

Comparative study of four BLDC motor configurations for a ventricular assist device with axial impeller without central axis

Carlos A. Jiménez-Carballo, M. Sc¹, and Gabriela Ortiz- León, Phd²

^{1,2}Costa Rica Institute of Technology y, Costa Rica, carjimenez@itcr.ac.cr, gaby@itcr.ac.cr

Abstract– In this work, the electromagnetic and mechanical behavior of four configurations for a brushless direct current motor (BLDC) was analyzed to determine which one represents the most suitable option for its implementation in a ventricular assist device with a central shaftless axial impeller. For this, a numerical simulation of computational electromagnetism based on the Finite Element Method is performed. From these simulations, the initial electrical angles where the torque is maximum, the distribution of the magnetic flux density, and the torque as a function of time for each configuration of the BLDC motor were obtained. Finally, it was found that for the physical and geometric parameters used, a 10-pole and 12-slot BLDC motor represents the most viable option for the ventricular assist device.

Keywords– BLDC motor, Finite Element Method, ventricular assist device, ripple torque, magnetic flux.

Estudio comparativo de cuatro configuraciones de motores BLDC para un dispositivo de asistencia ventricular con impulsor axial sin eje central

Carlos A. Jiménez-Carballo, M. Sc¹, and Gabriela Ortiz- León, Phd²

^{1,2}Costa Rica Institute of Technology y, Costa Rica, carjimenez@itcr.ac.cr, gaby@itcr.ac.cr

Resumen— En este trabajo se analizó el comportamiento electromagnético y mecánico de cuatro configuraciones para un motor de corriente directa sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés) para determinar cuál de ellas representa la opción más adecuada para su implementación en un dispositivo de asistencia ventricular con impulsor axial sin eje central. Para esto se realiza una simulación numérica del electromagnetismo computacional basada en el Método de Elementos Finitos. A partir de dichas simulaciones se obtuvieron los ángulos eléctricos iniciales donde el torque es máximo, distribución de la densidad de flujo magnético y el torque en función del tiempo para cada configuración del motor BLDC. Finalmente, se encontró para los parámetros físicos y geométricos utilizados que un motor BLDC de 10 polos y 12 ranuras representa la opción más viable para el dispositivo de asistencia ventricular.

Palabras clave— motor BLDC, Método de Elementos Finitos, dispositivo de asistencia ventricular, torque de rizado, flujo magnético.

I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería biomédica ha avanzado mucho en los últimos diez años, especialmente en la creación de dispositivos que ayudan al corazón y que están hechos para mejorar la calidad de vida de los pacientes con insuficiencia cardíaca avanzada [1]. Actualmente, los dispositivos de asistencia ventricular (DAV) constituyen una alternativa viable para individuos que padecen de insuficiencia cardíaca [2][3]. En términos generales, la utilización de un DAV puede ocasionar complicaciones en el paciente que lo emplea, tales como trombosis y hemólisis. En estos casos, la destrucción de los eritrocitos se produce debido al estrés asociado al cizallamiento de la pared, la aceleración del flujo y la interacción con superficies artificiales [4]. Sin embargo, la vida útil de los DAVs suele disminuir debido al desgaste mecánico inherente a estos aparatos. Debido a lo anterior, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) se encuentra en proceso de desarrollo un DAV, el cual emplea un impulsor axial sin eje central, con el cual se busca minimizar los impactos en la sangre de las personas al reducir el contacto mecánico y el desgaste, optimizando así la eficiencia y la durabilidad del dispositivo [5].

En la actualidad, los DAVs utilizan un motor eléctrico de corriente directa sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés)[6]. Bajo ese contexto, los motores BLDC han sido reconocidos como una de las tecnologías más adecuadas para

este tipo de aplicaciones biomédicas debido a que tienen muchas ventajas en comparación con los motores de corriente directa con escobillas y los motores de inducción, como por ejemplo, su eficiencia es mayor porque la pérdida de energía mecánica por fricción es menor, su velocidad está determinada por la frecuencia de suministro de corriente en lugar del voltaje, lo que también aumenta su eficiencia, pueden funcionar a alta velocidad en cualquier condición, son más silenciosos durante su uso y tienen una mejor relación torque-velocidad, lo que lo hace útil en aplicaciones [7], [8].

Sin embargo, las especificaciones únicas de un DAV, como la precisión en el control de flujo, la minimización de turbulencias hemáticas o el comportamiento mecánico del motor BLDC, requieren una evaluación rigurosa de las configuraciones para garantizar su desempeño óptimo. Bajo ese contexto, uno de los aspectos necesarios por analizar es el torque de rizado (o "torque ripple" en inglés), el cual se refiere a las fluctuaciones periódicas en el par de salida de un motor de imanes permanentes durante su operación y es originado por formas de onda no ideales de la fuerza electromotriz inversa, la saturación del circuito magnético y el torque de arrastre. Este último se presenta debido a la atracción entre los imanes del rotor y los dientes ferromagnéticos del estator, lo que provoca una variación periódica del par, particularmente a velocidades bajas. La saturación del circuito magnético es menos habitual, sin embargo, puede incrementar la oscilación del par mediante la modificación de la distribución del flujo en el entrehierro. Adicionalmente, la forma no sinusoidal de la fuerza electromotriz inversa genera armónicos que dificultan la producción de par, lo cual complica su eliminación sin comprometer el rendimiento del motor [9]. Las fluctuaciones en el torque pueden traducirse en variaciones en el flujo sanguíneo, lo que podría afectar negativamente la hemodinámica del paciente. Un flujo sanguíneo constante y suave es esencial para evitar daños a las células sanguíneas y garantizar una perfusión adecuada a los órganos [10][11]. Las variaciones en el torque de rizado son causadas por factores como la construcción del motor o el método de conmutación utilizado. En un motor ideal, el par de salida sería completamente uniforme; sin embargo, en la práctica, siempre existen pequeñas oscilaciones debido a imperfecciones mecánicas y eléctricas.

Debido a lo anterior en este trabajo se desea analizar el comportamiento del torque axial generado por las fuerzas electromagnéticas para cuatro configuraciones de motores BLDC que se podrían utilizar en un DAV, esto con la idea de definir cuál configuración generaría un menor impacto en la sangre por el ruido producido por las fluctuaciones de dicho torque. Para esto, se construirá una simulación numérica de electromagnetismo computacional basada en el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) con la cual primero se determinarán los ángulos eléctricos iniciales del rotor del motor donde se encuentra el torque inicial máximo. Posterior para evaluar el comportamiento de los campos magnéticos generados para las cuatro configuraciones de motores BLDC. Finalmente, se obtendrá la variación del torque axial en el motor en función del tiempo para cada configuración y se compararán las fluctuaciones para determinar cuál configuración es mejor para el DAV que se diseña en el TEC.

II. METODOLOGÍA

Primero se construye la geometría del estator, el rotor y el yugo para los cuatro motores BLDC esto utilizando las piezas disponibles en la biblioteca del módulo AC/DC de COMSOL Multiphysics. En la TABLA I se muestran los parámetros que no pueden ser modificados independientemente del motor BLDC utilizado.

TABLA I
PARÁMETROS INVARIANTES DEL ESTATOR Y EL ROTOR PARA LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MOTORES BLDC.

Parámetro	mm
Diámetro del eje	13
Diámetro del rotor	21
Diámetro de la interfaz de continuidad estator-rotor	22
Altura de los imanes	2
Radio de redondeo de los imanes	0.3
Espesor del hierro posterior	1.5
Diámetro del estator	38
Tamaño del aire externo al estator	3
Altura de la zapata	1
Ancho del diente	2
Radio de la curvatura de la zapata	0.5
Espesor del motor	10

En la TABLA II se presentan las cuatro configuraciones de motores BLDC que se utilizarán en este trabajo. El número de polos (N_p) se refiere a la cantidad de polos magnéticos en el rotor (pares de polos magnéticos norte-sur), el número de ranuras (N_s) se refiere a la cantidad de espacios en el estator donde se alojan las bobinas del devanado. Dichas configuraciones fueron escogidas según lo propuesto en [12], donde se indica que a la hora de construir o seleccionar un motor, hay que tener en cuenta el parámetro que es conocido como factor de devanado, el cual es un número que se encuentra entre los valores de 0 y 1, y expresa la parte de la corriente de armadura que se usa para producir el par en el motor. Asimismo, es importante tener presente que las cuatro configuraciones corresponden a motores BLDC trifásicos. De la Figura 1 a la Figura 4 se muestra un corte transversal de dichas configuraciones.

TABLA II
CONFIGURACIONES DE MOTORES BLDC DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE POLOS (N_p) Y EL NÚMERO DE RANURAS (N_s).

Configuración	1 (Figura 1)	2 (Figura 2)	3 (Figura 3)	4 (Figura 4)
Número de polos N_p	6	8	10	14
Número de ranuras N_s	9	12	12	18

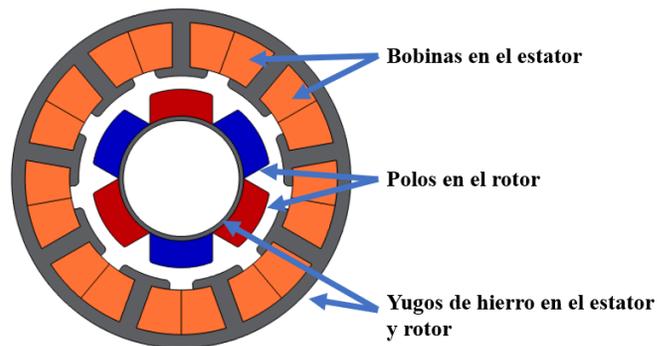


Figura 1: Corte transversal del motor eléctrico BLDC compuesto por 6 polos y 9 ranuras, la cual se define como configuración 1.

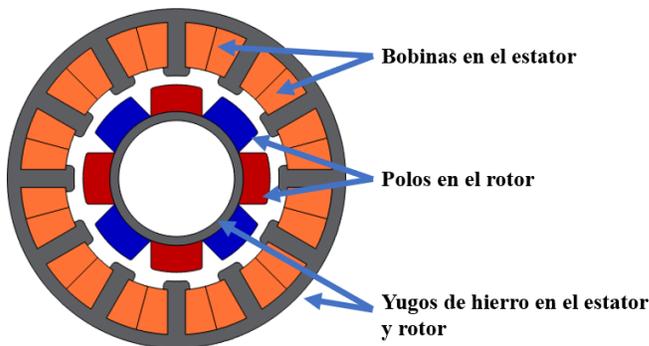


Figura 2: Corte transversal del motor eléctrico BLDC compuesto por 8 polos y 12 ranuras, la cual se define como configuración 2.

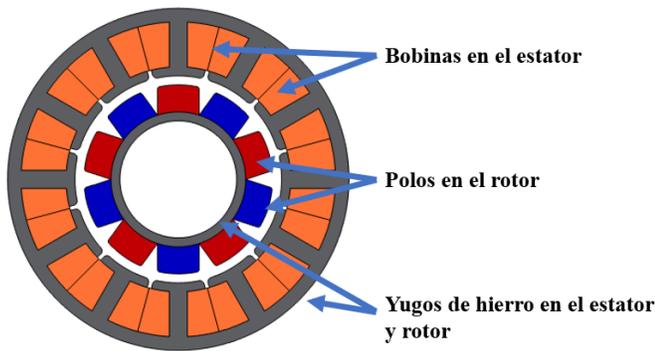


Figura 3: Corte transversal del motor eléctrico BLDC compuesto por 10 polos y 12 ranuras, la cual se define como configuración 3.

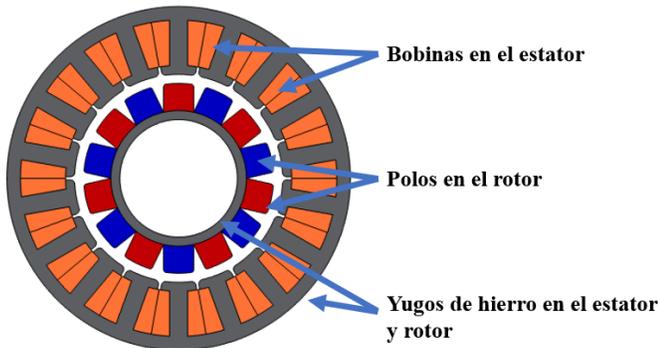


Figura 4: Corte transversal del motor eléctrico BLDC compuesto por 14 polos y 18 ranuras, la cual se define como configuración 4.

A. Instrucciones de modelado y simulación

Las simulaciones para las cuatro configuraciones de motores BLDC se realizaron con ayuda COMSOL Multiphysics, donde se utiliza la interfaz física Rotating Machinery ubicada en la rama Electromagnetismo y mecánica del módulo AC/DC, donde se da un enfoque en el análisis del torque y el comportamiento electromagnético del motor [13]. El modelo es desarrollado en 2D, lo que permite representar una sección transversal del motor y simplificar el cálculo sin perder precisión en los resultados esto de acuerdo con la metodología propuesta en [14].

Asimismo, la interfaz de física resuelve las ecuaciones de Maxwell formuladas utilizando una combinación de potencial vectorial magnético \vec{A} y potencial escalar magnético φ como variables dependientes [15]:

$$\nabla \times \vec{B} = \vec{0}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (2)$$

$$\vec{E} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (3)$$

donde \vec{B} es el campo magnético y \vec{E} el campo eléctrico.

Para construir cada simulación, se inicia con la selección de la interfaz física, como se mencionó anteriormente, se elige la interfaz Rotating Machinery, Magnetic. Se escoge un espacio

en 2D y se configura un estudio estacionario. Seguidamente se definen parámetros físicos clave como la velocidad de rotación, el número de polos, el número de ranuras, la frecuencia eléctrica y la corriente máxima en los devanados del estator, los cuales se muestran en la TABLA III. Es importante tener presente que para un motor BLDC se tiene que la velocidad de rotación ω se relaciona con la frecuencia eléctrica f_{el} y la cantidad de polos N_p , mediante la expresión [16]:

$$f_{el} = \omega \cdot \frac{N_p}{2} \quad (4)$$

Tal y como se mencionó al inicio de la sección II, la geometría del modelo se construye utilizando las piezas disponibles en la biblioteca del módulo AC/DC de COMSOL. Se definen el rotor, el estator y el entrehierro, asegurando que los componentes se ensamblen correctamente.

Una vez que se construye la geometría se definen los materiales para cada componente, específicamente se utiliza hierro blando sin pérdidas (Soft Iron Without Losses[17]) para el núcleo del rotor y el yugo del estator, cobre (Copper) para los devanados del estator, NdFeB (neodimio-hierro-boro) para representar a los imanes permanentes (polos) del rotor del rotor y por último se escoge aire para la región dentro del rotor, la región entre el rotor y el estator y la región más afuera del estator

Posteriormente, se establece la física del motor que se quiere simular. Primero, la interacción entre el rotor y el estator es modelada mediante la función Rotating Domain, que maneja la rotación relativa entre ambas partes, y en la cual se establece un valor de rotación ω (ver TABLA III).

TABLA III
PARÁMETROS FÍSICOS GENERALES PARA LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES DE MOTORES.

Parámetro	Valor
Espesor del motor	10 mm
Ángulo mecánico inicial	0 °
Número de polos (N_p)	6*
Número de ranuras	9*
Velocidad de rotación (ω)	7500 rpm
Frecuencia eléctrica	$\omega \cdot N_p/2$
Pico de corriente	1.0
Número de vueltas de las bobinas	100
Factor de llenado de las ranuras	0.5

*Aquí se muestran los polos y ranuras que se utilizaron en la configuración 1.

Para modelar los imanes permanentes (o sea los polos del motor) se utiliza la opción de dominio Conducting Magnet con Densidad de Flujo Remanente para simular el campo magnético generado por dichos imanes. Para los yugos en el rotor y en el estator se utiliza la opción de dominio Ley de Ampere y Curva B-H como modelo de magnetización. Las bobinas de los motores son simuladas con la opción de dominio Multiphase Winding, en la cual además se selecciona la configuración Automatic Three Phase y se establecen propiedades físicas como por ejemplo la corriente eléctrica, número de vuelta, frecuencia eléctrica y factor de bobina que se muestran en la TABLA III. Adicionalmente, se incluye un nodo llamado Arkkio Torque Calculation el cual define un método que es ampliamente utilizado para calcular el torque en motores eléctricos a partir del análisis del campo magnético en el entrehierro.

Después de establecer las propiedades físicas se escoge un mallado de tamaño para la interfaz entre el rotor y el estator y un mallado triangular libre para el resto de la geometría.

Finalmente, para analizar el torque, se desarrollan dos estudios principales:

- Estudio estacionario: Se realiza un barrido paramétrico sobre el ángulo eléctrico inicial del rotor, con el objetivo de determinar la posición angular inicial que genera el máximo torque. Se utiliza el cálculo de Arkkio, que evalúa la interacción entre los imanes del rotor y el campo magnético del estator.
- Estudio estacionario-temporal: Una vez determinado el ángulo inicial óptimo, se ejecuta una simulación transitoria que modela el comportamiento del motor durante dos ciclos completos de rotación eléctrica. En este paso, se obtiene el torque de rizado (torque ripple), una característica fundamental en el análisis de motores BLDC, ya que influye en la estabilidad y suavidad del funcionamiento del motor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección se exponen los resultados más importantes de estudio electromagnético y mecánico para cada una de las configuraciones de un motor BLDC.

A. Determinación del ángulo eléctrico inicial del rotor para cada configuración.

A partir del primer estudio se determinó el ángulo eléctrico inicial del rotor para cada configuración, el cual genera el máximo torque de arranque. Dicho torque se determinó con ayuda de método de cálculo de Arkkio, que evalúa la interacción entre los imanes del rotor y el campo magnético del estator. En la Figura 5 se la variación del torque en función del ángulo eléctrico inicial para la configuración 2, en dicha gráfica se puede ver que el torque máximo se encuentra para un ángulo

de 150°. Dicho método se aplicó para las tres configuraciones restantes de motores BLDC y los resultados se resumen en la TABLA IV. Dicho ángulo en un motor BLDC es importante para garantizar un arranque preciso y un funcionamiento eficiente ya que permite aplicar la conmutación de fase adecuada, pues si dicho ángulo inicial es incorrecto, el motor podría arrancar en la dirección equivocada o generar vibraciones [18], lo cual es algo que se busca evitar en un DAV. Asimismo, conocer el ángulo inicial permite maximizar la eficiencia del motor y reducir el consumo de energía. En el caso también de nuestro modelado, los ángulos eléctricos iniciales de la TABLA IV se utilizaron como valores iniciales para el segundo estudio.

B. Análisis de la densidad de flujo magnético en cuatro configuraciones de motor BLDC.

Las figuras de la 6 a la 9 muestran la distribución de la densidad de flujo magnético de las cuatro configuraciones distintas de un motor BLDC para el caso en que se produce el torque máximo, en otras palabras, para el ángulo inicial eléctrico de cada una de las configuraciones. En la configuración 1 (ver Figura 6) se observa una buena canalización del flujo magnético desde el rotor hasta el estator,

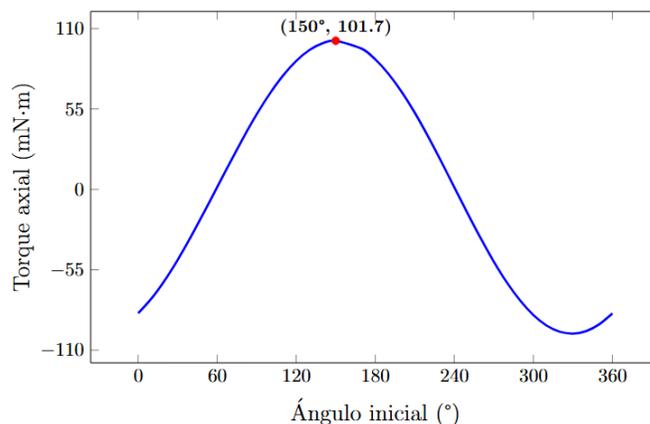


Figura 5: Variación del torque en el motor BLDC en función del ángulo eléctrico inicial para la configuración 2.

TABLA IV
ÁNGULO INICIAL PARA CADA CONFIGURACIÓN DE MOTORES DONDE SE ENCUENTRA EL TORQUE MÁXIMO.

Configuración	Torque máximo (mN · m)	Ángulo inicial mecánico (°)
$N_p = 6, N_s = 9$	74.9	30
$N_p = 8, N_s = 12$	101.7	150
$N_p = 10, N_s = 12$	95.9	200
$N_p = 14, N_s = 18$	64.7	320

por lo que se puede decir que esta configuración es eficiente, sin embargo, en algunas regiones de entrehierro del estator se presenta una gran saturación del campo magnético (regiones más rojas), lo que puede afectar la eficiencia. En la configuración 2 (ver Figura 7) el flujo magnético presenta mayor uniformidad en la distribución del flujo magnético en comparación con la configuración 1, ya que evita la saturación en los dientes del estator, lo que puede mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas por histéresis. En la configuración 3 (ver Figura 8) se presenta una la mejor distribución del flujo magnético pues es más homogéneo entre el rotor y el estator, minimizando zonas de alta densidad lo que minimiza pérdidas electromagnéticas. Por último, en la Figura 9 se muestra la distribución del flujo magnético para la configuración 4 la cual, en comparación con las demás se ve más irregular, pues incluso en el rotor no hay una distribución homogénea en comparación con las tres anteriores. Dichas irregularidades sugieren que hay una pérdida de eficiencia, así como una disminución en la entrega de torque debido a una menor transferencia de energía, por lo que de las cuatro configuraciones esta no sería recomendable.

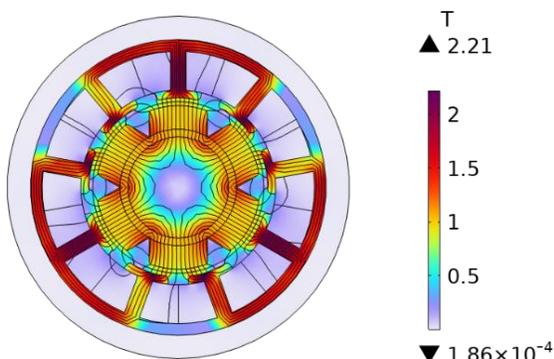


Figura 6: Distribución de densidad de flujo magnético para la configuración 1 de un motor BLDC para un ángulo eléctrico inicial de 30°.

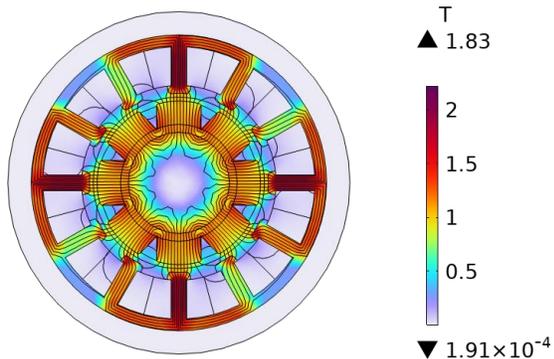


Figura 7: Distribución de densidad de flujo magnético para la configuración 2 de un motor BLDC para un ángulo eléctrico inicial de 150°.

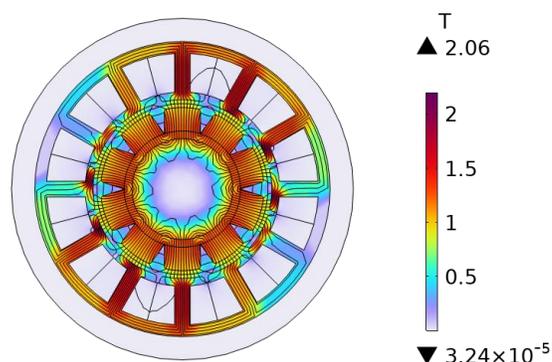


Figura 8: Distribución de densidad de flujo magnético para la configuración 3 de un motor BLDC para un ángulo eléctrico inicial de 200°

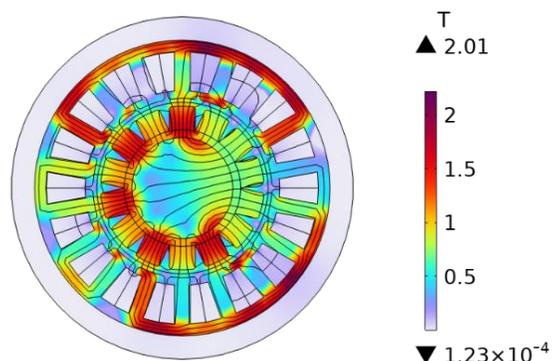


Figura 9: Distribución de densidad de flujo magnético para la configuración 4 de un motor BLDC para un ángulo eléctrico inicial de 320°.

C. Análisis de la variación del torque en función del tiempo para las cuatro configuraciones de motores BLDC.

De la Figura 10 a la Figura 13 se muestra la variación del torque axial (mN·m) en función del tiempo (ms) para cuatro configuraciones distintas de un motor BLDC, esto con el objetivo de evaluar el torque de rizado (torque ripple), que influye en la estabilidad y eficiencia del motor. En la Figura 10 se muestra el torque para la configuración 1, la cual presenta una alta variabilidad en el torque con oscilaciones significativas en el tiempo. La amplitud del torque ripple es muy alta tal y como se muestra en la TABLA V, donde se tiene que el rango entre el valor máximo y mínimo del torque es de 71.7 mN·m, lo que cual indica que hay una diferencia del 72.7 % entre el valor mínimo y máximo, lo que indica fluctuaciones en la entrega de torque y puede generar vibraciones y ruido mecánico, afectando la estabilidad del motor lo que indica que esta no es una configuración óptima, ya que un alto torque de rizado reduce la suavidad del funcionamiento y puede afectar la eficiencia.

En la Figura 11 se muestra la variación del torque en función del tiempo para la configuración 2, donde se puede ver que la ondulación del torque es menor en comparación con la presentada en la configuración 1, sin embargo aún se observan fluctuaciones periódicas con una diferencia entre el valor

máximo y mínimo de 14.1 mN·m (13.8 % de diferencia), tal y como se muestra en la TABLA V. Se mantiene un valor promedio de torque más estable que la configuración 1, lo que la hace un poco más estable.

La Figura 12 muestra la las fluctuaciones del torque con respecto al tiempo en la configuración 3, donde se observa una gran disminución del torque de rizado en comparación con las configuraciones anteriores, lo cual implica que el valor del torque es mucho más estable, a tal punto que la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo es de 2.3 mN·m (ver TABLA V) o un 2.4 % de diferencia, lo que implica pequeñas fluctuaciones que no afectan significativamente el rendimiento, lo que muestra que esta configuración tiene un mejor diseño electromagnético y menor efecto de conmutación brusca con respecto a las configuraciones 1 y 2 lo que reduce el ruido, mejora la eficiencia y minimiza vibraciones.

Por último, la Figura 13 muestra el comportamiento del torque en la configuración 4 donde en algunas regiones se observa una ligera oscilación del mismo torque, sin embargo, en otras regiones la diferencia entre el valor máximo y mínimo de torque es de 13.3 mN·m (ver TABLA V), aproximadamente un 17.4 % de diferencia lo cual muestra variaciones en el tiempo que pueden afectar la estabilidad.

Dado que el objetivo es diseñar un motor BLDC con alto rendimiento y estabilidad, para minimizar los efectos en la sangre debido al uso del DAV, se debe priorizar una configuración que minimice el torque de rizado, por lo que la configuración más adecuada de acuerdo al estudio realizado es la conformada por 10 polos y 12 bobinas, en otras palabras, la configuración 3.

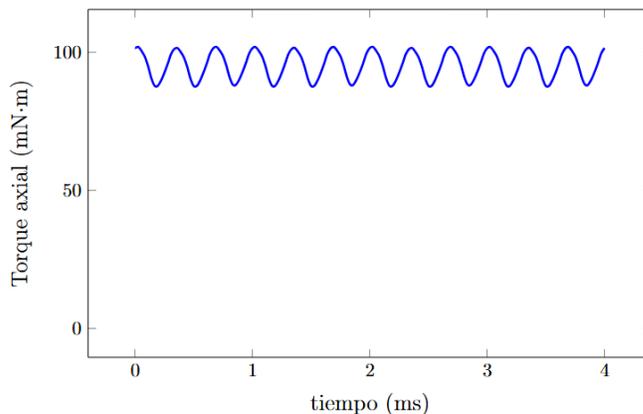


Figura 11: Variación del torque en el motor BLDC en función del tiempo para la configuración 2.

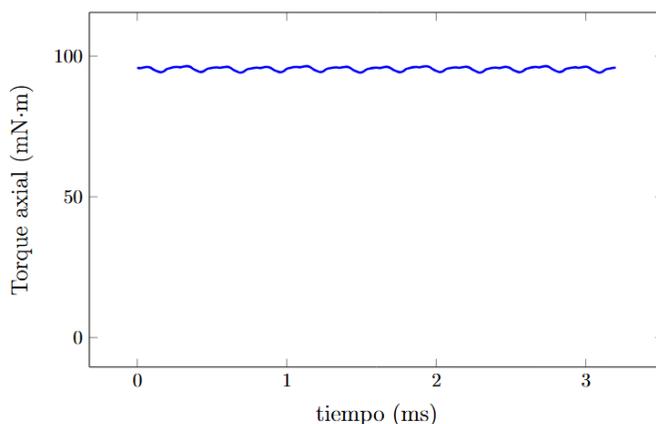


Figura 12: Variación del torque en el motor BLDC en función del tiempo para la configuración 3.

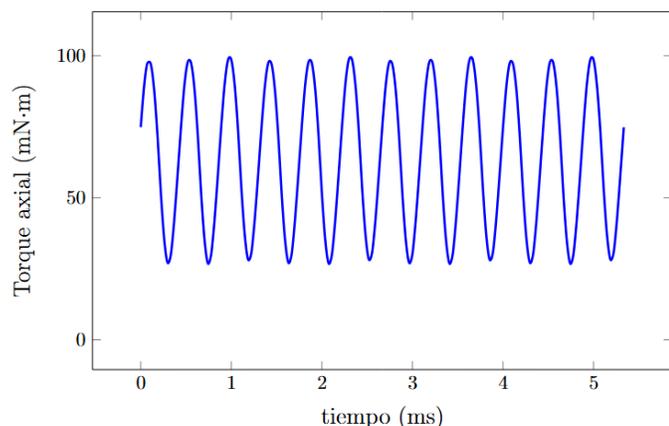


Figura 10: Variación del torque en el motor BLDC en función del tiempo para la configuración 1.

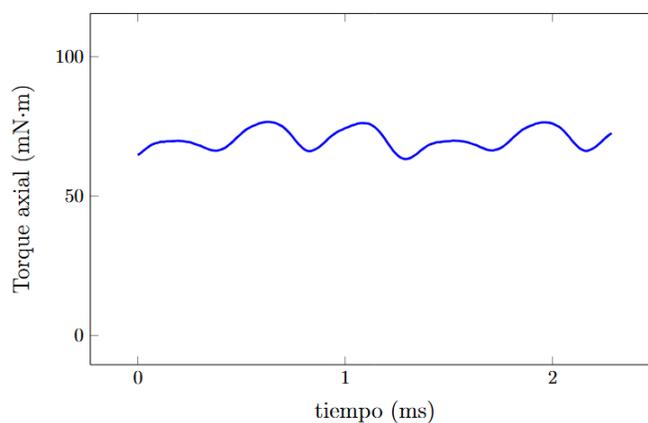


Figura 13: Variación del torque en el motor BLDC en función del tiempo para la configuración 4.

TABLA V
RANGOS DE TORQUE PARA CADA CONFIGURACIÓN

Configuración	Periodo eléctrico (ms)	Torque máximo (mN · m)	Torque mínimo (mN · m)	Rango (mN · m)
1	2.67	98.6	26.9	71.7
2	2.00	101.9	87.8	14.1
3	1.60	96.4	94.1	2.3
4	1.14	76.6	63.3	13.3

IV. CONCLUSIONES.

A partir de este trabajo se ha podido analizar el comportamiento electromagnético y mecánico de cuatro configuraciones de motores BLDC con el objetivo de determinar la opción más adecuada para su implementación en un dispositivo de asistencia ventricular (DAV) con impulsor axial sin eje central. Primero se encontraron los ángulos eléctricos iniciales del rotor donde se encuentra el torque máximo lo que permite en las distintas configuraciones reducir un poco las fluctuaciones en el motor BLDC.

Seguidamente, se estudió distribución del flujo magnético para cada configuración, donde se verificó que dicha distribución varía dependiendo de la configuración del número de polos y ranuras en el motor BLDC. Para las configuraciones analizadas se encontró que aquella que está compuesta por 14 polos y 18 ranuras presentó la peor distribución del flujo, lo que maximiza la saturación en el estator y genera pérdidas electromagnéticas.

El análisis del torque axial en las distintas configuraciones mostró que la configuración 3 ($N_p = 10$ y $N_s = 12$) presenta la menor ondulación del torque, con una diferencia mínima entre su valor máximo y mínimo, apenas un 2.4 %. Dicho resultado convierte a la configuración 3 como la mejor opción de motor para utilizar en el DAV ya que generaría menos vibraciones y variaciones en el flujo sanguíneo, lo que podría afectar levemente la hemodinámica de un paciente que lo utilice.

Finalmente, es importante considerar que este es un estudio computacional del diseño de motores BLDC el cual se realizó bajo los parámetros establecidos en la TABLA I y la TABLA III por lo que se deben validar con un experimento y además dichos resultados podrían variar dependiendo de las características físicas que se definan para las distintas partes del motor BLDC.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos la ayuda brindada al laboratorio SIBILA, a la Escuela de Física y al Programa de Doctorado Académico en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Costa Rica durante el desarrollo de este proyecto. Este artículo es un producto del

proyecto de investigación con título “Desarrollo de un sistema de mecánica auxiliar para un impulsor axial sin eje central” (código 5402-1450-2101), inscrito en la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

REFERENCIAS

- [1] S. Malkani and J. Nativi-Nicolau, “Reflexiones sobre el primer informe del registro español de asistencia ventricular de larga duración (REGALAD),” *Rev Esp Cardiol*, vol. 76, no. 4, 2023, doi: 10.1016/j.recesp.2022.09.019.
- [2] D. Timms, “A review of clinical ventricular assist devices,” *Med Eng Phys*, vol. 33, no. 9, pp. 1041–1047, 2011, doi: 10.1016/j.medengphy.2011.04.010.
- [3] T. Mani, M. Yeldose, T. J. Mannamplackal, J. Joy, and R. G. Jacob, “Axial ventricular assist devices: A review focused on magnetic levitation, speed control and packaging,” in *Materials Today: Proceedings*, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.090.
- [4] C. Heilmann *et al.*, “Haemolysis in patients with ventricular assist devices: major differences between systems,” *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, vol. 36, no. 3, 2009, doi: 10.1016/j.ejcts.2009.04.015.
- [5] G. Ortiz-León, “Modelo de un nuevo concepto de impulsor para la aplicación en bombas para sangre,” Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [6] M. R. Sreejith, S. A. Vivek, K. M. Sunil, D. Sagar, and M. H. Ravichandran, “Design of Magnetic Bearing and BLDC Motor for a Novel Third-Generation LVAD,” in *10th IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2022*, 2022. doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080849.
- [7] C. L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*. 2012. doi: 10.1002/9781118188347.
- [8] A. Fenecioğlu, “Design and Analysis of Magnetically Levitated AxialFlux BLDC Motor For Ventricular Assist Device (VAD),” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 24, May 2016, doi: 10.3906/elk-1405-139.
- [9] S. I. Suriano-Sánchez, M. Ponce-Silva, V. H. Olivares-Peregrino, and S. E. De León-Aldaco, “A Review of Torque Ripple Reduction Design Methods for Radial Flux PM Motors,” 2022. doi: 10.3390/eng3040044.
- [10] G. A. Giridharan, M. Skliar, D. B. Olsen, and G. M. Pantalos, “Modeling and control of a brushless DC axial flow ventricular assist device,” *ASAIJ Journal*, vol. 48, no. 3, 2002, doi: 10.1097/00002480-200205000-00013.
- [11] M. S. Slaughter and R. Singh, “El papel de los dispositivos de asistencia ventricular en la insuficiencia cardiaca avanzada,” *Rev Esp Cardiol*, vol. 65, no. 11, 2012, doi: 10.1016/j.recesp.2012.02.030.
- [12] S. Cifre Gregorio, “Control FOC de motores BLDC,” Universitat Politècnica de València, 2020.
- [13] COMSOL Multiphysics, “AC / DC Module User’s Guide,” 2019.
- [14] COMSOL Application Gallery, “Permanent Magnet Motor in 2D,” *Comsol*, 2023.
- [15] B. Zohuri, “Foundation of Electromagnetic Theory,” in *Scalar Wave Driven Energy Applications*, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-91023-9_1.
- [16] F. J. Cembranos Nistal, “Motores Síncronos,” *Revista Digital de ACTA*, 2014.
- [17] Inc. COMSOL, “COMSOL Material Library User’s Guide,” 2023. Accessed: Nov. 12, 2024. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.matlib/MaterialLibraryUsersGuide.pdf>
- [18] P. Champa, P. Somsiri, P. Wiparumonton, and P. Nakmahachalasint, “Initial rotor position estimation for sensorless brushless DC drives,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 45, no. 4, 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2023355.