

Modelado y Análisis de Sintonización de Velocidad de un MSIP con Presencia de Fisura Mediante Algoritmos Genéticos

A. Manilla García*, I. Rivas Cambero, J. A. Monroy Anieva

Universidad Politécnica de Tulancingo, Calle ingenierías No. 100, Huapalcalco, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

Resumen

En el presente artículo se propone el modelado del sistema continuo correspondiente al motor síncrono de imanes permanentes (MSIP) con presencia de degradación en la inercia rotacional del rotor, mediante el mecanismo de fisura, lo cual permite la estimación de parámetros físicos, en el caso de análisis, el diámetro de la grieta presente en el rotor, disminuyendo con ello la incertidumbre en el modelado del MSIP. Se lleva a cabo la identificación en bucle cerrado de las ganancias mediante un análisis de sensibilidad, donde mediante el método computacional de optimización de búsqueda por algoritmos genéticos se obtienen las ganancias que logran converger el modelo propuesto al modelo de referencia.

Palabras Clave:

Modelado del sistema continuo, Estimación de parámetro, Incertidumbre en el modelado, Identificación en bucle cerrado, Método computacional de optimización, Degradación en Inercia, Mecanismo de Fisura, Sensibilidad, Algoritmo genético.

Modeling and Analysis of speed tuning of a PMSM with presence of crack using genetic algorithms

Abstract

In this article, we propose the continuous system model corresponding to the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) with the presence of degradation in the rotational inertia of the rotor through the fissure mechanism, which allows the estimation of the physical parameters. We consider the diameter of the split on the rotor in the analysis of the model, and in effect, the decrease of the uncertainty of the PMSM model. The closed-loop identification of the gains is achieved by a sensibility analysis, whilst the gains obtained by the computational optimization method of search through genetic algorithms, allows the proposed model converge to the reference model.

Keywords:

Modeling of the continuous system, Parameter estimation, Modeling uncertainty, Closed loop identification, Computational optimization method, Inertia Degradation, Fissure Mechanism, Sensitivity, Genetic Algorithm.

1. Introducción

Los Motores Síncronos de Imanes Permanentes (MSIP), además de aportar altos rendimientos en aplicaciones donde es necesario corregir el factor de potencia, aportan pares elevados y velocidad constante bajo cargas variables, lo que hace que los mismos sean cada vez más estudiados y utilizados en aplicaciones que, hasta hace algunos años estaban restringidas a los motores de inducción (Gieras J. F. et al, 2002a).

Una de las fallas de interés, sobre todo en motores eléctricos de tamaños considerables, es debida a problemas vibratorios, ocasionados por desbalanceo, los cuales a su vez son generados por degradación en el eje del rotor, esto es,

fenómenos de fatiga que, finalmente, ocasionan fractura en el eje del rotor (Quiroz J. C. et al, 2018).

El comportamiento de la propagación de fisuras en materiales sólidos es un tema de gran interés en el campo de la ingeniería, ayudando con ello a preservar la vida de los dispositivos mecánicos (Bachschmid N. et al, 2010).

Buscando contribuir con el diagnóstico y control de MSIP sujetos a degradación temporal debido a los efectos de carga de uso, en el presente trabajo se analiza el comportamiento de MSIP con presencia de fisura en el eje del rotor, ocasionando con ello y de acuerdo a la dinámica de la fractura, degradación en el mismo, con el análisis y teoría propuesta se pretende

*Autor para la correspondencia: manillaabraham@hotmail.com

aportar un análisis detallado en el modelado y sintonización de este sistema dinámico con presencia de grieta, lo cual contribuye a una teoría más exacta del comportamiento dinámico del MSIP.

Se observa que el modelo dinámico del MSIP con presencia de degradación en la inercia propuesto presenta comportamientos altamente no lineales, lo que conlleva a que la sintonización sea bastante complicada para los parámetros característicos, es por ello que se optó por la sintonización mediante algoritmos genéticos (Villalobos-Piña F. et al, 2015).

Para definir el dominio de convergencia de las posibles ganancias de regulación del modelo dinámico del MSIP mediante el método de algoritmo genético, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad del mismo, con el fin de acotar el dominio de definición, minimizar el tiempo de evaluación y ayudar a la convergencia del sistema dinámico (Gen M. et al, 2000).

2. Variables empleadas en el presente trabajo

Las variables involucradas en el modelado del MSIP con presencia de degradación en la inercia rotacional son definidas como:

i_d, i_q	Corrientes del estator en el marco de referencia dq giratorio.
θ	Posición angular del eje del rotor
ω_r	velocidad angular del rotor
a	Tamaño de la fisura
V_d, V_q	Voltajes del estator en el marco de referencia dq giratorio.
L_d, L_q	Inductancias del estator en los ejes de referencia dq
r_s	Resistencia por fase en el estator
P	Numero de pares de polos
J	Momento polar de inercia
m_s	Masa del rotor
J_t	Inercia rotacional dependiente del tamaño de la fisura
λ_m	Flujo magnético permanente
f	Frecuencia fundamental del rotor
β	Coefficiente de amortiguamiento viscoso
c	Coefficiente proporcional (dependiente del material)
n	Exponente proporcional (dependiente del material)
D	Raíz del diámetro del eje del rotor
T_l	Par de carga externa
T_e	Par eléctrico (generado por el motor)
g	Función de respiro de fisura de Mayes y Davis
d	Diámetro del hueco en el eje del rotor a causa de la fisura
Δk	Variación del concentrador de esfuerzo
$\Delta \tau_{max}$	Variación del esfuerzo torsional en el eje del rotor
$i_{d0}, i_{q0}, \omega_{r0}, \theta_0, a_0$	Condiciones iniciales del modelo

V_s	Valor nominal del voltaje en aplicado en fases dq
δ	Desplazamiento angular eléctrico
e_{ω_r}, e_{i_d}	Errores de estados del sistema
c_{ω_r}	Coefficiente de error deseado
$i_{qd}, i_{dd}, \omega_{rd}$	Valores deseados de los estados del sistema
Q, R	Matrices Hermíticas de control óptimo
X	Vector de estados de control óptimo cuadrático lineal
U_q, U_d	Entradas de control del sistema
k_1, k_2	Ganancias del control óptimo cuadrático lineal
k_p, k_i, k_d	Ganancias del control proporcional integral y derivativo (PID)
α_1, α_2	Raíces de localización de ganancias del controlador PID
E_Q	Energía del controlador óptimo cuadrático lineal
E_T	Energía total del sistema dinámico del MSIP
E_C	Energía cinética del MSIP
E_p	Energía potencial del MSIP
G	Costo energético del sistema dinámico del MSIP
S_i	Sensibilidad del sistema dinámico del MSIP
c_j	Función costo de localización de ganancias óptimas
k_j	Vector de ganancias óptimas
ω_{rj}	Valor obtenido de la j-esima búsqueda de ganancia de velocidad

3. Modelo dinámico del MSIP con presencia de fisura en el rotor

Bajo las ecuaciones de balance de voltaje, el modelo dinámico del MSIP en el sistema de referencia dq se obtiene de manera similar al modelado de una maquina síncrona con devanado de campo, eliminando enlaces de flujo y definiendo corrientes iguales a cero por devanados de amortiguamiento, reemplazando la corriente de campo por un parámetro constante debido al enlace de flujo del imán permanente, el modelo obtenido es caracterizado por (Xue W. et al, 2015):

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{V_d}{L_d} - \frac{r_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{V_q}{L_q} - \frac{r_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \end{aligned} \tag{1}$$

La dinámica del rotor del MSIP referente a la velocidad angular y posición angular está definida por:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{P}{2J} [T_e - T_l - \beta \omega_r] \end{aligned} \tag{2}$$

Donde:

$$T_e = \frac{P}{2} \left[\frac{3}{2} (L_d - L_q) i_d i_q + \frac{3}{2} \lambda_m i_q \right] \quad (3)$$

3.1 Dinámica de la fractura en el eje del rotor

Se propone el comportamiento de fisura del eje del rotor como consecuencia de la variación del esfuerzo en el mismo, ocasionado por la carga externa T_1 , los efectos rotativos del eje del rotor generan una dinámica de apertura y cierre de la fisura, lo que generará, a través de los ciclos de trabajo, la fractura por fatiga que tiene un comportamiento similar a la fractura frágil, como se ilustra en la Figura 1 (Venkatesan K. et al, 2018).

El comportamiento de la fisura toma la estructura de la ecuación de Paris, como (Andrade A. A. et al, 2015):

$$\frac{da}{dt} = cf \Delta k^n \quad (4)$$

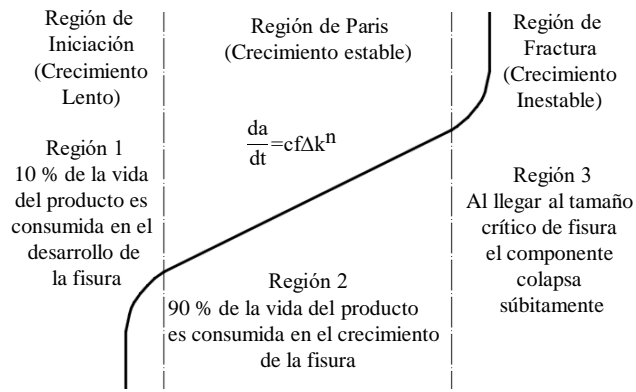


Figura 1: Mecanismo de fractura de un sólido elástico (Arana J. L. et al, 2011)

Se define el factor de intensidad de esfuerzos, como:

$$\Delta k = \Delta \tau_{\max} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

A partir de la expresión definida por (5) se propone la variación del esfuerzo torsional $\Delta \tau_{\max}$, basado en el comportamiento de una sección circular hueca, la cual irá en aumento de tamaño debido a la dinámica de degradación, partiendo del punto de concentración de esfuerzo donde existe la presencia de la fisura (Barter S. et al, 2016):

$$\Delta \tau_{\max} = \frac{16(T_e - T_1)D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (6)$$

El diámetro menor del eje del rotor d , se propone a partir de la variación en el tamaño de la grieta como:

$$d = ga \quad (7)$$

Donde, g toma el comportamiento de respiro del eje propuesto por Mayes y Davis (Genta G., 2005):

$$g = \frac{1 + \cos(\omega_r t)}{2} \quad (8)$$

Como consecuencia de la presencia de la fisura en el eje del rotor, se tiene el efecto la degradación en la inercia rotacional del eje del rotor, bajo la forma propuesta como:

$$J_t = \frac{1}{8} m_s (D^4 - d^4) \quad (9)$$

3.2 Modelo dinámico acoplado

El modelo dinámico de estudio con presencia de degradación en la inercia rotacional del eje del rotor, toma la forma:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{V_d}{L_d} - \frac{r_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{V_q}{L_q} - \frac{r_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{4P}{m_s \{D^4 - [ga]^4\}} \{T_e - T_1 - \beta \omega_r\} \\ \frac{da}{dt} &= cf \Delta k^n \end{aligned} \quad (10)$$

4. Modelo de referencia

La sintonización del modelo dinámico del MSIP con las características definidas por las ecuaciones (10) se realiza con base en la linealización del mismo, sin presencia de fisura, en el punto único de equilibrio estable global del sistema dinámico, definido como (Rasoolzadeh A. et al, 2012):

$$X_0 = [i_{d0} \quad i_{q0} \quad \omega_{r0}]^T = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

Las ecuaciones diferenciales lineales de primer orden para el MSIP bajo las cuales se realizará la simulación y posteriormente el desarrollo del regulador de velocidad cuadrático lineal son:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{r_s}{L_d} i_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{r_s}{L_q} i_q - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{3P^2 \lambda_m}{8J} i_q \end{aligned} \quad (11)$$

4.1 Comportamiento deseado del error

Se define el comportamiento del error referente al cambio de velocidad entre la velocidad angular deseada y la velocidad del rotor entregada el MSIP (Krishnan R. 2010):

$$e_{\omega_r} = \omega_{rd} - \omega_r \quad (12)$$

Se desea que el error de la velocidad angular decrezca exponencialmente en un tiempo acotado, lo cual implica la relación:

$$e_{\omega_r} = \exp(-c_{\omega_r} t) \quad (13)$$

El comportamiento de la corriente i_{qd} deseada para el sistema en función del error de la velocidad angular ω_r , toma la forma:

$$i_{qd} = \frac{2J}{1.5P^2\lambda_m} \left[c_{\omega_r} e_{\omega_r} + \dot{\omega}_{rd} + \frac{PT_1}{2J_t} \right] \quad (14)$$

El par de carga puede ser controlado directamente por el componente de corriente del eje q, por lo tanto, la velocidad angular del rotor puede ser controlada por el cambio de corriente del eje q, con lo cual se establece el cambio de corriente del eje d en cero para minimizar las pérdidas de corriente y de resistencia (Aguilar-Mejía O. et al, 2015).

$$i_{dd} = 0$$

4.2 Control óptimo cuadrático lineal para estados ω_r, i_q

Para el control del MSIP se plantea la retroalimentación de los estados i_q, ω_r a partir del modelo lineal de referencia definido, donde las ganancias óptimas son determinadas a partir de la función de energía E_Q como (Jun Xu W., 2011):

$$E_Q = \int_0^{\infty} (X \cdot QX + U_q \cdot R U_q) dt \quad (15)$$

Se definen las matrices Hermíticas positivas Q, R siguientes:

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = [1]$$

El vector X toma la forma:

$$X = [i_q \quad \omega_r]^T \quad (16)$$

La función de control U_q toma la estructura:

$$U_q = -[k_1 \quad k_2] \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

El sistema linealizado, para las variables i_q y ω_r bajo la acción del control toma la forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_q} & -\frac{\lambda_m}{L_q} \\ \frac{3P^2\lambda_m}{8J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U_q \quad (18)$$

4.3 Controlador PID para la corriente i_d

La estructura del controlador PID propuesto toma la forma (Yun-Jie W. et al., 2018):

$$U_d = k_p \left[e_{id} + \frac{1}{k_i} \int e_{id} dt + k_d \frac{d}{dt} e_{id} \right] \quad (19)$$

Para regular la corriente i_d se parte de la forma de la ecuación lineal desacoplada definida en (12), al momento de definir la acción de control toma la estructura:

$$\frac{di_d}{dt} = U_d - \frac{r_s}{L_d} i_d \quad (20)$$

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques para regular i_d del MSIP.

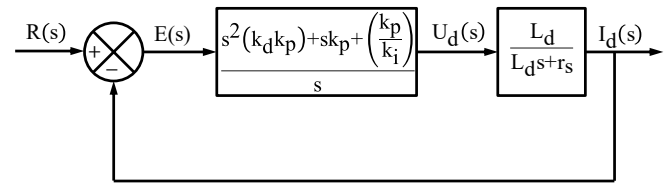


Figura 2: Diagrama de bloques, controlador PID y planta

Utilizando el lugar geométrico de las raíces se calculan las ganancias del controlador (k_i, k_p, k_d) como:

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{\alpha_1 + r_s}{L_d} \\ k_i &= \frac{L_d k_p}{\alpha_2} \\ k_d &= \frac{1 - L_d}{k_p L_d} \end{aligned} \quad (21)$$

5. Sintonización de las ganancias de los controladores mediante Algoritmos Genéticos

Las bases de los algoritmos genéticos (AG) fueron establecidas por John Holland en 1975 en su libro “adaptation in natural and artificial systems”, el cual resuelve muchos problemas relacionados con la teoría de optimización que resultan difíciles para las técnicas tradicionales (Holland J. H., 1975).

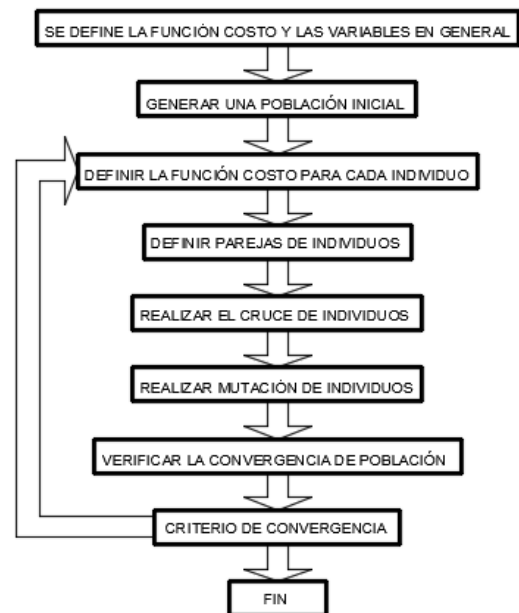


Figura 3: Diagrama de flujo de la estructura del algoritmo genético continuo

El algoritmo genético desarrollado por Holland presentado en forma binaria posee la limitación referente a la solución de problemas en donde los valores de las variables son continuos y se desea conocer a la precisión los valores de la variable; cada variable del problema requiere muchos bits para ser representada, si el número de variables es grande, el tamaño del problema también es grande (Kan L. et al, 2015).

Cuando las variables son continuas, el algoritmo genético continuo (GA) tiene la ventaja de requerir menos espacio de almacenamiento que el algoritmo genético binario porque un solo número flotante representa la variable en lugar de varios bits (Ortiz-Quisbert M. E. et al, 2016).

El algoritmo genético continuo es más rápido que el binario, debido a que los cromosomas no tienen que ser decodificados antes de la evaluación de la función de costo (Colorado-Arellano O. et al, 2018).

Por las razones expuestas anteriormente el algoritmo desarrollado en el presente trabajo es genético continuo (GA). La Figura 3 ilustra el diagrama de flujo utilizado para programar el código de búsqueda y sintonización de las ganancias mediante entorno Matlab.

6. Análisis de sensibilidad del dominio de definición de las ganancias

El algoritmo propuesto de sintonización mediante algoritmos genéticos, realiza la búsqueda de ganancias y la posterior simulación de las mismas en un dominio definido, se tiene la misión de lograr que este dominio sea óptimo en cuanto a consumo de tiempo de ejecución del algoritmo. Con el fin de acotar los límites del dominio de búsqueda se plantea un análisis de sensibilidad del sistema del MSIP, el cual analizará las variaciones en cada una de las ganancias involucradas, definidas como los parámetros k_j (Boroni G. et al, 2006):

$$k_j = [k_1, k_2, k_i, k_p, k_d] \tag{22}$$

Se define una función de energía, que tiene como objetivo analizar la sensibilidad del modelo del MSIP definida como:

$$E_T = E_C + E_P \tag{23}$$

Donde, la energía cinética E_C y potencial E_P toman la forma (Gieras J. F., 2002b):

$$E_C = \int T_e \omega_r dt \tag{24}$$

$$E_P = \frac{1}{2} \left[\frac{i_d^2}{L_d} + \frac{i_q^2}{L_q} + \frac{P}{2J} \omega_r^2 \right]$$

Dando como resultado:

$$E_T = \int T_e \omega_r dt + \frac{1}{2} \left[\frac{i_d^2}{L_d} + \frac{i_q^2}{L_q} + \frac{P}{2J} \omega_r^2 \right] \tag{25}$$

La ecuación (25) puede ser expresada en forma de ecuación diferencial como:

$$\frac{dE_T}{dt} = T_e \omega_r + \left[\frac{i_d}{L_d} \left(\frac{di_d}{dt} \right) + \frac{i_q}{L_q} \left(\frac{di_q}{dt} \right) + \frac{P \omega_r}{2J} \left(\frac{d\omega_r}{dt} \right) \right] \tag{26}$$

Planteándose la función costo energético G , para el periodo temporal de evaluación, como:

$$G = \int E_T dt \tag{27}$$

En forma diferencial puede definirse la rapidez de cambio de la función costo, en el intervalo de tiempo de análisis como:

$$\frac{dG}{dt} = E_T \tag{28}$$

El sistema dinámico que determina el comportamiento de la sensibilidad de las ganancias del sistema del MSIP es propuesto bajo la estructura:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{V_d}{L_d} - \frac{r_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{V_q}{L_q} - \frac{r_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{P}{2J} \left\{ \frac{P}{2} \left[\frac{3}{2} (L_d - L_q) i_d i_q + \frac{3}{2} \lambda_m i_q \right] - T_l \right\} \\ \frac{dE_T}{dt} &= T_e \omega_r + \left[\frac{i_d}{L_d} \left(\frac{di_d}{dt} \right) + \frac{i_q}{L_q} \left(\frac{di_q}{dt} \right) + \frac{P \omega_r}{2J} \left(\frac{d\omega_r}{dt} \right) \right] \\ \frac{dG}{dt} &= \int T_e \omega_r dt + \frac{1}{2} \left[\frac{i_d^2}{L_d} + \frac{i_q^2}{L_q} + \frac{P}{2J} \omega_r^2 \right] \end{aligned} \tag{29}$$

A partir del sistema de ecuaciones (29) se obtiene el comportamiento de la función costo para el intervalo de tiempo definido de simulación. La sensibilidad del sistema S_j , para cada parámetro de interés k_j se define a partir de:

$$S_j = \frac{dG}{dk_j} \tag{30}$$

7. Simulación

La función costo para evaluar el desempeño del algoritmo genético de búsqueda de ganancias, considerada como óptima, es aquella que logra minimizar las trayectorias deseadas con las obtenidas en las iteraciones del sistema propuesto, es definida a partir del estado de interés ω_r como:

$$c_j = [\omega_{rd} - \omega_{rj}]^2 \tag{31}$$

Para llevar a cabo la simulación del sistema dinámico del MSIP se definen los parámetros y coeficientes de simulación, la Tabla 1 ilustra los valores numéricos que se toman en consideración durante el análisis del modelo.

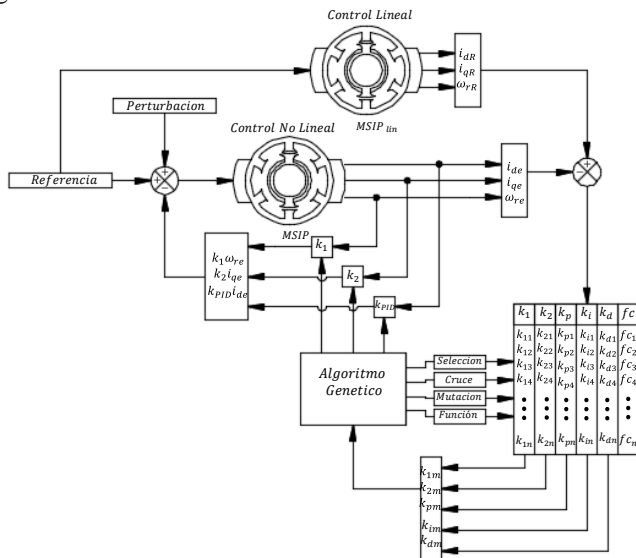
Las ganancias del sistema de comparación lineal, son determinadas a partir del análisis lineal de regulación de la velocidad y toman los valores:

$$\begin{bmatrix} k_p \\ k_i \\ k_d \\ k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -376.329 \\ 5.0 \\ 9.0 \\ 9990.09 \\ 930.0 \end{bmatrix}$$

Tabla 1: Parámetros de simulación para el modelo del MSIP

Parámetros	Valor Numérico	Unidades
L_d	6.73e-3	Inductancia [H]
L_q	6.73e-3	Inductancia [H]
r_s	2.6	Resistencia [Ω]
P	4	Pares de polos
J	3.5e-5	Inercia rotacional [kgm^2]
m_s	0.1	Masa del rotor [kg]
λ_m	0.319	Flujo magnético [Wb]
f	188.5/2 π	Frecuencia [Hz]
β	5e-5	Amortiguamiento [Nms]
c	10e-11	Coefficiente proporcional
n	3	Exponente proporcional
D	0.137409	Raíz del diámetro del rotor [$\text{m}^{1/2}$]
T_1	5	Par de carga [Nm]
i_{d0}	0	Corriente inicial d [A]
i_{q0}	0	Corriente inicial q [A]
ω_{r0}	0	Velocidad angular inicial [rad/s]
θ_0	0	Posición angular inicial [rad]
a_0	3e-8	Tamaño de fisura inicial [m]
V_s	90	Voltaje nominal [V]
c_{ω_r}	1500.5	Error deseado
i_{dd}	0	Corriente deseada q [A]
ω_{rd}	188.5	Velocidad angular deseada [rad/s]
α_1	-1	Raíz 1 deseada
α_2	-1	Raíz 2 deseada

La búsqueda de ganancias para la sintonización de velocidad del sistema dinámico no lineal del MSIP se plantea en el diagrama mostrado en la Figura 4, la etapa de búsqueda y prueba de ganancias se lleva a cabo mediante algoritmos genéticos.



La delimitación del dominio de búsqueda de cada una de ganancias involucradas en la acción del controlador ayudará a lograr este objetivo. Las Figuras 6 a 10 muestran el comportamiento de la función costo propuesta en el análisis de sensibilidad para cada una de las ganancias involucradas.

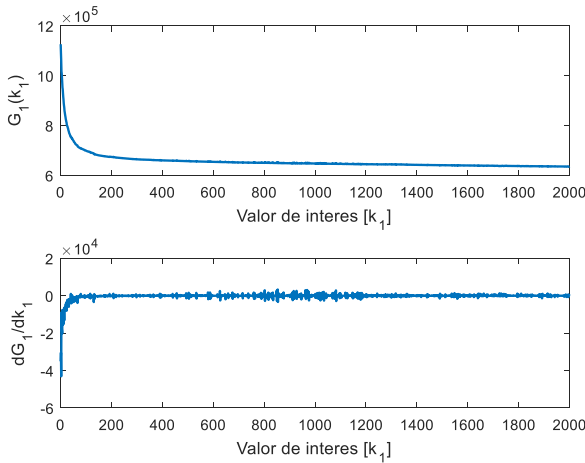


Figura 6: Tasa de energía (superior) y variación de energía (inferior) para la ganancia k_1

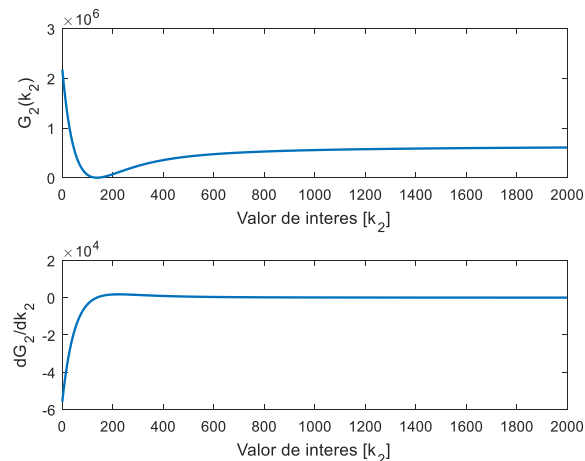


Figura 7: Tasa de energía (superior) y variación de energía (inferior) para la ganancia k_2

Para la ganancia k_1 se observa que para valores menores a 200 la sensibilidad del sistema dinámico aumenta exponencialmente, el consumo energético hace lo mismo y la inestabilidad numérica del algoritmo crece exponencialmente, lográndose con ello la no convergencia de la solución del modelo matemático, por lo tanto, deben evitarse esos valores.

Para la ganancia k_2 se observa un comportamiento cóncavo en el intervalo de valores cercanos a 120, donde se localiza el punto mínimo de sensibilidad, el consumo energético será menor y el tiempo de computo del algoritmo menor, por lo tanto, se debe escoger un intervalo cercano a ese valor de sensibilidad.

Se observa que dentro de las variaciones más representativas de consumo de energía se tiene la ganancia k_p , la cual es muy sensible a valores superiores a -185, donde la sensibilidad se refleja en el consumo energético, el cual aumenta exponencialmente, bajo este comportamiento se esperará que el tiempo de computo se comporte de la misma

forma, aumentando la inestabilidad numérica del algoritmo, por lo tanto se deben de evitar estos valores.

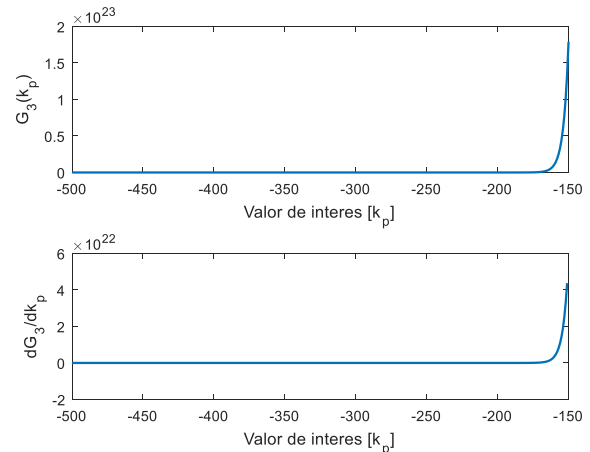


Figura 8: Tasa de energía (superior) y variación de energía (inferior) para la ganancia k_p

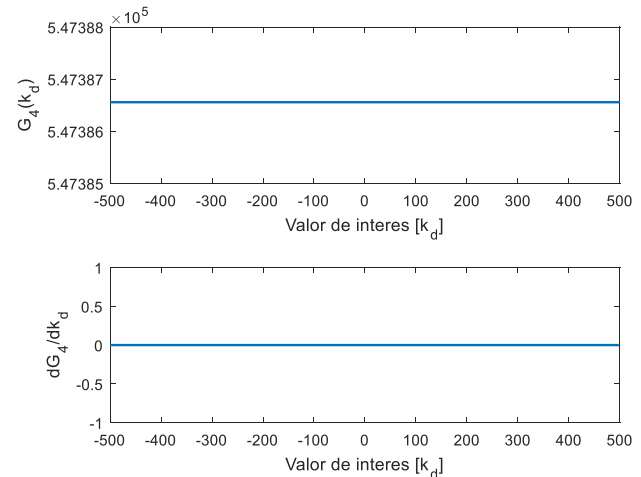


Figura 9: Tasa de energía (superior) y variación de energía (inferior) para la ganancia k_d

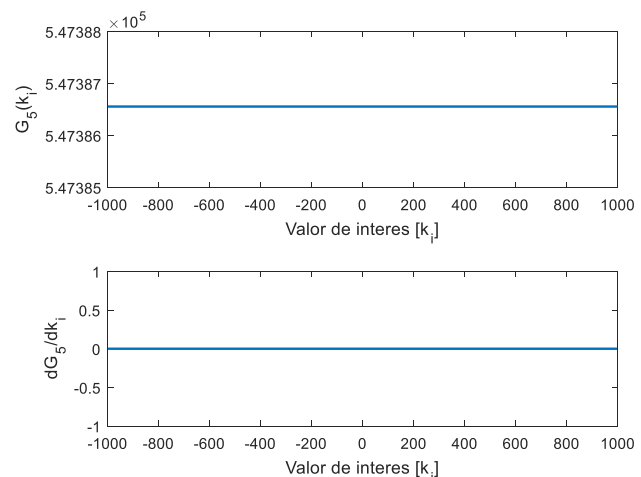


Figura 10: Tasa de energía (superior) y variación de energía (inferior) para la ganancia k_i

Para las ganancias K_i , K_d el comportamiento de la sensibilidad de variación de ganancias es indiferente, por lo tanto, cualquier intervalo que se escoja como búsqueda no afectará al tiempo de consumo de recursos computacionales.

Del análisis de sensibilidad anterior se eligen intervalos de búsqueda de ganancias cercanas a trayectorias que minimizan el consumo energético planteado, el cual es definido por:

$$\begin{aligned} k_1 &= [1000, 2000] \\ k_2 &= [150, 500] \\ k_p &= [-1200, -550] \\ k_i &= [-10, 10] \\ k_d &= [-10, 10] \end{aligned}$$

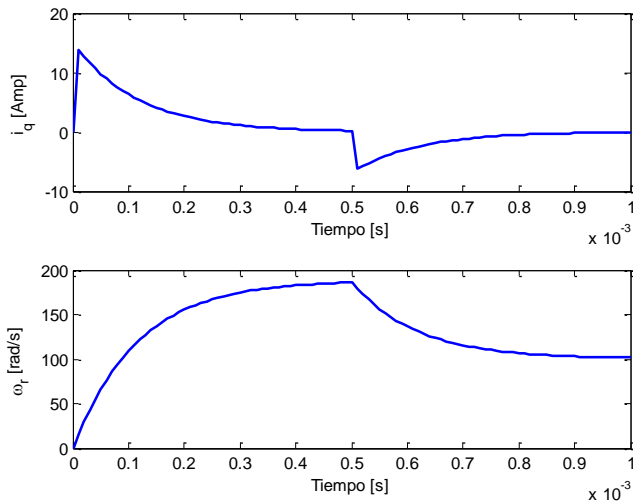


Figura 11: Comportamiento deseado de la velocidad angular (inferior) y consumo de corriente i_q (superior) en el sistema de comparación lineal

Se plantea para la prueba de convergencia entre respuestas a la acción de control del modelo de prueba lineal y el modelo propuesto no lineal del MSIP un comportamiento deseable de la velocidad angular mediante una función escalón definida como:

$$\omega_{rd} = \begin{cases} 188.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} & \text{cuando } t < 0.0005 \text{ s} \\ 100.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}} & \text{cuando } t > 0.0005 \text{ s} \end{cases}$$

La Figura 11 ilustra la respuesta del comportamiento de la velocidad angular ω_r y el consumo de corriente correspondiente i_q del modelo de comparación lineal del MSIP a la entrada de velocidad angular deseada ω_{rd} .

Los parámetros mínimos para la convergencia adecuada de sintonización de búsqueda del algoritmo genético, después de pruebas en simulaciones numéricas, son definidos como:

$$\begin{aligned} \text{Número de individuos} &= 100 \\ \text{Número de evoluciones} &= 20 \\ \text{Tasa de mutación} &= 0.1 \end{aligned}$$

La Figura 12 ilustra el comportamiento del algoritmo genético con respecto a la búsqueda de las ganancias para sintonizar el modelo del MSIP con presencia de degradación en la inercia rotacional, bajo las condiciones de búsqueda definidas por el análisis de sensibilidad y el modelo deseado de comportamiento del MSIP lineal, así como la velocidad angular deseada de comportamiento, bajo una primera iteración de búsqueda. Se puede observar que el algoritmo

genético genera cien familias de ganancias a las cuales corresponde cada trayectoria definida para el consumo de corriente y la sintonización de la velocidad angular, a partir de las mismas realizará el proceso de selección, mutación, cruce y definición de mejores individuos que integrarán las ganancias óptimas para el modelo no lineal del MSIP.

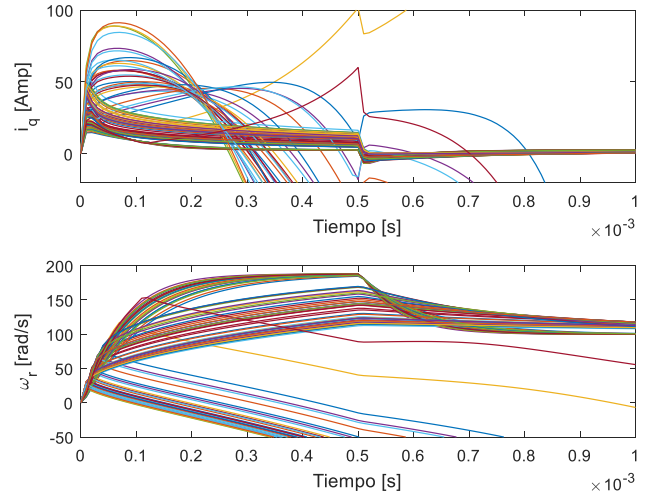


Figura 12: Comportamiento del algoritmo genético en la búsqueda de sintonización, consumo de corriente (superior), velocidad angular deseada (inferior), primera iteración.

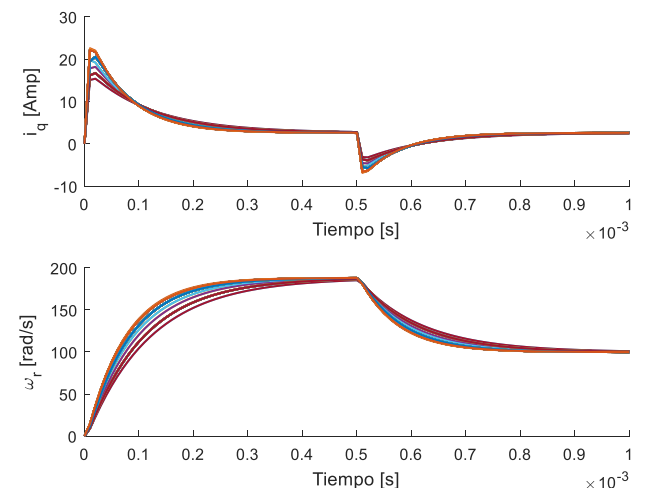


Figura 13: Comportamiento del algoritmo genético para el sistema dinámico del MSIP con presencia de grieta, mejores ganancias de control

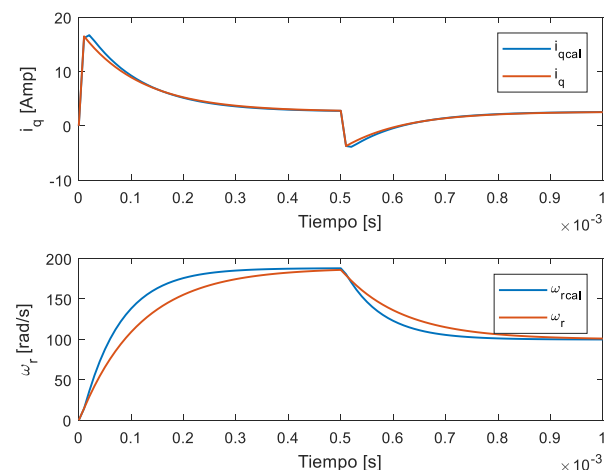


Figura 14: Comportamiento del algoritmo genético para el sistema dinámico del MSIP con presencia de grieta, ganancias con el menor error

La Figura 13 ilustra el comportamiento de las familias de ganancias generadas por el algoritmo genético, aplicado al modelo propuesto del MSIP con presencia de degradación en la inercia rotacional, en la décima evolución de búsqueda, se observa la convergencia de comportamientos de todas estas ganancias obtenidas por el algoritmo genético al modelo deseado de referencia lineal del MSIP.

La Figura 14 ilustra, la mejor respuesta obtenida en el proceso de sintonización de velocidad angular ω_r y consumo de corriente i_q mediante la acción del controlador definido por el algoritmo genético, para el caso de análisis son:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1540.6 \\ k_2 &= 150.7 \\ k_p &= -806.4 \\ k_i &= -4.8 \\ k_d &= 6.4 \end{aligned}$$

Se observa que la trayectoria obtenida tiene un desempeño con comportamiento próximo al solicitado de velocidad angular deseada ω_{rd} , por lo tanto, las ganancias obtenidas son consideradas óptimas.

El comportamiento del modelo no lineal propuesto y lineal de referencia del MSIP para tiempos mayores a 0.001 segundos se logra con estas ganancias, de tal manera, que se comprueba la robustez del algoritmo de sintonización, bajo la presencia de la fisura inicial dada. La Figura 15 ilustra el comportamiento de la velocidad angular ω_r y el consumo de corriente i_q bajo la acción de las ganancias obtenidas mediante la simulación hecha para un tiempo de evaluación de 0.02 segundos, lo cual demuestra que el sistema sigue respondiendo a la acción del control.

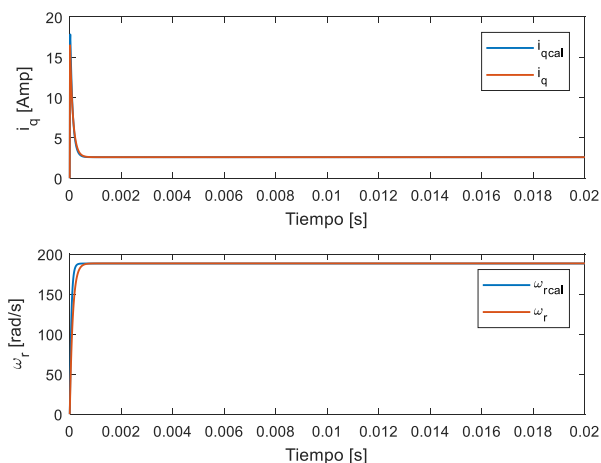


Figura 15: Comparación, mejores ganancias encontradas, sistema no lineal. Sistema lineal para tiempos mayores al atractor del punto de equilibrio

La Figura 16 ilustra el comportamiento de la velocidad angular ω_r y consumo de corriente i_q del modelo no lineal del MSIP propuesto con degradación en la inercia rotacional para un tiempo de simulación de 500 segundos, el tiempo de evaluación tan amplio que solo se visualiza los efectos del estado estacionario, se observa que el comportamiento de la velocidad angular deseada ω_{rd} se mantiene bajo la acción del control. Para la simulación dada se desea una velocidad

angular deseada de:

$$\omega_{rd} = \begin{cases} 188.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} & \text{para } t > 0 \text{ s} \end{cases}$$

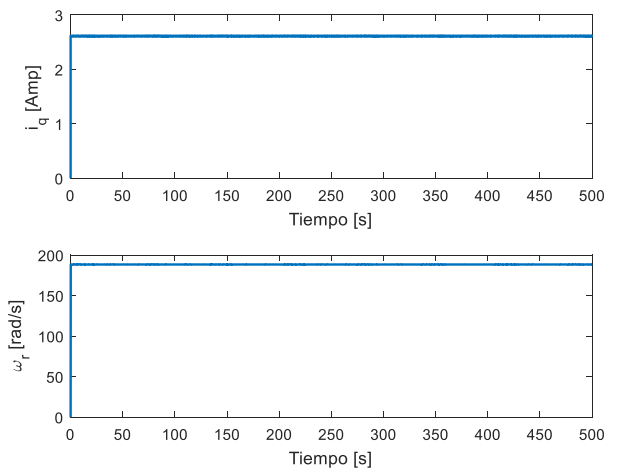


Figura 16: Comportamiento de la velocidad angular de referencia (inferior) y el consumo de corriente i_q (superior) para el tiempo de evaluación $t=500$ s

En la Figura 17 se ilustra el comportamiento de la fisura presentada al interior del MSIP. Se observa cómo, mediante el arranque del MSIP y a causa de efectos inerciales, crece súbitamente la fisura, conforme el tiempo de trabajo del MSIP continua, el crecimiento de la fisura es paulatino y lineal, bajo lo cual se observará, progresivamente, una degradación en la inercia rotacional del eje del rotor, validándose con ello el comportamiento dinámico propuesto.

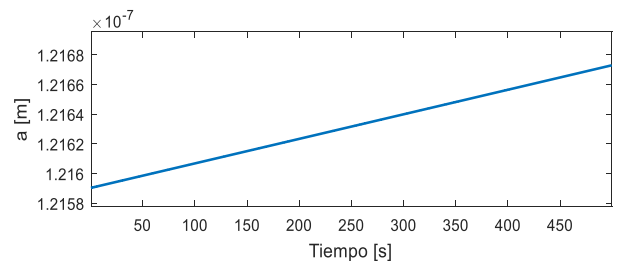


Figura 17: Comportamiento de la fisura del modelo dinámico propuesto en el rotor del MSIP

9. Conclusión

El modelo del MSIP propuesto con el acoplamiento de degradación en la inercia rotacional en el eje permite realizar aplicaciones en el campo del mantenimiento preventivo, control de fallas o determinación de intervalos de fallas de máquinas rotativas, por citar algunos campos de aplicación.

Se observa que, bajo las condiciones de trabajo dadas, el modelo dinámico del MSIP con presencia de degradación en la inercia rotacional del eje del rotor, se sintoniza de manera adecuada a las referencias solicitadas mediante el algoritmo genético continuo propuesto para cualquier tiempo de análisis.

El análisis de sensibilidad de ganancias del controlador del MSIP con presencia de degradación en la inercia rotacional, permite encontrar intervalos de búsqueda que ayudan a minimizar el tiempo de sintonización del algoritmo genético.

El modelo propuesto de MSIP con presencia de degradación en la inercia rotacional es considerado congruente con el comportamiento esperado de degradación típico de máquinas rotatorias, el tamaño de la fisura interior sigue creciendo de manera lineal y paulatina hasta que finalmente ocurrirá la fractura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de la beca otorgada por el consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) con número de asignación 622392, la Universidad Politécnica de Tulancingo (UPT) y la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI), sin cuyo apoyo académico, económico y motivacional no habría podido desarrollarse el presente escrito, nuestro mayor reconocimiento y agradecimiento a todas las personas que se encuentran detrás de los citados organismos e instituciones.

Referencias

- Aguilar-Mejía O., Tapia-Olvera R., Valderrabano – González A., Rivas-Camero I., Adaptive neural network control of chaos in permanent magnet synchronous motor, Taylor and Francis Group, Intelligent Automation & Soft Computing, 24 noviembre 2015, DOI: 10.1080/10798587.2015.1103971.
- Andrade A. A., Mosquera W. A., Vanegas L. V. Modelos de crecimiento de grietas por fatiga, Entre Ciencia e Ingeniería volumen 9, Número 18, Pereira, Colombia, julio-diciembre 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.2686>
- Arana J. L., González J. J., 2011, Mecánica de la fractura, Servicio editorial de la universidad del País Vasco, página 186.
- Bachschmid N., Pennacchi P., Tanzi E., 2010, Cracker Rotors, Editorial Springer, pages 4-14.
- Barter S., White P., Burchill M., Fatigue Crack path manipulation for crack growth rate measurement, Engineering fracture mechanics, volumen 167, November 2016, pages 224-238, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2016.04.020
- Boroni G., Lotito P., Clausse A. Análisis de sensibilidad de sistemas algebraicos diferenciales, Asociación argentina de mecánica computacional, Buenos Aires, Argentina, Volumen 25, noviembre de 2006, páginas 1071-1085.
- Colorado-Arellano O., Hernández-Romero N., Seck Tuoh-Mora J., Medina J. Algoritmo genético aplicado a la sintonización de un controlador PID para un sistema acoplado de tanques. Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, Volumen 5, 05 de enero de 2018.
- Gen M., Cheng R., 2000, Genetic Algorithms and engineering optimization, Editorial John Wiley, pages 27-34.
- Genta G., 2005, Dynamics of Rotating System, editorial Springer, pages 332-354.
- Gieras J. F., Wing M. 2002, Permanent Magnet Motor Technology: desing and applications, second edition, Editor Marcel Dekker, pages 1-15a and 169-187b.
- Holland J. H., Adaptation in Natural and Artificial Systems, An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence. The MIT Press, 1975.
- Jun Xu W. Permanent Magnet Synchronous Motor with Linear Quadratic Speed Controller, Energy Procedia, Volume 14, 2011, pages 364-369, DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.943.
- Kan L., Z. Q. Zhu. Quantum Genetic Algorithm-Based Parameter Estimation of PMSM Under Variable Speed Control Accounting for System Identifiability and VSI Nonlinearity, IEEE Industrial Electronics Society, 04 April 2015, Volume 62, pages, 2363–2371, DOI: 10.1109/TIE.2014.2351774.
- Krauze P., Wasynczuk O., Sudhoff S., Pekarek S., 2013, Analysis of electric machinery and drive systems, Tercera edición, Ediciones IEEE Wiley, pages 191-256.
- Krishnan R. 2010, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Editorial CRC Press, pages 225-276.
- Ortiz-Quisbert M. E., Duarte-Mermoud, Milla Freddy, Castro-Linares R., Control adaptativo fraccionario optimizado por algoritmos genéticos, aplicados a los reguladores de voltaje, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, Volumen 13, 2016, páginas 403–409, DOI: 10.1016/j.bspc.2018.01.023.
- Quiroz J. C., Maurin N., Rezazadeh M., Izadi M. Mison N., Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests, Measurement, Volume 116, February 2018, Pages 273-280, DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.004.
- Rasoolzadeh A., Tavazoei M. S. Prediction of chaos in non-salient permanent-magnet synchronous machines, Physics Letters A, 05 november 2012, pages 73–79, DOI: 10.1016/j.physleta.2012.10.053.
- Venkatesan K., Liu Y., Subcycle fatigue crack growth formulation under positive and negative stress ratios, Engineering fracture mechanics, volumen 189, 15 February 2018, pages 390-404, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.11.029.
- Villalobos-Piña F., Alvarez-Salas R., Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, Volumen 12, 2015, páginas 292–303, DOI: 10.1155/2016/3409756.
- Xue W., Li Y., Cang S., Jia H., Wang Z. Chaotic behavior and circuit implementation of a fractional-order permanent magnet synchronous motor model, Journal of the Franklin Institute, 20 de mayo de 2015, pages 2887–2898, DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.05.025.
- Yun-Jie W., Guo-Fei L. Adaptive disturbance compensation finite control set optimal control for PMSM systems based on sliding mode extended state observer. Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 98, 1 January 2018, Pages 402-414, DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.05.007.