

# EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN MEDIANTE TERMOGRAFÍA

**Bryan Esteven Agudelo Alvarez<sup>1</sup>, Juan José Cabello Eras<sup>2</sup>, Jorge Mario Mendoza Fandiño<sup>3</sup>, Vladimir Sousa Santos<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>ICT, Universidad de Córdoba, Colombia. bagudeloalvarez@correo.unicordoba.edu.co

<sup>2</sup>ICT, Universidad de Córdoba, Colombia. juancabelloe@correo.unicordoba.edu.co

<sup>3</sup>ICT, Universidad de Córdoba, Colombia. jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co

<sup>4</sup>GIOP, Universidad de la Costa, Colombia. vsousa@cuc.edu.co

## Resumen

Controlar la eficiencia de los motores eléctricos de inducción (MI) en tiempo real es importante, ya que consumen cerca del 60% de la demanda energética a nivel industrial. Se llevaron a cabo corridas experimentales en un ambiente controlado bajo diferentes factores de carga (20, 40, 60, 80 y 100%) con una duración de 120 minutos cada una, bajo los mismos factores de carga se midió la eficiencia del MI con un método convencional (Torquímetro y mediciones de potencia eléctrica). En cada corrida luego de asegurar que el MI alcanzará un estado térmico estacionario se tomaron fotografías con una cámara termográfica (Imágenes IR) y se estimaron las pérdidas de energía por transferencia de calor en cada régimen de operación para obtener la eficiencia por el método IR, los resultados del métodos basado en IR se compararon con los obtenidos por el método convencional y se pudo demostrar mediante los resultados parciales una convergencia a la eficiencia medida en la zona de alta carga bajo diferentes consideraciones de transferencia de calor.

**Palabras clave:** Termografía, eficiencia, pérdidas de energía.

## Abstract

Monitoring the real-time efficiency of induction motors (IM) is crucial as they account for approximately 60% of industrial energy demand. Experimental runs were conducted in a controlled environment under different load conditions (20, 40, 60, 80, and 100%), each lasting 120 minutes. Under the same load conditions, IM efficiency was measured using a conventional method (torque meter and electrical power measurements). In each run, after ensuring that the IM reached a steady state thermal condition, infrared (IR) images were captured using a thermal camera. Energy losses due to heat transfer were estimated for each operating condition to determine efficiency using the IR method. The results from the IR-based method were compared with those obtained through the conventional method, and partial results demonstrated a convergence to the efficiency measured in the high-load region under various heat transfer considerations.

**Keywords:** Thermography, efficiency, energy losses.

## 1. Introducción

Los accionamientos electromecánicos (AEM) consumen alrededor del 68 % de la electricidad en el sector industrial [1] y los motores eléctricos de inducción el 60% [2], se estima que mejorar la eficiencia operacional de los AEM, puede reducir su consumo eléctrico entre el 20% y el 30%, y rebajar la demanda total de

electricidad a nivel mundial alrededor del 10% [3]. Por lo que asegurar que trabajen con la mayor eficiencia posible es de gran importancia [4]. Para evaluar la eficiencia de los MI es fundamental monitorear en tiempo real el factor de carga, eficiencia y cuantificar las pérdidas de energía [5] Sin embargo, esto requiere medir la potencia del eje lo que se realiza mediante métodos

invasivos y costosos. Se han desarrollado varios métodos matemáticos de estimación de la eficiencia energética enumerados a continuación: Método de la placa [6], [7], Método de deslizamiento [8], [9], Método de la corriente [10] y método de circuito equivalente [11], [12] pero estos solo tienen una precisión aceptable para determinados valores de carga del motor y se hacen más imprecisos cuando operan con un factor de carga inferior al 40 % que es cuando menor es la eficiencia [13], por lo que se puede afirmar que la evaluación y monitoreo de la eficiencia en tiempo real y condiciones de campo en los MI es una problemática sin resolver. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un método basado en termografía (IR) que permita la estimación directa de las pérdidas de energía en MI. Para esto se busca validar el concepto de pérdidas de energía en un ambiente controlado, evaluar el método para diferentes factores de carga, desarrollar el concepto de pérdidas de energía y determinar si existe, la relación entre la temperatura superficial de los MI y la eficiencia.

## 2. Metodología

Las cámaras termográficas modernas pueden medir la temperatura de una superficie en función de la radiación emitida, brindando tantos datos de temperatura como píxeles tenga la imagen, los cuales están distribuidos en filas y columnas para formar la imagen. Por lo cual con un procesamiento previo a la fotografía se puede obtener matrices que representan la temperatura en cada punto del objeto evaluado. El conocer los valores de temperatura en cada píxel, área de la superficie, en este caso la superficie del MI y las condiciones del ambiente, se puede evaluar la transferencia de calor píxel a píxel en toda la superficie del MI, que se corresponde con las pérdidas de energía

que se producen en el motor cuando se encuentra en el estado estacionario [14]. El balance de energía de un

MI se muestra en la figura 1.

Donde:

$$Q_{cv} = 3A(T_m - T_{amb})^{1,25} \quad (1)$$

$$Q_{rad} = A\epsilon\sigma(T_m^4 - T_{amb}^4) \quad (2)$$

$$Q_{con} = \frac{KA_{st}(T_{ss} - T_{is})}{L} \quad (3)$$

$$P_{elétrica} = \sqrt{3}VI \cos \varphi \quad (4)$$

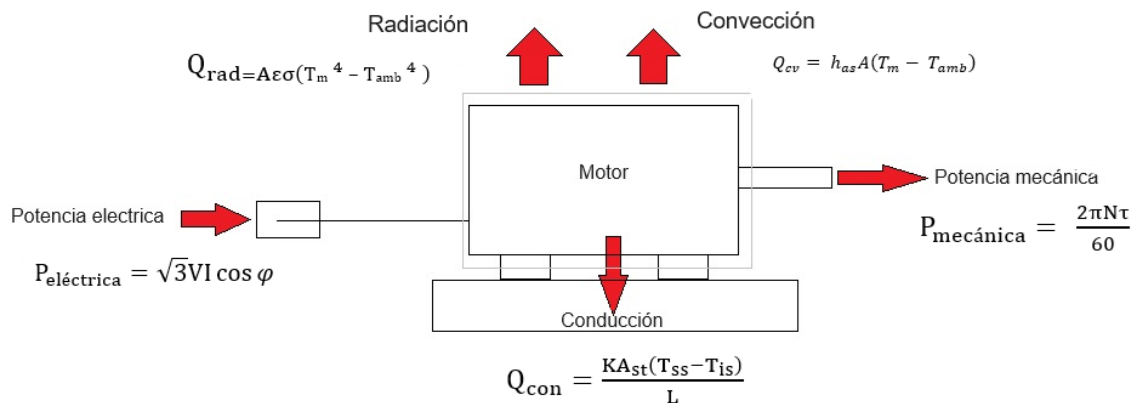
$$P_{mecánica} = \frac{2\pi N\tau}{60} \quad (5)$$

La eficiencia de un MI se puede expresar en términos de la potencia de entrada y salida del sistema.

$$n_m = \frac{P_{mecánica}}{P_{elétrica}} 100\% \quad (6)$$

De tal forma que la eficiencia basada en imágenes IR se puede expresar en términos de las pérdidas de energía en forma de calor, términos que corresponden a la transformación de la energía eléctrica en calor y potencia mecánica.

$$n_c = \frac{P_{mecánica}}{P_{mecánica} + Q_{con} + Q_{rad} + Q_{cv}} 100\% \quad (7)$$



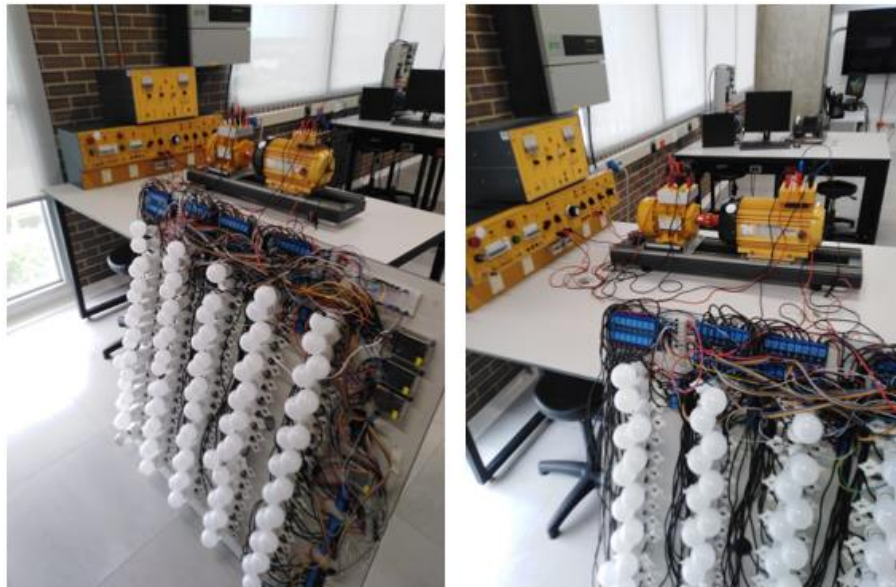
**Figura 1.** Balance de energía de un MI. Fuente: elaboración propia.

## 2.1 Desarrollo de experimentos

El trabajo experimental se desarrolló en el banco de ensayos mostrado en la figura 2, el MI acciona un

(lateral izquierdo, lateral derecho, entrada de aire y salida de aire).

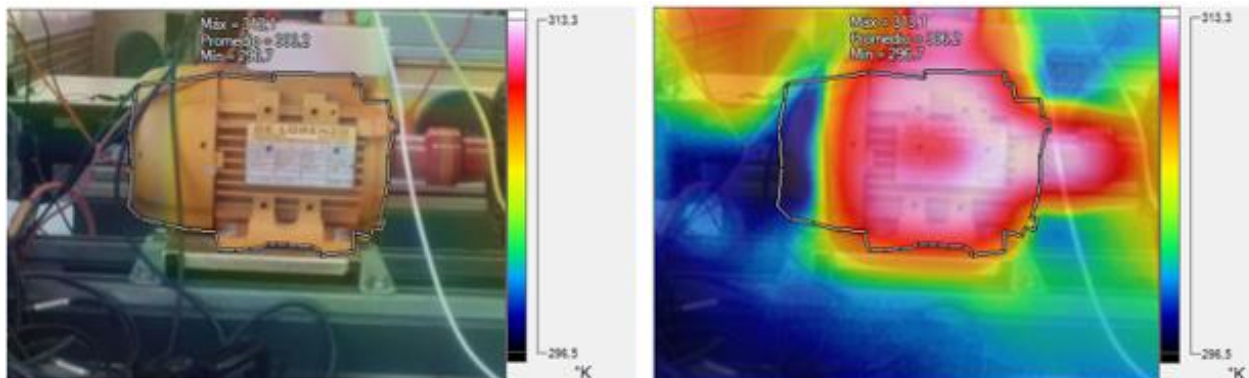
generador que se carga mediante el panel de bombillos y permite hacer pruebas de larga duración que permiten ensayar el motor cuando ha alcanzado el estado de equilibrio térmico estacionario



**Figura 2.** Banco de ensayo de MI. Fuente: elaboración propia.

Se realizaron cinco corridas en estado estacionario midiendo en el banco la eficiencia del MI para un factor de cara de 20, 40, 60, 80 y 100 %.

Simultáneamente se tomaron las imágenes termográficas como las mostradas en la figura 3, también se midió con un analizador de redes la potencia eléctrica de entrada.



**Figura 3.** Delimitación de zonas de temperatura. Fuente: elaboración propia

Para la evaluación de las pérdidas de energía por transferencia de calor se dividió el MI en cuatro zonas

Se tomaron imágenes térmicas de cada zona y se calcularon las pérdidas de energía por transferencia de calor.

### 3. Resultados

La tabla 3-1 presenta los valores de la eficiencia medida para cada factor de carga.

$\rho$ : Densidad del aire  $\frac{Kg}{m^3}$ .

$C_p$ : Calor específico del aire  $\frac{kJ}{kgK}$

A: Área  $m^2$

Los cuáles serán la referencia para comparar los resultados obtenidos mediante imágenes IR.

**Tabla 1.** Valores de referencia para la eficiencia a calcular.

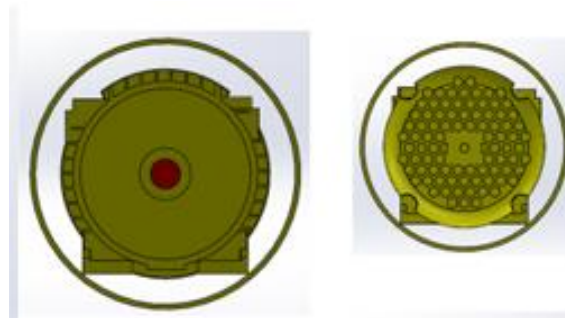
Factor de carga [%]	20	40	60	80	100
Potencia mecánica [w]	221	416	626	790	1060
Potencia eléctrica [w]	390	630	810	1020	1320
Eficiencia medida [%]	57	66	77	77	80

Fuente: elaboración propia

#### 3.1 Modelo de aire simple

El modelo de convección forzada más simple aplicado a un motor es un modelo de flujo de aire simple, en el cual se considera al MI como si hubiese un tubo que restringe el flujo de aire en su alrededor [4] (ver figura 4).

Obteniendo el máximo calor transferido por convección, entrando el aire a la temperatura ambiente y saliendo a la temperatura promedio de la superficie del MI.



**Figura 4.** Representación esquemática del modelo de aire simple. Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el calor transferido por convección mediante el modelo de aire simple, se utiliza la ecuación (8)

$$Q_{cv} = h_{as} A (T_m - T_{amb}) \quad (8)$$

Y el coeficiente de transferencia de calor se calcula utilizando la ecuación (9).

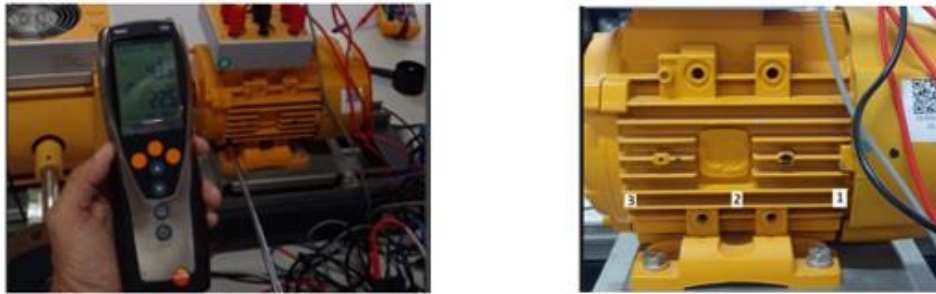
$$h_{as} = \frac{\rho C_p Q_a}{A} \quad (9)$$

$Q_a$ : Flujo volumétrico de aire  $\frac{m^3}{s}$

$$\rho = 2,5735 - (T \cdot 0,00475) \quad T [K] \quad (10)$$

$$C_p = 996,725 + 0,0325T \quad (11)$$

Con las ecuaciones 10 y 11 se puede calcular la densidad y calor específico a presión constante del aire, en función de la temperatura. El flujo de aire se midió con un anemómetro en tres puntos a lo largo del MI (ver figura 5) para establecer el valor de  $V_a$  y el coeficiente  $h_{as}$ .



**Figura 5.** Medición de la velocidad del aire. Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las mediciones del flujo de aire y la temperatura promedio superficial en los puntos 1,2 y 3

**Tabla 2.** Valores promedio de temperatura y velocidad del aire medidas sobre los laterales.

Factor de carga [%]	Lateral izquierdo					
	Temperatura promedio [K]			Velocidad promedio [m/s]		
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 1	Punto 2	Punto 3
20	294,75	295,10	295,25	7,90	5,30	4,40
40	295,45	295,25	295,35	7,70	4,95	4,40
60	295,25	295,40	295,65	7,85	5,15	4,50
80	295,20	295,55	295,90	7,90	5,15	4,35
100	295,45	296,10	296,60	8,10	4,75	4
	Lateral derecho					
20	294,75	295,10	295,25	8	5,05	4,05
40	295,75	295,25	295,55	7,90	4,95	4,40
60	295,25	295,40	295,75	7,85	5,15	4,15
80	295,20	295,55	295,90	7,90	5,10	4,40
100	295,45	296,10	296,60	8,05	5,10	4,15

Fuente: elaboración propia.

Con las medidas de velocidad y el área de salida del aire, se puede calcular el flujo como:

$$Q_A = AV_a \quad (12)$$

Donde:  $V_a$ : Velocidad promedio del aire en. [m/s].  
 $A$ : Área de salida de aire. [m<sup>2</sup>],  $Q_A$ : Flujo volumétrico de aire. [m<sup>3</sup>/s].  $A = 0,003698 \text{ m}^2$

**Tabla 3.** coeficiente de transferencia de calor por convección para el modelo de aire simple en el lateral izquierdo.

$F_c$ (%)	$T$ (K)	$V$ ( $\frac{m}{s}$ )	$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	$C_p$ ( $\frac{kJ}{kgK}$ )	$Q_A$ ( $\frac{m^3}{s}$ )	$A$ (m <sup>2</sup> )	$h_{as}$ ( $\frac{W}{m^2K}$ )
Lateral izquierdo							
20	294,75	7,9	1,173	1006,304	0,0292	0,183658	187,67232
40	295,45	7,7	1,17	1006,327	0,0284	0,183658	182,06794
60	295,25	7,85	1,171	1006,32	0,029	0,183658	186,07205
80	295,2	7,9	1,171	1006,319	0,0292	0,183658	187,35512
100	295,45	8,1	1,17	1006,327	0,0299	0,183658	191,6842
Lateral derecho							
20	294,75	8	1,173	1006,304	0,030	0,183658	190,211
40	295,75	7,9	1,169	1006,337	0,029	0,183658	187,079
60	295,25	7,85	1,171	1006,321	0,029	0,183658	186,270
80	295,2	7,9	1,171	1006,319	0,029	0,183658	187,494
100	295,45	8,05	1,170	1006,327	0,030	0,183658	190,862

Una vez conocidos los valores de  $h_{as}$  se calcula la eficiencia para todos los factores de carga, los resultados se muestran en la tabla 4

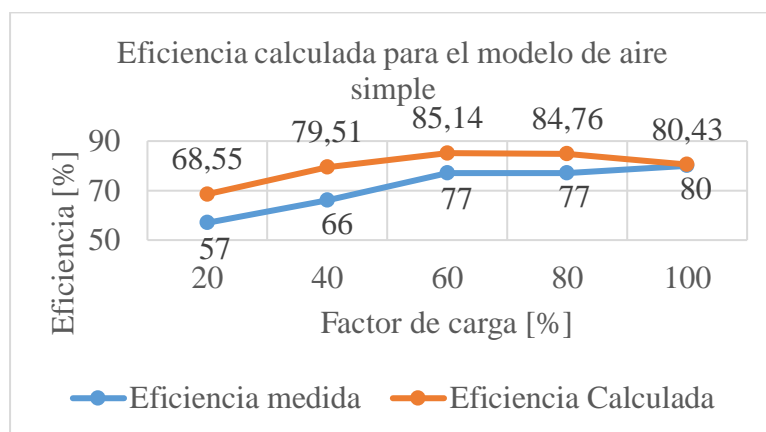
**Tabla 4.** Eficiencia calculada mediante termografía.

Factor de carga [%]	20	40	60	80	100
Pérdidas por convección [w]	84,52	85,98	88,02	110,04	202,10
Pérdidas por conducción [w]	14,33	18,55	18,55	28,67	49,75
Pérdidas por radiación [w]	2,53	2,66	2,67	3,32	6,07
Potencia mecánica [w]	221,00	416,00	626,00	790,00	1060,00
Eficiencia calculada [%]	68,55	79,51	85,14	84,76	80,43
Eficiencia medida [%]	57,00	66,00	77,00	77,00	80,00

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la eficiencia del MI medidos en el banco de ensayos y de la estimación realizada mediante imágenes IR se muestran en la figura 5

en la que se ve una mayor aproximación para los factores del 60% al 100%, siendo la zona de alta carga la región donde deben operar los MI para alcanzar máxima eficiencia.

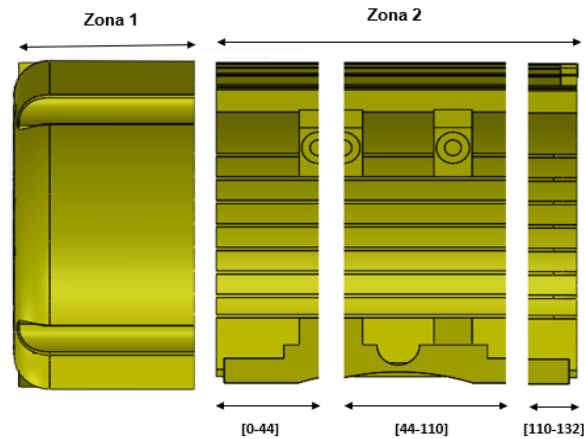
**Figura 6.** Eficiencia calculada por imágenes IR vs Eficiencia medida. Fuente: elaboración propia.



### 3.2 Modelo combinado

En este modelo se divide el MI en dos zonas, la zona de las aletas (zona 2) será evaluada bajo convección forzada y variable en función de la longitud,

mientras la zona de la tapa del ventilador (zona 1) será evaluada bajo convención natural en su totalidad.



**Figura 7.** Zona 1 y 2 del MI. Fuente: elaboración propia.

Los coeficientes de transferencia de calor por convección para el modelo combinado en cada sección del MI se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.** Coeficientes de transferencia de calor para las secciones del MI en  $\left[\frac{w}{m^2K}\right]$ .  
 $h_{[0-44]}$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el tramo [0-44].

Fc (%)	Lateral izquierdo			Lateral derecho		
	$h_{[0-44]}$	$h_{[44-110]}$	$h_{[110-132]}$	$h_{[0-44]}$	$h_{[44-110]}$	$h_{[110-132]}$
20	187,764	146,468	111,547	190,211	143,309	104,024
40	182,546	139,155	108,648	187,079	140,688	108,661
60	186,26	143,501	111,762	186,27	143,501	106,213
80	187,446	143,832	109,297	187,494	143,05	109,699
100	192,029	138,838	100,367	190,862	143,974	105,46

Fuente: elaboración propia.

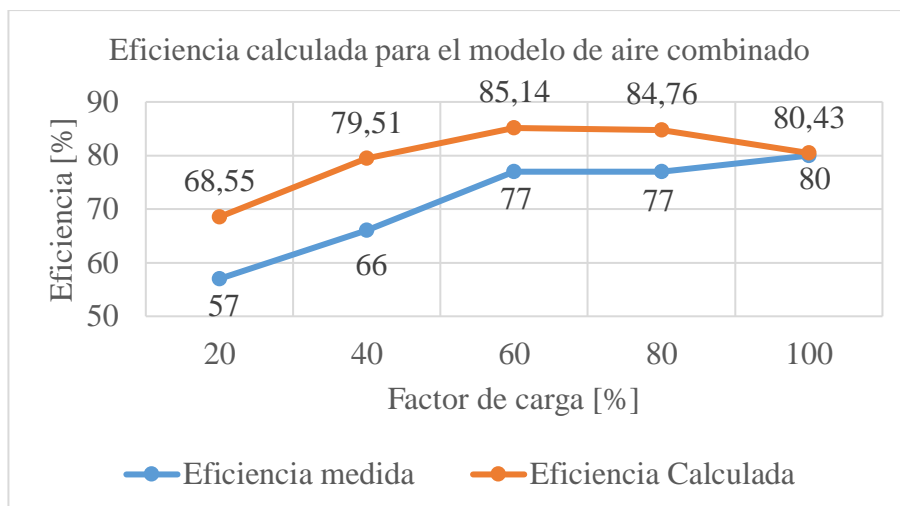
Bajo la consideración del modelo combinado el coeficiente de transferencia de calor por convección varía a lo largo de la longitud del MI (ver tabla 5).

La tabla 6 y la gráfica 6 muestran las pérdidas y la eficiencia calculada para este modelo.

**Tabla 6.** Pérdidas por el mecanismo de convección bajo el modelo combinado en los tramos especificados.  $C_n(w)$  : pérdidas por convección natural,  $w_{[0-44]}$  : Pérdidas por convección forzada en el tramo [0 – 44].

Fc (%)	$C_n(w)$	Lateral izquierdo			Lateral derecho			Total (w)
		$w_{[0-44]}$	$w_{[44-110]}$	$w_{[110-132]}$	$w_{[0-44]}$	$w_{[44-110]}$	$w_{[110-132]}$	
20	0,420	14,63	15,58	3,87	7,16	7,99	2,76	52,41
40	0,324	13,91	16,41	4,12	5,86	14,61	4,11	59,34
60	0,438	8,39	21,05	2,76	7,16	10,05	3,38	53,23
80	0,684	14,99	16,27	3,99	13,73	29,82	6,38	85,87
100	0,884	12,65	19,95	3,41	21,80	33,00	8,50	100,19

Fuente: elaboración propia.



**Figura 8.** Eficiencia calculada vs Eficiencia medida para el modelo de aire simple. Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

El modelo de aire simple ofrece una buena aproximación de la eficiencia del motor en condiciones de carga alta ( $\geq 60\%$ ). Sin embargo, en condiciones de carga baja, la discrepancia entre los valores medidos y calculados sugiere que el modelo sobreestima la eficiencia real del motor. Estos resultados indican que, aunque el modelo es útil, su precisión podría mejorarse para condiciones de baja carga, lo que sugiere la necesidad de ajustes o la inclusión de más variables en el modelo para capturar mejor las pérdidas de energía a bajos factores de carga.

Mientras que para el modelo de aire combinado la eficiencia calculada muestra una tendencia ascendente hasta un máximo del 85.14% a un 60% de carga, disminuyendo ligeramente después, mientras que la eficiencia medida alcanza un máximo del 77% en 60% y 80% de carga. La discrepancia entre la eficiencia medida y calculada es mayor en cargas bajas (20% y 40%) y disminuye a medida que aumenta la carga, siendo mínima al 100% (0.43 puntos porcentuales). Comparado con el modelo de aire simple, el modelo de aire combinado se ajusta mejor a la eficiencia medida, especialmente en cargas altas, aunque sigue habiendo una sobreestimación en cargas bajas.

#### 4.1 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**.

#### 5. Referencias

- [1] Adissi, M. O., Lima Filho, A. C., Gomes, R. D., Silva, D. M. G. B., & Belo, F. A. (2017). Implementation and Deployment of an Intelligent Industrial Wireless System for Induction Motor Monitoring. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 139(12). <https://doi.org/10.1115/1.4037167>
- [2] Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., & Pastorelli, M. (2002). A simplified thermal model for variable speed self cooled industrial induction motor. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2(4), 723–730. <https://doi.org/10.1109/ias.2002.1042640>
- [3] Chirindo, M., Khan, M. A., & Barendse, P. S. (2016). Considerations for Nonintrusive Efficiency Estimation of Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2), 741–749. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2477801>
- [4] Chuang, H. C., Li, G. De, & Lee, C. T. (2019). The efficiency improvement of AC induction motor with constant frequency technology. *Energy*, 174, 805–813. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.019>
- [5] Di Piazza, M. C., & Pucci, M. (2016). Techniques for efficiency improvement in PWM motor drives. *Electric Power Systems Research*, 136, 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.02.031>
- [6] Gharakhani Siraki, A., & Pillay, P. (2012). Comparison of two methods for full-load in situ induction motor efficiency estimation from field testing in the presence of over/undervoltages and unbalanced supplies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(6), 1911–1921. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2226134>



- [7] Gómez, J. R., Sousa, V., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutiérrez, A., Viego, P. R., Quispe, E. C., & de León, G. (2022). Assessment criteria of the feasibility of replacement standard efficiency electric motors with high-efficiency motors. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121877>
- [8] Holmquist, J. R., Rooks, J. A., & Richter, M. E. (2004). Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(1), 242–248. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821654>
- [9] Hsu, J. S., Member, S., Kueck, J. D., Member, S., Olszewski, M., Casada, D. A., Otaduy, P. J., & Tolbert, L. M. (1998). Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(1), 117–125.
- [10] Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. In *Jurnal Penelitan Pendidikan Guru Sekolah Dasar* (Cuarta, Vol. 6, Issue August). PEARSON.
- [11] Lu, B., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2006a). A nonintrusive efficiency estimation method for in-service motor testing using a modified induction motor equivalent circuit. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*. <https://doi.org/10.1109/PESC.2006.1712010>
- [12] Lu, B., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2006b). A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(4), 924–933. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.876065>
- [13] Lu, B., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2008). A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(6), 1666–1674. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2006297>
- [14] Narrol, M. H. (2009). *Quantitative thermographic diagnostics of electric motors for reducing energy demand* (University of Guelph. School of Engineering. (ed.)). University of Guelph.
- [15] Narrol, M., & Stiver, W. (2011). Quantitative Thermography for Electric Motor Efficiency Diagnosis. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEAA)*. <https://doi.org/10.24908/pceea.v0i0.3947>
- [16] Quispe, E. C., Lopez-Fernandez, X. M., Mendes, A. M. S., Marques Cardoso, A. J., & Palacios, J. A. (2013). Influence of the positive sequence voltage on the derating of three-phase induction motors under voltage unbalance. *Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013*, 100, 100–105. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556239>
- [17] Rocha, J. H. A., & Póvoas, Y. V. (2017). La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado: Revisión del estado del arte. *Revista ALCONPAT*, 7, 200–214.
- [18] Siva, K., & R, P. (2014). *Tecnologías de almacenamiento de energía térmica para la sostenibilidad* (Elsevier (ed.)). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-09744-7>
- [19] Sousa Santos, V., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutierrez, A., & Cabello Ulloa, M. J. (2019). Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 136, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.080>
- [20] Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (Sexta). PEARSON. <https://books.google.com.co/books?id=ehxKXip1j6EC&printsec=frontcover&dq=maquinas+electricas&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi26K6m5MnOAhVFGx4KHaduADkQ6AEIMjAC#v=onepage&q=maquinas electricas&f=false>
- [21] Yunus A, C., & Afshin J, G. (2011). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. (Cuarta). Mc Graw Hill.

#### Nomenclatura

$A$	Área [ $m^2$ ]
$A_{st}$	Área de sección transversal [ $m^2$ ]
$\cos\phi$	Factor de potencia 0,84
$\sigma$	Constante de Stepan Boltzman [ $w(m^2K)^{-1}$ ]
$\varepsilon$	Emisividad [–]
$E_{entrada}$	Energía de entrada [w]
$E_{salida}$	Energía de salida [w]
$I$	Corriente [A]
$K$	Conductividad térmica [ $(K\ m)\ w^{-1}$ ]
$L$	Longitud [m]
$N$	Número de revoluciones [rpm]
$n_c$	Eficiencia calculada [%]
$n_m$	Eficiencia medida [%]
$P_{eléctrica}$	Potencia eléctrica [w]
$P_{mecánica}$	Potencia mecánica [w]
$Q_{con}$	Calor transferido por conducción [w]
$Q_{rad}$	Calor transferido por radiación [w]
$Q_{cv}$	Calor transferido por convección [w]
$\tau$	Torque de frenado [Nm]
$T_{amb}$	Temperatura de los alrededores [K]
$T_m$	Temperatura de la superficie del motor [K]
$T_{ss}$	Temperatura superior del apoyo del motor [K]
$T_{is}$	Temperatura inferior del apoyo del motor [K]
$V$	Voltaje [V]