

ECUACIÓN EMPÍRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN LAS ALETAS DE ENFRIAMIENTO EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Gerson Edwin Hernández Fuentes¹, Juan José Cabello Eras², Jorge Mario Mendoza Fandiño³

1.ICT, Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, País: Colombia

Email: Ghernandezfuentes68@correo.unicordoba.edu.co

2.ICT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, País: Colombia

Email: juancabelloe@correo.unicordoba.edu.co

3.ICT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, País: Colombia

Email: jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co

Resumen:

Se presenta un estudio sobre la estimación de la velocidad del aire a través de las aletas de enfriamiento en motores eléctricos mediante un modelo de regresión múltiple. Los motores de inducción (MI) representan una parte significativa del consumo eléctrico industrial, y optimizar su eficiencia es crucial para reducir el consumo energético global.

El estudio desarrolla un modelo de regresión múltiple que utiliza datos geométricos del motor y parámetros operativos del ventilador para estimar con precisión la velocidad del aire en diferentes puntos de las aletas de enfriamiento. Este modelo fue validado utilizando datos reales de tres motores eléctricos diferentes, demostrando una alta concordancia entre las predicciones del modelo y las mediciones reales.

Los resultados del estudio subrayan la robustez y la aplicabilidad del modelo propuesto en entornos industriales, facilitado el camino para la estimación de pérdidas de energía en motores de inducción en condiciones de campo mediante termografía, ya que esta es esencial para determinar con exactitud suficiente el coeficiente de transferencia de calor.

Palabras clave: Motores de inducción, enfriamiento de motores de inducción, modelación flujo de aire.

Abstract:

A study is presented on the estimation of air velocity through the cooling fins in electric motors using a multiple regression model. Induction motors (IM) represent a significant part of industrial electricity consumption, and optimizing their efficiency is crucial to reduce overall energy consumption.

The study develops a multiple regression model that uses engine geometric data and fan operating parameters to accurately estimate the air velocity at different points on the cooling fins. This model was validated using real data from three different electric motors, demonstrating high agreement between model predictions and actual measurements.

The results of the study underline the robustness and applicability of the proposed model in industrial environments, providing an advanced tool for engineers and designers in optimizing the design of electric motor cooling systems.

Keywords: Induction motors, cooling of induction motors, air flow modeling.

1. Introducción

Los motores de inducción (MI) consumen aproximadamente el 68% de la electricidad del sector industrial, y se estima que tiene el potencial de reducir su consumo eléctrico entre el 20% y el 30 [1]. Para

lograr esto es esencial monitorear en tiempo real la eficiencia y el factor de carga, e identificar y cuantificar las pérdidas de energía [2], Sin embargo, esto es aún es un reto no resuelto [3]

La termografía infrarroja es ampliamente utilizada en la industria [4]. Como todas las pérdidas de energía en los MI se transforman en calor capacidad de la termografía de determinar el campo de temperatura en su superficie abre la posibilidad de estimarlas, lo que ya ha sido aplicado a escala de laboratorio [5]. Para determinar a partir del campo de temperatura en la superficie de una MI la energía disipada es imprescindible considerar con la mayor precisión posible las condiciones ambientales. Los MI mayoritariamente se enfrían mediante un flujo forzado de aire producido por un ventilador acoplado a su eje y conocer su velocidad en cualquier parte de su superficie con la mayor precisión posible es fundamental para de determinación de la energía disipada.

Se desarrolló un modelo CFD isotérmico utilizando el software ANSYS para simular el flujo de aire de enfriamiento en un Motor de Inducción de la marca ENA POWER de la serie Y100LI-4 con una potencia de 0.12 KW, Este modelo permitió analizar la distribución y comportamiento del flujo de aire generado por el ventilador acoplado al eje del motor

2.1.1. Preparación de Geometría:

Inicialmente se importó el modelo CAD al entorno de ANSYS CFX. Se realizó una limpieza y simplificación de las geometrías para eliminar detalles irrelevantes que podrían aumentar innecesariamente el tiempo de simulación sin afectar significativamente los resultados.

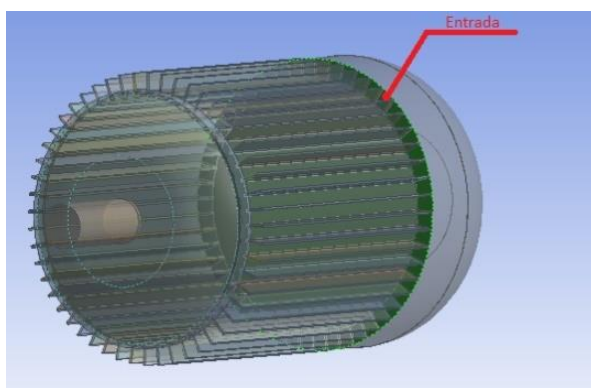


Figura 1. Entrada de aire Establecida

Fuente: Elaboración propia.

En los trabajos previos aplicar la termografía infrarroja a la determinación de las pérdidas de energía en MI [5] la velocidad del aire de enfriamiento ha sido medida. En el presente trabajo se obtiene una ecuación empírica que permite determinar la velocidad del aire en cualquier punto de las aletas de enfriamiento de un MI a partir de datos geométricos y su velocidad, lo que resulta una contribución para la aplicación de la estimación de pérdidas de energía y la evaluación de su eficiencia en condiciones operacionales reales a partir de la termografía infrarroja.

2. Metodología

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una ecuación empírica que permita determinar la velocidad del aire en cualquier punto de las aletas de enfriamiento de un motor de inducción (MI), a partir de datos geométricos y de su velocidad. La metodología seguida para alcanzar este objetivo es la siguiente:

2.1 Desarrollo de un Modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD):

2.2 Condiciones de Frontera:

Se establecieron las condiciones de entrada del aire en la zona resaltada en la figura 1, asumiendo que era un fluido incompresible con propiedades constantes a temperatura ambiente. Las simulaciones se realizaron bajo condiciones isotérmicas, es decir, no hubo transferencia de calor. Además, se calculó la velocidad de entrada al sistema de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{2} Fm * V^2 \quad (1)$$

Donde:

P = potencia.

Fm = caudal másico.

V = velocidad del fluido.

El caudal másico se calcula de la siguiente manera

$$Fm = p * A * v \quad (2)$$

Donde:

Fm=flujo masico

p= Densidad del fluido

v = velocidad del fluido

Reemplazamos (2) en (1):

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * V * V^2 \quad (3)$$

Despejamos V:

$$V = \sqrt[3]{\left(\frac{2P}{\rho * A}\right)} \quad (4)$$

Según Komeza y Dems [6], el ventilador de un motor eléctrico puede consumir aproximadamente entre el 1% y el 2% de la energía total. Por lo tanto, para este estudio se tomó como referencia el 1.5% de la energía del motor.

Ya con estos valores y suponiendo la densidad del aire de forma estándar (1.225kg/m³) se procedió a calcular la velocidad de entrada del aire con la formula (4), dando como resultado una velocidad de entrada de 2.7m/s

de fluidos similares realizados por León Martínez y Mass Ortega [5].

2.2.2. Ecuaciones fundamentales de conservación

El flujo de aire en el túnel de viento se rige por las ecuaciones fundamentales de conservación, que incluyen:

Conservación de la Masa:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0$$

Donde:

ρ es la densidad del aire.

v es la velocidad del flujo de aire.

Esta ecuación asegura que la cantidad de aire que entra en el sistema es igual a la cantidad de aire que sale, garantizando así la conservación de la masa.

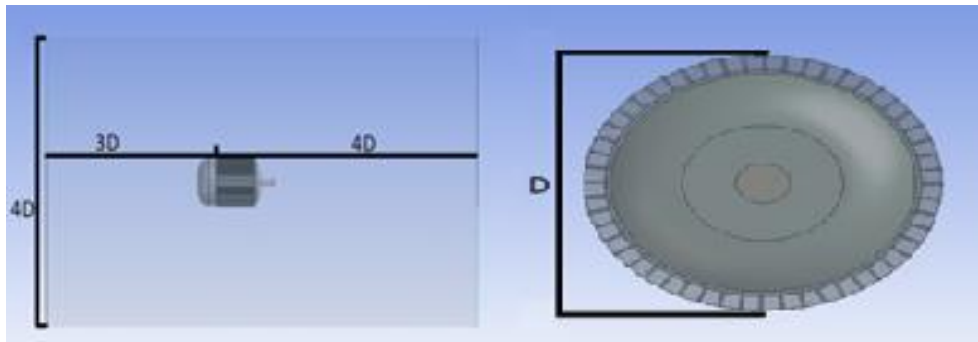


Figura 2. Visualización del MI en el dominio
Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Dominio de simulación:

Se eligió el dominio como se ilustra en la figura 2. Durante la creación de la malla, se optó por utilizar una malla no estructurada con el modelo de celdas poly-hexcore. La entrada se colocó a una distancia de 3 veces el diámetro (3D) del motor de inducción (MI), como se muestra en la figura 5, mientras que la salida se posicionó 4D aguas abajo desde el mismo punto. En términos radiales, el dominio se extendió hasta 4D desde el motor, manteniendo una presión de 1 atmósfera fuera del dominio, guiándonos de estudios

Conservación del Momento:

$$\rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g$$

Donde:

P es la presión.

μ es la viscosidad dinámica.

g es la aceleración gravitacional

Esta ecuación describe cómo el movimiento y la interacción del aire dentro del túnel de viento son influenciados por factores como la presión, la viscosidad y la gravedad.

Conservación de la Energía:

$$\rho C_p (\mathbf{v} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

Donde:

C_p es la capacidad calorífica a presión constante.

k es la conductividad térmica.

Aquí se describe cómo la energía térmica se transfiere y se distribuye a través del flujo de aire, teniendo en cuenta factores como la conducción y la convección térmica.

Para modelar adecuadamente la turbulencia del flujo de aire, se aplicó el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, que se basa en las siguientes ecuaciones de transporte:

Ecuación de transporte de K:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot (\mu \nabla k) + P_k - \rho \epsilon$$

Ecuaciones de transporte de Épsilon:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = \nabla \cdot (\mu \nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Donde:

ρ es la densidad del aire.

\mathbf{u} es la velocidad del aire.

μ es la viscosidad dinámica del aire.

P_k es la producción de turbulencia debido al gradiente de velocidad.

$C_{\epsilon 1}$ y $C_{\epsilon 2}$ son constantes del modelo.

En ANSYS CFX, se utilizó un enfoque de resolución totalmente acoplado para las ecuaciones de Navier-Stokes. Este método resolvió simultáneamente las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, lo que permitió una interacción precisa entre la presión, la velocidad y la energía en cada iteración, asegurando la convergencia global de la solución.

Además, se utilizó un enfoque de resolución totalmente acoplado para las ecuaciones de Navier-Stokes. Este método resolvió simultáneamente las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, lo que permitió una interacción precisa entre la presión, la velocidad y la energía en cada iteración, asegurando la convergencia global de la solución.

2.2.3 Criterios de convergencia:

Los criterios de convergencia para las simulaciones fueron establecidos en función de la reducción de los residuos de las ecuaciones de continuidad, momento y energía. Se consideró que la solución había convergido cuando los residuos disminuyeron a un valor menor

que 10^{-6} para las ecuaciones de energía y menor que 10^{-4} para las ecuaciones de cantidad de movimiento.

2.3 Mallado:

Se realizaron 38 simulaciones con el fin de determinar el tamaño de malla óptimo en precisión de resultados y minimización de recursos computacionales, la variación de la malla fue de 0.05 metros, iniciando en 0.2 metros y finalizando en 0.015 metros, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Configuraciones de mallado.

Tamaño de los elementos (m)	N nodos	N elementos
0,2	931	3498
0,195	937	3526
0,19	972	3710
0,185	997	3834
0,18	1098	4087
0,175	1155	4373
0,17	1160	4389
0,165	1220	4542
0,16	1328	4905
0,155	1393	5180
0,15	1423	5325
0,145	1483	5591
0,14	1496	5641
0,135	1520	5740
0,13	1566	5960
0,125	1595	6053
0,12	1607	6113
0,115	1658	6282
0,11	1826	6994
0,105	1873	7124
0,1	1892	7209
0,095	1991	7644
0,09	2075	8071
0,085	4219	17755
0,08	4352	18292
0,075	4485	18905
0,07	7934	36258
0,065	8255	37794
0,06	8766	40177
0,055	9345	43013
0,05	10148	46805
0,045	12025	53016
0,04	13873	64731

0,035	17050	80927
0,03	23102	111286
0,025	33697	167505
0,02	99698	521769
0,015	163309	874441

Fuente: Elaboración propia.

Se tomó como referencia las velocidades promedio de las simulaciones y se calcularon las variaciones entre ellas, las cuales se muestran en la tabla 2 y la tabla 3 respectivamente.

Tabla 2. Velocidades promedio generadas con cada configuración

Prom	Dif prom
5,54	*
5,80	0,26
5,70	-0,10
5,78	0,08
5,01	-0,76
5,30	0,29
5,14	-0,17
5,56	0,42
5,51	-0,04
5,62	0,11
4,83	-0,78
5,88	1,04
5,34	-0,54
5,61	0,27
5,43	-0,18
5,55	0,11
5,56	0,01
5,44	-0,12
5,50	0,06
5,38	-0,12
5,38	0,00
5,12	-0,26
5,30	0,18
5,39	0,08
5,39	0,00
5,40	0,01
5,42	0,02
5,37	-0,05

5,53	0,16
5,52	-0,01
5,59	0,07
5,58	-0,01
5,65	0,07
5,65	-0,01
5,73	0,08
5,82	0,09
5,86	0,04
5,93	0,07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Rango de configuraciones de mallado aceptables

Element size (m)	N nodos	N elementos
0,05	10148	46805
0,045	12025	53016
0,04	13873	64731
0,035	17050	80927
0,03	23102	111286
0,025	33697	167505
0,02	99698	521769
0,015	163309	874441

Fuente: Elaboración propia.

Estas variaciones se graficaron (Figura 3) como la variable independiente y el tamaño de mallado como variable dependiente

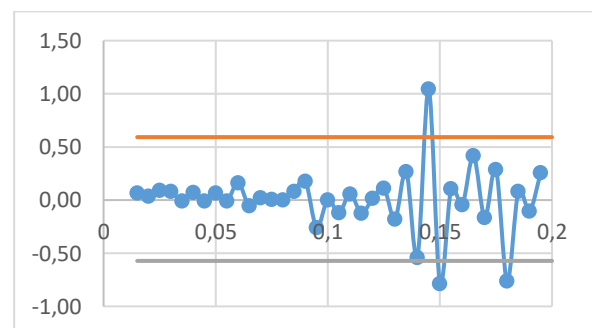


Figura 3. Variaciones de velocidad entre las diferentes configuraciones de malla

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de la Figura 3 podemos determinar que, a mayor tamaño de malla, los resultados son más variables y poco precisos, además podemos observar una disminución de la variabilidad en los en los

resultados de las simulaciones con un tamaño de elemento de mallado menor a 0.05

Para asegurar la precisión del modelo CFD, sus resultados fueron validados mediante mediciones experimentales. Se utilizó un anemómetro Gm8903 para tomar 100 muestras de la velocidad del aire en diferentes puntos de las aletas de enfriamiento del MI en un banco de pruebas tal como se muestra en la figura 4. Las mediciones experimentales se compararon con los resultados del modelo CFD.

Los resultados de la comparación entre la simulación y las mediciones se muestran en la figura 5.



Figura 4. Toma de muestras con anemómetro Gm8903
Fuente: Elaboración propia.

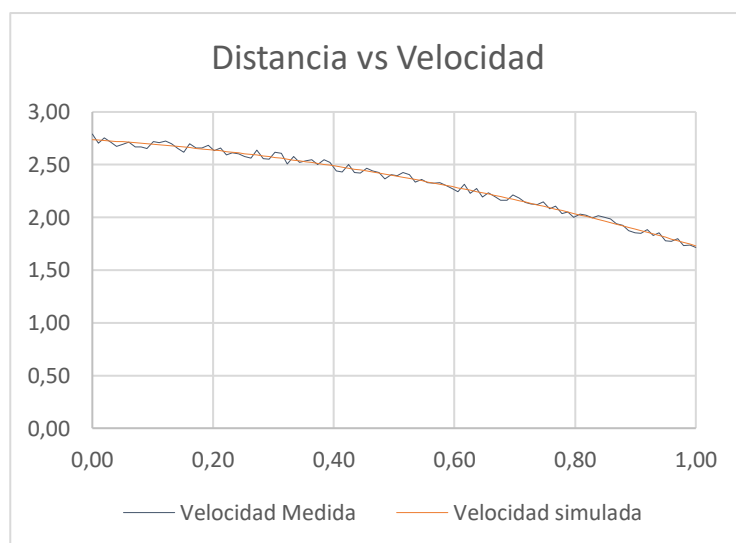


Figura 5. Comparación de la velocidad simulada vs la velocidad medida
Fuente: Elaboración propia.

2.4. Modelado del Flujo en Diversos Motores:

Una vez validado el modelo CFD inicial, se procedió a modelar el flujo de aire en diez motores de diferentes capacidades. Esto generó un conjunto de datos amplio y representativo de las condiciones de operación de diversos MI. Para llevar a cabo estas simulaciones, se utilizó el software ANSYS CFX, aprovechando su capacidad para modelar y simular el flujo de fluidos de manera precisa.

Se seleccionaron diez motores eléctricos de la marca WEG (tabla 4), cuyas geometrías se obtuvieron directamente del catálogo de la empresa.:

Tabla 4. Lista de motores seleccionados

IEC Aluminium Frame Multimounting 13 Frame 200M L Europe Standard
IEC HGF General Purpose 07 Frame 450 II Pole Up to 1.1 kV Standard
IEC Modular Motor Line 09 Frame 160M L Standard SAT ACIS
IEC Saw Arbor 04 Frame 90L Standard
IEC W12 General Purpose Single Phase 05 Frame W80 DIM L 284.5mm Standard
IEC W21 General Purpose 20 Frame 355M L II Pole Europe Standard
IEC W22Xdb Flameproof Ex db eb 05 Frame 250S M II Pole Latin America Standard
IEC W50 General Purpose 04 Frame 400J H II Pole 5.1kV Up to 6.6kV Cast Iron Standard
IEC W51HD 01 Frame 315G F II Pole 5.1kV Up to 6.6kV Cast Iron Terminal Box Standard
IEC Brake Motor with Lenze Brake 09 Frame 132M Standard

Fuente: Elaboración propia.

El rango de velocidades de entrada utilizando la formula (4) se escogieron del motor más grande en estudio, el cual fue el IEC W51HD cuya potencia (P) máxima es igual a 1400 kW con un área de salida (A) igual a 45m² y tomando el valor de la densidad del Aire de forma estándar (1.225kg/m³), dando como resultado una velocidad de 9.2 m/s. Teniendo en cuenta que las RPM maximas del motor en cuestion son 3600, se realiza una regla de tres para determinar la velocidad del aire a 2700 rpm, 1800 rpm y 900 rpm, los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Velocidades de entrada del aire

Metros/segundos	RPM
9.2	3600
6.9	2700
4.6	1800
2.3	900

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Análisis de regresión:

Se realizó un análisis de regresión múltiple utilizando datos simulados de 10 motores eléctricos, donde se exploraron varias características que podrían influir en la eficiencia del motor. Las variables consideradas fueron:

- Ba (Ancho de Aleta): La distancia entre las aletas del motor.
- DExt (Diámetro Exterior): El diámetro externo total del motor.
- Ha (Altura de Aleta): La altura de las aletas que proporcionan refrigeración.
- Lrel (Longitud Relativa): La longitud del motor en relación 0-1.
- Na (Número de Aletas): La cantidad total de aletas de refrigeración.
- Vent (Velocidad de Entrada): La velocidad del flujo de entrada al motor.

El modelo de regresión lineal múltiple ajustado para predecir la variable dependiente Vaire es:

$$Vaire = 0.302798 - 30.6951 \cdot Ba - 1.33562 \cdot DExt + 26.522 \cdot Ha - 0.362385 \cdot Lrel + 0.0103175 \cdot Na + 0.322767 \cdot Vent$$

2.4.1. Resultados del Análisis

El análisis de varianza (ANOVA) muestra que el modelo es altamente significativo (Valor-P < 0.05), con un F de 363.06, indicando una fuerte relación entre las variables explicativas y la variable dependiente.

2.4.2. Medidas de Ajuste del Modelo

R-cuadrada: 93.26%: El modelo explica aproximadamente el 93.26% de la variabilidad observada en la eficiencia del motor.

R-cuadrada ajustada: 93.16%: Esta medida ajustada tiene en cuenta el número de variables en el modelo, proporcionando una evaluación precisa de su capacidad predictiva.

Error estándar del estimador: 0.602958: La desviación estándar de los residuos del modelo.

2.4.3. Consideraciones Adicionales:

El estadístico de Durbin-Watson (DW) revela una posible correlación serial en los residuos, lo que podría sugerir la necesidad de revisar la independencia de las observaciones en el análisis.

2.5. Validación de ecuación empírica:

Para validar el modelo de regresión múltiple desarrollado, se realizaron mediciones reales en tres motores eléctricos específicos. A continuación, se compararon estas mediciones con las predicciones del modelo:

2.5.1 Descripción de los Motores Seleccionados

Los motores seleccionados para la validación representan una muestra diversa en términos de diseño y características físicas, estas características se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Datos geométricos del motor y parámetros operacionales de los 3 motores de validación

	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Diametro mayor	195 mm	175 mm	170 mm
Largo	250 mm	160 mm	165 mm
Alto de aleta	25 mm	12 mm	10 mm
Ancho de aleta	3 mm	1.5 mm	4 mm
Numero de aletas	28	34	36
Ventrada	2.7 m/s	1 m/s	2.56 m/s

Fuente. Elaboracion propia

En las figuras 6, 7 y 8 se muestran las comparaciones de velocidad generadas con el modelo y las mediciones reales de los motores 1, 2 y 3 respectivamente

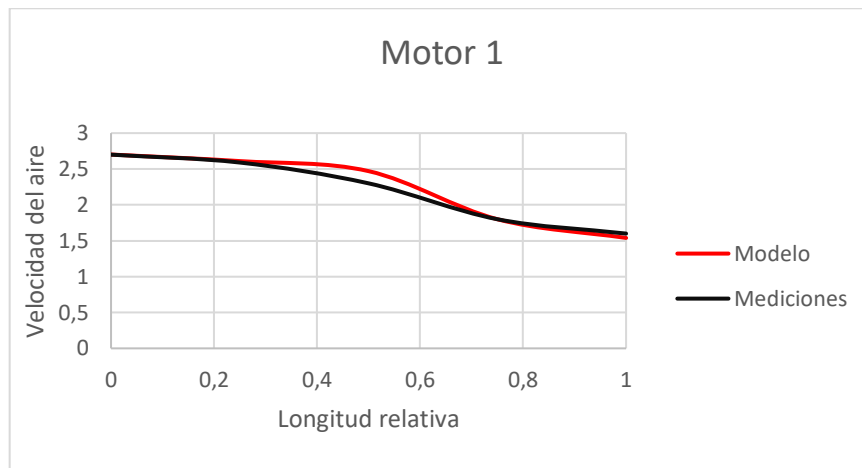


Figura 6. Comparación de la velocidad obtenida con el modelo vs la velocidad medida en el motor 1

Fuente: Elaboración propia.

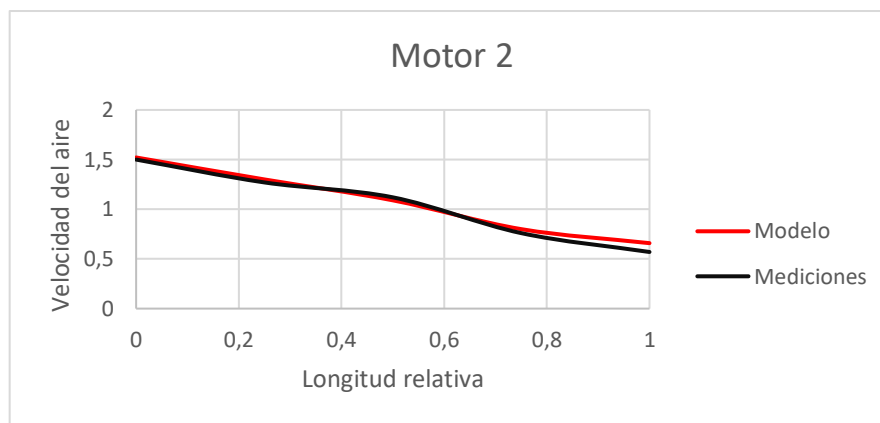


Figura 7. Comparación de la velocidad obtenida con el modelo vs la velocidad medida en el motor 2

Fuente: Elaboración propia.

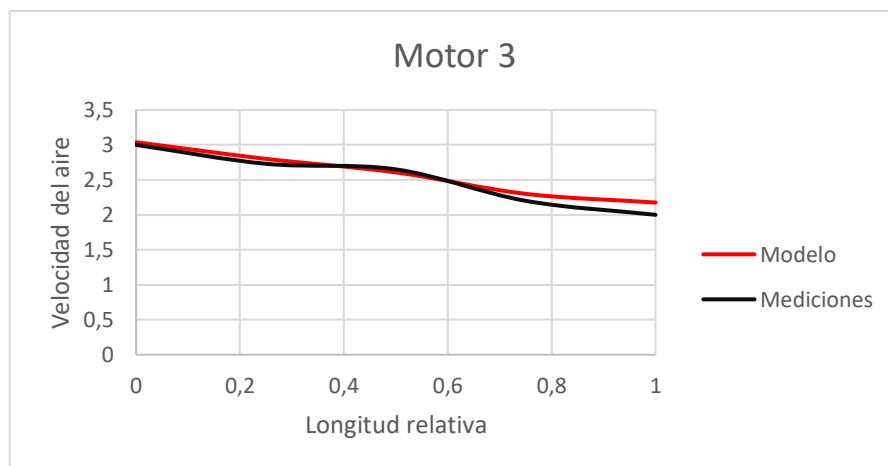


Figura 8. Comparación de la velocidad obtenida con el modelo vs la velocidad medida en el motor 3

Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas obtenidas muestran una consistencia notable entre las mediciones reales y las predicciones del modelo para cada motor. Esto indica que el modelo de regresión múltiple desarrollado es capaz de capturar adecuadamente la variabilidad en la eficiencia de los motores eléctricos basado en las características físicas evaluadas: ancho de aleta, diámetro exterior, altura de aleta, longitud relativa, número de aletas y velocidad de entrada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó una alta similitud entre las mediciones reales y las predicciones del modelo para todos los motores evaluados. Las gráficas correspondientes muestran una alineación cercana entre los puntos medidos y las líneas de predicción del modelo, indicando una buena capacidad del modelo para estimar la eficiencia de los motores eléctricos.

3.1. Evaluación por Motor:

Motor 1: Las diferencias entre mediciones y predicciones fueron mínimas, indicando una excelente capacidad predictiva del modelo para este tipo de configuración de motor.

Motor 2: A pesar de algunas variaciones observadas, el modelo pudo ajustarse adecuadamente a las diferencias específicas de este motor.

Motor 3: Se observaron diferencias ligeramente mayores en algunos casos, lo cual podría atribuirse a particularidades en el diseño o condiciones operativas. Aun así, el modelo logró ofrecer estimaciones precisas en la mayoría de los casos evaluados.

3.2. Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos confirman la robustez del modelo de regresión múltiple desarrollado para predecir la eficiencia de motores eléctricos. La alta correlación entre las mediciones reales y las predicciones del modelo sugiere que las características físicas consideradas tienen un impacto significativo en la eficiencia del motor. Además:

Aplicabilidad del Modelo: La capacidad del modelo para adaptarse a diferentes tipos de motores y entregar predicciones precisas es esencial para su aplicación práctica en la industria de la motorización eléctrica.

Validación Crucial: La validación con datos reales refuerza la confianza en la utilidad del modelo, proporcionando una herramienta efectiva para

ingenieros y diseñadores que buscan optimizar el rendimiento de los motores eléctricos.

Limitaciones y Mejoras Futuras: Aunque el modelo mostró un desempeño sólido, se observaron algunas variaciones en los resultados para ciertos motores. Investigaciones futuras podrían explorar modificaciones en el modelo para capturar aún más precisamente los efectos de diseño y operación en la eficiencia del motor.

4. Conclusiones

se desarrolló y validó un modelo de regresión múltiple para estimar la velocidad del aire a través de las aletas de enfriamiento en motores eléctricos, utilizando datos geométricos y operacionales. Se llevó a cabo una validación exhaustiva del modelo utilizando datos reales de tres motores eléctricos diferentes.

Los resultados demostraron una alta concordancia entre las predicciones del modelo y las mediciones reales de la velocidad del aire en las aletas de enfriamiento. Esto valida la precisión y robustez del modelo propuesto para estimar de manera efectiva la velocidad del aire en condiciones operativas reales.

La capacidad del modelo para integrar datos geométricos del motor y parámetros operacionales del ventilador permite una estimación precisa de la velocidad del aire, crucial para la gestión térmica y la eficiencia energética en aplicaciones industriales como lo es la medición de pérdidas de energía mediante termografía infrarroja.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la universidad de Córdoba por financiación en el ámbito del programa para el sostenimiento y mejoramiento de indicadores de los grupos de investigación y se aprueba la convocatoria interna para el año 2022”, según acta No. FI-04-22 de 2023.

6. Referencias

- [1] E. C. Quispe, X. M. Lopez-Fernandez, A. M. S. Mendes, A. J. Marques Cardoso, and J. A. Palacios, “Influence of the positive sequence voltage on the derating of three-phase induction motors under voltage unbalance,” in Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013, 2013, no. 100, pp. 100–105, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556239.
- [2] M. O. Adissi, A. C. Lima Filho, R. D. Gomes, D. M. G. B. Silva, and F. A. Belo, “Implementation and

Deployment of an Intelligent Industrial Wireless System for Induction Motor Monitoring,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 139, no. 12, p. 124502, 2017, doi: 10.1115/1.4037167.

[3] V. Sousa, P. R. Viego, J. R. Gomez, E. C. Quispe, and M. Balbis, “Estimating induction motor efficiency under no-controlled conditions in the presences of unbalanced and harmonics voltages,” in *CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Proceedings of IEEE Chilecon 2015*, 2016, pp. 567–572, doi: 10.1109/Chilecon.2015.7400434.

[4] R. Alfredo Osornio-Rios, J. A. Antonino-Daviu, and R. De Jesus Romero-Troncoso, “Recent industrial applications of infrared thermography: A review,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 615–625, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2884738.

[5] M. Narrol and W. Stiver, “Quantitative Thermography for Electric Motor Efficiency Diagnosis,” 2011, doi: 10.24908/pceea.v0i0.3947.

[6] K. Komeza and M. Dems, “Finite-element and analytical calculations of no-load core losses in energy-saving induction motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2934–2946, 2011.

[7] G. León Martínez and J. Mass Ortega, “Diseño de una hélice de alto rendimiento para mejorar la eficiencia de navegación de un vehículo acuático en el río Sinú,” 2023.