

# Obtención de parámetros de un modelo térmico para un motor trifásico usando algoritmos genéticos

Luis D. Murillo-Soto, Magister<sup>1</sup>, Geovanni Figueroa-Mata, Magister<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, [lmurillo@itcr.ac.cr](mailto:lmurillo@itcr.ac.cr), [gfigueroa@itcr.ac.cr](mailto:gfigueroa@itcr.ac.cr)

**Resumen-** Se presenta la metodología para obtener los parámetros térmicos de un motor trifásico de 2 Hp, 230V, 60Hz usando algoritmos genéticos. Se resuelve analíticamente un modelo térmico para usar su solución en la estimación de los parámetros. **Palabras Claves-** Modelo térmico, motor, algoritmo genético.

## I. INTRODUCCIÓN

La temperatura de operación en motores trifásicos de inducción es el principal reductor de su vida útil, en [1] se muestran la relación:

$$L_x = L_{100} \cdot 2^{(T_c - T_x)/k} \quad (1)$$

Donde  $L_x$  es la nueva estimación de vida proyectada,  $L_{100}$  es la proyección de fábrica (20 mil horas),  $T_x$  es la nueva temperatura de operación,  $T_c$  es la temperatura del tipo de aislamiento y  $k$  es una constante según el tipo de aislamiento. Este trabajo muestra la estimación de los parámetros térmicos del motor a partir de datos experimentales y un algoritmo genético con la finalidad de estimar posteriormente el comportamiento térmico de la máquina.

## II. MODELO TÉRMICO DEL MOTOR TRIFÁSICO

En [2] se propone el modelo térmico general:

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} = P - G\theta \quad (2)$$

Sin embargo [3] y [4] muestran un modelo simplificado que se adopta y se muestra en (3).

$$\begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_r \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} = \begin{bmatrix} P_s \\ P_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (G_s + G_{sr}) & -G_{sr} \\ -G_{sr} & (G_r + G_{sr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

El modelo anterior posee sólo dos nodos llamados  $\theta_s$  y  $\theta_r$  que representan la temperatura promedio del estator y del rotor respectivamente. Las pérdidas de potencia del motor se representan como fuentes de calor que elevan las temperaturas internas, la pérdida del estator se llamada  $P_s$  y la del rotor  $P_r$ . La capacidad del estator y rotor de almacenar calor, es el producto de la masa del componente por el calor específico del material, tanto el estator como el rotor poseen capacitancias térmicas llamadas  $C_s$  y  $C_r$ . Finalmente las conductancias térmicas entre el estator y el ambiente, entre el rotor y el estator, entre el rotor y el ambiente son  $G_s, G_{sr}, G_r$  respectivamente, donde la conductancia es el inverso de la resistencia térmica.

Se solucionó de forma analítica la ecuación (3) y se obtuvo las ecuaciones (4) que modelan la temperatura del estator  $\theta_s$  y del rotor  $\theta_r$  en función de los parámetros térmicos.

$$\begin{aligned} \theta_s &= C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + \frac{E}{B} \\ \theta_r &= C_3 e^{r_1 t} + C_4 e^{r_2 t} + \frac{F}{B} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde las constantes de (4) en función de los parámetros son:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{E(r_2 C_s + G_s + G_{sr}) - F G_{sr}}{B C_s (r_1 - r_2)} & C_2 &= \frac{E(r_1 C_s + G_s + G_{sr}) - F G_{sr}}{B C_s (r_2 - r_1)} \\ C_3 &= \frac{C_1 (r_1 C_s + G_s + G_{sr})}{G_{sr}} & C_4 &= \frac{C_2 (r_2 C_s + G_s + G_{sr})}{G_{sr}} \\ B &= \frac{G_s G_r + G_s G_{sr} + G_r G_{sr}}{C_s C_r} & E &= \frac{G_r P_s + G_{sr} P_s + G_{sr} P_r}{C_s C_r} \\ F &= \frac{G_s P_r + G_{sr} P_r + G_{sr} P_s}{C_s C_r} & & r_1, r_2 \text{ son las soluciones de la ecuación característica asociada.} \end{aligned}$$

## II. ALGORITMO GENÉTICO

Los algoritmos genéticos son utilizados tradicionalmente para resolver problemas de búsqueda y/o optimización, en los cuales se tiene que determinar la mejor solución de un conjunto de soluciones factibles de gran tamaño. A cada solución factible generada se le asocia un valor llamado aptitud. Este valor cuantifica la calidad de la solución y permite comparar soluciones de la misma generación y/o con soluciones de generaciones anteriores.

El algoritmo genético programado según criterios de [5], da inicio con una población inicial de soluciones factibles, la cual se construye de forma aleatoria. Se evalúa la aptitud de cada individuo de la población y se construye nueva población mediante cruzamiento, mutación y selección. Este proceso se repite hasta que algún criterio de parada sea satisfecho, como se muestra en la figura 1.

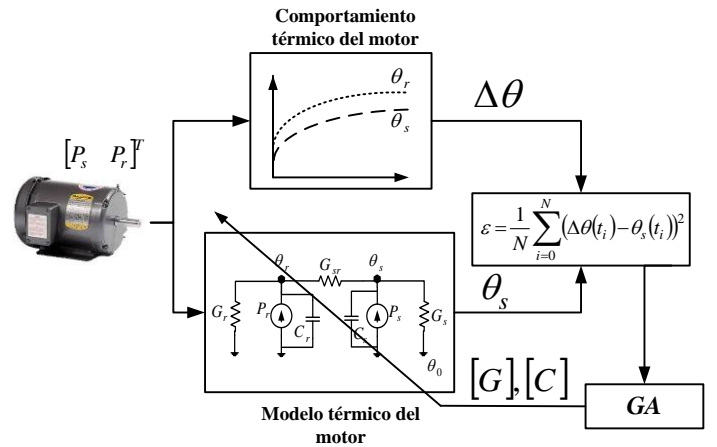


Fig. 1 Diagrama de bloques para la identificación del modelo térmico.

### III. BANCO DE PRUEBAS Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Se diseñó y construyó un banco de pruebas para motores trifásicos que se compone básicamente de un generador de corriente directa de 5 kW y un banco de resistencias de 7 kW. El banco posee tres autotransformadores monofásicos conectados en estrella para provocar bajos y altos voltajes de alimentación así como desbalances. Finalmente poleas y fajas para acoplar mecánicamente el motor al generador tal como se aprecia en la figura 2.

Se desarrolló una solución informática [6] en *LabView* v12.0 que gestiona el banco de pruebas mediante un controlador de tiempo real C-Rio 9073 y somete los motores a experimentos controlados en donde se definen los parámetros de la prueba, se controlan los estímulos del motor (carga del motor, tiempos de encendido o apagado), se monitorea su reacción y finalmente se registran en archivos todas las variables de interés, específicamente voltajes y corrientes trifásicas, torque, velocidad angular y once puntos de temperatura en el motor.

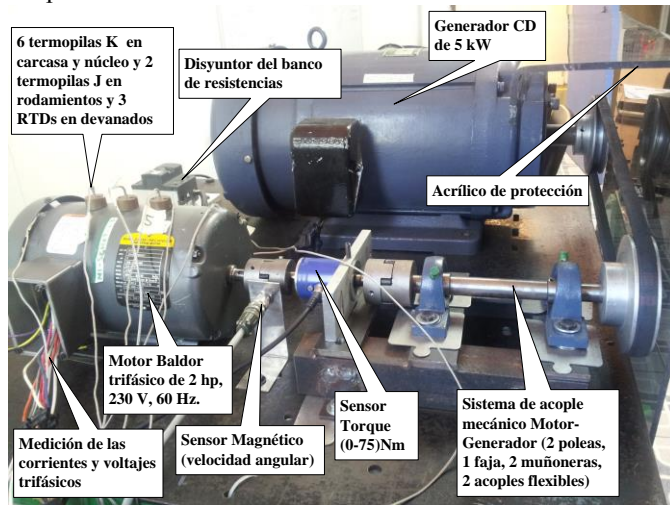


Fig. 2 Imagen parcial del banco de pruebas implementado.

### IV. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO

Se estiman los parámetros  $G = (G_s, G_r, G_{sr})$  y  $C = (C_s, C_r)$  comparando la respuesta  $\theta_s$  del modelo de referencia basado en la ecuación (4), se toma el incremento de temperatura en el estator  $\Delta\theta$  como la diferencia entre las temperaturas medidas del devanado eléctrico  $\theta$  y el ambiente,  $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ .

El modelo de referencia se alimenta con el vector de pérdidas  $P = (P_s, P_r)$ , y los vectores de parámetros a estimar  $C = (C_s, C_r)$  y  $G = (G_s, G_r, G_{sr})$  generados por el algoritmo genético tal como se muestra en la figura 1. Luego se compara su respuesta con las temperaturas medidas del estator, se ajustan de nuevo los parámetros y se realimenta el sistema. El proceso de optimización se detiene cuando no hay cambios significativos en los vectores de parámetros  $C$  y  $G$ . La función objetivo a optimizar está dada por la función de error cuadrático medio (5), la cual se obtiene restando los datos experimentalmente medidos  $\Delta\theta$  y la respuesta del modelo térmico  $\theta_s$

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\Delta\theta(t_i) - \theta_s(t_i))^2 \quad (5)$$

Para calcular el vector de pérdidas, primero se calcula la pérdida total como la diferencia entre la potencia eléctrica de entrada menos la potencia mecánica de salida. La potencia obtenida se separa mediante el cálculo de pérdidas del estator, núcleo, mecánica y otras, según la norma IEEE 112 [7]. El vector de pérdidas calculado es  $P = [306 \ 60]^T$  Watts, para el motor de 2 hp al 100% de carga.

Si el cambio acumulado en el valor de la función objetivo a lo largo de las generaciones es menor que la tolerancia de funciones  $10^{-15}$  o si se alcanza el número máximo de 100000 generaciones se detiene la búsqueda. Los parámetros encontrados se muestran en la tabla I y ajustan a la temperatura medida del estator como se aprecia en la figura 3.

TABLA I  
PARÁMETROS TÉRMICOS DEL MOTOR DE 2 HP, 230V, 60HZ Y AJUSTES.

Símbolo	Valor	Símbolo	Valor
$C_r$	5561.66 J/°C	$G_{sr}$	12.36 W/°C
$C_s$	5129.74 J/°C	Mejor aptitud	0.532
$G_r$	0 W/°C	Aptitud promedio	0.663
$G_s$	4.19 W/°C		

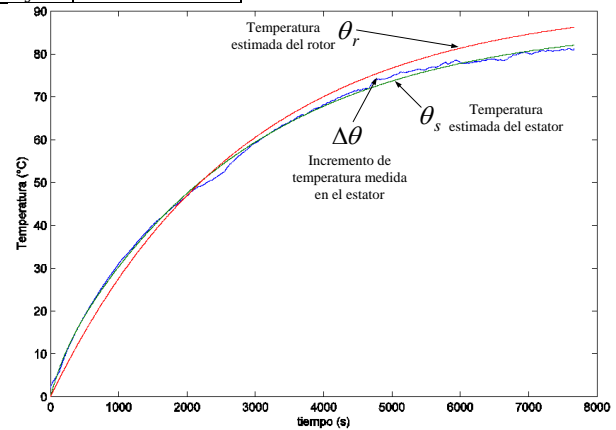


Fig. 3 Ajuste de temperaturas entre la medida y la estimada.

### AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Vicerrectora de Investigación por el financiamiento brindado al proyecto SEMAT, código VIE 5402-1341-1301.

### REFERENCIAS

- [1] H. Oraee, "A quantitative approach to estimate the life expectancy of motor insulation systems," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, no. 6, pp. 790-796, 2000.
- [2] G. Kylander, "Thermal modelling of small cage induction motors," Chalmers University of Technology, 1995.
- [3] M. J. Duran and J. Fernandez, "Lumped-Parameter Thermal Model for Induction Machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 791-792, 2004.
- [4] J. F. Moreno, F. P. Hidalgo, and M. D. Martínez, "Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 148, p. 393, 2001.
- [5] E. G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. 2009.
- [6] L. D. Murillo-Soto, "Aplicación informática para el monitoreo de variables eléctricas, mecánicas y térmicas en motores trifásicos de inducción," in *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)*, 2014.
- [7] "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," *IEEE Std 112-2004 (Revision IEEE Std 112-1996)*, 2004.