

Control adaptable basado en evolución diferencial para un motor de CD

Miguel G. Villarreal-Cervantes¹, Efrén Mezura-Montes²

¹ Instituto Politécnico Nacional-CIDETEC. Av. Juan de Dios Bátiz s/n,
Col. Nueva Industrial Vallejo, Deleg. Gustavo A. Madero, C.P. 07700, México D.F.
mvillarrealc@ipn.mx. Teléfono: (55)-57296000

² Universidad Veracruzana, Departamento de Inteligencia Artificial, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n,
Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz.
emezura@uv.mx. Teléfono: (228) 817-2957

Resumen—En este trabajo se propone una estructura de control adaptable para el control de velocidad de un motor de corriente directa (C.D.) y para la compensación de las incertidumbres paramétricas no lineales en el sistema. Se plantea un problema de optimización dinámica y se usa la técnica de cómputo inteligente de evolución diferencial para estimar en línea los parámetros del controlador y así permitir una eficiente estrategia de control adaptable para el motor. Se analizan los resultados obtenidos con este enfoque y se comparan con los resultados obtenidos con un controlador PID, mostrando las ventajas y desventajas del presente enfoque bajo incertidumbres paramétricas.

Palabras clave: Evolución diferencial, Optimización dinámica, Motor de CD, Dinámica inversa.

I. INTRODUCCIÓN

Los motores de corriente directa (C.D.) son ampliamente usados en una variedad de aplicaciones industriales, como por ejemplo en manipuladores robóticos, donde un amplio rango de movimientos son requeridos para seguir una pre-determinada trayectoria de posición o velocidad bajo carga variable. Generalmente se modela al motor de C.D. como un sistema lineal y se diseñan estrategias de control lineal para ejecutar diversas tareas. Sin embargo, la mayoría de los controladores lineales no presentan una buena respuesta en el seguimiento y regulación cuando el sistema presenta incertidumbres paramétricas constantes o variantes en el tiempo, como por ejemplo la carga a manejar por un sistema (robot), superficies rugosas a pulir, valores de parámetros que cambian con la temperatura, cambios en la masa del sistema (vehículos), amplio rango de operación, etc. En un amplio sentido, las incertidumbres paramétricas se pueden agrupar en *i*) inexactitudes en el modelo (no se consideran algunas dinámicas no lineales) y *ii*) desconocimiento de los parámetros físicos del sistema.

Las incertidumbres paramétricas no pueden ser compensadas por controladores lineales de tal manera que su desempeño no será apropiado para ciertas aplicaciones. Se han realizado investigaciones para compensar las incertidumbres paramétricas en los controladores PID, como en (Hsu y Lee, 2011) se ha sintonizado en línea las ganancias

del controlador lineal PID con el propósito de mejorar la respuesta en el seguimiento de una trayectoria senoidal. Se utiliza el método de gradiente descendente para la sintonización y se diseña un compensador difuso para eliminar los errores de aproximación del error.

Esquemas de control robusto y adaptable (Slotine, 1991), (Astrom y Wittenmark, 1994), (Khalil, 2001), (Isidori, 1995), (Ortega y Spong, 1989), (Craig, 1987) se han estudiado ampliamente desde hace algunas décadas atrás con el propósito de mejorar el desempeño del controlador, ante incertidumbres paramétricas. Para controlar sistemas dinámicos con incertidumbres paramétricas se utiliza frecuentemente técnicas de control adaptable (Astrom y Wittenmark, 1994). La idea básica en el control adaptable es estimar en línea los parámetros no conocidos del sistema basado en la medición de la señal del sistema y usar los parámetros estimados en el cálculo del controlador. Un controlador ideal requiere del conocimiento preciso del modelo dinámico del sistema y sus parámetros para lograr un buen desempeño (Slotine, 1991). Un sistema de control adaptable puede ser considerado como un sistema de control con estimación de parámetros del sistema en línea del sistema a controlar.

Por otra parte, recientemente, la computación evolutiva tal como algoritmos evolutivos o algoritmos de inteligencia colectiva han estado solucionando problemas del mundo real en el área de control automático. En (Willjuice y Baskar, 2009) se ha incorporado algoritmos evolutivos para sintonizar fuera de línea los parámetros de un controlador PID en una planta de columna de destilación. En (Hong y Li, 2011) se propone un control de búsqueda de extremo basado en el algoritmo de optimización de cúmulo de partículas. En (Villarreal et al., 2013) se establece formalmente el enfoque de diseño integrado robusto para sistemas mecatrónicos. El caso de estudio al que se le aplicó este enfoque es a un robot de 5 eslabones planar con un controlador PID. Se considera encontrar la estructura mecánica y las ganancias del sistema de control de tal manera que el diseño resultante sea tan insensible como sea posible a incertidumbres en la carga que soporta el efector

final. Se utiliza el algoritmo de evolución diferencial para resolver el problema. En (Mohideen et al., 2013) se diseña un controlador adaptable por modelo de referencia y se modifica con el propósito de lograr un buen desempeño en el error de estado estacionario y en los transitorios, para un proceso de tanques. Esta modificación se basa en la utilización de un algoritmo genético con codificación real para sintonizar fuera de línea los parámetros del controlador. En (Ozturk y Celik, 2012) se presenta un controlador difuso basado en un algoritmo genético para el control de velocidad de un motor síncrono de imán permanente. Se parametriza la base del conocimiento del controlador difuso y se optimiza con base en un algoritmo genético, lo cual origina que no se requiera el conocimiento del experto para su sintonización.

Es así que en el presente trabajo se propone un esquema de control adaptable de un motor de C.D. en donde los parámetros del controlador se estimán con el algoritmo de evolución diferencial. Se establece un problema de optimización dinámica multiobjetivo para encontrar los parámetros del controlador en línea, en donde el comportamiento del error de posición, velocidad y corriente entre el sistema real y el aproximado sea el mínimo, sujeto a límites en el par de la señal de control y a la dinámica de los sistemas (real y estimado). El problema de optimización dinámica se resuelve mediante un algoritmo de evolución diferencial. Resultados en simulación muestran que el controlador adaptable basado en evolución diferencial muestra un buen desempeño bajo cargas estáticas e incertidumbres dinámicas en los parámetros del motor comparado con un controlador PID.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se muestra el modelo dinámico del motor de C.D. así como su esquema de control. El establecimiento formal del problema de optimización dinámica se desarrolla en la sección 3. En la sección 4 se menciona el algoritmo de evolución diferencial así como el esquema general del control adaptable basado en evolución diferencial. Los resultados en simulación se muestran en la sección 5, así como la discusión de los mismos. Finalmente en la sección 6 se dan las conclusiones pertinentes y trabajo futuro.

II. MODELO DINÁMICO Y SISTEMA DE CONTROL

El diagrama esquemático del motor de C.D. se muestra en Fig. 1, donde L_a es la inductancia de armadura, k_m es la constante de par, k_e es la constante de la fuerza contraelectromotriz, R_a es la resistencia de armadura, b_o es el coeficiente de fricción viscosa referido a la flecha, J_o es la inercia del motor referida a la flecha del motor, V_{in} es el voltaje de entrada de armadura, i_a es la corriente de armadura, τ_L es el par de carga, y q_m , \dot{q}_m , \ddot{q}_m son las posiciones, velocidades y aceleraciones angulares del rotor, respectivamente.

El modelo dinámico del motor de C.D. (Krishnan, 2001) se expresa en (1)-(2),

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_e \dot{q}_m = V_{in} \quad (1)$$

$$J_o \frac{d\dot{q}_m}{dt} + b_o \dot{q}_m + \tau_L = k_m i_a \quad (2)$$

Sea el estado $x = [q_m \ \dot{q}_m \ i_a]^T$ y la entrada $u = V_{in}$, el modelo dinámico del motor de C.D. en variables de estado, se expresa como $\dot{x} = f(x(t), u(t))$ en (3).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_o}{J_o} & \frac{k_m}{J_o} \\ 0 & -\frac{k_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\tau_L}{J_o} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} u \quad (3)$$

Considere el cambio de coordenadas $\tilde{x}_1 = x_2$, $\tilde{x}_2 = \frac{k_m x_3 - b_o x_2 - \tau_L}{J_o}$ y $\tilde{u} = V_{in}$, el sistema (3) se puede representar como en (4)-(5).

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 \quad (4)$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = \frac{k_m}{J_o L_a} \tilde{u} + \frac{b_o}{J_o^2} \tau_L + \tilde{x}_1 \left(\frac{b_o^2}{J_o^2} - \frac{k_m k_e}{J_o L_a} \right) - x_3 \left(\frac{k_m R_a}{J_o L_a} + \frac{b_o k_m}{J_o^2} \right) \quad (5)$$

Se propone el controlador mostrado en (6), donde $v = \ddot{w}_r + k_p e + k_d \dot{e}$, $e = w_r - \tilde{x}_1$, $\dot{e} = \dot{w}_r - \tilde{x}_2$. w_r , y \dot{w}_r es la velocidad y aceleración deseada.

$$\tilde{u} = \frac{J_o L_a}{k_m} \left(v + \frac{b_o}{J_o} \left(\frac{k_m}{J_o} x_3 - \frac{b_o}{J_o} x_2 - \frac{\tau_L}{J_o} \right) \right) + k_e x_2 + R_a x_3 \quad (6)$$

Defínase el cambio de coordenadas $z = [z_1 \ z_2]^T = [e \ \dot{e}]^T$ y la señal de control (6), el sistema en lazo cerrado (7) en las coordenadas z presenta un único punto de equilibrio en $z = \mathbf{0} \in R^2$.

$$\dot{z} = Az \quad (7)$$

$$\text{donde } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -k_d \end{bmatrix}.$$

Considere la función candidata de Lyapunov mostrada en (8).

$$V(z) = \frac{1}{2} z^T P z \quad (8)$$

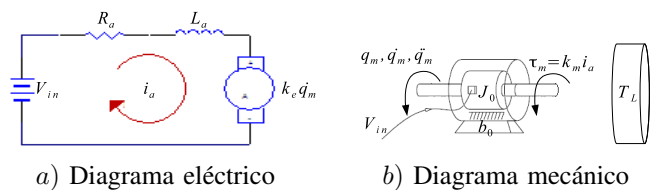


Figura 1. Diagrama esquemático del motor.

La derivada con respecto al tiempo de $V(z)$ es dado por (9), donde $A^T P + PA = -Q$.

$$\dot{V} = -z^T Q z \quad (9)$$

Considerando $k_p \in R$ y $k_d \in R$ ganancias positivas y usando el teorema generalizado de Krasovskii (Khalil, 2001), se puede obtener dos matrices simétricas definidas positivas $P \in R^{2 \times 2}$ y $Q \in R^{2 \times 2}$, de tal manera que $\forall z \neq \mathbf{0}$ la matriz $F(z) = A^T P + PA + Q$ es definida negativa de tal manera que $V(z) \rightarrow \infty$, cuando $\|z\| \rightarrow \infty$. Por lo tanto, la función $V(z)$ es una función de Lyapunov y el punto de equilibrio $z = \mathbf{0}$ del sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable, por lo que $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$. De la transformada de Laplace del sistema en lazo cerrado $s^2 + k_d s + k_p = 0$, se observa que para sintonizar las ganancias del sistema de control se debe considerar $k_d = 2\xi w_n$, $k_p = w_n^2$ donde $\xi \in (0, 1]$ es el factor de amortiguamiento y $w_n > 0$ es la frecuencia natural del sistema.

En aplicaciones prácticas, los parámetros del motor de C.D. pueden ser desconocidos o pueden ser perturbados por factores externos, por lo que el controlador ideal mostrado en (6) no se puede obtener con precisión. Es así que existe, por ejemplo el enfoque de control adaptable (Spong y Vidyasagar, 2004), (Kelly y Santibañez, 2003) en donde se cumple el análisis de estabilidad anteriormente mostrado, con la diferencia que se estiman los parámetros del sistema en línea de tal manera que los errores de estimación permanece acotado y se cumple que el sistema en lazo cerrado sea asintóticamente estable. Estrategias de control adaptable basado en los enfoques anteriormente mencionados quedan fuera del alcance del artículo y lo que se propone es estimar los parámetros del motor de C.D. por medio del establecimiento de un problema de optimización dinámica y cuya solución se realiza con el uso de un algoritmo de evolución diferencial.

III. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DINÁMICA

En la Fig. 2 se muestra el esquema en lazo cerrado del sistema de control adaptable basado en evolución diferencial (CAED), en donde $p = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6]^T = \begin{bmatrix} b_0/J_0 & k_m/J_0 & k_e/L_a & R_a/L_a & 1/L_a & \tau_L/J_0 \end{bmatrix}^T \in R^6$ y $\bar{p} = [\bar{p}_1 \ \bar{p}_2 \ \bar{p}_3 \ \bar{p}_4 \ \bar{p}_5 \ \bar{p}_6]^T = \begin{bmatrix} \bar{b}_0/J_0 & \bar{k}_m/J_0 & \bar{k}_e/L_a & \bar{R}_a/L_a & 1/L_a & \bar{\tau}_L/J_0 \end{bmatrix}^T \in R^6$ son los vectores de parámetros reales y de parámetros estimados del motor de C.D., respectivamente. Los vectores de estado del sistema real y el sistema estimado están nombrados como $x \in R^3$ y $\bar{x} \in R^3$, respectivamente. El vector de control es dado por $u = \tilde{u} \in R$.

El problema de optimización dinámica multiobjetivo consiste en encontrar el vector de parámetros óptimos estimados \bar{p}^* de un motor de C.D. tal que minimice el vector (10) de error de posición angular, de velocidad angular

y de corriente de armadura entre el sistema real \dot{x} y del sistema estimado $\dot{\bar{x}}$ sujeto a las restricción propia de la dinámica del sistema real (11) y del sistema estimado (12), a las condiciones iniciales de estado (13) y a los límites en la señal de control u (14) con el propósito de proporcionar los parámetros estimados \bar{p} para el sistema de control u y a su vez presentar un buen desempeño. Sea $\Omega = \{\lambda \in R \mid \lambda \in [t_1, t_n], t_1 = t_n - \Delta w\}$, donde $t_n \in R$ es el tiempo actual, $\Delta w \in R$ es el intervalo de tiempo hacia atrás que se considera para evaluar el sistema en el problema de optimización. Así, el problema de programación matemática se formula en (10)-(14), donde $u(t_n) = f(x(t_n), \bar{p}) = \frac{\ddot{w}_r + k_p e + k_d \dot{e} + \bar{p}_1 \bar{p}_2 x_3(t_n) - \bar{p}_1^2 x_2(t_n) + \bar{p}_1 \bar{p}_6}{\bar{p}_2 \bar{p}_5} + \frac{\bar{p}_3 x_2(t_n)}{\bar{p}_5} + \frac{\bar{p}_4 x_3(t_n)}{\bar{p}_5}$ es una función suave.

$$\text{Min}_{\bar{p}} \begin{bmatrix} \int_{t \in \Omega} (x_1(t) - \bar{x}_1(t))^2 dt \\ \int_{t \in \Omega} (x_2(t) - \bar{x}_2(t))^2 dt \\ \int_{t \in \Omega} (x_3(t) - \bar{x}_3(t))^2 dt \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sujeto a:

a) Sistema dinámico real:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), p) \Big|_{t \in \Omega} \quad (11)$$

b) Sistema dinámico estimado:

$$\dot{\bar{x}}(t) = f(\bar{x}(t), u(t), \bar{p}) \Big|_{t \in \Omega} \quad (12)$$

c) Condiciones iniciales de estados:

$$\bar{x}(t_1) = x(t_1), \quad x(0) = x_0 \quad (13)$$

d) Límites en la señal de control actual:

$$u_{MIN} \leq u(t_n) \leq u_{MAX} \quad (14)$$

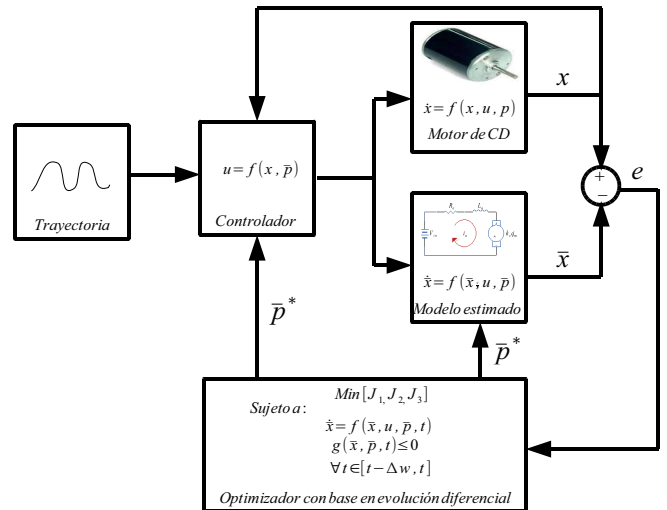


Figura 2. Estrategia de CAED.

IV. ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

El problema de optimización dinámica se resuelve con el uso del algoritmo de evolución diferencial ED/RAND/1/BIN (Price, et al., 2005). Este algoritmo consiste en generar aleatoriamente NP individuos $x_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, \dots, x_{j,i,G}, \dots, x_{D,i,G}]^T \in R^D$, $G = 1, 2, \dots, GenMax \forall i = 1, 2, \dots, NP$ llamados padres. El conjunto de individuos $x_{i,G} \forall i = 1, 2, \dots, NP$ se le llama población de padres. Cada individuo $x_{i,G}$ contiene la información de las D variables de diseño cuyos límites son establecidos como $[x_j^{\min}, x_j^{\max}] \forall j = 1, 2, \dots, D$. La población de padres inicial se genera aleatoriamente como sigue: $x_{j,i,G=0} = x_j^{\min} + rand_j(0, 1)(x_j^{\max} - x_j^{\min})$, donde $rand_j$ es un número aleatorio distribuido uniformemente en el intervalo $[0, 1]$. En cada generación G , la población de padres se mutan y cruza para generar otra población llamada población de hijos $u_{i,G} = [u_{1,i,G}, u_{2,i,G}, \dots, u_{j,i,G}, \dots, u_{D,i,G}]^T \forall i = 1, 2, \dots, NP$. Es así, que los hijos se generan de la selección aleatoria de un vector base $x_{j,D}^{r_1}$ y un vector de diferencia $x_{j,D}^{r_2} - x_{j,D}^{r_3}$ con un factor de escala F , considerando $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ y el proceso de cruza uniforme (binomial). Se propone un mecanismo para elegir entre el padre y el hijo al individuo que pasa a la siguiente generación con base en dominancia de Pareto (Coello et al., 2007) y el uso del manejo de restricciones de Deb (Deb, 2000). El mecanismo de selección (MS) se puede establecer de la siguiente manera:

Una solución i pasa a la siguiente generación sobre una solución j , si cualquiera de las siguientes condiciones se cumplen:

- Las soluciones i y j son factibles y la solución i domina a la solución j .
- La solución i es factible y la solución j no lo es.
- Las soluciones i y j son no factibles, pero la solución i tiene un menor número de restricciones violadas.

El pseudocódigo del algoritmo ED/RAND/1/BIN se muestra en la Fig. 3.

V. RESULTADOS

Para realizar el proceso de optimización con base en el algoritmo de ED/RAND/1/BIN se escoge un número de individuos de la población $NP = 20$, el número máximo de generaciones $GenMax = 600$, el factor de escala se selecciona aleatoriamente en el intervalo $F \in [0.3, 0.6]$ por cada generación, el factor de cruza CR se propone aleatoriamente en el intervalo $CR \in [0.3, 0.6]$ por cada vez que entra el proceso de optimización y se escoge el intervalo de tiempo hacia atrás $\Delta w = 50ms$. Los resultados de simulación fueron realizados en una computadora personal Intel Core i7 2GHz con 6GB de RAM.

Se utiliza el método de Euler para resolver la ecuación diferencial dada por la dinámica del sistema real y el sistema estimado, con la condición inicial $x(0) = \bar{x}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$, el paso de integración $\Delta t = 5 \times 10^{-3}s$ y el tiempo final $t_f = 3s$. Se escoge los siguientes parámetros

```

1  BEGIN
2  G = 0
3  Crear una población aleatoria  $\bar{x}_{i,G} \forall i = 1, \dots, NP$ 
4  Evaluar  $J(\bar{x}_{i,G}), g(\bar{x}_{i,G}), \forall i = 1, \dots, NP$ 
5  Do
6  For  $i = 1$  to  $NP$  Do
7  Seleccionar aleatoriamente  $\{r_1 \neq r_2 \neq r_3\} \in \bar{x}_G$ .
8   $j_{rand} = \text{randint}(1, D)$ 
9  For  $j = 1$  to  $D$  Do
10  Proceso de mutación y cruza
11  End For
12  Evaluar  $J(\bar{u}_{i,G+1}), g(\bar{u}_{i,G+1})$ 
13  If  $\bar{u}_{i,G+1}$  es mejor que  $\bar{x}_{i,G}$  (Basado en el MS) Then
14   $\bar{x}_{i,G+1} = \bar{u}_{i,G+1}$ 
15  Else
16   $\bar{x}_{i,G+1} = x_{i,G}$ 
17  End
18  G = G + 1
19  While (G ≤ GMax)
20  END

```

Figura 3. Pseudocódigo del algoritmo DE/RAND/1/BIN.

para el motor (sistema real): $L_a = 102.44 \times 10^{-3}H$, $R_a = 9.665\Omega$, $k_m = 0.3946Nm$, $k_e = 0.4133V/rads$, $b_0 = 05.85 \times 10^{-4}Nm s^2$, $J_0 = 3.45 \times 10^{-4}Nm s^2$ y el par de carga $T_L = 0.05$ para $t \in [1, 2]$ de otra forma $T_L = 0$. Se propone las siguientes ganancias del controlador $k_p = 2500$, $k_d = 100$.

Se propone para el problema de regulación la referencia $w_r = 52.35rad/s$ y para el problema de seguimiento la trayectoria mostrada en (15)-(17).

$$w_r = 52.35 \sin(6.28t)rad/s \quad (15)$$

$$\dot{w}_r = 328.75 \cos(6.28t)rad/s^2 \quad (16)$$

$$\ddot{w}_r = -2064.55 \sin(6.28t)rad/s^3 \quad (17)$$

Con el propósito de evaluar el desempeño del control adaptable con base en evolución diferencial (CAED), los resultados obtenidos se comparan con un controlador PI con ganancias constantes ($\bar{k}_p = 0.03$, $\bar{k}_i = 7.5$).

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de la señal de velocidad angular del motor así como la señal de control aplicada para el problema de regulación (Fig. 4a y Fig. 4b) y para el problema de seguimiento (Fig. 4c y Fig. 4d), considerando que el par de carga T_L cambia al valor constante $T_L = 0.05$ en el intervalo de tiempo $t \in [1, 2]$. Se observa un mejor seguimiento de la referencia y trayectoria deseada en el caso del enfoque CAED. Por otro lado, en las Fig. 4e - Fig. 4h se muestran los resultados cuando los parámetros del motor cambian dinámicamente un 10% de su valor nominal. El cambio de los parámetros del motor de CD está dado por: $J_0 = 3.45 \times 10^{-4} + 3.45 \times 10^{-5} \sin(2.09t)Nm s^2$, $k_m = 0.3946 + \sin(6.28t)Nm$, $b_0 = 5.85 \times 10^{-4} + \sin(3.14t)Nm s^2$, $R_a = 9.66 + \sin(2.09t)\Omega$, $k_e = 0.4133 + \sin(6.28t)V/rads$, $L_a = 102.44 \times 10^{-3} + \sin(3.14t)H$. Finalmente en la Fig. 4i - 4l se presentan los resultados cuando se le suma una señal aleatoria a la señal de salida del sistema x . La señal aleatoria presenta valores pico-pico

TABLA I

TABLA COMPARATIVA ENTRE EL CONTROLADOR PID Y EL CAED.

	$\ e\ $ (rad/s)		$\ u\ $ (Volts)	
	PID	CAED	PID	CAED
P. Reg.	149.55	103.31	553.66	557.4
P. Seg.	312.06	109.61	379.14	395.94
P. Reg. con Parámetros Din.	153.01	104.09	554.8	558.79
P. Seg. con Parámetros Din.	313.92	107.69	380.65	397.39
P. Reg. con ruido en la señal y Parámetros Din.	153.01	104.09	554.8	558.79
P. Seg. con ruido en la señal y Parámetros Din.	313.92	107.69	380.65	397.39

de ± 0.01 , ± 0.1 , ± 0.001 para x_1 , x_2 y x_3 , respectivamente. Además en esta simulación, los parámetros del motor de CD cambian dinámicamente un 10 % de su valor nominal, igual que en el caso anterior.

De la misma forma para estos resultados se observa un mejor seguimiento de la referencia y trayectoria deseada en el caso del enfoque CAED. Estos resultados se pueden verificar en forma numérica en la Tabla I en donde se muestra la magnitud del error ($\|e\|$) y la señal de control ($\|u\|$) generada en todo el tiempo para los dos casos (PID y CAED). Se puede verificar en dicha Tabla, que la magnitud del error de posición angular es menor y que se consume más energía para el caso del CAED.

El enfoque con el control adaptable basado en evolución diferencial supera al comportamiento del control PID. Considerando que se utiliza el algoritmo de ED en la solución del problema de optimización y no un algoritmo tipo gradiente, el CAED tiene la particularidad de tener una mayor probabilidad de converger a mejores soluciones, ante incertidumbres paramétricas debido a que no converge con facilidad a mínimos locales y se puede utilizar incluso con sistemas discontinuos. Sin embargo la desventaja principal en este momento es el tiempo computacional requerido por el algoritmo de evolución diferencial para resolver el problema de optimización dinámica, ya que se requiere en promedio de 3.99s en cada tiempo de integración Δt , lo cual en este momento no sería posible su implementación práctica. El tiempo computacional del algoritmo se podrá reducir por medio de tres vías, *i*) Utilizar una computadora con mayores prestaciones, *ii*) Implementar el algoritmo en sistemas embebidos de propósito específico o *iii*) Modificar y/o cambiar el algoritmo de ED para que encuentre de manera más eficiente y rápida la solución óptima de Pareto.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una estructura de control adaptable basado en evolución diferencial para el control de velocidad de un motor de CD, el cual compensa las incertidumbres paramétricas en el sistema. Se establece formalmente el problema de optimización dinámica para estimar los parámetros del controlador en línea que compensen las no linealidades presentes en el sistema. Resultados en simulación muestran que el CAED presenta un mejor desempeño en el error de posición comparado con el control

PID. Sin embargo la principal desventaja en este momento es el tiempo de cómputo empleado por el algoritmo de ED para encontrar soluciones.

Trabajo futuro es el comparar el CAED con técnicas de control adaptable y/o robusto. Además se requiere desde el punto de vista computacional, reducir el tiempo de cómputo requerido por el algoritmo de ED para encontrar soluciones óptimas de Pareto.

VII. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo de la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA) y a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional bajo el proyecto No. 20131053 y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con el proyecto 182298.

REFERENCIAS

- Astrom K. J. y Wittenmark B. (1994), *Adaptive Control*. Prentice Hall.
- Bhushan Bharat y Singh Madhusudan (2011), Adaptive control of DC motor using bacterial foraging algorithm, *Applied Soft Computing* **11**, 4913-4920.
- Coello Coello Carlos A., Lamont Gary B. y Van Veldhuizen David A. (2007), *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer.
- Craig J. (1987), *Adaptive control of mechanical manipulators*. Addison-Wesley Pub. Co.
- Deb K., An efficient constraint handling method for genetic algorithms (2000), *Computer methods in applied mechanics and engineering* **186**(2/4), 311-338.
- Hong Chen y Li Kong, Swarm intelligence-based extremum seeking control (2011), *Expert Systems with Applications* **38**, 14852-14860.
- Hsu Chun-Fei, Lee Bore-Kuen (2011), FPGA-based adaptive PID control of a DC motor driver via sliding-mode approach, *Expert Systems with Applications* **38**(9), 11866-11872.
- Isidori Alberto (1995), *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.
- Mohideen K. Asan, Saravanakumar G., Valarmathi K., Devaraj D., Radhakrishnan T.K. (2013), Real-coded Genetic Algorithm for system identification and tuning of a modified Model Reference Adaptive Controller for a hybrid tank system, *Applied Mathematical Modelling* **37**, 3829-3847.
- Kelly Rafael y Santibañez Victor (2003), *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson Educación.
- Khalil Hassan K. (2001), *Nonlinear Systems*, Prentice Hall.
- Krishnan R. (2001), *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control*, Prentice Hall.
- Ortega R. y Spong M. (1989), Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial, *Automatica*, **25**(6), 877-888.
- Ozturk Nihat, Celik Ozturk (2012), Speed control of permanent magnet synchronous motors using fuzzy controller based on genetic algorithms, *Electrical Power and Energy Systems* **43**, 889-898.
- Price Kenneth, Storn Rainer M. y Lampinen Jouni A. (2005), *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer.
- Slotine J. J. E (1991), *Applied nonlinear control*, Prentice Hall.
- Spong M. W. y Vidyasagar M. (2004), *Robot Dynamics and Control*. John Wiley & Sons.
- Villarreal-Cervantes Miguel G., Cruz-Villar Carlos A., Alvarez-Gallegos Jaime y Portilla-Flores Edgar A. (2013), Robust Structure-Control Design Approach for Mechatronic Systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **18**(5), 1592-1601.
- Wang Hanlei y Xie Yongchun (2009), Adaptive inverse dynamics control of robots with uncertain kinematics and dynamics, *Automatica* **45**, 2114-2119.
- Willjuice Iruthayarajan M. y Baskar S. (2009), Evolutionary algorithms based design of multivariable PID controller, *Expert Systems with Applications* **36**, 9159-9167.

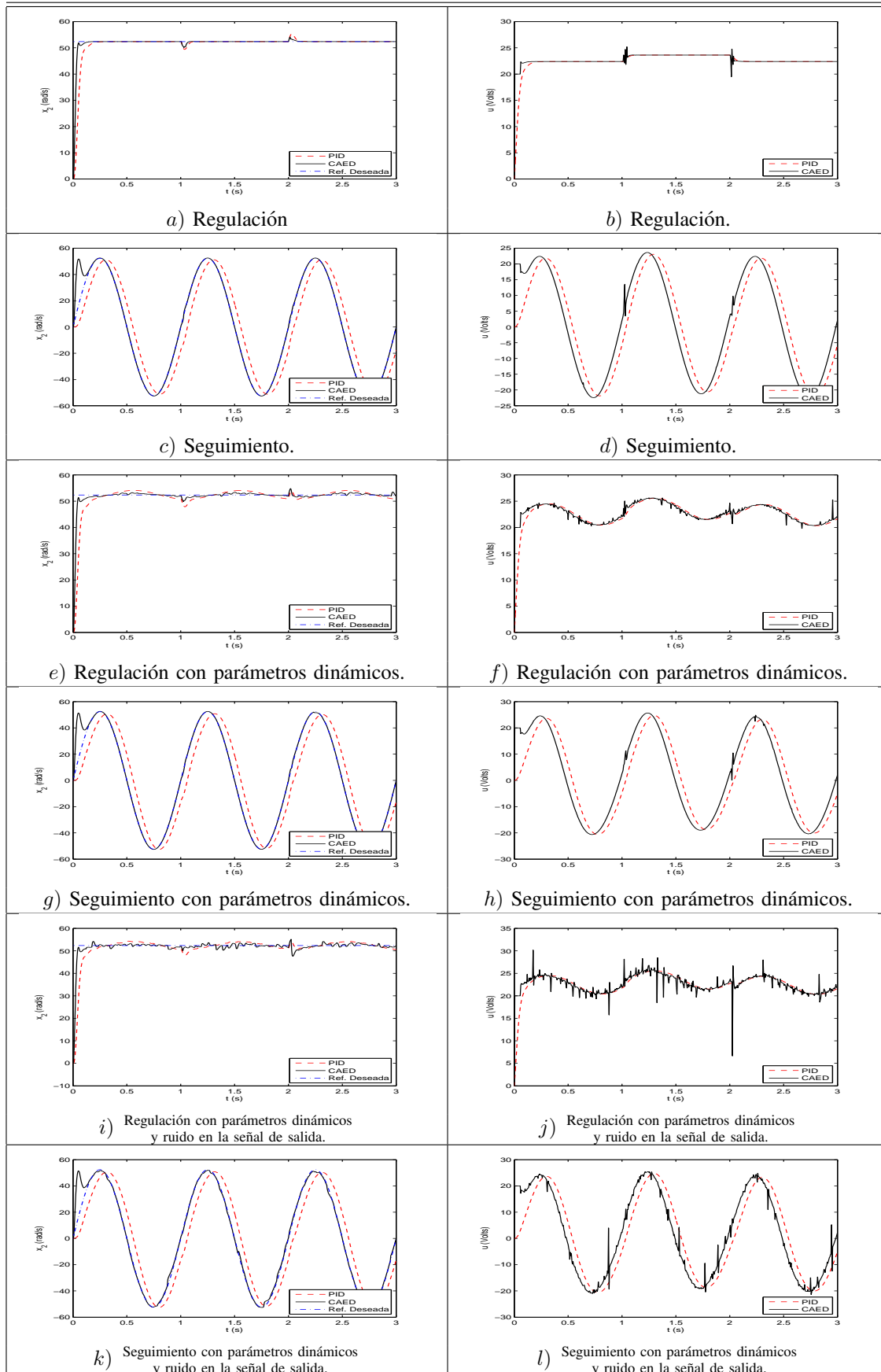


Figura 4. Comportamiento del sistema y de la señal de control, considerando $T_L = 0.05 \forall t \in [1, 2]$.