

Desarrollo de un par cinemático rotacional con rodamientos magnéticos activos para su aplicación en robots para cuartos limpios

Walter Torrestiana-González¹, Emmanuel González-Mendoza¹, Luis Gerardo Bautista-Cruz¹, Leopoldo Adrián González-González¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Email: waltert@comunidad.unam.mx

Resumen

El presente trabajo investiga el uso de rodamientos magnéticos activos (AMB por sus siglas en inglés) para reducir partículas contaminantes en entornos que requieren de ultra limpieza, como los "cuartos limpios". Los AMB no requieren lubricación ni generan desgaste, eliminando fuentes comunes de contaminación. El estudio se centra en desarrollar un par cinemático para un robot SCARA usando AMBs, incorporando un controlador LQG, programación en FPGA del algoritmo de control y un diseño mecánico específico. Se realizaron pruebas en una cámara de flujo laminar controlada, evaluando precisión, repetibilidad y limpieza mediante un contador de partículas. Los resultados mostraron una significativa reducción de partículas contaminantes, validando la efectividad de los AMB. Este avance mejora la limpieza en entornos industriales y abre nuevas posibilidades para su uso en sectores donde la contaminación por partículas es crítica.

Palabras clave: Control LQG, Rodamientos AMB, FPGA, Cuartos limpios.

Abstract

The present work investigates the use of Active Magnetic Bearings (AMB) to reduce contaminant particles in environments that require ultra-cleanliness, such as clean rooms. AMBs do not require lubrication or generate wear, eliminating common sources of contamination. The study focuses on developing a kinematic pair for a SCARA robot using AMBs, incorporating an LQG controller, FPGA programming of the control algorithm, and a specific mechanical design. Tests were conducted in a controlled laminar flow chamber, evaluating precision, repeatability, and cleanliness using a particle counter. The results showed a significant reduction in contaminant particles, validating the effectiveness of AMBs. This advancement improves cleanliness in industrial environments and opens up new possibilities for their use in sectors where particle contamination is critical.

Keywords: LQG Control, AMB bearings, FPGA, Cleanrooms.

1. Introducción

La idea de utilizar imanes para suspender cuerpos metálicos mediante un campo magnético con la finalidad de lograr una suspensión libre de contacto se ha presentado en un sinnúmero de trabajos [1-3]. El principio de funcionamiento de estos sistemas es lograr una suspensión libre de contacto mediante la manipulación del campo magnético generado al controlar la dinámica de un electroimán y mantener en

levitación magnética al objeto deseado, en esta aplicación específica un rotor dentro de un rodamiento magnético activo, (AMB por sus siglas en inglés) [4]. En la actualidad no pueden negarse las ventajas que existen en utilizar AMBs en comparación con rodamientos tradicionales, tales como no tener contacto físico entre dos partes que rotan, como por ejemplo el rotor y el rodamiento, debido a esto no existe fricción entre ambas partes por lo que no requiere de lubricación, además, la durabilidad de las

piezas sin desgaste por contacto físico es superior [5-6]. Los AMBs son apropiados en varias aplicaciones a nivel industrial debido a sus beneficios tales como: tolerancia a la vibración y a las perturbaciones externas, no necesitar de lubricación, buena durabilidad de las piezas debido al nulo desgaste, bajos costos de mantenimiento, alta productividad y fiabilidad [7-10]. Otra de las ventajas es que el rotor puede girar a grandes velocidades sin perder precisión en su posición [11-13]. Debido a que los AMBs son sistemas altamente no lineales e inestables en su funcionamiento en lazo abierto, se requiere de un lazo de control retroalimentado que garantice la funcionalidad de manera estable y resistente a perturbaciones externas del sistema. Al utilizar un control en lazo cerrado se puede estabilizar al rotor en una posición precisa de funcionamiento aun si la carga en el rotor varía, ya que la fuerza electromagnética en el electroimán es la variable de control [14].

Los sistemas AMB emplean una combinación de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, por ejemplo, sensores, rotor, amplificadores de potencia, tarjetas de adquisición de datos, sistemas de control embebido y electroimanes, todos en conjunto representando un sistema mecatrónico complejo. En [15] Se presenta el procedimiento de modelado de un AMB de dos grados de libertad y se describe el modelado de orden reducido y control del rotor mediante un controlador PID. Sin embargo, los autores consideran únicamente el modelo mecánico y no incluyen la información electrónica del sistema. En otros trabajos se ha estudiado y presentando el efecto de utilizar una estrategia de control descentralizada y como los efectos de las no linealidades de la fuerza radial del AMB afectan al funcionamiento del sistema [16-17]. En [18] se utiliza un actuador electromagnético de tipo homopolar y se utiliza un controlador PD para control de posición del rotor del AMB. El diseño de un controlador basado en la teoría de rechazo activo de perturbaciones y su comparación con un controlador PID es presentado en [19]. En el trabajo presentado en [20] se propone un método para utilizar un AMB en ejes que giran en rodamientos convencionales, los autores estudiaron el efecto de la relación entre dimensiones del AMB y los rodamientos convencionales. En [21] se presenta un enfoque alternativo para la posición del sensor en sistemas AMB, afirmando que se reduce el costo y la complejidad del sistema, además de obtener ventajas dinámicas debido a la colocación del sensor y el actuador.

En el presente trabajo de investigación se propone el uso de un Rodamiento Magnético Activo en un par cinemático rotacional enfocado a bajas velocidades, se presenta el diseño de un prototipo del AMB fabricado con PLA (Ácido Poliláctico) empleando manufactura aditiva mediante el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM), y se evalúa el desempeño

del sistema a partir de pruebas de repetibilidad y limpieza de acuerdo con normas ISO vigentes.

2. Descripción del sistema

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 (figura 1).

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, este último transmite movimiento rotacional al sistema a través de un cople.

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.

En el prototipo presentado se emplea una estrategia de control LQG (Lineal Cuadrático Gausiano), la cual es una técnica de control óptimo que ha demostrado ser adecuada para este tipo de sistemas no lineales que pueden ser linealizados en un punto de equilibrio, en este caso, el punto de equilibrio es cuando el rotor permanece centrado entre los dos pares de electroimanes que estabilizan dicha posición mediante electromagnetismo. Se ha verificado que este enfoque de control estabiliza correctamente al sistema descrito y presenta un buen desempeño frente a perturbaciones.

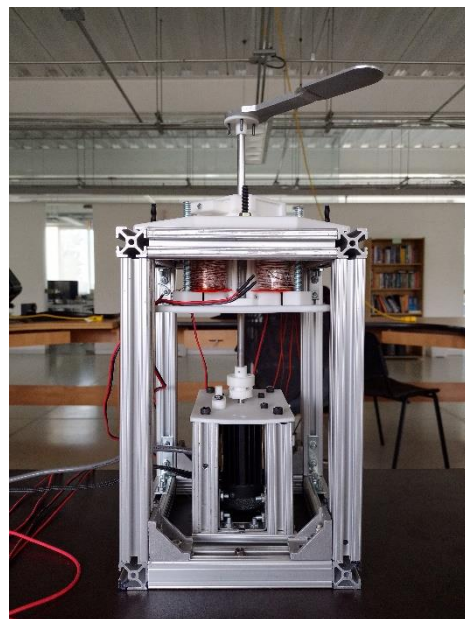
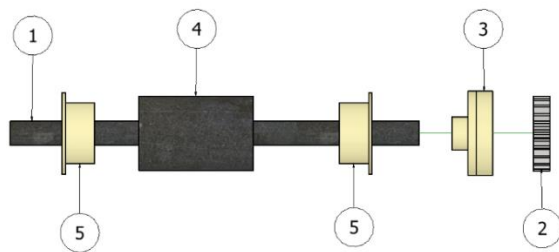


Figura 1. Prototipo desarrollado de un par cinemático rotacional que emplea un AMB.

2.1 Diseño mecánico

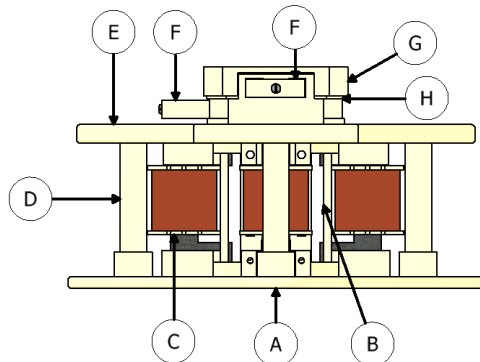
Para el diseño del prototipo del par cinemático rotacional se consideraron dos sistemas: el sistema eje (Figura 2) que se encarga de transmitir el movimiento rotacional desde el servomotor hasta el efector terminal, y el sistema radial (Figura 3) que se encarga de contener los componentes del AMB.

Los elementos de los dos sistemas, a excepción de los electroimanes y el eje, se fabricaron en manufactura aditiva mediante el proceso de FDM. Se seleccionó PLA para la fabricación de los elementos. Se han realizado estudios del PLA para aplicaciones limpias, como el publicado en [22], en su trabajo obtuvieron resultados que permiten validar que piezas fabricadas en PLA alcanzan los estándares de limpieza de un cuarto limpio ISO clase 5.



Número	Elemento
1	Eje principal
2	Cople eje servomotor
3	Cople eje primario-servomotor
4	Eje secundario
5	Cople ejes

Figura 2. Sistema eje.



Letra	Elemento
A	Base inferior
B	Soporte frontal
C	Electroimán
D	Soporte axial
E	Base superior
F	Porta sensor
G	Tapa sensores
H	Base porta sensor

Figura 3. Sistema Radial.

2.2 Sensores y actuadores

Los sensores de posición empleados en el prototipo desarrollado son del tipo óptico. Se emplea un sensor para cada dirección de control del AMB.

Cada sensor está constituido por un LED infrarrojo y un fototransistor. Estos elementos se encuentran alineados uno frente a otro dentro del porta sensor indicado en la Figura 3. Entre estos dos componentes electrónicos hay un espacio por donde pasa el eje del par cinemático rotacional (Figura 4). De esta manera, cuando el eje presenta algún desplazamiento horizontal, la cantidad de luz infrarroja que el fototransistor recibe varía y se puede determinar su posición a partir del cambio en el voltaje del fototransistor.

Se determinó experimentalmente que el rango de lectura del sensor de posición es de ± 1 mm con una resolución de 0.00074 mm.

Por otro lado, los elementos actuadores del sistema son cuatro electroimanes con núcleo en forma de "C" como el que se muestra en la Figura 5. Durante el desarrollo de este proyecto fue posible observar que esta forma del núcleo de los electroimanes permite concentrar mejor el flujo magnético generado logrando así incrementar la fuerza magnética aplicada al eje.

Cada uno de los electroimanes es energizado a través de un circuito amplificador que emplea un MOSFET de potencia. Este circuito es controlado a través de una señal PWM (Pulse-Width Modulation).

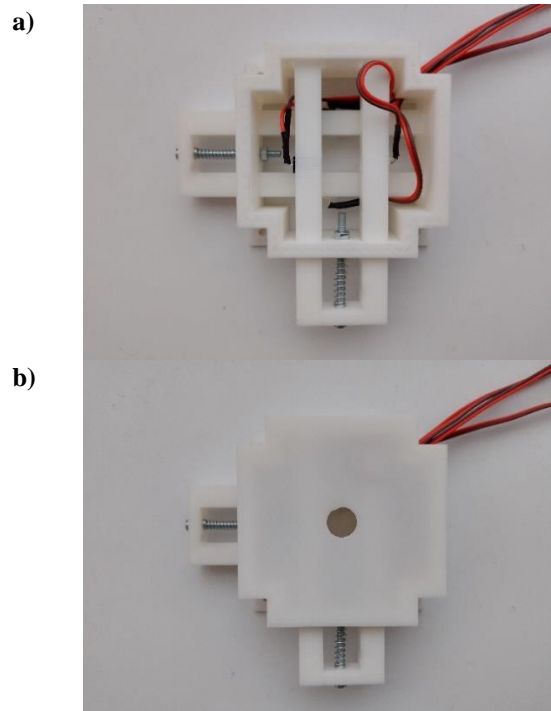


Figura 4. Base porta sensores (Vista superior). a) Base sin tapa; b) Base con tapa.



Figura 5. Electroimán utilizado en el prototipo del AMB.

2.3 Controlador

El AMB requiere de un controlador que ajuste la intensidad de las fuerzas magnéticas generadas por los electroimanes de manera que el eje del par cinemático rotacional se mantenga estable al centro del rodamiento. Para esta tarea se empleó un controlador LQG descentralizado en el que se aplican dos controladores en configuración diferencial, uno para cada eje de desplazamiento como se muestra en la figura (6), cuyo punto de equilibrio es cuando el eje se encuentra completamente vertical. Para el diseño y ajuste de parámetros del controlador se obtuvo el modelo matemático del sistema no lineal, el cual se presenta en la ecuación (1). Posteriormente el sistema es linealizado en el punto de equilibrio, el vector de estado se define en la ecuación (2), las variables de estado son la posición del rotor, velocidad de desplazamiento del rotor, corriente de electroimán izquierdo y corriente de electroimán derecho. El controlador es ajustado acorde a la función de costo ecuación (3), los parámetros de las matrices Q y R ecuación (4) y ecuación (5) respectivamente son ajustados acorde a las necesidades del sistema dando prioridad a la posición del rotor.

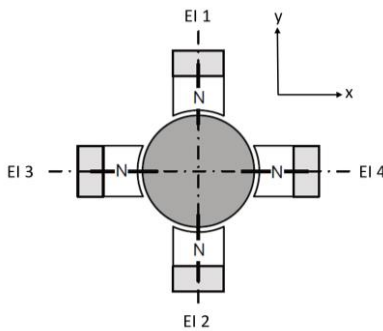


Figura 6. Configuración de polos del AMB.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \frac{b\dot{\theta} - glm(\sin\theta) + \frac{c_L i_L^2 \cos\theta}{2(d_L + l\sin\theta)^2} - \frac{c_R i_R^2 \cos\theta}{2(d_R - l\sin\theta)^2}}{I + l^2 m(\cos\theta)^2 + l^2 m(\sin\theta)^2} \\ \frac{u_L - R_L i_L}{L_L} \\ \frac{u_R - R_R i_R}{L_R} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_L \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R = 1 \quad (5)$$

En la figura 7 se presenta un diagrama de bloques del control por retroalimentación de estados con estimador filtro de Kalman (control LQG).

La señal de control que se aplica a la etapa de potencia de los electroimanes consiste en una señal PWM de ciclo de trabajo variable. De esta manera, la fuerza de origen magnético generada por los electroimanes es mayor conforme se incrementa el ciclo de trabajo de la señal PWM.

Dado que se requiere que el eje del rodamiento tenga rigidez cuando se encuentra en el punto de equilibrio, es necesario agregar a la señal determinada por el controlador LQG un valor constante que genere en los electroimanes una fuerza fija. La magnitud de esta fuerza constante permite determinar la carga radial máxima que el AMB puede soportar.

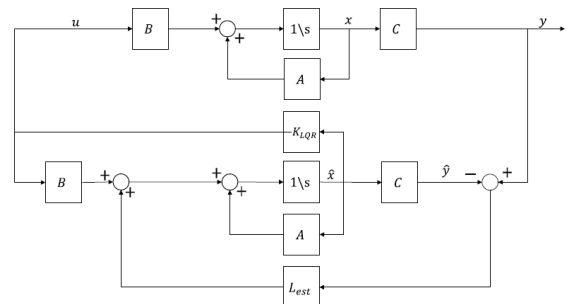


Figura 7. Diagrama de bloques control LQG.

3. Pruebas de repetibilidad

Para validar la funcionalidad del AMB, se desarrolló un protocolo de pruebas de repetibilidad tomando como base la norma ISO 9283, donde se establecen lineamientos que se requieren seguir para caracterizar una articulación robótica respecto a la repetibilidad. El protocolo de pruebas consta de tres etapas; etapa de preparación, etapa de pruebas experimentales y etapa de resultados.

3.1 Etapa de preparación

Para la parte de preparación se proponen los siguientes pasos:

- Inspección visual: Examinar el Rodamiento Magnético Activo en busca de daños visibles, conexiones sueltas o cualquier anomalía.
- Revisión de conexiones eléctricas: Asegurarse de que todas las conexiones eléctricas estén correctamente conectadas y aseguradas.
- Conexión a la fuente de alimentación: Conectar el Rodamiento Magnético Activo a la fuente de alimentación.
- Prueba de funcionamiento básica: Encender el Rodamiento Magnético Activo y observar su comportamiento. Asegúrese de que el rodamiento funcione correctamente y que no haya vibraciones excesivas, ruidos inusuales o calentamiento excesivo.
- Control: Asegurarse de que el rodamiento responda a las señales de control de manera adecuada.
- Prueba de carga: Aplicar una carga simulada y observe el rendimiento del rodamiento bajo esta condición.

3.2 Etapa de pruebas experimentales y resultados

3.2.1 Definición del espacio de trabajo

Se estableció el espacio de trabajo, que se refiere al volumen tridimensional dentro del cual el extremo el efector terminal puede operar y moverse. Para definirlo es necesario establecer los marcos de referencia del AMB. En la Figura 8 se muestran los marcos de referencias y en la Figura 9 se muestra el espacio de trabajo del AMB.

3.2.2 Carga máxima

Se colocaron pesos incrementales de 10 gramos en el origen del marco de referencia X_1 , Y_1 y Z_1 ubicado sobre el efector terminal, se calcularon las desviaciones provocadas por los pesos y se observó que el sistema es muy sensible ante las cargas que se aplicaron, los datos se muestran en la Tabla 1.

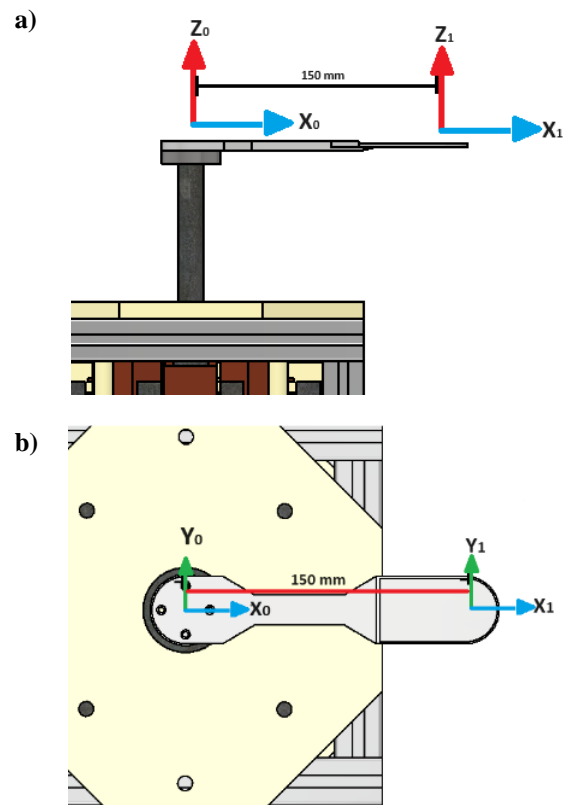


Figura 8. Marcos de referencia del AMB. a) Vista lateral; b) Vista superior.

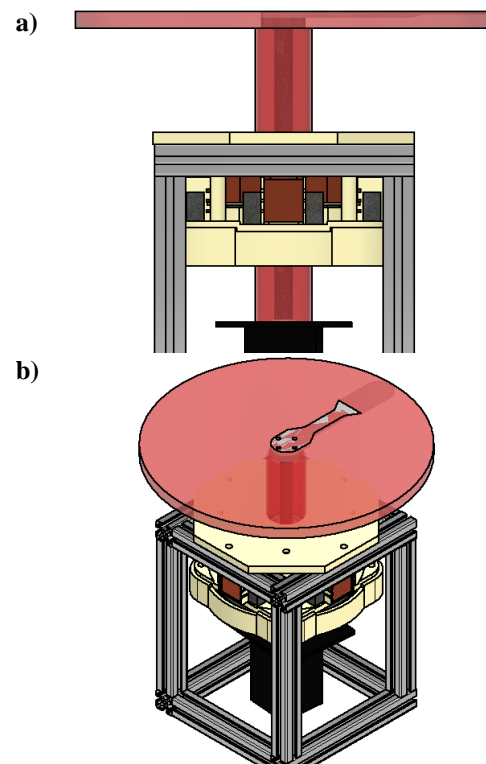


Figura 9. Espacio de trabajo del AMB. a) Vista lateral; b) Vista isométrica.

Tabla 1 – Peso y desplazamiento.

Peso [g]	Desplazamiento [μm]
0	83.93
10	178.73
20	258.66
30	349.85
40	449.98
50	536.39
60	635.07
70	705.72
80	817.85
90	950.73
100	1029.67

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Velocidad máxima

Se varió la velocidad del servomotor incrementando 5 RPM, se obtuvieron muestras que proporcionan los sensores de posición del eje X_0 y Y_0 , para verificar el desplazamiento del eje mientras rota, se obtuvo que la velocidad de funcionamiento máximo del AMB es de 20 RPM.

3.2.4 Repetibilidad

Se realizaron pruebas para calcular la repetibilidad de encendido y de posicionamiento del efector terminal utilizando un indicador de carátula y el sistema de sensores del control. Para las pruebas de repetibilidad de encendido se colocó el indicador de carátula como se muestra en la Figura 10, mientras el AMB se encontraba funcionando y se ajustó a 0 el indicador de carátula para indicar que ese es el valor de referencia.



Figura 10. Indicador de carátula montado en el efector terminal.

Se apagó y encendió el sistema de control del AMB durante 30 ciclos, como establece en la norma ISO 9283 para validar la repetibilidad de encendido, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Para las pruebas de repetibilidad de posicionamiento, con el AMB encendido se colocó el indicador de carátula en la posición mostrada en la Figura 11. Esta posición se eligió debido a que al colocar el indicador de carátula alineado al eje Y_1 , y ajustarlo, se generaba un momento que el AMB no es capaz de contrarrestar lo que provocaba que el eje saliera de la referencia X_0 , Y_0 y Z_0 . Con esta posición se aseguraba que el eje se mantenía alineado al origen. Una vez definido el nuevo marco de referencia X_1 , Y_1 y Z_1 , se procedió a girar -90° sobre el eje Z_0 y regresar al origen para obtener los datos de repetibilidad de posicionamiento del efector terminal.

Este procedimiento se repitió 30 ciclos. El procedimiento de repetibilidad de posicionamiento se repitió con un giro de -180° para validar los resultados obtenidos, los datos se muestran en la Tabla 2.

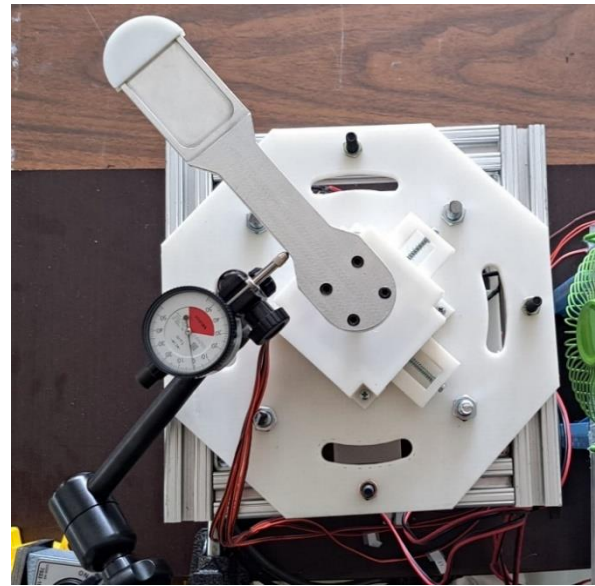


Figura 11. Indicador de carátula colocado para pruebas de repetibilidad de posicionamiento.

Para calcular la repetibilidad se emplearon las ecuaciones (6) a (10) las cuales se encuentran establecidas en la norma ISO 9283 [23] y [24].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (6)$$

$$l_{x_j} = |x_j - \bar{x}| \quad (7)$$

$$\bar{l}_x = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{x_j} \quad (8)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{xj} - \bar{l}_x)^2}{n-1}} \quad (9)$$

$$RP_x = \bar{x} + 3S_x \quad (10)$$

Tabla 2 – Datos de repetibilidad de encendido del AMB y posicionamiento del efector terminal.

Ciclo	Repetibilidad de encendido			Repetibilidad de posicionamiento	
	X ₀	Y ₀	Z ₀	Y ₁ a 90°	Y ₁ a 180°
1	-182.435	543.540	0	0	2
2	-182.391	543.351	1	2	2
3	-180.708	543.600	0	3	2
4	-183.479	544.403	2	0	3
5	-185.592	541.861	0	0	3
6	-181.990	539.524	1	0	3
7	-181.572	540.693	1	0	2
8	-180.737	545.837	0	1	4
9	-181.672	540.460	1	0	3
10	-181.700	541.199	0	0	1
11	-182.925	543.536	0	1	2
12	-183.737	544.532	1	0	1
13	-179.576	541.909	0	0	3
14	-183.242	544.652	0	4	3
15	-184.415	544.448	0	1	4
16	-187.339	545.64	0	3	3
17	-184.961	542.978	0	4	1
18	-179.612	543.757	0	4	3
19	-183.974	540.171	0	0	3
20	-181.544	544.102	0	1	1
21	-181.311	540.291	0	1	3
22	-178.793	541.444	0	0	2
23	-180.210	544.436	0	0	3
24	-183.251	541.231	0	0	0
25	-183.801	540.215	0	0	0
26	-178.307	541.757	0	3	3
27	-181.961	543.062	2	4	2
28	-180.969	540.030	1	4	4
29	-180.267	544.468	0	1	1
30	-188.07	540.709	0	1	0
Repeti-bilidad	6.888	5.575	1.819	5.923	5.728

Fuente: elaboración propia.

4. Pruebas de limpieza

Para realizar las pruebas de limpieza, se requiere conocer las condiciones que establece la norma ISO 14644-1 para preparar el experimento de muestreo. La primera es conocer el área de la Campana de Flujo Laminar (CDFL). La base de la CDFL que se muestra en la Figura 12 tiene dimensiones de 1.2 por 0.6 metros, lo que equivale a un área de 0.72 metros cuadrados. De acuerdo con la norma ISO 14644-1, el número de muestras que se deben obtener para establecer el Nivel de Limpieza es 1 (NL), sin embargo, también menciona que se pueden realizar más mediciones en puntos que se consideren críticos. Para el presente trabajo se midió la concentración de partículas en las tres ubicaciones que se muestran en la Figura 11.



Figura 12. Ubicaciones de muestreo de Nivel de Limpieza.

Los resultados de las mediciones en las tres ubicaciones de la Campana de Flujo Laminar indicaron que dentro de la campana se alcanza el nivel de limpieza requerido para ser considerado ISO clase 5. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentración promedio de partículas al interior de la campana de flujo laminar.

Ubicación	Concentración de partículas por metro cúbico	
	0.3 μm	0.5 μm
1	0	0
2	0	0
3	0	0

Fuente: elaboración propia.

Se limpió el AMB con alcohol isopropílico y toallas de microfibras como recomienda Mathia [25] y se montó al interior de la CDFL. Se repitió el proceso de preparación que se desarrolló para las pruebas de repetibilidad para verificar el correcto funcionamiento del AMB.

Se encendió el sistema de ventilación y se dejó funcionando durante 10 minutos. Posteriormente se midió la concentración de partículas en la ubicación 3 para validar el nivel de limpieza al interior y se aseguró que la concentración de partículas al interior de la campana era 0 de 0.3 y 0.5 micras.

Para las pruebas de limpieza, se seleccionaron las ubicaciones que se muestran en las figuras (13), (14) y (15). Se encendió el sistema de transmisión para rotar el efector terminal y se midió la concentración de partículas mientras el AMB se encontraba funcionando.

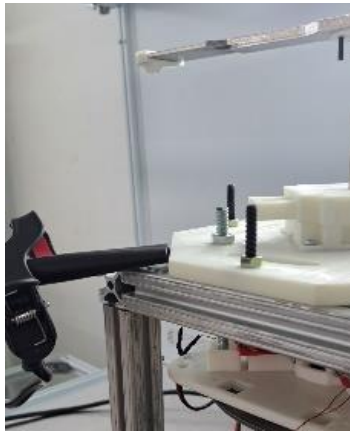


Figura 13. Ubicación 1 para medir la concentración de partículas.



Figura 14. Ubicación 2 para medir la concentración de partículas.



Figura 15. Ubicación 3 para medir la concentración de partículas.

En cada ubicación se midió la concentración durante 1 hora, durante 3 días, los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración promedio de partículas por ubicación.

Ubicación	Concentración de partículas por metro cúbico	
	0.3 μm	0.5 μm
1	45	0
2	239	18
3	61	14

Fuente: elaboración propia.

5. Resultados

Las pruebas de repetibilidad permiten verificar que el par cinemático rotacional tiene la capacidad de alcanzar con gran precisión una posición establecida. Con los datos obtenidos, se observa que la repetibilidad de encendido alcanza un valor menor a las 7 micras en cada eje, lo cual indica que el sistema tiene una alta repetibilidad. No se pueden comparar los resultados obtenidos dado que los AMB generalmente se implementan en turbomaquinaria o la industria aeroespacial, se han realizado propuestas de AMB para aplicaciones en robótica, pero no se han generado prototipos que permitan generar una comparación respecto a los valores de repetibilidad de encendido.

La repetibilidad de posicionamiento del efector terminal alcanza un valor de 6 micras, esto indica que el sistema tiene una alta repetibilidad de posicionamiento, característica de gran relevancia en aplicaciones de robótica.

La precisión absoluta de encendido del AMB alcanza un valor de 3.015 micras mientras que la de posicionamiento alcanza un valor de 1.940 micras. Los robots SCARA comerciales como es el caso de un robot SCARA Yamaha YK-TG Series alcanza una precisión absoluta de ± 20 micras, lo cual hace muy atractiva la implementación de un AMB en aplicaciones robóticas.

Las pruebas de limpieza permiten observar que las piezas fabricadas en manufactura aditiva, con el proceso de FDM en PLA, alcanzan un nivel de limpieza ISO clase 5. Los resultados de concentración absoluta de partículas por metro cúbico del AMB son de 115 de 0.3 micras y 10 de 0.5 micras, que en comparación con los límites de un cuarto limpio ISO clase 5, cuyos valores son 10,200 partículas por metro cúbico de 0.3 micras de tamaño y 3,520 partículas por metro cúbico de 0.5 micras de tamaño, se encuentran en valores de limpieza aceptables después de 9 horas de trabajo en total, es decir, durante los 3 días que se contabilizaron las partículas.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de las diversas pruebas realizadas empleando el prototipo del par cinemático rotacional propuesto indican que el sistema cuenta

con una alta repetibilidad y precisión de posicionamiento de encendido y de posicionamiento del efector terminal. Estos resultados se alcanzaron al implementar un protocolo de pruebas de funcionamiento basado en la norma ISO 9283. La finalidad de reducir las dimensiones de un AMB es la implementación en articulaciones robóticas y por la alta repetibilidad que se alcanzó con el prototipo desarrollado en el presente trabajo, se puede considerar como una alternativa para sustituir los rodamientos ultra limpios implementados en las articulaciones robóticas. Cabe mencionar que las dimensiones del prototipo aún se pueden reducir, de igual manera es posible adaptar el control del AMB para que tenga una mejor respuesta ante cargas externas como las aplicadas en el efector terminal.

Las piezas fabricadas en PLA presentan una buena respuesta respecto a la liberación de partículas. La manufactura aditiva permite fabricar piezas con geometrías complejas y que por las características de limpieza que se alcanzaron, son atractivas para aplicaciones limpias, ya que permiten reducir costos de fabricación y generar prototipos de manera rápida. Para validar los niveles de limpieza del AMB se desarrolló un protocolo de pruebas de limpieza, partiendo de los requerimientos de la norma ISO 14 644-1, que permitieron verificar que se cumplen con los estándares de limpieza en un cuarto limpio ISO clase 5.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la DGAPA de la Universidad Nacional Autónoma de México el apoyo otorgado mediante el proyecto PAPIIT IT101321 “*Desarrollo de un par cinemático rotacional con rodamientos magnéticos activos para su aplicación en Robots para Cuartos Limpios (Cleanroom Robots)*”.

7. Referencias

- [1] Arredondo, I., Jugo, J., Alonso-Quesada, S., Lizarraga, I., & Etzebarria, V. (2008). Modeling, analysis and control of active magnetic bearings systems. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 5(4).
- [2] Binder, A., Sabirin, C., Popa, D., & Craciunescu, A. (2007). Modeling and digital control of an Active Magnetic Bearing System. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques Serie Electrotechnique Et Energetique*, 52(2), 157.
- [3] Huang, J., Wang, L., & Huang, Y. (2007). Continuous Time Model Predictive Control for a Magnetic Bearing System. *PIERS Online*, 3(2), 202–208.
- [4] Huang, T., Zheng, M., & Zhang, G. (2019). A Review of Active Magnetic Bearing Control Technology. *Proceedings of the 31st Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2019*, 2888–2893.
- [5] Hung, J. Y. (1995). Magnetic Bearing Control Using Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6), 1492–1497.
- [6] Husain, A. R., Ahmad, M. N., & Yatim, A. H. M. (2007). Deterministic models of an active magnetic bearing system. *Journal of Computers*, 2(8), 9–17.
- [7] Ji, J. C., Hansen, C. H., & Zander, A. C. (2008). Nonlinear dynamics of magnetic bearing systems. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(12), 1471–1491.
- [8] Lindlau, J. D., & Knospe, C. R. (2002). Feedback linearization of an active magnetic bearing with voltage control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(1), 21–31.
- [9] Meressi, T., & Kao, M. C. (2006). Modeling and control of a magnetic levitation system. *Proceedings of the Eight IASTED International Conference on Control and Applications*, 2006(2), 48–51.
- [10] Raghunathan, P., & Logashanmugam, E. (2018). Position servo controller design and implementation using low cost eddy current sensor for single axis active magnetic bearing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 0(0), 0.
- [11] Rong, G., Gang, L., & Yan, C. X. (2014). Dynamic modeling and analysis of active magnetic bearings. *Applied Mechanics and Materials*, 494–495, 685–685.
- [12] Sun, Z., He, Y., Zhao, J., Shi, Z., Zhao, L., & Yu, S. (2014). Identification of active magnetic bearing system with a flexible rotor. In *Mechanical Systems and Signal Processing* (Vol. 49, Issues 1–2, pp. 302–316).
- [13] Xu, Y., Shen, Q., Zhang, Y., Zhou, J., & Jin, C. (2020). Dynamic modeling of the active magnetic bearing system operating in base motion condition. *IEEE Access*, 8, 166003–166013.
- [14] Yaseen, M. H. A., & Abd, H. J. (2018). Modeling and control for a magnetic levitation system based on SIMLAB platform in real time. In *Results in Physics* (Vol. 8, pp. 153–159).
- [15] Polajzer B (1999) “Modeling and control of horizontal shaft magnetic bearing system” in *ISIE*

99. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No. 99TH8465): IEEE, 3 1051-1055.
- [16] Polajzer B, Ritonja J, Stumberger G, Dolinar D, Lecoite J-P (2006) "Decentralized PI/PD position control for active magnetic bearings" *Electr Eng* 89(1):53-59.
- [17] POLajzer B, Ritonja J, and DOLinar D (2010) "Impact of radial force nonlinearities on decentralized control of magnetic bearings." In the XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010: IEEE, 1-4.
- [18] Zhong W, Palazzolo A (2015) "Magnetic bearing rotordynamic system optimization using multi-objective genetic algorithms" *J Dyn Syst MEas Control* 137(2): 021012. <https://doi.org/10.1115/1.4028401>.
- [19] Jin C, Guo K, Xu Y, Cui H, Xu L (2019) "Design of magnetic bearing control system based on active disturbance rejection theory." *J Vib Acoust* 141(1):011009. <https://doi.org/10.1115/1.4040837>.
- [20] Barbaraci G, Mariotti GV, Piscopo A (2013) "Active magnetic bearing design study. *J Vib Control* 19(16) :2491-2505.
- [21] Maslen E (2009) "Self-sensing magnetic bearings." *Magnetic bearings* Springer, Berlin, pp 435-459.
- [22] Pasanen, T., von Gastrow, G., Heikkinen, I., Vähäniemi, V., Savin, H., & Pearce, J. (2019). *Compatibility of 3-D printed devices in cleanroom environments for semiconductor processing*. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 89, 59-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.08.027>
- [23] Mousavi, A., Akbarzadeh, A., Shariatee, M., & Alimardani, S. (2015). *Repeatability analysis of a SCARA robot with planetary gearbox*. 2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 640-644. <https://doi.org/10.1109/ICRoM.2015.7367858>
- [24] Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A., Lenarčič, J., Stanovnik, A., Munih, M., ... Šlajpah, S. (2018). *Accuracy and Repeatability of Industrial Manipulators*. *Robotics*, 231–241. doi:10.1007/978-3-319-72911-4_15
- [25] Mathia, K. (2010). *Robotics for Electronics Manufacturing: Principles and Applications in Cleanroom Automation*. Cambridge University Press.