



Algoritmos evolutivos: Alternativa para problemas de estimación de parámetros de máquinas eléctricas.

Herbert Lara Ordaz, Norberto Hernández Romero, Juan Carlos Seck Tuoh Mora, Joselito Medina Marín

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área académica de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Carretera Pachuca Tulancingo Km. Mineral de la Reforma Hidalgo.

herbertlara@hotmail, nor.her.00@gmail.com, jseck@uaeh.edu.mx, jmedina@uaeh.edu.mx

RESUMEN

Los algoritmos evolutivos han sido aplicados en el ámbito de la computación inteligente obteniendo resultados satisfactorios, al implementarlos en la solución de diversos problemas; particularmente en el área de las máquinas eléctricas siempre ha existido la necesidad de contar con herramientas que permitan la medición e identificación de parámetros. En este trabajo se presentan los algoritmos: Salto de Ranas Combinado (Shuffled Frog Leaping Algorithm SFLA) y el Diferencial Evolutivo (Differential Evolution DE) para la estimación de parámetros en el motor de corriente directa y en el motor de inducción; empleando el modelo equivalente del circuito correspondiente y de los valores conocidos a priori que deben alcanzar en su comportamiento bajo condiciones normales.

PALABRAS CLAVE: modelo, función costo, estimación, parámetros, circuito equivalente.

1 INTRODUCCIÓN

La computación evolutiva ha desarrollado esquemas inspirados en la forma como la naturaleza ha resuelto problemas complejos, modelando el comportamiento de ciertas especies en su interacción con su ambiente y su propia sociedad, el resultado son algoritmos heurísticos que realizan un búsqueda de una solución para un problema real que normalmente es modelado dentro de un espacio definido.

En el caso de las máquinas eléctricas existe dificultad para la determinación de parámetros, porque generalmente no es posible

hacer una prueba de laboratorio que proporcione esta información, adicionalmente algunas pruebas como la de rotor bloqueado para el motor de inducción, no produce resultados certeros debido a la frecuencia corrientes en el rotor.

2 ALGORITMO SALTO DE RANAS COMBINADO (SFLA).

Esta técnica de optimización propuesta por Muzaffar Eusuff and Kevin Lansey en el 2003, consiste en imitar mediante modelos el comportamiento de los grupos de ranas, en particular la forma en que estos anfibios buscan su alimento (insectos).

El algoritmo SFLA tiene reglas de saltos hacia lo que será primero una búsqueda local para cada rana individual, y reglas de combinación de los diferentes grupos de ranas (hojas) para una búsqueda global [1][4]; cada salto de rana produce un cambio de posición dentro del espacio de soluciones y tiene el propósito de acercarse a la mejor posible. Los pasos del algoritmo son:

Paso 1, Se proporcionan la información inicial, como la cantidad de saltos por rana s , el número de ranas por hoja m , el número de variables del problema NV , el espacio de búsqueda permitido EP , la cantidad de hojas kch y para criterio de finalización Err el número de iteraciones $Itera$.

Paso2, Se inician las iteraciones, se genera una población aleatoria de saltos de rana y se evalúan en la función costo para determinar su aptitud (fitness) y con ello ordenarlos en forma descendente.

Paso 3, Se hace una distribución de saltos de rana (partición) entre las hojas, de tal forma que el primer salto de rana se asigna al primer

hoja, el segundo salto al segundo hoja y así sucesivamente.

Paso 4, Se identifica al mejor y al peor salto de rana (mejor valor de aptitud y peor valor de aptitud) de cada hoja así como al salto de rana con la mejor aptitud global.

Paso 5, Se actualizan los peores saltos de ranas empleando a los mejores saltos de cada hoja ec. 1.

$$psR_m^{k+1} = psR_m^k + r^k(msR_m^k - psR_m^k) \quad (1)$$

Donde k es la generación actual de población, psR es la peor rana, msR mejor rana y el hoja correspondiente m . Las mejores ranas de cada hoja se actualizan con la mejor rana global

$$msR_m^{k+1} = msRL^k + r^k(msRG^k - msRL^k) \quad (2)$$

Donde $msLR$ es el mejor salto de rana local y $msRG$ es el mejor salto de rana global.

Paso 6, se realiza una combinación de hojas (reasignación de saltos en las hojas)

Paso 7, se revisa el criterio de finalización, si se cumple se presentan los resultados y termina el programa; si no se cumple, se regresa al **paso 2**. [4][7]

3 ALGORITMO DIFERENCIAL EVOLUTIVO DE.

El método fue creado por Storn y Price en 2006, sus características son similares al algoritmo genético (AG), por que emplea los mecanismos de mutación, recombinación (cruce) y selección equivalentes en el AG. El algoritmo DE emplea la diferencia entre dos vectores para la operación de mutación, el primero vector objetivo y el segundo vector de prueba; en el algoritmo se tienen otras variantes para producir la mutación y son denominadas **DE/best/1**, **DE/rand/1**, **DE/best/2**, **DE/rand/2** donde **DE** se refiere a diferencial evolutivo, "**best**" para que el vector objetivo se obtenga de los mejores elementos o "**rand**" para obtenerlo de valores aleatorios, y el número se refiere a la cantidad de vectores involucrados, esto quiere decir que puede ser la diferencia entre 1 o 2 vectores. [5]

A continuación se lleva a cabo la operación de cruce y selección para la creación

de la siguiente generación. El algoritmo se puede resumir en los siguientes pasos:

Paso 1, se proporcionan los valores de las constantes de inicio como el tamaño de la población T_{aP} , límites permitidos del espacio de búsqueda L_{eB} , factor de ponderación f_P , probabilidad de cruce P_{CR} , dimensiones del problema Dim y los criterios de finalización: error permitido Err y número de iteraciones N_{ite} .

Paso 2, se realiza un proceso de inicialización para los elementos de un vector de población V_P ; los individuos se eligen aleatoriamente dentro del espacio L_{eB} .

Paso 3, se genera el vector de prueba V_{PR} ; para este trabajo se emplea la estrategia **DE/best/1**. Entonces se crea el vector de mejores elementos V_{me} y 2 vectores combinados para la diferencia, V_1 y V_2 ec. 3; los elementos de los vectores V_1 y V_2 son miembros seleccionados del vector V_P inicial.

$$V_{PR} = V_{me} + f_P(V_1 - V_2) \quad (3)$$

Donde el factor de ponderación f_P está entre $(0,1)$.

Paso 4, se realiza el cruce entre V_{PR} y el vector de la población actual V_P . Para ello se hace un índice de elementos seleccionados E_{sel} de V_{PR} , a través de la probabilidad de cruce P_{CR} , y el complemento y el complemento correspondiente CE_{sel} ec. (4).

$$V_{PR}^{k+1} = [V_{PR}^k]_{j, j \in E_{sel}} + [V_P]_{i, i \in CE_{sel}} \quad (4)$$

Paso 5, se realiza la selección de los elementos para la nueva generación de población entre los elementos de la generación actual y los elementos del vector de prueba ec(5).

$$V_P^{k+1} = \begin{cases} V_{PR}^{k+1}, & f(V_{PR}^{k+1}) < f(V_P) \\ V_P, & f(V_{PR}^{k+1}) \geq f(V_P) \end{cases} \quad (5)$$

Paso 6, Se verifican los criterios de finalización, sin no se cumplen, regresa al paso 3, en caso de cumplirse, se presentan los resultados y se termina el algoritmo. [1]

4 MODELOS MATEMÁTICOS.

El modelo matemático describe el comportamiento de la máquina bajo ciertas condiciones, en este trabajo se presentan los

modelos del motor de corriente directa en estado transitorio y el modelo del motor de inducción jaula de ardilla en estado estacionario.

4.1 MOTOR DE INDUCCION.

El comportamiento que se presenta con este modelo corresponde al par desarrollado en el arranque, a plena carga y el máximo que alcanza en función del deslizamiento. Los parámetros a estimar son los correspondientes al circuito equivalente: resistencias del estator y rotor (rs , rr), reactancias de estator, rotor y magnetizante (xs , xr , xm); se consideran que as reactancias xr y xs iguales, adicionalmente los núcleos magnéticos no tienen corrientes de distorsión además que cada uno de los devanados de fase son idénticos lo que permite desarrollar un solo circuito equivalente para las 3 fases como se muestra en la figura 1.

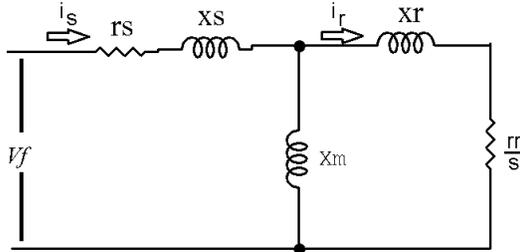


Figura 1. Circuito equivalente del motor de inducción asíncrono jaula de ardilla.

La expresión del par electromagnético que resulta del circuito de la figura 1 es:

$$\tau_e(s) = \frac{3p}{\omega_s} (i_r(s))^2 \left(\frac{R_r}{s}\right) \quad (6)$$

Las corrientes de rotor, estator e impedancia equivalente se obtienen con las expresiones 7,8 y 9.

$$i_r(s) = \frac{Z_p(s)i_s(s)}{\frac{rr}{s} + jxr} \quad (7)$$

$$Z_p(s) = \frac{1}{\frac{1}{jxm} + \frac{1}{\frac{rr}{s} + jxr}} \quad (8)$$

$$i_s(s) = \frac{Vf}{rr + jrs + Z_p} \quad (9)$$

En las expresiones 7 y 8 se requiere del valor del deslizamiento, con estos valores de obtiene el par de arranque τ_A , par a plena carga τ_{pc} y par máximo τ_M . El deslizamiento en el

momento que el motor es accionado tiene un valor de $S_A = 1$, para el deslizamiento a plena carga, este valor es proporcionado por el fabricante del motor, en este caso el deslizamiento se localiza en la tabla 2 de datos del motor de inducción ($S_{PC}=0.07$) y el deslizamiento cuando el par es máximo se obtiene mediante la expresión 10 [6].

$$S_{PC} = \frac{rr}{\sqrt{(Re_{TH})^2 + (Im_{TH} + xr)^2}} \quad (10)$$

Donde los valores de Re_{TH} e Im_{TH} correspondes a los componentes real e imaginario de la impedancia de Thevenin del rotor. El factor de potencia se obtiene es a plena carga y es a partir de del ángulo de la corriente de estator ec. 11.

$$fp_{pc}^c = \cos[\text{ang}(i_s(s_{pc}))] \quad (11)$$

4.2 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.

El modelo que se presenta en este trabajo es el motor de corriente directa conectado en paralelo y con polos auxiliares (figura 2) y su funcionamiento transitorio mediante el comportamiento de las corrientes del campo paralelo i_p , corriente de rotor i_r y la velocidad angular del rotor ω_r . Los parámetros involucrados en el modelo son: resistencia de campo paralelo R_p , rotor R_r y polos auxiliares R_A , inductancias de campo paralelo L_p , rotor L_r , polos auxiliares L_A ; así como las inductancias mutuas del campo auxiliar-rotor M_{AR} , rotor-campo auxiliar M_{RA} , campo paralelo-rotor M_{PR} y finalmente los parámetros mecánicos: constante de fricción D y coeficiente de inercia J . En este modelo no se consideran las pérdidas de energía por contacto y desgaste de las escobillas-conmutador, tampoco se considera la dispersión magnética en los núcleos.

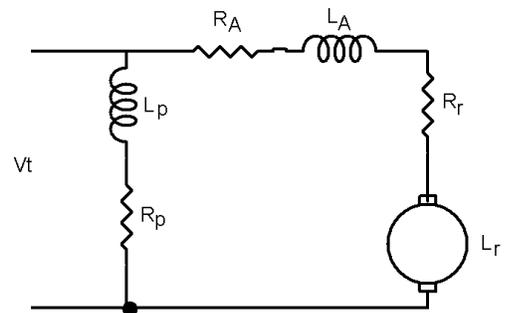


Figura 2. Circuito equivalente del motor de corriente directa en serie con polos auxiliares.

El conjunto de ecuaciones que modela se presenta a continuación.

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{V_T}{L_{TR}} - \frac{R_{TR}}{L_{TR}} i_r - \frac{M_{pr}}{L_{TR}} i_p \omega_r \quad (12)$$

$$\text{Donde: } A_T = L_r + M_{Ar} + M_{rA} + L_A \quad (13)$$

$$\text{y } R_{TR} = R_r + R_A \quad (14)$$

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{V_T}{L_p} - \frac{B_1}{L_p} i_p \quad (15)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_{pr}}{J} i_r i_p - \frac{\tau_m}{J} - \frac{D}{J} \omega_r \quad (16)$$

La solución de este sistema de ecuaciones se lleva a cabo mediante el método de integración Runge-Kutta de 4to. orden.

5 FUNCIÓN OBJETIVO.

La función que se optimiza es denominada función objetivo y lo que se busca es determinar los parámetros de esta función para obtener el mínimo error.

5.1 FUNCIÓN OBJETIVO PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Empleando las expresiones 6, 7, 8, 9 y 10 se determina el tipo par electromagnético: τ_A^c , τ_M^c , τ_{pc}^c , el fabricante proporciona estos valores (τ_A^f , τ_M^f , τ_{pc}^f) que deberán ser alcanzados por los que sean estimados por los algoritmos de saltos de ranas y diferencial evolutivo; las función objetivo se muestra en la expresión 17.

$$F_{obj} = F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 \quad (17)$$

Donde se tiene que:

$$F_1 = \frac{\tau_A^F - \tau_A^C}{\tau_A^F} \quad (18)$$

$$F_2 = \frac{\tau_{pc}^F - \tau_{pc}^C}{\tau_{pc}^F} \quad (19)$$

$$F_3 = \frac{\tau_M^F - \tau_M^C}{\tau_M^F} \quad (20)$$

$$F_4 = \frac{fp_{pc}^F - fp_{pc}^C}{fp_{pc}^F} \quad (21)$$

$$F_5 = fp_r \quad (22)$$

La expresión 22 determina el factor de potencia reducido, se obtiene con las expresión 11 pero el deslizamiento empleado es un valor reducido ($s_{red}=0.001$) [2]

5.2 FUNCIÓN OBJETIVO DEL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.

Para el modelo transitorio del motor de corriente directa se estableció un tiempo de duración de 5 segundos. El método Runge-Kutta implementado en matlab proporciona en vectores los valores de las corrientes de rotor $i_r(t)$, y campo paralelo $i_p(t)$ y velocidad angular $\omega_r(t)$; los valores de referencia para construir la función objetivo son proporcionados por las simulaciones de [3] y se presentan en la tabla 1

Tabla 1. Valores de referencia del comportamiento transitorio.

$i_r(0.468s)$ A	$i_r(5s)$ A	$i_p(5s)$ A	$\omega_r(5s)$ rad/s
115.01	237.4813	186.4906	1.0692

La expresiones 23, 24, 25 y 26 conforman a la función objetivo.

$$G_{obj} = G_1^2 + G_2^2 + G_3^2 \quad (23)$$

$$G_1 = \frac{i_r(5) - 237.4813}{237.4813} \quad (24)$$

$$G_2 = \frac{i_p(5) - 1.0692}{1.0692} \quad (25)$$

$$G_3 = \frac{\omega_r(5) - 186.4906}{186.4906} \quad (26)$$

6 PRUEBAS Y RESULTADOS.

A continuación presentamos las pruebas y resultados para el motor de inducción y el motor de corriente directa empleando los algoritmos de salto de ranas combinado y el algoritmo diferencial evolutivo.

6.1 MOTOR DE INDUCCIÓN.

El motor de inducción utilizado para este trabajo es de 5 Hp, 400 volts, a 50 Hz y 2 polos,

otra información proporcionada por el fabricante y que es requerida en este trabajo se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Información adicional proporcionada por el fabricante.

τ_A	τ_{pc}	τ_M	fp_{pc}	s_{pc}
15Nm	25Nm	43Nm	0.8	0.07

Los valores estimados con los algoritmos saltos de ranas y diferencial evolutivo se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores estimados por los algoritmos SFLA y DE para el motor de inducción.

	rs	rr	xr=xs	xm
SFLA	0.014365	2.13189	5.55156	74.24526
DE	0.005373	2.17724	5.74633	89.87313

El comportamiento de los diferentes tipos de par debido a los parámetros estimados (tabla 3) con respecto a los valores de fábrica (tabla 2), son mostrados en las figuras 3 y 4.

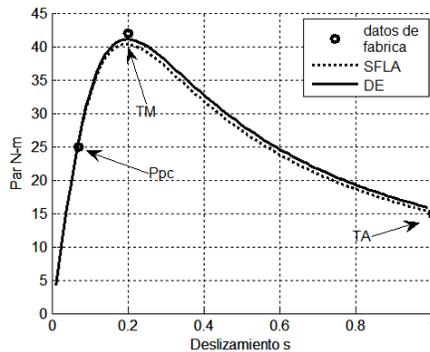


Figura 3. Comparación de los tipos de par proporcionados de fábrica y los obtenidos con los parámetros estimados.

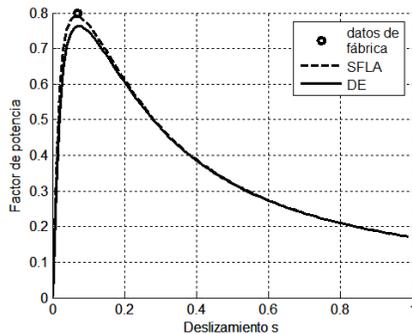


Figura 4. Comparación del factor de potencia a plena carga de fábrica con el obtenido con los parámetros estimados.

6.2 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.

El motor de corriente directa empleado como referencia de este trabajo es de 8 KW, a 220V, y velocidad 1800 rpm.

Los parámetros obtenidos mediante SFLA y DE se presentan en las tablas 4 y 5. El tiempo de estudio es de 5 segundos.

Tabla 4. Valores estimados de resistencia total de rotor, inductancia total del rotor, inductancia de campo paralelo e inductancia mutua campo paralelo rotor.

	RTR	LTR	LP	MPR
DE	0.6253	0.2524	1.6762	8.6195
SFLA	0.8734	0.0024	1.185	0.0889

Tabla 5. Valores estimados de resistencia de campo paralelo, coeficiente de inercia y coeficiente de fricción dinámica.

	RP	J	D
DE	243.3399	0.0542	3.4264
SFLA	207.5214	0.0344	0.5043

Los comportamientos de las corrientes i_r , i_p y velocidad angular comparadas con los de referencia son mostrados en las figuras 5, 6 y 7.

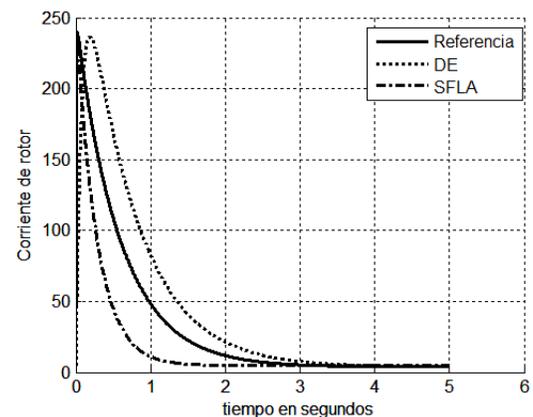


Figura 5. Comportamiento de la corriente de rotor de referencia y la calculada con los parámetros obtenidos.

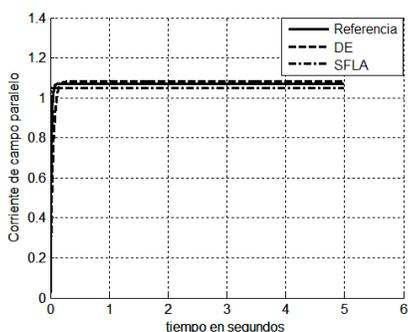


Figura 6. Comportamiento de la corriente de campo paralelo de referencia y la calculada.

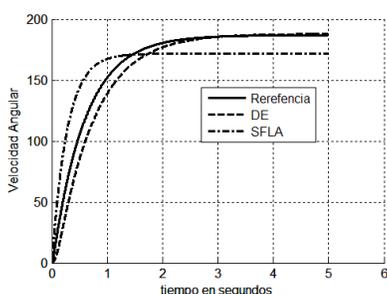


Figura 7. Comportamiento de la velocidad angular de referencia y la calculada.

7 CONCLUSIONES.

Se implementaron los métodos de optimización SFLA y DE para la estimación de parámetros en un caso para el motor de inducción modelado en estado estacionario y para el segundo caso el motor de corriente directa conectado en paralelo.

Los valores estimados por los métodos implementados para cada caso de estudio proporcionaron un comportamiento satisfactorio con respecto a los valores de referencia.

En las figuras 3 y 4 se observa que los valores de referencia y los alcanzados son cercanos entre sí. y las gráficas de comportamiento 5,6 y 7 tienen desempeños similares.

7.1 Referencias

[1] Dervis K., Selcuk Ö., (2004). *A Simple and Global Optimization Algorithm for Engineering Problems: Di*

fferential Evolution Algorithm. Turk J Elec Engin, VOL.12, NO.1

[2] H. Lara, N. Hernández, J.C. Seck, J. Medina. (2014). *Conformación del algoritmo CMA-es para la estimación de parámetros del motor de inducción asíncrono trifásico.* RVP2014 IEEE.

[3] H. Lara.(1999). *Análisis transitorio del motor de C.D.* (tesis de licenciatura no publicada). Tecnológico de Pachuca. Carretera México Pachuca Km. 84.5

[4] Mohammadreza F., Saber B. M., Seyyed F. G.(2010). *A hybrid meta-heuristic optimization algorithm based on SFLA.* 2nd International Conference on Engineering Optimization.

[5] RAINER S., KENNETH P.,(1997). *Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces.* Journal of Global Optimization 11: 341–359

[6] S.J. Chapman. (2011). *Máquinas Eléctricas,* McGraw-Hill , pp. 333-350. México D.F.

[7] Xuehai P.(2012). *The Study on the Shuffled Frog Leap Algorithm and Its Application.* *Advances in information Sciences and Service Sciences.* Volume4, Number1. doi: 10.4156/AISS.vol4.issue1.28