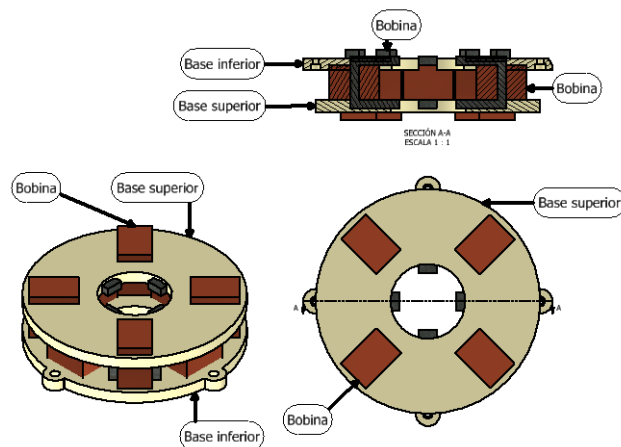


Figura 2 - Propuesta de configuración de un AMB que utiliza un solo rodamiento radial y un rodamiento axial de 4 puntos de levitación.

El enfoque de este trabajo consiste en diseñar e implementar un esquema de control descentralizado, el cual se detalla en la Sección 3. Para ello, se analiza el modelo matemático de cada uno de los cuatro actuadores del levitador magnético de manera independiente. La configuración del sistema se ilustra en la Fig. 3.

Basado en el principio de levitación magnética, el objeto suspendido está sujeto a dos fuerzas principales: la fuerza gravitacional, presentada en la ec. (1), y la fuerza electromagnética, descrita en la ec. (2).

$$F_g = mg \quad (1)$$

Donde:

$m$ : Masa del elemento levitante

$g$ : Aceleración debida a la gravedad

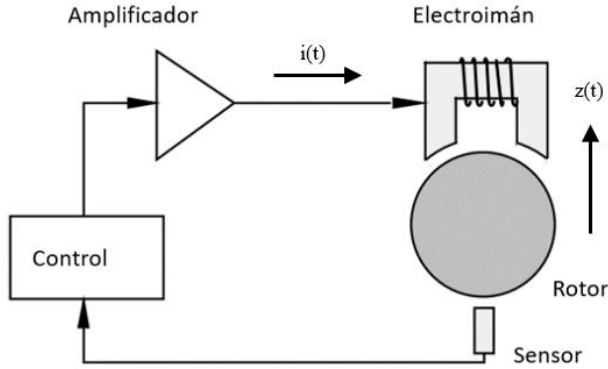


Figura 3 - Esquema del principio de funcionamiento de la suspensión electromagnética activa.

$$F_m = \frac{Ci^2}{2z^2} \quad (2)$$

Donde:

$i$ : Corriente eléctrica en el electroimán

$z$ : Distancia entre el electroimán y el disco levitante

$C$ : Constante de actuación magnética

Para modelar la parte eléctrica del sistema, se considera un circuito equivalente donde el voltaje de entrada ( $V_{in}$ ) se aplica a una resistencia ( $R$ ) y una inductancia ( $L$ ) en serie. Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff, se obtiene la ecuación de equilibrio eléctrico ec. (3).

$$u = Rx_1 + L\dot{x}_1 \quad (3)$$

Donde:

$u$ : Voltaje de entrada al electroimán

$R$ : Resistencia en el electroimán

$L$ : Inductancia en el electroimán

La dinámica del sistema se obtiene mediante la sumatoria de fuerzas en el eje vertical, lo que da como resultado la ecuación mecánica representada en la ec. (4):

$$mg = \frac{c}{2} \frac{x_1^2}{x_2^2} + m\dot{x}_3 \quad (4)$$

Para el análisis de control, se definen las siguientes variables de estado:

- $x_1$ : Corriente en el circuito eléctrico
- $x_2$ : Distancia entre el electroimán y el objeto levitante
- $x_3$ : Velocidad del desplazamiento del objeto levitante

El vector de estados se expresa en la ec. (5).

$$x = \begin{bmatrix} i \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Resolviendo para las derivadas de los estados se obtiene la ecuación de estados ec. (6) y la ecuación de salida ec. (7).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \frac{1}{L}u \\ x_3 \\ g - \frac{c}{2m} \frac{x_1^2}{x_2^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{x_2}{x_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Se define el punto de equilibrio ec. (8).

$$x = 0 \rightarrow f(x_{eq}, u_{eq}) = 0 \quad (8)$$

Por lo tanto, el vector de estados de equilibrio resultante se presenta en la ec. (9).

$$x_{eq} = \begin{bmatrix} x_{1eq} \\ x_{2eq} \\ x_{3eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{eq} \\ z_{eq} \\ \dot{z}_{eq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

El sistema se presenta con tres ecuaciones ec. (10) y cuatro incógnitas: ( $i_{eq}$ ,  $z_{eq}$ ,  $v_{eq}$ ,  $u_{eq}$ ).

$$\begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_{1eq} + \frac{1}{L}u_{eq} \\ x_{3eq} \\ g - \frac{c}{2m} \frac{x_{1eq}^2}{x_{2eq}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Considerando las relaciones dinámicas establecidas en las ecs. (11)-(13):

$$x_{3eq} = \dot{z}_{eq} = 0 \quad (11)$$

$$u_{eq} = Rx_{1eq} = Ri_{eq} \quad (12)$$

$$\frac{2gm}{c}x_{2eq}^2 = x_{1eq}^2 \quad (13)$$

se parametriza la solución del punto de equilibrio en función de  $z_{eq}$ , dado que esta variable representa la distancia entre el electroimán y el disco levitante medida por el sensor de posición ecs. (14)-(17). Esta elección permite:

- **Interpretación física directa:**  $z_{eq}$  es la variable críticamente observable en el sistema real.
- **Sintonización intuitiva:** Facilita el ajuste operacional según las especificaciones de la distancia deseada.
- **Consistencia con lazo de control:** Alinea el modelo con la arquitectura de realimentación basada en medición de posición.

$$i_{eq} = x_{1eq} = \pm \sqrt{\frac{2gm}{c}}x_{2eq} \quad (14)$$

$$z_{eq} = x_{2eq} \quad (15)$$

$$\dot{z}_{eq} = 0 \quad (16)$$

$$u_{eq} = Rx_{1eq} = \pm \sqrt{\frac{2gm}{c}}Rx_{2eq} \quad (17)$$

Los parámetros del sistema, fundamentales para el funcionamiento del modelo propuesto, se presentan en la Tabla 1. Estos incluyen variables como la masa del disco levitador, la resistencia y la inductancia eléctrica. Cada valor fue validado para garantizar la precisión de los resultados.

**Tabla 1** - Parámetros del levitador magnético.

| Parámetro | Valor                  | Descripción                            |
|-----------|------------------------|----------------------------------------|
| m         | 0.557 kg               | Masa del disco rotor (medido)          |
| g         | 9.78 m/s <sup>2</sup>  | Aceleración gravitacional              |
| R         | 6.9 Ω                  | Resistencia del electroimán (medido)   |
| L         | 0.065 H                | Inductancia del electroimán (medido)   |
| C         | 4.0 x 10 <sup>-5</sup> | Constante electromagnética (calculada) |

## Diseño del controlador LQG

El diseño del controlador Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG) constituye un enfoque robusto para sistemas dinámicos complejos como los rodamientos magnéticos activos (AMB), donde coexisten perturbaciones estocásticas y la necesidad de optimizar el desempeño para evitar saturación de los actuadores [25-27]. Este método combina dos componentes fundamentales:

- Un Regulador Lineal Cuadrático (LQR), que optimiza la respuesta del sistema minimizando un funcional cuadrático de costo.
- Un Filtro de Kalman, estimador óptimo en presencia de ruido gaussiano.

Para sistemas AMB, el enfoque LQG es particularmente adecuado debido a:

- La presencia de ruido en sensores de posición (interferencias electromagnéticas).
- Estados no medibles directamente (e.g., velocidad del rotor).
- Requerimientos de optimización energética para evitar saturación de actuadores.

## Control óptimo LQR

El controlador LQR minimiza la función de costo cuadrático ec. (18).

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t))dt \quad (18)$$

Donde:

Q: Matriz simétrica definida positiva que penaliza los estados.

R: Matriz simétrica definida positiva que penaliza el esfuerzo de control.

La dinámica del sistema se modela como en la ec. (19).

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (19)$$

La ley de control óptima se presenta en la ec. (20).

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (20)$$

Donde K se obtiene resolviendo la ecuación algebraica de Riccati ecs. (21)-(22).

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (21)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (22)$$

Para el rodamiento axial, las matrices de ponderación se determinaron mediante un proceso iterativo, ajustándolos para garantizar un compromiso adecuado entre la estabilidad del sistema y el esfuerzo de control. En el caso de la matriz  $\mathbf{R} = 1$  el valor escalar unitario representa que todos los actuadores tienen la misma penalización debido a que los actuadores son similares. Los valores se presentan en la ec. (23).

$$\mathbf{Q}_{axial} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{RA} = 1 \quad (23)$$

Donde:

$\mathbf{Q}_{22} = 10$ : Prioriza el control de posición (altura del rotor).

$\mathbf{Q}_{11}$  y  $\mathbf{Q}_{33} = 1$ : Priorizan menos la velocidad de desplazamiento y la corriente eléctrica para evitar calentamiento.

La matriz de ganancias resultante para el rodamiento axial se presenta en la ec. (24).

$$\mathbf{K}_{axial} = [10.6 \quad -2912.9 \quad -36.1] \quad (24)$$

La matriz  $\mathbf{K}_{axial}$  es esencial para determinar la ley de control óptima  $\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}_{axial} \mathbf{x}(t)$  en el rodamiento axial, donde  $\mathbf{x}(t)$  representa el vector de estados del sistema y  $\mathbf{u}(t)$  las señales de control generadas por el controlador.

### Filtro de Kalman discreto

El filtro de Kalman es un estimador óptimo recursivo que permite calcular los estados no medibles del sistema AMB (como velocidades o perturbaciones) a partir de mediciones ruidosas, considerando tanto el ruido del proceso como el de medición. El modelo discreto del sistema se describe mediante las ecuaciones (25)-(26).

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A} \mathbf{x}[k] + \mathbf{B} \mathbf{u}[k] + \mathbf{w}[k] \quad (25)$$

$$\mathbf{y}[k] = \mathbf{C} \mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k] \quad (26)$$

Donde:

$\mathbf{x}[k]$ : Vector de estados en el instante  $k$  (posición, velocidad y corriente eléctrica)

$\mathbf{u}[k]$ : Vector de señales de control (corriente en el electroimán)

$\mathbf{y}[k]$ : Vector de mediciones (posición medida por el sensor)

$\mathbf{w}[k]$ : Ruido del proceso, modelado como gaussiano con covarianza  $\mathbf{Q}_k$

$\mathbf{v}[k]$ : Ruido de medición, gaussiano con covarianza  $\mathbf{R}_k$  A, B, C: Matrices del sistema discretizado

### Etapas del filtro de Kalman

El algoritmo opera en dos fases cíclicas:

1. **Predicción** (etapa de propagación) ecs. (27)-(28):

$$\mathbf{x}[k|k-1] = \mathbf{A} \mathbf{x}[k-1|k-1] + \mathbf{B} \mathbf{u}[k] \quad (27)$$

$\mathbf{x}[k|k-1]$ : Estimación a priori del estado en  $k$  usando información hasta  $k-1$ .

$$\mathbf{P}[k|k-1] = \mathbf{A} \mathbf{P}[k-1|k-1] \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_k \quad (28)$$

$\mathbf{P}[k|k-1]$ : Matriz de covarianza del error de estimación a priori.

2. **Actualización** (corrección de mediciones) ecs. (29)- (31).

$$\mathbf{K}[k] = \mathbf{P}[k|k-1] \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{P}[k|k-1] \mathbf{C}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (29)$$

$\mathbf{K}[k]$ : Ganancia de Kalman óptima que pondera la confianza en las mediciones vs. El modelo.

$$\mathbf{x}[k|k] = \mathbf{x}[k|k-1] + \mathbf{K}[k] (\mathbf{y}[k] - \mathbf{C} \mathbf{x}[k|k-1]) \quad (30)$$

$\mathbf{x}[k|k]$ : Estimación a posteriori corregida con la innovación  $\mathbf{y}[k] - \mathbf{C} \mathbf{x}[k|k-1]$ .

$$\mathbf{P}[k|k] = (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k] \mathbf{C}) \mathbf{P}[k|k-1] \quad (31)$$

$\mathbf{P}[k|k]$ : Covarianza del error actualizada después de la medición.

### Integración LQG

El controlador LQG (Linear-Quadratic-Gaussian) combina la ley de control LQR con el filtro de Kalman mediante el principio de separación ec. (32).

$$\mathbf{u}[k] = -\mathbf{K}_c \mathbf{x}[k|k] \quad (32)$$

Donde:

$\mathbf{K}_c$ : Matriz de ganancia del controlador LQR (previamente diseñada)



$\hat{x}[k|k]$ : Estado estimado por el filtro de Kalman

Este esquema presenta tres ventajas clave:

- Rechazo activo de ruido: Compensa perturbaciones y ruido en sensores de posición.
- Estimación de estados ocultos: Reconstruye variables críticas no medibles (como la velocidad en este caso).
- Optimalidad: Minimiza tanto el error de estimación como el esfuerzo de control.

Un diagrama de bloques del algoritmo de control se presenta en la Fig. 4.

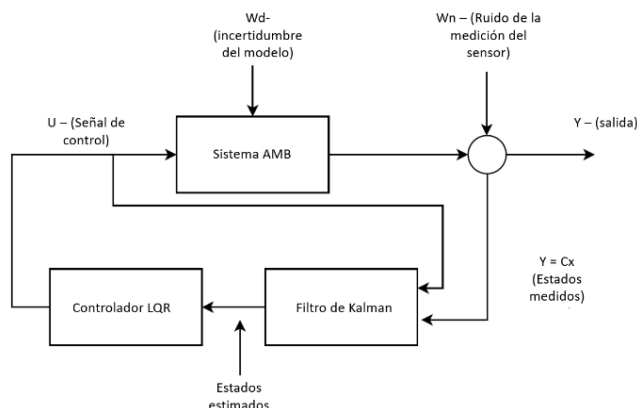


Figura 4 - Diagrama de bloques del algoritmo de control LQG.

### Implementación del algoritmo de control

La implementación del controlador diseñado se llevó a cabo en una FPGA (Field-Programmable Gate Array), una plataforma de hardware reconfigurable ampliamente utilizada en aplicaciones de control en tiempo real debido a su alta velocidad de procesamiento, paralelismo inherente y capacidad de adaptación a diferentes arquitecturas de control.

El uso de FPGAs permite ejecutar algoritmos de control con una latencia extremadamente baja, lo cual es crítico en sistemas como los rodamientos magnéticos activos, donde los tiempos de respuesta deben mantenerse en el rango de microsegundos. Adicionalmente, su capacidad de reconfiguración facilita la optimización de recursos y ajustes en el diseño sin necesidad de cambios en el hardware físico [28].

Comparada con plataformas como los microcontroladores o DSPs, las FPGAs destacan por su capacidad para implementar múltiples operaciones en paralelo, lo que permite realizar tareas como el cálculo del LQR, el filtro de Kalman y la actualización de los estados simultáneamente. Esta característica resulta particularmente útil en un AMB, donde la sincronización precisa entre sensores, actuadores y el controlador es esencial para mantener la estabilidad del sistema [29].

### Arquitectura de hardware

Para nuestra implementación experimental, utilizamos la tarjeta de desarrollo Nexys A7, equipada con una FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T. Esta plataforma fue seleccionada debido a su equilibrio entre capacidad de procesamiento, disponibilidad de recursos lógicos y bajo consumo energético. Las características principales de este dispositivo incluyen 15850 slices lógicos, 240 DSP slices para procesamiento aritmético acelerado, y 4.86 Mb de memoria BRAM integrada, facilitando la implementación de algoritmos complejos como el filtro de Kalman y el controlador LQR [30].

La frecuencia de operación del sistema se estableció en 100 MHz para el reloj principal, mientras que el bucle de control se ejecuta a una frecuencia de 2 kHz, proporcionando un período de muestreo de 500  $\mu$ s. Esta frecuencia fue seleccionada tras un análisis detallado del ancho de banda del sistema mecánico y los requisitos de estabilidad del controlador LQG, garantizando un margen adecuado para la ejecución completa del algoritmo en cada ciclo ya que supera la constante de tiempo característica de los electroimanes ( $\tau = 1$  ms), reduciendo el rizado de corriente a  $<5\%$  y manteniendo una respuesta dinámica adecuada evita resonancias mecánicas, garantizando estabilidad en todo el rango operativo y maximiza la eficiencia temporal: en una FPGA Artix-7 con reloj de 100 MHz, permite ejecutar el algoritmo de control en 200  $\mu$ s, dejando 300  $\mu$ s para otras tareas de procesamiento dentro del periodo de 500  $\mu$ s.

El controlador LQR se implementó como un módulo separado que opera sobre el vector de estados estimado por el filtro de Kalman. La ley de control se implementó mediante un producto matriz-vector dedicado.

La matriz de ganancias K calculada offline durante la fase de diseño según lo descrito en la sección 3, se almacenó en registros dedicados dentro de la FPGA, permitiendo un acceso rápido y paralelo durante la ejecución del algoritmo. Esta aproximación elimina la necesidad de recalcular las ganancias en tiempo real, reduciendo significativamente la carga computacional.

Para garantizar una transición suave en la señal de control aplicada a los actuadores, se implementó un limitador de tasa y amplitud que restringe tanto los valores máximos como la velocidad de cambio de la señal de control. Esta característica es especialmente importante en sistemas AMB, donde cambios bruscos en las corrientes de los electroimanes pueden inducir perturbaciones indeseadas o saturación en los actuadores.

### Resultados de la implementación

La Tabla 2 muestra la utilización de recursos de la FPGA para los diferentes módulos del sistema implementado. Como se puede observar, el módulo del controlador del le-

vitador magnético para los cuatro puntos de levitación del disco consumen la mayor proporción de recursos debido a las operaciones matriciales involucradas, particularmente en el cálculo de la matriz de covarianza y la ganancia de Kalman en el filtro de Kalman. AMB representa el total de los recursos utilizados en el proyecto.

**Tabla 2** – Utilización de recursos en FPGA

| Módulo        | LUTs (%) | Regs (%) |
|---------------|----------|----------|
| AMB           | 83.12    | 2.45     |
| LM_1          | 20.59    | 0.42     |
| LM_2          | 20.59    | 0.42     |
| LM_3          | 20.59    | 0.42     |
| LM_4          | 20.59    | 0.42     |
| XADC          | 0        | 0        |
| Antirebotes   | 0.17     | 0.07     |
| PWM_1         | 0.03     | 0.02     |
| PWM_2         | 0.03     | 0.02     |
| PWM_3         | 0.03     | 0.02     |
| PWM_4         | 0.03     | 0.02     |
| UART_TX       | 0.06     | 0.04     |
| Divisor_Frec. | 0.02     | 0.03     |

### Validación experimental

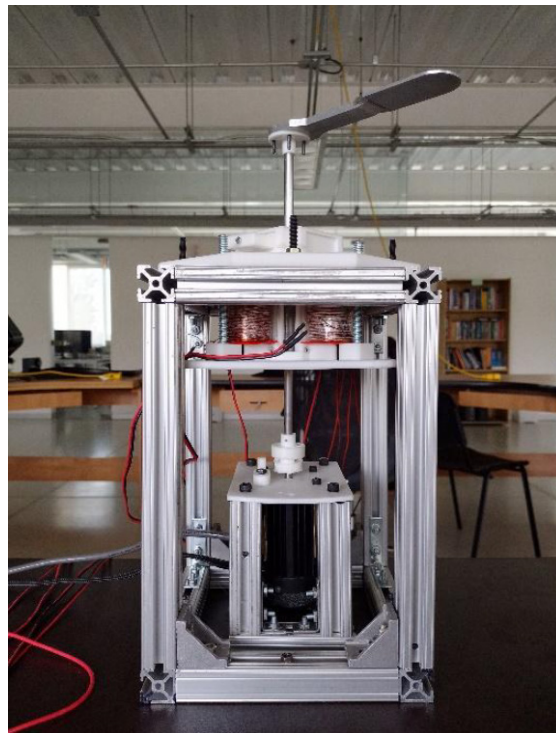
La validación experimental del controlador propuesto para la estabilización del levitador magnético en el sistema AMB se realizó mediante la construcción de un banco de pruebas de rodamiento Fig. 5. El cual fue desarrollado en [31]. Este banco permitió evaluar el desempeño del control y comparar los resultados experimentales con las simulaciones del sistema realizadas en Matlab/Simulink.

Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas de nivel de limpieza, ya que este trabajo formó parte de un proyecto más amplio: el diseño de un banco de pruebas de rodamiento AMB para un par cinemático de un robot SCARA, destinado a aplicaciones en cuartos limpios.

En este diseño, el eje del par cinemático es considerado como un péndulo invertido cuya posición es controlada por un AMB a través de la aplicación de fuerzas magnéticas generadas por dos pares de electroimanes.

El AMB está soportado por una estructura de aluminio que lo mantiene alineado con un servomotor colocado en la parte inferior. El eje del par cinemático descansa sobre el eje del servomotor cuando se encuentra apagado, este último transmite movimiento rotacional al sistema a través de un cople. Al iniciar el funcionamiento del sistema se activan los actuadores electromagnéticos para sostener el disco levitador.

En el extremo superior del eje se tiene un elemento radial que se desempeña como un efector terminal. Este componente se emplea para realizar diversas pruebas de repetibilidad y desbalance al AMB para evaluar su funcionamiento.



**Figura 5** – Prototipo desarrollado de un par cinemático rotacional que emplea un AMB.

Los componentes del sistema, exceptuando los electroimanes y el eje, se fabricaron mediante manufactura aditiva utilizando el proceso de modelado por deposición fundida (FDM). Como material de impresión, se eligió ácido poliláctico (PLA) debido a su idoneidad para entornos de alta limpieza. Estudios previos, como el citado en [32], han demostrado que las piezas fabricadas en PLA cumplen con los requisitos de limpieza establecidos para cuartos limpios de clase ISO 5, lo que valida su uso en este tipo de aplicaciones.

### Resultados

Para validar el desempeño del controlador propuesto para el levitador magnético, se realizaron pruebas tanto en simulación (*Matlab/Simulink*) utilizando el modelo propuesto como en el banco de pruebas experimental. Los ensayos se centraron en un escenario crítico: la respuesta transitoria del sistema al inicio de operaciones (*encendido/apagado*).

Esta sección presenta un análisis comparativo entre los resultados simulados y los obtenidos experimentalmente, destacando la eficacia del controlador en la estabilización del sistema y su robustez. Las gráficas incluidas ilustran las variables clave del sistema (posición del eje en cada uno de los cuatro puntos de levitación) en ambos contextos, junto con métricas cuantitativas como el tiempo de estabilización y el error en estado estacionario.

### Metodología de evaluación

Las pruebas de simulación en Matlab/Simulink replicaron fielmente las condiciones físicas del sistema AMB, inclu-

yendo la masa del eje y los parámetros electromagnéticos de los actuadores. Para las pruebas experimentales, se empleó el banco de pruebas construido Fig. 5, equipado con un sensor óptico de posición (resolución: 10  $\mu\text{m}$ ) y un actuador electromagnético controlado por PWM. Los datos se adquirieron directamente del sensor y se procesaron en una interfaz diseñada en Python para su comparación con las curvas simuladas, asegurando consistencia en las escalas de tiempo y amplitud.

### Respuesta transitoria (prueba ON/OFF)

La Fig. 6 muestra la respuesta simulada del levitador durante el arranque, la posición inicial del disco levitador se ubica a 4mm de distancia de la base del AMB y logra estabilizarse a 3mm, alcanza el estado estacionario en 0.179 s con un error de posición menor a 0.1 mm.

En contraste, los resultados experimentales Fig. 7 presentan un punto de estabilización en 2.2 mm, un tiempo de estabilización de 0.2 s con un error de posición también menor a 0.1 mm, atribuibles a retardos en lazo cerrado por el hardware (filtrado de señales del sensor).

A pesar de estas diferencias, ambos casos confirman la ausencia de oscilaciones sostenidas, permaneciendo solo una señal de ruido menor por parte del sensor, validando la estabilidad del sistema bajo el controlador propuesto.

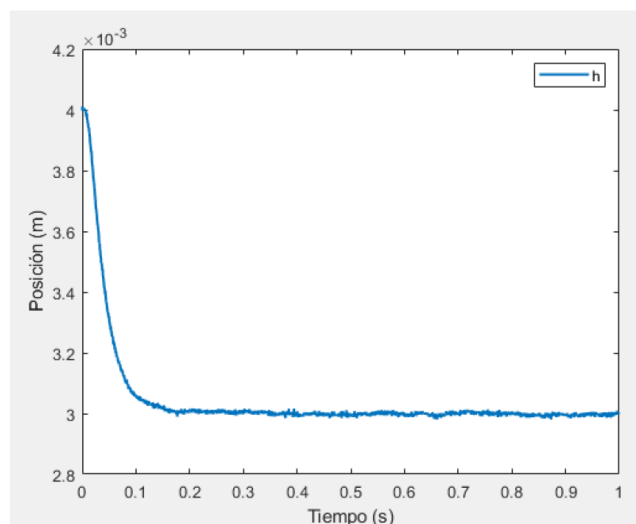


Figura 6 – Respuesta temporal del sistema simulada en Matlab/Simulink.

### Análisis comparativo

Las discrepancias entre simulación y experimentos (p. ej. +0.2 s en tiempo de estabilización) se atribuyen a fenómenos no lineales no considerados en el modelo teórico, como la histéresis magnética de los electroimanes y el ruido en la señal del sensor óptico. No obstante, el controlador demostró capacidad para mantener la estabilidad con errores inferiores a 0.5 mm, cumpliendo así los requisitos de precisión para el robot SCARA. Adicionalmente, la ausencia de lubricantes

mecánicos en el diseño garantiza que el sistema no genere contaminantes, crítico para entornos de alta limpieza.

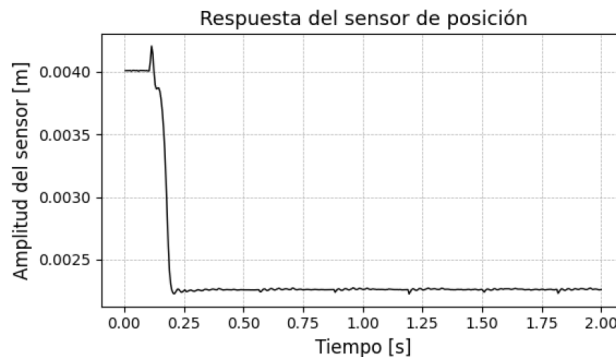


Figura 7 – Respuesta temporal experimental con el banco de pruebas.

En la Fig. 8 se presentan las señales de respuesta de los cuatro sensores de posición correspondientes a cada actuador. Se puede apreciar que el levitador 1 y el levitador 3 se estabilizan alrededor de 2.2 y 2.7 mm respectivamente, mientras que el levitador 2 y el levitador 4 se estabilizan en 1.7 mm para ambos casos, esto puede deberse a diferencias de ajuste en el rotor y el disco levitador. Sin embargo, se puede apreciar que el desempeño en general de los cuatro levitadores es uniforme.

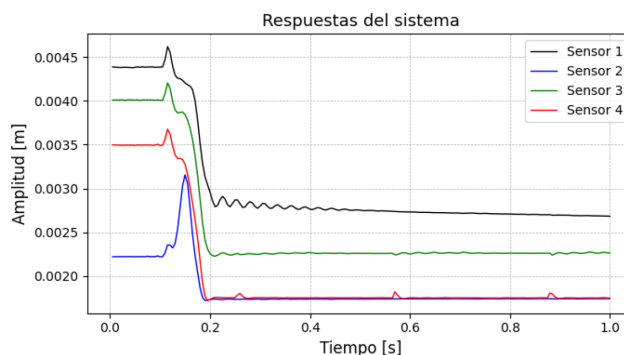


Figura 8 – Respuesta temporal del conjunto de cuatro levitadores magnéticos.

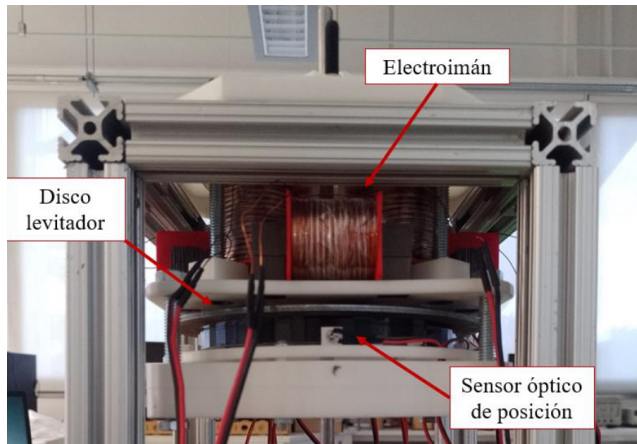
En la Fig. 9 se presenta una vista frontal a detalle donde se puede apreciar el disco levitador, el sensor de posición y los electroimanes que generan las fuerzas magnéticas.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos en simulación y en el banco de pruebas experimental demuestran la efectividad del controlador propuesto para estabilizar el sistema de levitación magnética en condiciones críticas de arranque y operación. A pesar de las discrepancias menores entre los datos simulados y experimentales atribuibles a no linealidades no modeladas, como la histéresis magnética y retardos en el hardware, el sistema logró mantener un desempeño estable, sin oscilaciones sostenidas y con errores de posición inferiores a 0.5 mm. Este nivel de precisión cumple con los requeri-



mientos operativos de un robot SCARA destinado a entornos de alta limpieza.



**Figura 9** – Vista frontal del conjunto rodamiento AMB a detalle de levitador magnético.

Además, la implementación sobre FPGA y el diseño sin componentes mecánicos con lubricación confirman la idoneidad del sistema para aplicaciones donde la ausencia de contaminantes es crítica. La uniformidad observada entre los cuatro levitadores, a pesar de ligeras variaciones en altura final, respalda la robustez del esquema de control implementado.

### Trabajos futuros

Como trabajo futuro, se propone refinar el modelo dinámico del sistema para incluir efectos no lineales relevantes, como la histéresis magnética y la dinámica del sensor, con el fin de mejorar la precisión de las simulaciones y reducir las discrepancias frente a los resultados experimentales. Asimismo, se plantea la incorporación de estrategias de control adaptativo o basadas en inteligencia artificial que permitan compensar en tiempo real las variaciones estructurales del levitador y mejorar la robustez ante perturbaciones externas.

Finalmente, se proyecta la integración del sistema en un prototipo funcional de robot SCARA en ambiente de sala limpia, lo cual permitirá validar el desempeño del levitador magnético en tareas reales de manipulación con requerimientos estrictos de limpieza y precisión.

### Referencias

- [1] G. Schweitzer and E. H. Maslen, *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. doi:10.1007/978-3-642-00497-1. SpringerLink
- [2] T. Higuchi, K. Oka, and H. Sugawara, “Clean room robot with non-contact joints using magnetic bearings,” *Advanced Robotics*, vol. 7, no. 2, pp. 105–119, Jan. 1992. doi:10.1163/156855393X00078. Taylor & Francis Online
- [3] M. Tantau, “Active Magnetic Bearing for Ultra Precision Flexible Electronics Production System,” 2014.
- [4] M. Ota, S. Andoh, and H. Inoue, “Mag-Lev semiconductor wafer transporter for ultra high vacuum environment,” in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB)*, Tokyo, Japan, Jul. 12–14, 1990, pp. 109–114. ResearchGate+1
- [5] R. P. Jastrzębski and O. Liukkonen, “Analysis of a Segmented Axial Active Magnetic Bearing for Multi-MW Compressor Applications,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2799–2809, Oct. 2023. doi:10.1109/TMECH.2023.3254812. ResearchGate
- [6] M. O. T. Cole, T. Hongphan, and C. Chamroon, “A high-efficiency magnetic suspension actuator with reluctance-balanced permanent magnet biasing and flux-based control,” *Mechatronics*, vol. 93, Aug. 2023, Art. 102988. doi:10.1016/j.mechatronics.2023.102988. lutpub.lut.fi
- [7] C. Chamroon, M. O. T. Cole, and W. Fakkaew, “Linearizing control of a distributed actuation magnetic bearing for thin-walled rotor systems,” *Actuators*, vol. 9, no. 4, Dec. 2020, Art. 99 (18 pp.). doi:10.3390/act9040099. finna.fi
- [8] G. Rong, L. Gang, and C. X. Yan, “Dynamic modeling and analysis of active magnetic bearings,” in *Applied Mechanics and Materials*, vols. 494–495, pp. 685–688, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.494-495.685. ResearchGate
- [9] R. Tiwari and A. Chougale, “Identification of bearing dynamic parameters and unbalance states in a flexible rotor system fully levitated on active magnetic bearings,” *Mechatronics*, vol. 24, no. 3, pp. 274–286, 2014. doi:10.1016/j.mechatronics.2014.02.010. Google Books
- [10] Y. Li and C. Zhu, “Multi-Objective Optimal Design of  $\mu$ -Controller for Active Magnetic Bearing in High-Speed Motor,” *Actuators*, vol. 12, no. 5, May 2023, Art. 206. doi:10.3390/act12050206.
- [11] M. A. Ahad, N. Iqbal, S. M. Ahmad, and M. Khan, “Detailed modelling and LQG/LTR control of a 2-DOF radial active magnetic bearing for rigid rotor,” *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 5, May 2021, Art. 234. doi:10.1007/s40430-021-02951-4.
- [12] E. A. Workeye, T. G. G/Meskel, and Y. K. T/Himanot, “Design of Genetic Algorithm Based Robust LQG Controller for Active Magnetic Bearing System,” in *Advances of Science and Technology, LNICST*, vol. 412, Springer, 2022, pp. 215–236. doi:10.1007/978-3-030-93709-6\_15. (Capítulo de ICAST 2021, Bahir Dar, Etiopía). SpringerLink

- [13] A. Mabrouk, O. Ksentini, N. Feki, M. S. Abbes, and M. Haddar, "LQR Optimization of an Eight-Pole Radial Active Magnetic Bearing System," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, 2023, pp. 606–615. doi:10.1007/978-3-031-14615-2\_68.
- [14] R. P. Jastrzębski, *Design and Implementation of FPGAs-Based LQ Control of Active Magnetic Bearings*. Lappeenranta, Finland: Lappeenranta Univ. of Technology, 2007. [Master's thesis]. ISBN 978-952-214-363-3. Disponible en: <https://lutpub.lut.fi> (acceso: 11-oct-2025).
- [15] [P. O. Jaatinen, R. P. Jastrzębski, T. Lindh, and O. Pyrhönen, "Implementation of a flux-based controller for active magnetic bearing system," in 2013 IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Bochum, Germany, 2013, pp. 141–145. doi:10.1109/INDIN.2013.6622872.
- [16] J. S. Wang, Y. Xu, and K. Zhang, "Design of Digital Control Platform for Magnetic Bearings Based on Multi-Core Architecture," in *Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems*, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 883, Springer, 2022, pp. 316–326. doi:10.1007/978-981-19-1181-1\_31.
- [17] M. Selmy, M. Fanni, and A. M. Mohamed, "Design and control of a novel contactless active robotic joint using AMB," in 2015 IEEE Int. Conf. on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), Vila Real, Portugal, May 2015, pp. 144–149. doi:10.1109/ICARSC.2015.12.
- [18] J. A. Calderón, D. E. Aragón, C. A. Perea, O. Melgarejo, J. C. Tafur, and B. Barriga, "Control Strategies for a Prototype of Active Magnetic Bearing System," in *Proceedings—2016 International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, Chengdu, China, Jan. 2017, pp. 22–26. doi:10.1109/CRC.2016.14. ResearchGate
- [19] M. H. A. Yaseen and H. J. Abd, "Modeling and control for a magnetic levitation system based on SIMLAB platform in real time," *Results in Physics*, vol. 8, pp. 153–159, Mar. 2018. doi:10.1016/j.rinp.2017.11.026. ACM Digital Library
- [20] X. Ling, H. Xiwu, C. Wenjie, and L. Ming, "Structural optimization and dynamic characteristics of the new type 3-degrees of freedom axial and radial hybrid magnetic bearing," *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, vol. 236, no. 9, pp. 5097–5110, 2022. doi:10.1177/09544062211052826. bu.edu.sg
- [21] T. Du, H. Geng, Y. Sun, H. Lin, H. Lv, and L. Yu, "Design and implement of a low cost control system of active magnetic bearings using LabVIEW Interface for Arduino," in 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, Aug. 2017, pp. 1833–1837. doi:10.1109/ICMA.2017.8016096.
- [22] M. Selmy, M. Fanni, and A. M. Mohamed, "Macro/micro-positioning control and stability analysis of contactless active robotic joint using active magnetic bearing," in 2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), Coimbra, Portugal, 2017, pp. 23–29. doi:10.1109/ICARSC.2017.7964047. ieee-ras.org
- [23] Y. He, et al., "Research on Motion Simulation of Wafer Handling Robot Based on SCARA," in *Proceedings—2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Shanghai, China, 2018, pp. 734–739. doi:10.1109/ICEPT.2018.8480663. icept.org
- [24] M. Keller, G. Baum, M. Schweizer, F. Bürger, U. Gommel, and T. Bauernhansl, "Optimized Robot Systems for Future Aseptic Personalized Mass Production," *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 303–309, 2018. doi:10.1016/j.procir.2018.03.066. proceedings.com
- [25] A. H. Pesch, A. Smirnov, O. Pyrhönen, and J. T. Sawicki, "Magnetic bearing spindle tool tracking through  $\mu$ -synthesis robust control," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1448–1457, Jun. 2015. doi:10.1109/TMECH.2014.2344592. ResearchGate
- [26] A. M. Benomair and M. O. Tokhi, "Nonlinear full-order observer-based controller design for active magnetic levitation via LQR-feedback linearisation," *Int. J. Modelling, Identification and Control*, vol. 26, no. 1, pp. 59–67, 2016. doi:10.1504/IJMIC.2016.077738. dblp.org
- [27] T. Soni, J. K. Dutt, and A. S. Das, "Parametric Stability Analysis of Active Magnetic Bearing Supported Rotor System with a Novel Control Law Subject to Periodic Base Motion," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 67, no. 2, pp. 1160–1170, Feb. 2020. doi:10.1109/TIE.2019.2898604. search.library.doc.gov
- [28] S. T. Fleming and D. B. Thomas, "FPGA based control for real time systems," in 2013 23rd International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL), Porto, Portugal, Sept. 2013, pp. 1–2. doi:10.1109/FPL.2013.6645610. fpl.org+1
- [29] J. J. Rodríguez-Andina, M. J. Moure, and M. D. Valdes, "Features, design tools, and application domains of FPGAs," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 1810–1823, Aug. 2007. doi:10.1109/TIE.2007.898279. ResearchGate

- [30] Digilent Inc., “Nexys A7 FPGA Board Reference Manual.” [Online]. Available: <https://digilent.com/reference/programmable-logic/nexys-a7/reference-manual> (accessed: Oct. 11, 2025). digilent.com
- [31] L. G. Bautista Cruz, L. A. González González, E. González Mendoza, and W. Torrestiana González, “Validación experimental de un par cinemático rotacional que emplea un Rodamiento Magnético Activo,” Memorias del XXX Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Querétaro, México, Sept. 25–27, 2024, Tema A3f, pp. 1–8 (código A3-129). [Online]. Available: [https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/M/A3\\_129.pdf](https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/M/A3_129.pdf) (accessed: Oct. 11, 2025). Somim
- [32] T. P. Pasanen, G. von Gastrow, I. T. S. Heikkinen, V. Vähänissi, H. Savin, and J. M. Pearce, “Compatibility of 3-D printed devices in cleanroom environments for semiconductor processing,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 89, pp. 59–67, Jan. 2019. doi:10.1016/j.mssp.2018.08.027.