

Control óptimo para el arranque en tiempo mínimo de un motor de inducción

Optimal control for induction motor start-up in minimal time

JOSÉ M. RAMÍREZ

Ingeniero eléctrico de la Universidad del Valle, Colombia. Recibió el grado de Ph.D. de INPG, Grenoble, France. Es Docente Titular en la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, pertenece al Grupo GICI - Univalle. Correo electrónico: jomiram@univalle.edu.co

MAURICIO J. SALAMANCA

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magíster en Automatización, Universidad Nacional de Colombia, Candidato a Doctor en Ingeniería con énfasis en Automática de la Universidad del Valle, Director Grupo DSP-UPTC, Además pertenece al grupo GICI de Univalle, Docente Escuela de Ingeniería electrónica. Correo electrónico: jumasala@univalle.edu.co

ÓSCAR M. HIGUERA

Ingeniero Electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Candidato a Magíster en Ingeniería - Automatización Industrial en la Universidad Nacional de Colombia, hace parte del Grupo de Investigación DSP-UPTC, docente de la Escuela de Ingeniería electrónica. Correo electrónico: oihigueram@unal.edu.co

Clasificación del artículo: Investigación (conciencias)

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2009

Fecha de aceptación: 26 de enero de 2010

Palabras claves: Motor de Inducción, Control Optimo, Algoritmos genéticos, Tiempo Mínimo.

Keywords: Induction Motor, Óptimal control, Genetic algorithms, Minimal Time.

RESUMEN

En este documento se presenta el diseño del control óptimo para el arranque en tiempo mínimo de un motor de inducción. Se presenta la determinación de la ley de control basada en la técnica del vector unitario y los parámetros que se obtienen

por medio de optimización basada en algoritmos genéticos. Finalmente presentamos simulaciones en Matlab para el sistema y la ley de control los parámetros óptimos se muestran en tablas.

ABSTRACT

In this paper we present the induction motor optimal control for start up and to reach nominal speed in minimal time. It presents the control law Unity vector approach based and the parameters

are obtained by genetics algorithms optimization. Finally we present simulations in Matlab for the system and control laws and the optimal parameters are showed in tables.

* * *

1. Introducción

En el arranque de motores de inducción se parte de un flujo remanente, para así después realizar el arranque del motor hasta llevarle a un punto de operación deseado. Es aquí donde se pretende introducir un controlador con limitación en la señal, en el cual se tengan en cuenta las limitaciones o restricciones que plantea el modelo matemático del motor, entre las que se encuentran corrientes y flujo máximo, flujos remanentes, tiempo de respuesta, etc.

El trabajo se enfoca en aplicar la optimización, en la que se plantea encontrar los valores óptimos para el diseño de un controlador con limitación en la señal para realizar el arranque en tiempo mínimo de un motor de inducción. Lograr minimizar este tiempo es muy importante, debido a que se puede optimizar el tiempo de trabajo efectivo de los motores de inducción, ya que éstos se arrancan con cero carga y al alcanzar su velocidad nominal se les conecta la carga, para lo cual es útil realizar un análisis y determinación del tiempo, puesto que éste se demora en alcanzar el valor de su velocidad nominal; en consecuencia, se plantea la optimización del tiempo de alcance de esta velocidad nominal ω_{nominal} .

En el transcurso del texto se verán algunos conceptos básicos necesarios sobre los temas trabajados en este desarrollo; asimismo se verán el modelo desarrollado, las limitaciones encontradas y el modelo por optimizar, y se mostrarán la simulación y los resultados obtenidos.

2. Modelo a controlar

Para poder determinar cuál es la función de control por optimizar, las restricciones a las cuales está sujeta, es necesario plantear matemáticamente el modelo del motor de inducción que se ha elegido para realizar el presente desarrollo. Los valores del motor que se trabajan son reales, tomados de un Motor de Inducción del Laboratorio de Automática (Gipsa-Lab) de la Universidad de Grenoble en Francia [1].

2.1. Modelado

En esta sección se describe el modelo matemático en espacio de estados del motor de inducción, con sus restricciones, así como la función de los coestados, entre otras características inherentes al sistema por optimizar en el control óptimo.

2.1.1. Modelo del motor de inducción.

El modelo que se va a emplear en este caso es el descrito por (1) y (2), el cual está basado en los parámetros del motor, así como en los valores de las corrientes manejados, los cuales son valores RMS [2].

$$\dot{\varphi}_d(t) = -a\varphi_d(t) + bi_s^d(t) \quad (1)$$

$$\dot{\omega}(t) = -\frac{f}{m}\omega(t) + \frac{c}{m}\varphi_d(t)bi_s^g(t) \quad (2)$$

donde se tiene:

$\varphi_d(t)$ es el flujo.

$\omega(t)$ es la velocidad angular del motor.

$i_s^d(t)$ Corriente en el eje d

$i_s^q(t)$ Corriente en el eje q

$$\|i_s(t)\|_2 = \sqrt{i_s^d(t)^2 + i_s^q(t)^2} \quad (3)$$

Las constantes del motor son: $a = 3,125$, $b = 0,3750$, $c = 1,875$, $f = 0,006$. Coeficiente de fricción, $m = 0,22$. Por consiguiente, se tiene que el modelo estaría definido por:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \varphi_d(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} i_s^d(t) \\ i_s^q(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} -a & 0 \\ 0 & -\frac{f}{m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & \frac{c}{m} \varphi_d \end{bmatrix} = B(\varphi_d) \quad (7)$$

Obteniendo finalmente la ecuación:

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B(x) U(t) \quad (8)$$

2.1.2. Condiciones Iniciales y condiciones finales.

Las condiciones iniciales para el arranque del motor están determinadas por:

$$t_0 = 0 \quad (9a)$$

$$\omega(t_0) = 0 \quad (9b)$$

$$X(t_0) = X_0 = \quad (9c)$$

Como se puede ver el valor del flujo remanente inicial es muy importante, para lo cual se debe establecer el valor de este flujo; entonces, se tiene: $\varphi_d = 0.001$.

Las condiciones finales serían:

$t_f = T$. Tiempo libre

$\omega(t_f) = \omega_{nominal}$

$\varphi_d(t_f) = \varphi_d(T) = \varphi_{dT} \neq 0$. Libre.

2.1.3. Restricciones de control.

$$\|i_s(t)\|_2 = \sqrt{i_s^d(t)^2 + i_s^q(t)^2} \leq 1.5 I_{nom} = I_{max} \quad (10)$$

Donde

$$\|U(t)\| = \|i_s(t)\|_2 \leq I_{max} = 36.9 \text{Amp} \quad (11)$$

2.1.4. Objetivo de control

El objetivo de control es arrancar el motor desde las condiciones iniciales dadas hasta alcanzar las condiciones finales especificadas en tiempo mínimo, es decir, el criterio por minimizar es el tiempo, por consiguiente se debe minimizar [3,4]:

$$J = \int_0^t dt = T \quad (12)$$

2.1.5. Coestados

Los coestados para el sistema son:

$$\lambda(t) = \begin{bmatrix} \lambda_1(t) \\ \lambda_2(t) \end{bmatrix} \quad (13a)$$

$$\lambda(t) = -\frac{dH}{dx} = -A^T \lambda(t) - \frac{d}{dx} \lambda^T(t) B(x) U(t) \quad (13b)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -A^T \lambda(t) - V(\lambda) U(t) \quad (13c)$$

Que generara las ecuaciones:

$$\dot{\lambda}_1(t) = a\lambda_1(t) - \frac{c}{m} \lambda_2(t) i_s^q(t) \quad (14)$$

$$\dot{\lambda}_2(t) = \frac{f}{m} = \lambda_2(t) \quad (15)$$

2.1.6. Hamiltoniano

$$H(X,U,t) = H(X,U) = 1 + \lambda^T [A X(t) + B(x) U(t)] \quad (16)$$

$$H(X,U) = 1 + \lambda^T(t) A X(t) + \lambda^T(t) B(x) U(t) \quad (17)$$

$$1 + \lambda^{*T}(t) A X^*(t) + \lambda^{*T}(t) B(X^*) U^*(t) \leq 1 + \lambda^{*T} A X^*(t) + \lambda^{*T}(t) B(X^*) U(t) \quad (18)$$

Sea

$$W(X^*, \lambda^*) = B^T(X^*) \lambda^* \quad (19)$$

Escogiendo

$$W^T(X^*, \lambda^*) U(t) = -U_{\max} \|W(X^*, \lambda^*)\| \quad (20)$$

2.2. Ley de Control

Encontrar la ley de control es muy importante, porque nos permitirá hallar el valor de las corrientes que se deben aplicar, así como las restricciones que se van a tener en cuenta al momento de realizar la optimización.

2.2.1. Obtención de la señal $U^*(t)$

Como $H(X,U)$ es lineal en el control, $\frac{dH}{dU} = B^T(x)\lambda$

es independiente en U, y como se ve $H(X,U)$ es convexo con respecto a U.

Para minimizar $H(X,U)$ se utiliza el “Principio del Mínimo de Pontryagin” $H(X^*, U^*) \leq H(X^*, U)$

$X^*(t)$ es la trayectoria óptima deseada del estado.

$\lambda^*(t)$ es la trayectoria óptima del coestado.

$U^*(t)$ es la trayectoria óptima de control.

Se obtiene:

$$\|W(X, \lambda)\|_2 = \sqrt{[b\lambda_1(t)]^2 + \left[\frac{c}{m} \varphi_d(t) \lambda_2(t)\right]^2} \quad (21)$$

Con lo cual se obtiene la siguiente señal para la entrada de control (22).

$$U^*(t) = \begin{bmatrix} \frac{-U_{\max} b \lambda_1}{\sqrt{[b \lambda_1(t)]^2 + \left[\frac{c}{m} \varphi_d(t) \lambda_2(t)\right]^2}} \\ -U_{\max} \frac{c}{m} \varphi_d^*(t) \lambda_2(t) \\ \frac{-U_{\max} \frac{c}{m} \varphi_d^*(t) \lambda_2(t)}{\sqrt{[b \lambda_1(t)]^2 + \left[\frac{c}{m} \varphi_d(t) \lambda_2(t)\right]^2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_s^{*d} \\ i_s^{*q} \end{bmatrix} \quad (22)$$

2.2.2. Obtención de $\omega(t)$

Para este caso debemos considerar las condiciones finales.

$$\lambda_1^*(T) = 0 \quad (23a)$$

$$\lambda_2^*(T) = -d \quad (23b)$$

$$\lambda_2^*(0) < 0 \quad (25)$$

De acuerdo a las ecuaciones del coestado se obtiene:

Obteniéndose finalmente:

$$-d = e^{\frac{f}{m}T} \lambda_2^*(0) \quad (24)$$

$$\omega(t) = -k\omega \lambda_2^*(0) e^{-\alpha t} \int_0^t \frac{e^{2\alpha\tau} [\varphi_d^*(\tau)]^2}{\sqrt{[b \lambda_1^*(t)]^2 + [\beta e^{\alpha\tau} \varphi_d^*(\tau) \lambda_2^*(0)]^2}} d\tau \quad (26)$$

La ecuación anterior servirá para evaluar la velocidad en la simulación del sistema de control de arranque en tiempo mínimo del motor de inducción hasta alcanzar la velocidad nominal.

$$\omega(t) \leq \frac{k\omega b U_{\max}}{\beta \alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (28)$$

Donde:

2.2.3. Valores límites

De la ecuación anterior se puede hallar algunos valores límites útiles en la determinación de los valores óptimos del sistema de control. Entonces, se obtiene:

$$\alpha = \frac{f}{m}$$

$$\beta = \frac{c}{md}$$

$$\varphi_d(T) \leq \frac{b}{a} U_{\max} = 4.42 \quad (27)$$

$$k\omega = \frac{c^2 U_{\max}}{M^2 d}$$

De igual forma como $\lambda_2^*(0) < 0$, entonces $-\lambda^*(0) = |\lambda^*(0)|$, se obtiene:

De la ecuación anterior se puede despejar T para obtener un valor mínimo del tiempo de arranque,

el cual sería: $T \geq 0.023 \text{ seg}$

3. Determinación de λ_0 óptimo y simulación

3.1. Función por optimizar

Para poder determinar los valores óptimos de λ_0 , del controlador se emplea la optimización, con lo cual se logra minimizar el tiempo de arranque, así como cumplir con las restricciones del modelo empleado [5], es decir la función por optimizar está dada por:

$$\begin{aligned} & \min t \\ & \lambda_0 \\ & \text{st: } t \geq 0.023 \text{seg} \\ & \varphi_d(t) \leq 4.42 \\ & \varphi_d(t) \geq 0, \text{ Para todo } t > 0 \\ & \omega(T) = \omega_{nominal} = 188,4956 \end{aligned}$$

$$\|U(t)\| = \|i_s(t)\|_2 \leq I_{max} = 36.9 \text{Amp} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1^*(T) & \approx 0 \\ \lambda_2^*(t) & < 0 \end{aligned}$$

La implementación de las funciones de restricción y los coestados, se realiza en MATLAB/simulink; para esto se realiza un llamado a la simulación del esquema presentado en la figura 1. Los resultados de la simulación son enviados a workspace para poder realizar su análisis [6], y con base en estos resultados se lleva a cabo la evaluación de si cumplen o no las restricciones planteadas, y así tomar la decisión de si se varía o no el punto λ_0 seleccionado.

Los bloques que aparecen en la figura 1 son mostrados en la figura 2. El bloque Criterio de Parada; establece las condiciones por las cuales se interrumpe la simulación; éstas son que lleguen a la velocidad nominal; y obtengan el flujo máximo permitido o que se cumpla el tiempo máximo de simulación, el cual se ha establecido en 5 segundos.

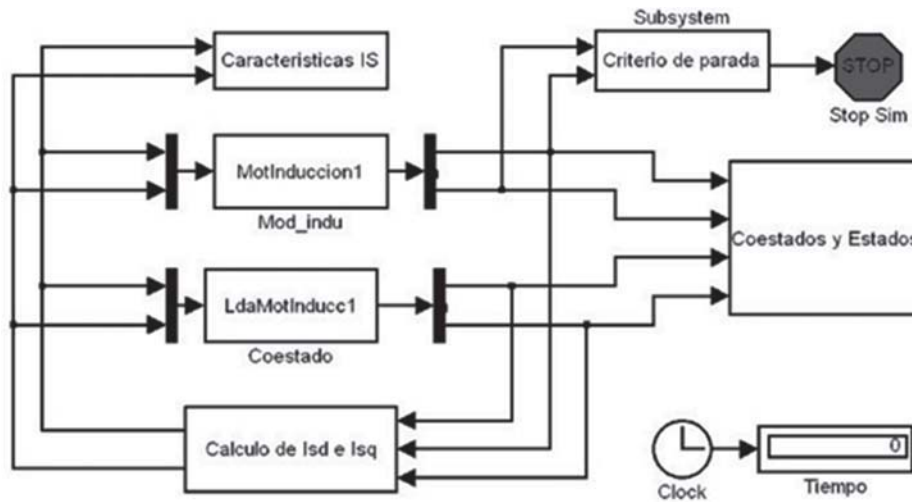


Figura 1. Esquema de Simulación del modelo y su control.

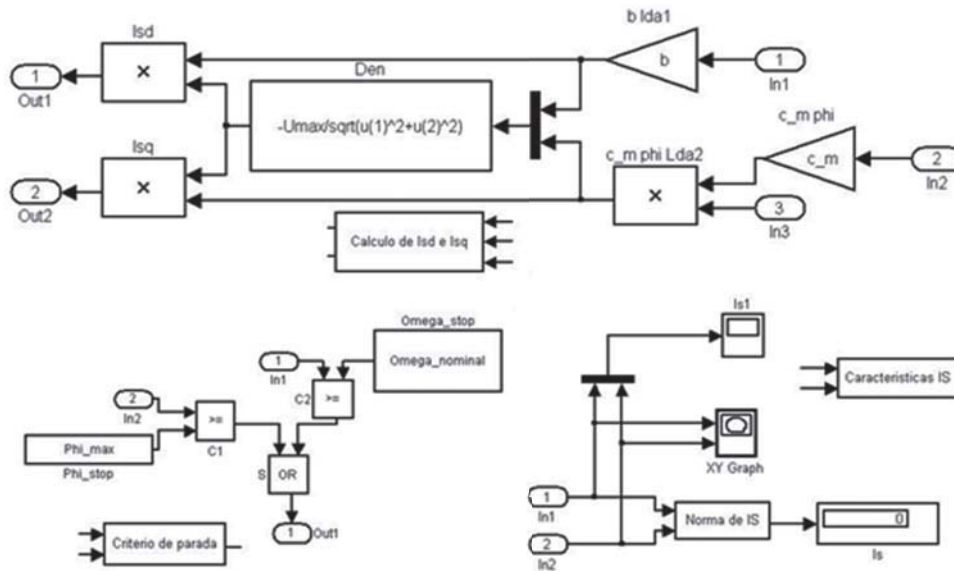


Figura 2. Bloques internos presentes en la figura 1

3.2. Optimización

Para realizar la optimización de los valores de λ_0 , se empleó una rutina de algoritmos genéticos [7-9], que hace un llamado al esquema de simulación para realizar la evaluación de las funciones y las restricciones.

En el proceso de optimización basado en algoritmos genéticos, se utilizan cuatro padres para cada una de las variables; y el cambio se realiza al mismo tiempo tanto para una como para la otra variable de optimización. Adicionalmente se va almacenando el hijo que brinde el mejor resultado. Para escoger el mejor de los hijos, se utiliza una ponderación entre las restricciones y la función a minimizar, así:

Si el valor de $\varphi(t)$ es negativo en algún tiempo la ponderación para este factor es 0, mientras que si es siempre positivo es 1. Para la velocidad, se realiza una diferencia normalizada a la velocidad nominal, en cuyo caso si la velocidad es la nominal la ponderación es 1, y si es cero la ponderación es 0, y entre éstos una equivalencia escalizada, es decir,

entre más cercana este a la velocidad nominal mas cercana sera la ponderación a 1. Para el tiempo, se hace similar a la velocidad, pero en este caso si es cercano a 5 vale 0 la ponderación, y entre mas cercano sea a cero más cercana sera la ponderación a 1. La ponderación final es la suma de cada una de las ponderaciones anteriores, y aquel que obtenga la mejor ponderación es el mejor hijo y, por tanto, el que se tendrá en cuenta.

Después de obtener el mejor hijo se realiza la mutación y se evalúa la función; es este paso se va almacenando, así como el mejor resultado con respecto al tiempo, para así obtener una salida, en caso de no obtener la convergencia dentro de un número máximo de iteraciones.

4. Resultados

4.1 Obtención de Valores Óptimos λ_0

Para realizar la obtención de los valores óptimos de λ_0 , se establece el intervalo de búsqueda, de acuerdo con simulaciones previas. Se obtuvo el intervalo (-0,25, 0). Cuando los valores están fue-

ra de estos límites, el valor de $\varphi(t)$ está oscilando, aún más, dentro de estos límites en ocasiones el valor de $\varphi(t)$ oscila, así como no se puede conseguir la velocidad nominal en un tiempo mínimo. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el valor de $\varphi(t)$ siempre debe ser positivo, es decir, que al momento de tener los datos se debe corroborar que esto sea así.

Tabla 1. Resultados de Variación de λ_{10} con $\lambda_{20} = -0.001$

T (seg)	φ_{\max}	$\omega(T)$	λ_{10}
2,0660	4,4200	132,9000	-0,1172
2,0375	4,4200	79,5495	-0,1875
2,0318	4,4200	64,1428	-0,2305
2,0239	4,4200	32,2156	-0,4531
2,0230	4,4200	26,4500	-0,5508
0,8423	3,9853	188,4956	-0,0742
0,7664	3,8528	188,4956	-0,0703
0,6497	3,5434	188,4956	-0,0625

Como se mencionó anteriormente, el programa planteado realiza la simulación del sistema en simulink, por tanto el número de iteraciones máximo se ve reducido, debido a lo extenso de los cálculos que requieren para una convergencia. Después de realizar diferentes simulaciones, se pudo llegar a los resultados mostrados en la tabla 1 ordenados de mayor a menor en tiempo.

En la tabla 1, se puede observar que con algunos parámetros no se logra alcanzar la velocidad nominal, cuando ya se ha alcanzado el flujo máximo; es por esto que se realiza la variación de los dos parámetros de λ_{θ} , con lo cual se logra una mayor eficiencia en el sistema, con lo cual se obtienen los datos mostrados en la tabla 2. Como se puede observar, en la tabla 2, el tiempo mínimo encontrado es 0,4833 segundos, el cual se logra con 2 Diferentes Valores de λ_{θ} , así como hay un tercer resultado que es muy similar a estos con un tiempo de 0,4834 segundos. Para lo cual se observa las respuestas de los Estados y Coestados para ver

que cuál de éstas satisface mejor las restricciones.

Tabla 2. Resultados de Variación de λ_0 , $\omega(T)=188.4956$

T (seg)	φ_{\max}	λ_{10}	λ_{20}
1,1459	1,0801	-0,0637000	-0,0027000
1,1459	1,0783	-0,0345000	-0,0014000
1,0170	1,2386	-0,1410000	-0,0052000
0,8750	1,4279	-0,0813293	-0,0026398
0,6904	3,6708	-0,0919000	-0,0014000
0,5641	3,1504	-0,0696411	-0,0016650
0,5293	2,8916	-0,1228943	-0,0023956
0,5267	2,8675	-0,0226000	-0,0004425
0,5222	2,8230	-0,0939484	-0,0018616
0,5072	2,6472	-0,0689390	-0,0014191
0,5060	2,6297	-0,0790405	-0,0016327
0,4902	2,1103	-0,0801544	-0,0018921
0,4864	2,3159	-0,0626221	-0,0013886
0,4851	2,2867	-0,0491486	-0,0010986
0,4848	2,1563	-0,0689087	-0,0016022
0,4845	2,1610	-0,1130524	-0,0026245
0,4841	2,1695	-0,0962219	-0,0022278
0,4834	2,2209	-0,1171875	-0,0026703
0,4833	2,2077	-0,0967102	-0,0022125
0,4833	2,2085	-0,0767212	-0,0017548

Para el caso con $\lambda_{\theta}=[-0,0967102 -0,0022125]$ con $T=0,4833$, se logra observar que cumple todas las restricciones, y el valor de $\lambda_I(T)$ es cercano a cero (0,0005318), por lo que se considera un resultado válido. Para el caso con $\lambda_{\theta}=[-0,0767212 -0,0017548]$ con $T=0,4833$, (figuras 3 a 9), se logra observar que cumplen todas las restricciones, y el valor de $\lambda_I(T)=0,0002333$ es aproximado a cero, por lo que se considera un resultado válido. Adicionalmente este valor de $\lambda_I(T)$ es inferior al resultado dado por la prueba anteriores. Por tanto se escoge el valor de $\lambda_{\theta_{optimo}}=[-0,0767212 -0,0017548]$. En la figura 9 se observa que las corrientes forman una circunferencia de radio 36,9, que satisface la condición de la corriente que es la señal de control.

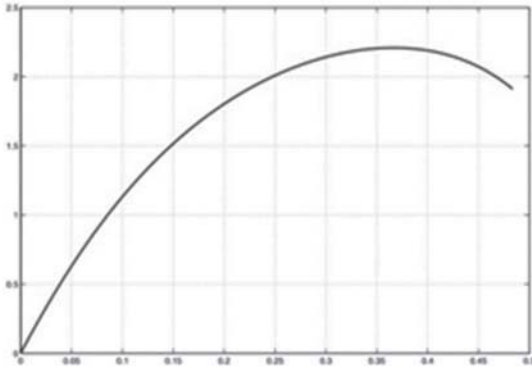


Figura 3. Valor de $\varphi(t)$, para $\lambda_0=[-0.0767212 -0.0017548]$

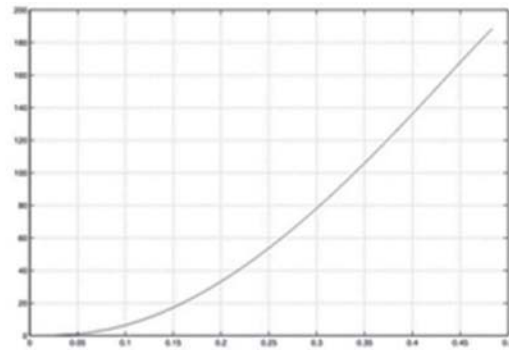


Figura 4. Valor de $\omega(t)$, para $\lambda_0=[-0.0767212 -0.0017548]$

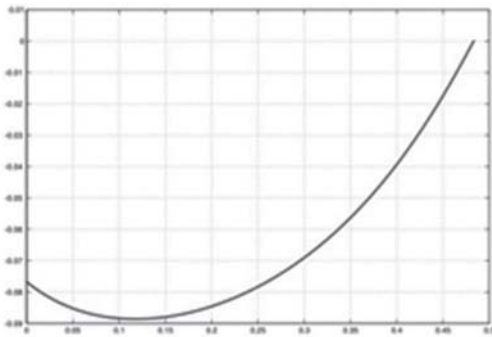


Figura 5. Valor de $\lambda_1(t)$, para $\lambda_0=[-0.0767212 -0.0017548]$

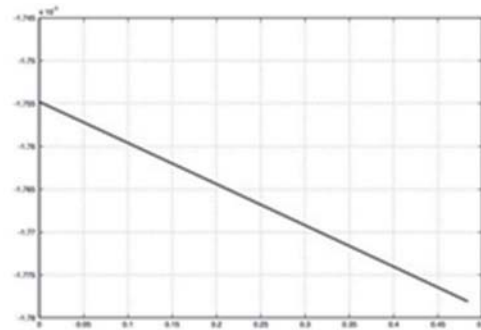


Figura 6. Valor de $\lambda_2(t)$, para $\lambda_0=[-0.0767212 -0.0017548]$

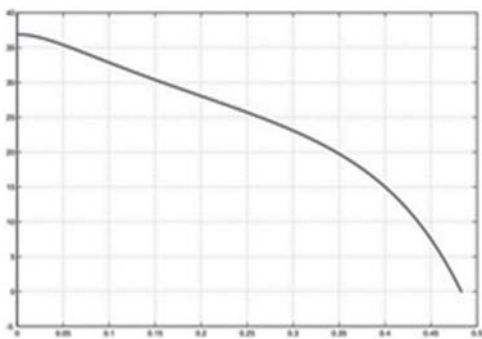


Figura 7. Valor de $I_{sd}(t)$, para $\lambda_0=[-0.0767212 -0.0017548]$

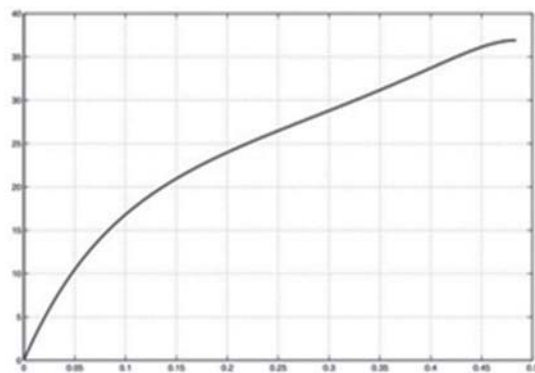


Figura 8. Valor de $I_{sq}(t)$, para $\lambda_0=[-0.0767212 -0.0017548]$

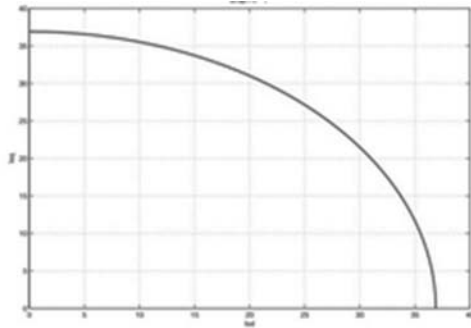


Figura 9. Valor de $I_{sd}(t)$ vs $I_{sq}(t)$, para $\lambda_0 = [-0.0767212 -0.0017548]$

4.2. Variación de los Parámetros de Motor

Para realizar una sencilla prueba del efecto que poseen las variaciones de los parámetros del motor sobre el efecto del tiempo de alcance de la velocidad nominal se realiza una variación sobre el valor de los parámetros del Motor, para este caso se emplea el λ_{optimo} seleccionado. Los resultados de las variaciones a los parámetros del motor de inducción, para al alcance de la velocidad nominal se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de tiempo de alcance de la velocidad nominal con variación de parámetros

		Tiempo $\omega_{nominal}$ (seg)				
Variación		-10%	-5%	0%	5%	10%
Parámetro	f = 0.006	0.4832	0.4833	0.4833	0.4834	0.4835
	a = 3.125	0.4912	0.4802	0.4833	0.4941	0.5116
	b = 0.375	0.5219	0.5005	0.4833	0.4686	0.4555
	c = 1.875	0.5242	0.5014	0.4833	0.4703	0.4649
	m = 0.22	0.4665	0.4699	0.4833	0.5004	0.5197

Después de observar estas variaciones se puede detallar que la variación en el tiempo de alcance de la velocidad nominal no supera los 0,5 segundos, si la variación en los parámetros del motor no excede el 5%; si se garantiza que el modelo con el cual se realizó el diseño es exactamente el del motor al cual se le aplicará el control, este alcanzará la velocidad nominal en 0,4833 segundos.

La variación de parámetros del motor se realizó para poder observar qué tan robusto puede llegar a ser el control, si se emplean los valores encontrados en la optimización y el sistema sufre pequeños cambios en los parámetros internos. Como se demostró, el error en el tiempo (T) ante variaciones de parámetros era máximo de un 8,5%, pero, dada la dinámica del sistema la variación no siempre será de un solo parámetro y puede llegar el caso en que la variación de éstos saque al sistema

de control de la capacidad de llegar a obtener una solución, debido a que este ya sería otro modelo diferente al que se le diseñó inicialmente al control, para cuyo caso es necesario volver a encontrar los valores óptimos para el nuevo sistema. Si se asegura por parte del motor que los parámetros están dentro de cierto rango, por ejemplo la variación máxima será de un 5% en cualquiera de sus parámetros; se puede asegurar que el control llevará a cabo el alcance de la velocidad nominal en aproximadamente 0,5 segundos.

5. Conclusiones

Encontrar el modelo matemático de las diferentes variables que influían en el diseño y en la respuesta del sistema controlado y, por tanto, en la optimización fue clave para poder solucionar y encontrar

trar un punto factible de solución a este sistema. Dado que este sistema era no lineal y que no se podía por simple inspección encontrar cuál era la solución óptima, se hizo necesario implementar rutinas de evaluación y cambios de parámetros en simulink, para lo cual se tuvo que encontrar una representación en MATLAB de todo el sistema, y que gracias a pruebas iniciales, antes de la optimización permitieron encontrar un intervalo de búsqueda óptimo para así reducir la búsqueda innecesaria y encontrar mucho más rápido la solución al sistema.

Debido a que los algoritmos genéticos están basados en una aleatoriedad, presentan una ventaja que se vio demostrada en el hecho de llegar a obtener el mismo resultado partiendo de diferentes puntos y encontrando valores óptimos diferentes. Como en este caso para dos valores diferentes de λ_0 se lograba una respuesta igual del sistema con el mismo tiempo, su diferencia era mínima, por tanto, se podía escoger cualquiera de las dos, que para

este caso se escogió aquella que fuera mucho más estricta en el cumplimiento de las restricciones, como lo fue $\lambda_{0optimo} = [-0.0767212 -0.0017548]$.

Otra posible forma de encontrar una solución factible a este problema puede ser intentar utilizando Recosido Simulado, para lo cual se aconsejaría revisar la forma de evaluar las funciones y restricciones, a fin de poder disminuir el costo computacional que se presenta en la obtención de esta solución. Como para este caso, en el que resultaba complicado resolver el sistema dado que éste estaba basado en el llamado a rutinas de otros programas, se realizó un trabajo de bloques, como el que se trabaja en simulink, pero a costa de sacrificar el tiempo de convergencia de la solución. Se espera poder encontrar nuevos valores de λ_0 óptimos para este mismo motor, por lo que queda abierta la posibilidad de emplear Simulated Annealing y evaluar la formulación de la evaluación de las restricciones y la función.

6. Referencias

- [1] J.M Ramirez. *Control óptimo del motor de inducción en ejes ab*, Tesis Maestría. Universite De Grenoble .(Scientifique Et Medicale - Joseph Fourier). 1994
- [2] W Leonhard. *Control of Electrical Drives*. 3 ed. Springer 2001.
- [3] D. Kirk. *Optimal Control Theory: an Introduction*. Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey, 1970.
- [4] F.L Lewis. *Applied Optimal Control and Estimation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1992.
- [5] T. Belegundu. Chandrupatla. *Optimization Concepts and Applications in Engineering*, Prentice Hall. Saddle River, N.J., 1999.
- [6] O.I Higuera. Salamanca. “*Diseño de un controlador LMI+I basado en optimización para un helicóptero de dos grados de libertad*”. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 1, No 4., 2007.
- [7] L. Davis. *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [8] D.E Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989.
- [9] K. Zhou, J.C. Doyle and K. Glover. *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall. Saddle River. 1995.