

Actuador rotativo de ultra bajo consumo basado en energía magnética potencial

M. Albertos-Cabañas¹, I. Valiente-Blanco¹, S. Sánchez Prieto², D. López-Pascual¹ y E. Díez-Jiménez¹

¹Grupo de investigación en Tecnologías Mecánicas, Eléctricas y Térmicas. Área de Ingeniería Mecánica, E-mail: i.valiente@uah.es

²Grupo de Investigación Espacial. Departamento de Automática. E-mail: sebastian.sanchez@uah.es

Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. Ctra. Madrid-Barcelona km. 33.600, 28805 Alcalá de Henares. Madrid. España.

Resumen

En esta investigación se presenta un novedoso concepto de actuador rotativo que minimiza el consumo de potencia y energía para aplicaciones de posicionamiento de precisión. Dicho dispositivo se basa en el aprovechamiento de la energía magnética potencial almacenada entre imanes permanentes con polaridades enfrentadas que se repelen entre sí. Al combinar esta energía almacenada con un sistema de estabilización y control activo de la posición se consigue un dispositivo capaz de realizar cambios ultrarrápidos entre múltiples posiciones estables. Todo ello con un consumo energético minimizado en comparación con un dispositivo tradicional equivalente como un motor eléctrico.

Se presenta el marco teórico para la operación de dicho dispositivo y su diseño detallado como actuador para una aplicación de rueda de filtros de un satélite espacial de observación. Se han calculado las prestaciones estimadas del dispositivo mediante modelos electromagnéticos de elementos finitos. Como se demuestra, el dispositivo podría permitir una reducción de la potencia nominal del dispositivo superior al 90% y del consumo energético superior al 78%, asegurando al mismo tiempo, un cambio ultrarrápido y preciso entre ocho posiciones angulares diferentes.

Palabras clave: consumo energético, actuador rotativo, electromagnetismo.

Abstract

In this paper, a novel concept of a rotative actuator that minimizes its power and energy consumption for precision positioning applications is presented. The device is based in the use of potential magnetic energy storage between permanent magnet facing with opposing magnetization polarities. When combined with an electromagnetic active control and stabilization system, the rotor of the device is able to switch between stable equilibrium positions in a fast way with a minimal fraction of the power and energy consumption of a traditional electric motor.

A theoretical model is presented, and performance calculations have been done supported by detailed finite element model (FEM) results. A prototype has been designed to operate as an actuator for a filterwheel application in a satellite. As the results show, the device has the potential to provide a power consumption saving up to 90% and an energy consumption saving up to 78% with respect to previous similar developments. At the same time, the actuator switches between 8 stable positions in a fast and accurate way.

Keywords: power consumption, rotative actuator, electromagnetism.

1. Introducción

El consumo de los sistemas de actuación es un problema de ingeniería de especial relevancia debido a la necesidad constante de incrementar la eficiencia energética y la sostenibilidad de los procesos productivos. Los actuadores o motores rotativos eléctricos se emplean en una gran variedad de aplicaciones donde es necesario un posicionamiento rápido y preciso. Para todos estos sistemas, el consumo energético es un parámetro muy relevante que se ve incrementado por el hecho de la necesidad de acelerar y frenar rápidamente la carga de pago para alcanzar los tiempos de operación necesarios. Algunos ejemplos de dichas aplicaciones son los sistemas de alimentación de procesos y fabricación en serie [2], sistemas de cambio de herramienta en centros de mecanizado y manipuladores robóticos [3] o sistemas ópticos avanzados [4]. Otro número importante de aplicaciones requieren de actuadores de altas prestaciones dinámicas, capaces de proporcionar grandes aceleraciones y potentes sistemas de frenado [5] que, de igual manera, presentan elevados costes energéticos asociados.

Una aplicación de particular interés para el presente desarrollo son los mecanismos de ruedas de filtros que se pueden encontrar en numerosas aplicaciones ópticas. Una rueda de filtros es un dispositivo típicamente rotatorio que porta una serie de filtros ópticos para diferentes longitudes de onda. Los filtros ópticos pueden ser diseñados para transmitir, bloquear o reflejar la luz en cualquier rango de longitudes de onda desde la UV hasta la IR [1]. Su objetivo es disponer de una amplia gama de información para las diferentes longitudes de onda requeridas en la imagen que se quiere obtener.

La arquitectura de las ruedas de filtros modernas, en lo que a aspectos constructivos se refiere, es muy similar en todos los casos. Es decir: motores de imanes permanentes, rodamientos de muy alta precisión y eficiencia, un sensor para determinar la posición de la rueda y sus derivadas, y un trinquete para asegurar la precisión del posicionamiento independientemente de la precisión del sensor

Un ejemplo de las prestaciones de una rueda de filtros comercial para aplicaciones ópticas puede encontrarse en el modelo FW103 del fabricante Thorlabs [2]. Dicho mecanismo se compone de una rueda de filtro con 6 posiciones, con un diámetro de rueda de aproximadamente 100 mm. Algunas de sus prestaciones más significativas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Prestaciones de la rueda de filtros FW103 de Thorlabs

Actuador del Thorlabs FW103	
Parámetro	Valor
Tamaño del motor	25x32x52 mm
Número de filtros	6
Diámetro del filtro	25 mm
Rango de temperaturas	-20 a 40 °C
Corriente nominal	1 A
Resistencia de fase	4.6 Ohm
Potencia eléctrica nominal	21.2 W
Par de actuación	231 mNm
Par de retención	17 mNm
Tiempo de cambio de filtro	60 ms

Este tipo de rueda de filtros se emplea de manera frecuente en telescopios terrestres y espaciales. En el caso de sistemas de vuelo, los requisitos técnicos impuestos por la normativa son significativamente más severos. Los conceptos como la alta fiabilidad durante la vida útil del proyecto, la baja potencia de accionamiento, la alta precisión en de posicionamiento, o la supervivencia en ambientes de temperatura y vibraciones extremos cobran especial relevancia.

En particular, el requisito de bajo consumo es crítico en aquellas misiones que operan en entornos criogénicos a muy bajas temperaturas para mejorar la sensibilidad de los instrumentos. Un buen ejemplo de este tipo de misiones es el telescopio espacial James Webb [3]. En dicho telescopio, existen varias ruedas de filtros con diferentes funcionalidades. El instrumento NIRCam tiene un conjunto de doble rueda con 12 filtros cada una de ellas, que consiste en una rueda pupila y una rueda de filtros colocadas en paralelo. La luz del colimador pasa primero por el elemento activo de la rueda pupila y luego por el elemento activo de la rueda de filtros. Las dos ruedas pueden girar independientemente para seleccionar combinaciones específicas de los elementos ópticos que definen los modos de observación del NIRISS [4].

Por otro lado, el instrumento MIRI contiene una rueda de filtros que porta 18 elementos ópticos seleccionables: filtros de banda estrecha y banda ancha, un prisma y cuatro máscaras coronográficas. Las dos ruedas de rejillas/dicroicas casi idénticas llevan combinaciones de rejillas y dicroicas con sólo tres posiciones para cada rueda [5].

La Tabla 2, resume las prestaciones principales de los motores de actuación incorporados en las ruedas de filtros del telescopio espacial James Webb.

Tabla 2. Prestaciones de los motores de los instrumentos MIRI y NIRCam del telescopio James Webb

Instrumento	FWA DM Cryo 84	NIRCam actuador
Parámetro	Valor	Valor
Diámetro del actuador	96 mm	91.4
Longitud del actuador	22 mm	n/d
Inercia del rotor	0.25 gm ²	n/d
Masa	0.53 kg	n/d
Numero de imanes permanentes	24	n/d
Número de bobinas	12	n/d
Resistencia bobinado (293 K)	370 Ohm	82 Ohm
Inductancia bobinado	19 mH	n/d
Corriente máxima	250 mA	130 mA
Voltaje máximo	40V	n/d
Consumo eléctrico máximo (293 K)	23 W	3.3 W
Rango de temperaturas	4.2 - 300 K	6-300 K
Par de actuación	200 mNm	149.5 mNm
Par de retención	n/d	n/d
Tiempo de actuación para cambio de posición	500 ms	n/d
Energía consumida (estimación)	11.5 J	

En ambos casos, el consumo eléctrico puede reducirse significativamente cuando los instrumentos operan en condiciones criogénicas debido a la reducción de la resistencia del bobinado [6].

No obstante, a pesar de la optimización alcanzada por algunos de los mencionados desarrollos, el concepto operacional impide optimizar el consumo eléctrico de estos dispositivos, ya que una gran cantidad de energía es necesaria para acelerar la carga de pago lo suficiente para cumplir con los estrictos requisitos de tiempo de cambio de filtros.

En este trabajo de investigación se presenta un novedoso sistema de actuador rotativo que basa su principio de operación en el aprovechamiento de la energía magnética potencial para minimizar la potencia y el consumo eléctrico del dispositivo. Este dispositivo es nombrado VALMAC. La energía magnética

potencial se obtiene enfrentando imanes permanentes con polaridades opuestas en una serie de posiciones estabilizadas del actuador. Dicha energía es liberada de manera controlada por un sistema activo de actuación, minimizando el tiempo de cambio de posición y minimizando la energía consumida por el sistema.

Un concepto similar fue propuesto previamente por Bradley et al. en 2007, trabajando para Launchpoint Technologies Inc [7]. La invención propone emplear una serie de imanes permanentes distribuidos en una configuración de Halbach para minimizar el consumo de un motor acoplado. No obstante, el sistema en sí mismo no permite una regulación ni un control preciso de la posición y requiere una mayor cantidad de imanes permanentes.

En este trabajo, se presenta el marco teórico para la operación de dicho dispositivo y su diseño detallado como actuador para una aplicación de rueda de filtros de un satélite espacial de observación. Se han calculado las prestaciones estimadas del dispositivo mediante modelos electromagnéticos de elementos finitos.

2. Principio de funcionamiento del dispositivo y descripción teórica

El dispositivo está compuesto por tres elementos principales.

- Un rotor compuesto por imanes permanentes.
- Un segundo conjunto de imanes permanentes, localizados en el estator del dispositivo. Sus direcciones de magnetización son coincidentes con las del estator y el eje de rotación del dispositivo. No obstante, el sentido de magnetización de estos imanes permanentes es opuesto al de los imanes del rotor.
- Un sistema de estabilización y actuación, principalmente compuesto por una serie de elementos ferromagnéticos que estabilizan las posiciones de equilibrio estable del actuador y un conjunto de bobinas o electroimanes que permiten el giro del actuador en ambas direcciones.

La Figura 1. esquematiza estos elementos en una vista en planta de un actuador radial con 4 posiciones de equilibrio.

Debido a que los imanes permanentes del rotor y del estator presentan polaridades enfrentadas, una gran cantidad de energía magnética potencial se almacena en el dispositivo. Sin embargo, sin la ayuda de materiales magnéticos blandos para la estabilización, las posiciones de equilibrio 1, 2, 3 y 4 mostradas en la

Figura 1 serían posiciones de equilibrio inestable. Consecuentemente el rotor, ante cualquier perturbación externa, abandonaría descontroladamente dichas posiciones. Sin embargo, empleando materiales magnéticos blandos adecuadamente dimensionados en el entorno de dichas posiciones, se puede revertir la inestabilidad y conseguir 4 posiciones de equilibrio estable en las posiciones 1, 2, 3 y 4. Entonces, el rotor permanecerá en dichas posiciones, aunque existan pequeñas perturbaciones externas que traten de desestabilizarlo.

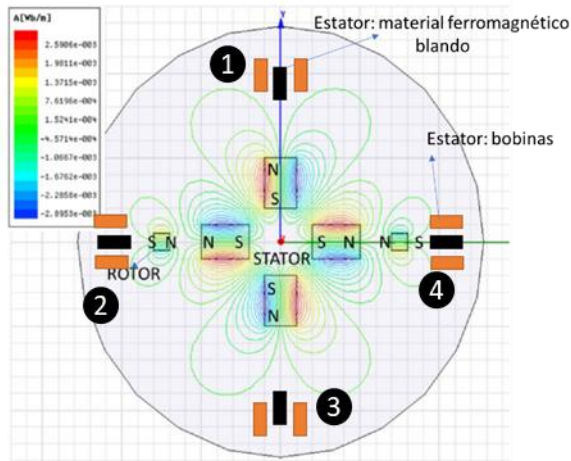


Figura 1. Vista en planta y principio de funcionamiento.

Si se desea liberar la energía potencial almacenada y permitir un cambio entre las posiciones de equilibrio, basta con inyectar una pequeña cantidad de corriente en las bobinas. De esta forma, el rotor acelerará y frenará por sí mismo hasta estabilizarse rápidamente en una nueva posición de equilibrio estable.

La Figura 2 ilustra el flujo de energía hacia el rotor en cada posición angular del dispositivo.

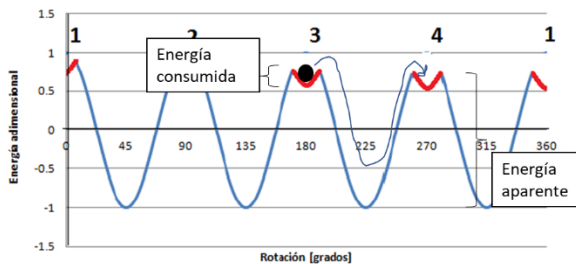


Figura 2. Energía potencial almacenada.

Nótese que solo es necesaria una mínima fracción de la energía para provocar un cambio de posición. Este principio de aprovechamiento de la energía potencial almacenada entre dos imanes en repulsión es el que permite reducir significativamente los requisitos de potencia y energía de actuación. Ya no es necesario suministrar la energía necesaria para acelerar y frenar el rotor, sino simplemente la energía necesaria para sacar el rotor de sus posiciones de equilibrio estable,

que como se demostrará, es mucho menor a la anteriormente descrita.

Desde un punto de vista teórico, se puede establecer, en base al principio de conservación del momento angular del rotor que:

$$\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = [I] \cdot \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times ([I] \cdot \vec{\omega}) = \sum \vec{M} \quad (1)$$

Donde $[I]$ es la matriz de inercia del sistema, $\vec{\alpha}$ la aceleración angular, $\vec{\omega}$ su velocidad angular y \vec{M} cualquier momento externo aplicado.

Siempre y cuando la rotación del rotor tenga lugar en torno al eje principal de inercia del mismo (eje z), se puede reducir la ecuación anterior a:

$$\sum M_z = I_z \cdot \alpha_z \quad (2)$$

La ecuación anterior se puede reescribir, empleando un cambio de variable, como:

$$\sum M_z = I_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

O lo que es lo mismo:

$$\sum M_z = I_z \cdot \frac{\partial \omega_z}{\partial \theta} \cdot \omega_z \quad (4)$$

Donde ω_z es la velocidad angular del rotor, y θ es su posición angular.

Operando la ecuación anterior, se puede demostrar que:

$$\int M_{z_total} \cdot \partial \theta = I_z \int \omega_z \cdot \partial \omega_z \quad (5)$$

Y por último, para un desplazamiento angular determinado:

$$\omega_{z_f} = \sqrt{2 \cdot \frac{\int_{\theta_i}^{\theta_f} M_{z_total} \cdot \partial \theta}{I_z} + (\omega_{z_i})^2} \quad (6)$$

Donde ω_{z_f} es la velocidad angular final del dispositivo, y ω_{z_i} la velocidad angular inicial para un desplazamiento angular entre la posición inicial θ_i y la posición final θ_f .

Los momentos externos aplicados sobre el rotor, serán principalmente ejercidos por los imanes dispuestos en el estator del dispositivo, y cuya magnetización es de sentido opuesto a las de los imanes del rotor. Además, otros elementos como los núcleos ferromagnéticos de las bobinas o las propias bobinas ejercerán una acción sobre el rotor. Dichas interacciones son complejas de calcular analíticamente, y por ello se empleará un software de elementos finitos para determinar la dependencia de los

momentos ejercidos sobre el rotor en función de su posición angular.

Por otro lado, se puede aproximar el tiempo transcurrido (Δt) entre dos posiciones angulares muy próximas entre sí a partir del perfil de velocidades angulares del rotor aplicando diferencias finitas, de manera que:

$$\Delta t = \frac{\Delta \theta}{\bar{\omega}_z} \quad (7)$$

Donde $\bar{\omega}$ es la velocidad angular promedio entre las dos posiciones angulares,

$$\bar{\omega}_z = \frac{\omega_{z,f} + \omega_{z,i}}{2} \quad (8)$$

Una vez calculadas las prestaciones del dispositivo en términos de par de actuación, velocidad angular y tiempo de cambio de posición, es necesario estimar la potencia eléctrica y su consumo energético. La potencia eléctrica instantánea consumida para la actuación se puede calcular como:

$$W_{act} = I^2 \cdot R \quad (9)$$

Donde I es la corriente que circula por el bobinado y R es la resistencia total del bobinado.

La resistencia del bobinado viene determinada por la sección del cable y la longitud del mismo. De modo que:

$$R = \rho \cdot (1 + \alpha(T - 20)) \cdot \frac{l}{A} \quad (10)$$

Donde ρ es la resistividad del cobre, $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, α es el coeficiente de temperatura de la resistividad del cobre $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, T es la temperatura del cable en $^\circ\text{C}$, A la sección del cable y l la longitud del mismo.

Para comparar el potencial ahorro de potencia eléctrica de actuación (W_{act}) con respecto a la potencia aparente ($W_{aparente}$) del dispositivo. Esta última se calcula como:

$$W_{aparente} = M_{z,total} \cdot \omega_z \quad (11)$$

Y el ratio ideal de ahorro en potencia como:

$$\eta_W[\%] = \left[1 - \frac{W_{act}}{W_{aparente}} \right] \cdot 100 \quad (12)$$

Para determinar el consumo de energía por cambio de posición, es necesario integrar la potencia instantánea consumida en función del tiempo, de manera que:

$$E_{act} = \int_{t_i}^{t_f} W_{act} \cdot dt \quad (13)$$

Se define, así mismo, la energía aparente consumida como:

$$E_{aparente} = \int_{t_i}^{t_f} W_{aparente} \cdot dt \quad (14)$$

Y el ratio ideal de ahorro de energía como:

$$\eta_E[\%] = \left[1 - \frac{E_{act}}{E_{aparente}} \right] \cdot 100 \quad (15)$$

Nótese que en un dispositivo real existirán otras fuentes de disipación de energía como las pérdidas magnéticas o la fricción en los rodamientos, que deben ser tenidos en cuenta para corregir las ecuaciones anteriores tal y como se describe en la sección 5 de este artículo.

3. Diseño detallado

Se ha diseñado un actuador rotativo con 8 posiciones de equilibrio de configuración axial, denominado actuador VALMAC. La Figura 3 muestra el diseño detallado del actuador y un explosionado de sus elementos principales.

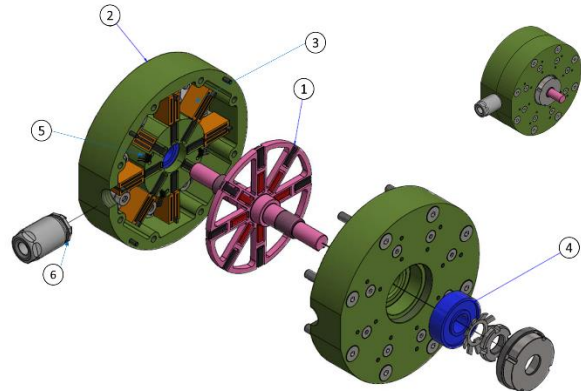


Figura 3. Diseño detallado del actuador VALMAC.

El actuador, de 92 mm de diámetro, tiene un peso estimado de 1.2 kg. Las 8 posiciones de equilibrio están equidistantiadas entre sí 45 grados. El actuador está principalmente compuesto por un rotor (1) y un estator (2). El rotor consiste en una rueda de acero inoxidable AISI 304 de 67 mm de diámetro exterior sobre el que se ensamblan 16 imanes permanentes de SmCo 30, con un valor de remanencia $B_r = 1.12 \text{ T}$ y una coercitividad $H_c = 835 \text{ kA/m}$ y $10 \times 10 \times 3 \text{ mm}$ de dimensión. Los imanes están magnetizados en la dirección del eje del actuador. Además de esta rueda que porta los imanes permanentes, el rotor integra un eje macizo de 8 mm de diámetro y 82 mm de longitud. El momento de inercia del rotor es de $2.15 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$. La Figura 4 muestra algunas de las dimensiones principales del dispositivo y una vista en sección del mismo.

Por otro lado, el estator del actuador (2) está principalmente compuesto por un conjunto de 8 imanes permanentes de iguales características que los imanes del rotor, ensamblado en dos piezas estructurales de acero inoxidable AISI 420. Los imanes del estator, no obstante, presentan un sentido opuesto de magnetización con respecto a los imanes del estator, generando la energía potencial necesaria para la actuación cuando se encuentran enfrentados entre sí en las posiciones de equilibrio.

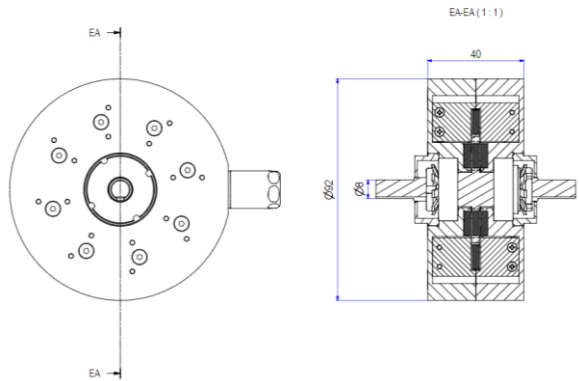


Figura 4. Vista en sección y dimensiones generales.

En el estator se han integrado un total de 32 bobinas de núcleo ferromagnético (3) compuesto por acero al carbono AISI 1010 de 8 mm de altura, cuya sección activa de cobre es de aproximadamente 8 mm². Las bobinas están diseñadas como un arrollamiento de cable de sección AWG 28 sobre núcleos ferromagnéticos. Se ha estimado que cada bobina tendrá un total de unas 75 vueltas, una resistencia de 0.34 Ohm y una inductancia de 0.45 μH. La resistencia total del bobinado se ha calculado en 11 Ohm y la inductancia total en 14.5 μH. Dichas bobinas, están situadas en torno a las posiciones de equilibrio del actuador, siendo su eje de magnetización paralelo al eje del actuador. El sistema de actuación puede operar en modo redundante. En este modo, solo 16 bobinas operan al mismo tiempo y las otras 16 bobinas se utilizan de respaldo en caso de fallo en el actuador. El actuador también tendría la posibilidad de operar en modo no redundante, empleando las 32 bobinas al mismo tiempo. La conexión de todas las bobinas se realiza en serie y el actuador solo dispone, por lo tanto, de una única fase (redundante). Cabe destacar que el “airgap” entre el rotor y el estator es de 0.5 mm.

Con el fin de permitir la rotación entre el actuador y el rotor, se han utilizado dos rodamientos de bolas de contacto angular (4) de 28 mm de diámetro exterior y 8 mm de espesor. Para permitir una caracterización de la posición angular del rotor, se prevé la instalación de una serie de sensores magnéticos de efecto Hall (5). Por último, se ha diseñado un “feedtrough” (6) para el paso de los cables del interior del actuador al exterior.

Se ha especificado un rango operacional de temperaturas para el dispositivo entre -20°C y 70°C. La Tabla 3, resume las principales características constructivas del dispositivo

Tabla 3. Características del dispositivo

Actuador VALMAC	
Diámetro actuador	92 mm
Longitud actuador	40 mm
Momento de inercia del rotor	$2.15 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$
Peso del actuador	1.2 kg
Numero de imanes del rotor	16
Número de imanes del estator	8
Material de imanes permanentes	SmCo 32
Número de bobinas (redundante)	16
Sección del cable	AWG 28
Resistencia del bobinado (redundante)	5.5 Ohm
Inductancia de la bobina (redundante)	7.25 μH

4. Modelo electromagnético de elementos finitos

Se han desarrollado dos modelos de elementos finitos del dispositivo para analizar sus prestaciones desde un punto de vista electromagnético empleando el software de elementos finitos ANSYS ELECTRONICS 2021R1.

Un primer modelo, permite simular el comportamiento del actuador en régimen magnetoestático. Dicho modelo consiste en un sistema reducido con los elementos magnéticos principales del actuador: bobinas, imanes permanentes y yugos ferromagnéticos, pero sin rodamientos y otros accesorios. La Figura 4 muestra una imagen del modelo.

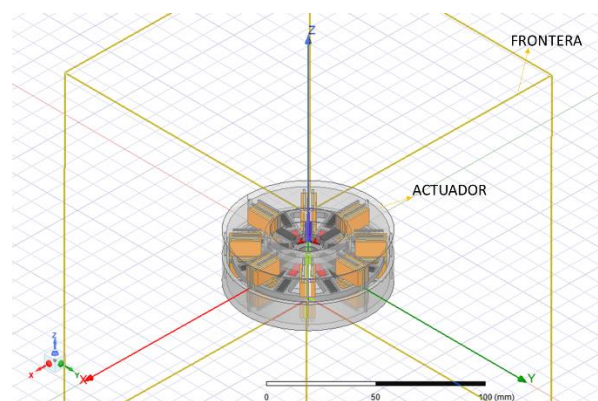


Figura 4. Modelo magnetoestático de elementos finitos.

Este modelo se ha empleado para obtener la dependencia del par del actuador con la posición angular del rotor y para analizar la capacidad del sistema de actuación para modificar las posiciones de equilibrio estable del sistema. El modelo se ha puesto a punto con un error máximo de convergencia del 1%, siendo el número de elementos finitos típico del modelo de aproximadamente 300.000 unidades. La resolución del modelo permite obtener los campos electromagnéticos del sistema y, mediante técnicas de post-procesado, las fuerzas y momentos en los diferentes componentes del actuador. La Figura 5 muestra los vectores de densidad de campo magnético \vec{B} en el espacio y en el plano YZ del sistema.

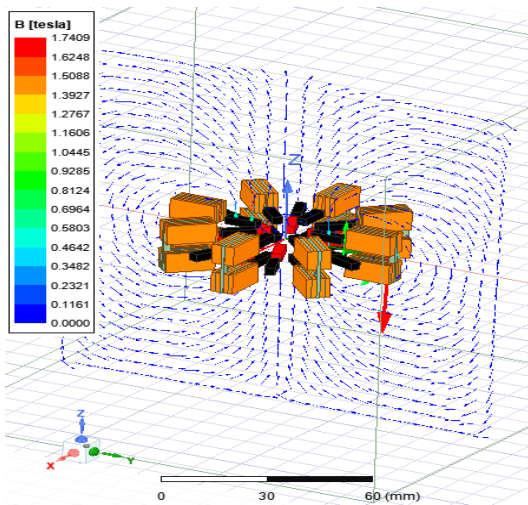


Figura 5. Vectores de densidad de campo magnético en el plano YZ del dispositivo.

Por otro lado, para obtener las pérdidas electromagnéticas durante la actuación, se ha generado un modelo de simulación transitorio que simula el giro del rotor a una velocidad constante durante un periodo de tiempo de 100 ms en intervalos de 2 ms. La Figura 6 muestra las pérdidas específicas durante un instante aleatorio de tiempo.

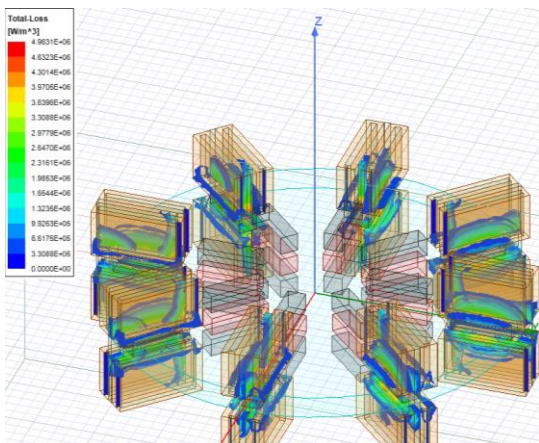


Figura 6. Pérdidas magnéticas específicas durante un instante de la simulación.

5. Resultados obtenidos

En esta sección se presentan los cálculos teóricos realizados sobre el comportamiento del dispositivo, sustentados por los resultados obtenidos mediante las simulaciones por elementos finitos de los modelos detallados en la sección anterior.

5.1. Par de actuación y estabilidad

El par ejercido sobre el rotor debido a la energía potencial almacenada en los diferentes elementos magnéticos del sistema en función de la posición angular del rotor se representa en la Figura 7.

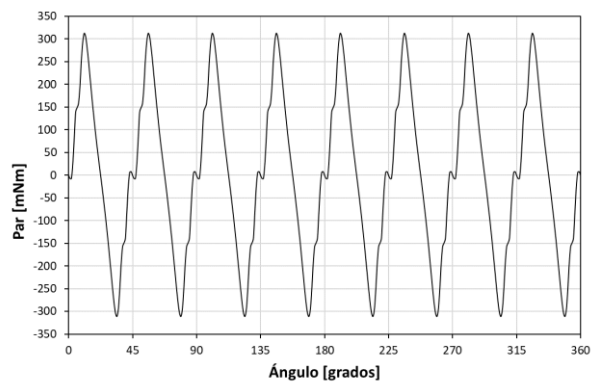


Figura 7. Par vs. Ángulo de giro del rotor

Se puede apreciar que el par máximo de actuación es de 312 mNm. Además, se pueden apreciar las 8 posiciones de estabilidad diseñadas equidistantes 45 grados entre sí.

El par de retención del actuador, en torno a estas posiciones de equilibrio estable es de aproximadamente 10 mNm. Esta zona de estabilidad tiene una amplitud de aproximadamente ± 2.3 grados.

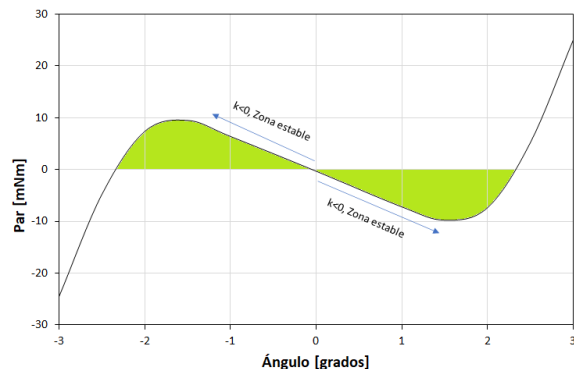


Figura 8. Posición de equilibrio estable.

Para pasar de una posición de estabilidad a otra, será necesario superar esta barrera de energía potencial. Integrando el área de la curva anterior en la zona de

estabilidad del dispositivo, se puede calcular que esta energía es de aproximadamente 13 ± 1 mJ.

Dicha energía será suministrada por el sistema de actuación. La Figura 9 muestra el impacto sobre la zona de estabilidad al inyectar corriente en el sistema de actuación. Véase que el sentido de la corriente circulante permite establecer el sentido de rotación del actuador. Para densidades de corriente positivas, el actuador tiende a girar en el sentido antihorario (positivo) mientras que el actuador girará en sentido horario (negativo) si la corriente suministrada es negativa.

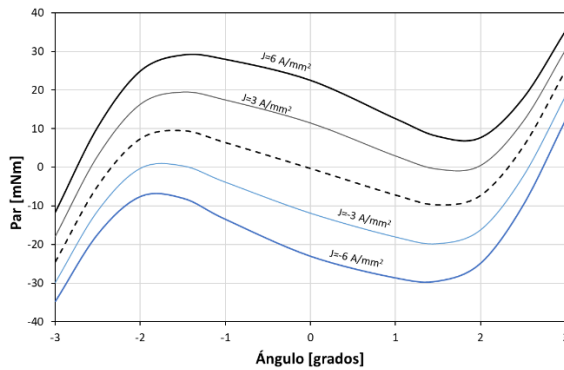


Figura 9. Influencia de la corriente en las bobinas en función de la posición del rotor.

Puede apreciarse, que para densidades de corriente ligeramente superiores a 3 A/mm², el rotor tendrá la energía suficiente como para superar la zona de estabilidad e iniciar la rotación hasta la siguiente posición estable. Nótese que estos resultados, no consideran la acción de un par estático de fricción en los rodamientos. Dicho par de fricción provocaría un desplazamiento en las curvas descritas en la Figura 9 y por lo tanto, sería necesario un nivel de corriente ligeramente superior. Considerando características del bobinado descrito en el apartado 3, la corriente que circula por el cable, para una densidad de corriente de 3.5 A/mm² es de 0.37 A. Aproximadamente, la mitad del valor máximo admitido por la norma MIL-STD-975 para bobinados operando en condiciones de vacío.

5.2. Velocidad y tiempo de cambio de posición

La Figura 10, muestra el perfil de velocidades y aceleraciones angulares entre dos posiciones de estabilidad, cuando el sistema ha sido actuado con una corriente de 3.5 A/mm² para vencer la posición de estabilidad inicial. Se puede apreciar que la velocidad aumenta hasta alcanzar la posición de 22.5° , siendo su valor máximo de 702 rpm. A partir de ese momento, el sistema empieza a decelerar, frenando completamente en la zona de estabilidad siguiente.

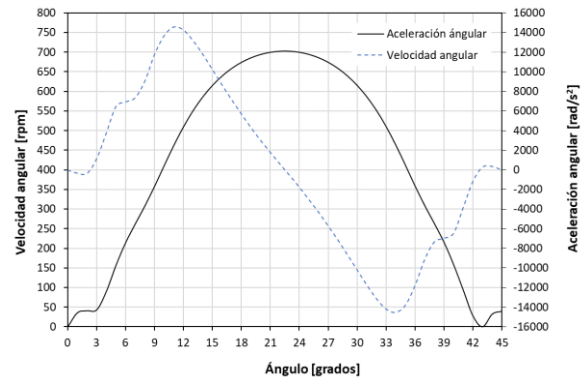


Figura 10. Velocidad y aceleración angular vs. ángulo de giro del rotor.

Empleando la ecuación 7 y partir de los datos simulados, se puede obtener el perfil de posición angular con respecto al tiempo. El tiempo mínimo de cambio de posición es de aproximadamente 56.4 ms, tal y como se puede apreciar en la Figura 11.

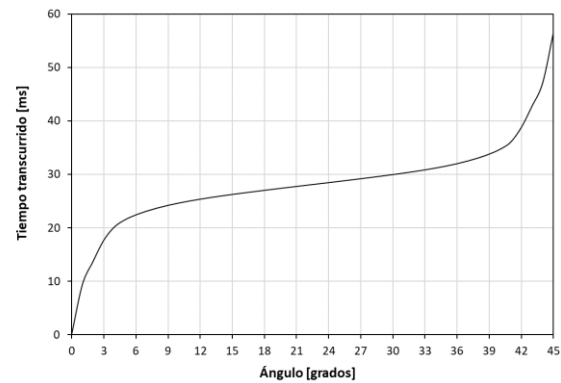


Figura 11. Velocidad promedio y tiempo de cambio de posición vs. momento de inercia de la carga de pago

Además, los parámetros cinemáticos del rotor dependerán significativamente de la inercia de la carga de pago. La Figura 12 muestra la relación entre el momento de inercia de la carga de pago y el momento de inercia del rotor con el tiempo de cambio de posición y la velocidad media de rotación.

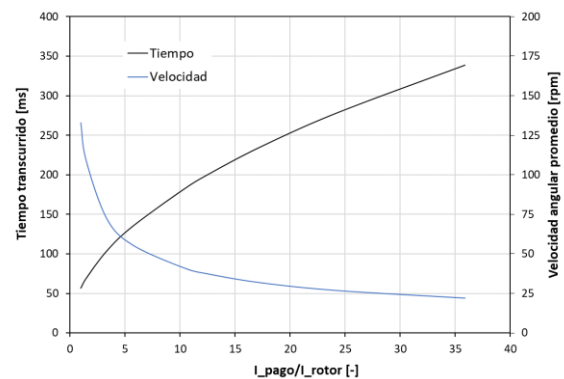


Figura 12. Velocidad promedio y tiempo de cambio de posición vs. relación de momentos de inercia

5.3. Consumo y potencia eléctrica

Se ha seleccionado un cable AWG 28 para la construcción de las bobinas. La temperatura máxima de dicho cable se considera igual al límite definido de temperaturas operacionales del dispositivo de 70°C. Se ha tenido en cuenta que, debido a la naturaleza intermitente del funcionamiento del dispositivo y los breves periodos de actuación, la temperatura del bobinado no se incrementa significativamente durante la actuación. La longitud estimada total del bobinado es de 44 metros. Por lo tanto, la resistencia del bobinado se calcula en 110Ω. El consumo máximo esperado del sistema de actuación (W_{act}) será de aproximadamente 1.5 W. La Figura 13 muestra la potencia aparente ($W_{aparente}$) y la potencia consumida por el dispositivo en función de la posición angular del mismo, cuando este opera en vacío:

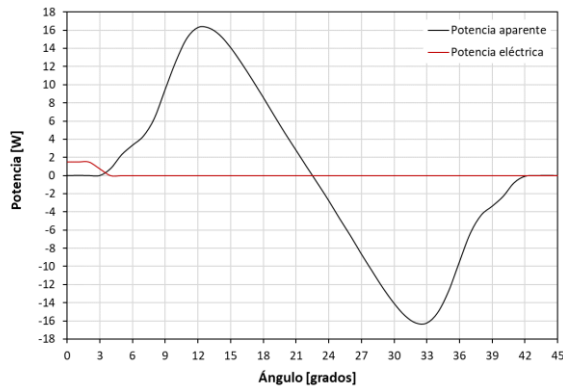


Figura 13. Potencia vs. posición del rotor.

Comparando el valor máximo de la potencia aparente desarrollada (16.2 W) con el valor de la potencia consumida (1.5 W), se puede definir un ahorro en potencia:

$$\eta_{W_{ideal}} = 90.7 \%$$

Teniendo, que el sistema de actuación estará encendido entre las posiciones angulares 0° y 2.3° la energía consumida por el sistema para el cambio de posición será de, aproximadamente:

$$E_{act} = 25 \text{ mJ}$$

Sin embargo, la energía aparente consumida, que necesitaría un actuador convencional ideal para reproducir el perfil cinemático del actuador sería:

$$E_{aparente} = 117 \text{ mJ}$$

Se puede calcular entonces el ratio ideal de ahorro energético como:

$$\eta_{E_{ideal}} = 78.6\%$$

No obstante, existen otras fuentes de disipación de energía que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar el comportamiento del actuador. Las dos fuentes principales de disipación de energía son:

- Fricción en los rodamientos.
- Pérdidas magnéticas inducidas.

Las pérdidas magnéticas inducidas por histéresis y corrientes de Foucault en los materiales del actuador han sido calculadas utilizando el modelo transitorio de elementos finitos descrito en la sección 4. Las pérdidas por fricción en los rodamientos se han calculado considerando un par de fricción similar a los desarrollos para el instrumento NIRCам del telescopio espacial James Webb de 9.6 mNm [6]. La Figura 14, muestra la potencia disipada debido a dichas pérdidas en función de la velocidad de giro del rotor.

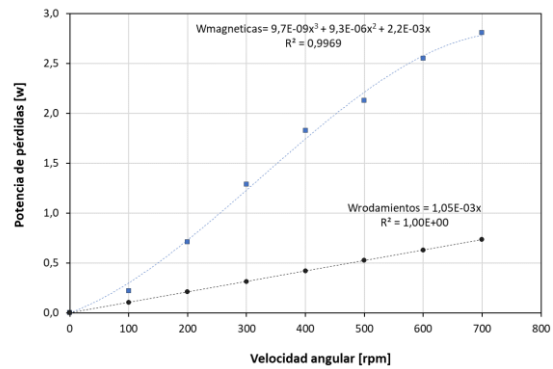


Figura 14. Pérdidas vs. velocidad angular del rotor.

Se define una velocidad promedio de actuación en función del tiempo de cambio de posición calculado de 133 rpm. Empleando esta velocidad promedio, se han calculado las pérdidas promedio en los rodamientos y debido a las corrientes de Foucault y la histéresis en los materiales. De este modo:

$$\bar{W}_{magnéticas} = 0.68 \text{ W y } \bar{W}_{rodamientos} = 0.09 \text{ W}$$

$$\bar{W}_{pérdidas} = 0.77 \text{ W}$$

A partir de estos valores de pérdidas, se calcula la energía disipada en función del tiempo de cambio de posición en vacío (56.4 ms):

$$E_{pérdidas} = 43.4 \text{ mJ}$$

Y la energía total consumida para un cambio de posición, sería:

$$E_{total} = E_{act} + \bar{E}_{pérdidas} = 68.4 \text{ mJ}$$

Teniendo en cuenta las pérdidas de energía, se pueden recalcular los factores de ahorro de potencia y ahorro energético:

$$\eta_{W_p\u00e9rdidas}[\%] = \left[1 - \frac{W_{act} + \bar{W}_{p\u00e9rdidas}}{W_{aparente} + \bar{W}_{p\u00e9rdidas}} \right] \cdot 100 \quad (16)$$

$$\eta_{W_p\u00e9rdidas}[\%] = 86.6 \%$$

Y:

$$\eta_{E_p\u00e9rdidas}[\%] = \left[1 - \frac{E_{total}}{E_{aparente} + \bar{E}_{p\u00e9rdidas}} \right] \cdot 100 \quad (17)$$

$$\eta_{E_p\u00e9rdidas}[\%] = 63.1 \%$$

6. Conclusiones

En este artículo, se ha presentado un novedoso concepto de dispositivo rotativo basado en el aprovechamiento de la energía magnética potencial entre imanes permanentes en repulsión para minimizar el consumo y la potencia requerida para su actuación, denominado actuador VALMAC. Dicho actuador ha sido diseñado y estudiado teóricamente empleando modelos de simulación por elementos finitos y orientado a su potencial aplicación como sistema de actuación para una rueda de filtros de un telescopio de observación.

Tal y como se puede ver en la Tabla 4, los valores obtenidos para las prestaciones del actuador son similares o superiores a los que se puede encontrar en los dispositivos de referencia para dicha aplicación.

Tabla 4. Comparación de prestaciones del actuador VALMAC propuesto con otros modelos

Modelo	Thorlabs FW103	FWA DM Cryo 84	VALM AC
Diámetro [mm]	25x32	96	92
Longitud [mm]	52	22	40
Peso [kg]		0.53 kg	1.2 kg
Rango de temperaturas	-20 a 40 °C	4.2-300 K	-20 a 70°C
Corriente nominal [A]	1	0.25	0.37
Resistencia bobinado [A]	4.6 (por fase)	370	11
Par de actuación [mNm]	231	200	312
Par de retención [mNm]	17	n/d	10
Tiempo de cambio [ms]	60	500	54
Potencia nominal [W]	21.2 W	23 W	1.5 W
Consumo estimado por cambio [J]	1.27	11.5	0.068

El actuador, de 92 mm de diámetro y 40 mm de largo, es capaz de ejercer un par de actuación máximo de 312 mNm, y presenta un par de retención de 10 mNm en torno a 8 posiciones de equilibrio estable equidistanciadas 45 grados entre sí. Gracias a un sistema activo de actuación, se puede generar el movimiento entre posiciones de estabilidad. Se ha calculado que el actuador tiene el potencial de presentar un ahorro de potencia nominal superior al 90% y un ahorro de consumo de energía del 78.6%. Este ahorro no solo permitirá reducir el coste operacional y el consumo del dispositivo, sino que permitiría la simplificación de las electrónicas de potencia y control. El tiempo de actuación en vacío se ha calculado en aproximadamente 54 ms.

El siguiente paso en la presente investigación, consistirá en la construcción de un prototipo demostrador para la verificación del principio de funcionamiento y la determinación de las prestaciones.

7. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el programa Ramon y Cajal (RYC-2017-23684) del Ministerio Español de Ciencia e Innovación.

8. Referencias

- [1] M. Ware and J. Peatross, *Physics of Light and Optics* (Black & White). Brigham Young University, Department of Physics, 2015.
- [2] Thorlabs, “Rueda de filtros FW103,” 2022. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com>.
- [3] NASA, “James Webb Space Telescope, [2020/04/18], <https://www.jwst.nasa.gov>.”
- [4] K. Weidlich et al., “The grating and filter wheels for the JWST NIRSpec instrument,” *Atad-Edtedgui, Eli ; Antebi, Joseph ; Lemke, D. Astron. Telesc. Instrumentation, SPIE, 627323-1-8, 2006*.
- [5] O. Krause et al., “Cryogenic wheel mechanisms for the Mid-Infrared Instrument (MIRI) of the James Webb Space Telescope (JWST): detailed design and test results from the qualification program,” in *Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, 2008, vol. 7018, p. 701824*.
- [6] S. McCully et al., “Development Tests of a Cryogenic Filter Wheel Assembly for the NIRCams Instrument,” *Proc. 38 Aerosp. Mech. Symp., 2006*.
- [7] B. Evan et al. “Magnetic spring and actuators with multiple equilibrium positions,” *US Patent 7265470 B1, 2005*.