

Identificación y sintonización inteligentes para sistemas mecánicos con base en cómputo evolutivo

Alejandro Rodríguez-Molina*, Omar Serrano-Pérez†, Geovanni Flores-Caballero‡, Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes§, José David Álvarez-Piedras*, Miguel Ángel Paredes-Rueda*

* Tecnológico Nacional de México/IT de Tlalnepantla, Research and Postgraduate Division, Tlalnepantla de Baz 54070, México.

‡ Universidad Aeronáutica de Querétaro, Querétaro 76278, México.

† Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato, Guanajuato 36275, México.

§ Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Mechatronics Laboratory, Ciudad de México 07700, México.

Abstract—Los sistemas dinámicos y, dentro de estos, los mecánicos, están presentes en un sinnúmero de contextos de aplicación. El comportamiento de estos sistemas debe controlarse adecuadamente para que las aplicaciones actuales puedan explotarlos. Debido a la naturaleza no lineal de los sistemas mecánicos, su control es complicado. Aunque existen controladores altamente efectivos y utilizados en la industria para dichos sistemas, su rendimiento está condicionado a una adecuada sintonización de sus parámetros. Sin embargo, la tarea de sintonización de controladores requiere de un modelo preciso del sistema que en la práctica es difícil de obtener. Para atender los problemas anteriores de forma eficaz, en este trabajo se abordan las tareas de identificación del modelo de sistemas mecánicos y sintonización de controladores desde un enfoque de optimización inteligente con base en cómputo evolutivo. De esta forma, se describe un enfoque general para llevar a cabo estas dos tareas en la práctica para el caso de estudio de un mecanismo de cuatro barras. El enfoque mostró ser capaz de obtener un modelo del mecanismo de cuatro barras con parámetros semejantes a los nominales (con un máximo de 4% de error) y un control sintonizado para la tarea de seguimiento de trayectorias con alta efectividad.

Index Terms—Identificación inteligente, control inteligente, optimización fuera de línea, mecanismo de cuatro barras, evolución diferencial.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas dinámicos se utilizan en prácticamente cualquier contexto de aplicación. Muchos de estos sistemas son mecánicos y se utilizan para generar movimientos especializados. Para que las aplicaciones puedan explotar los movimientos que pueden generar estos mecanismos, es necesario que estos últimos se gobiernen adecuadamente a través de un controlador. Debido al comportamiento no lineal que tienen los mecanismos y, en general, cualquier sistema dinámico, el control es una tarea compleja. A pesar de esto, a lo largo del tiempo se han desarrollado controladores efectivos para manejar diferentes casos de operación en los sistemas dinámicos, muchos de ellos ampliamente utilizados en la industria [1].

Para que un controlador, sin importar su tipo, pueda gobernar el comportamiento de un sistema, es necesario ajustar adecuadamente los parámetros que posee. Esta tarea se conoce como sintonización de controladores y es complicada debido a la cantidad inconmensurable de alternativas que existen para

dichos parámetros [2]. De esta forma, cada alternativa produce un comportamiento diferente en el sistema. Algunos de estos comportamientos pueden ser no deseados y pueden resultar en daños en el sistema o en su entorno de operación. Por esto, la sintonización de controladores se lleva a cabo a partir de un modelo preciso del sistema. El modelo se utiliza para predecir el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones y acciones de control. Un modelo preciso es difícil de obtener en la práctica [3]. A la tarea de obtener el modelo de un sistema se le conoce como identificación. La identificación consta de cuatro etapas. En la primera se obtienen pares de entradas y salidas del sistema real tras excitarlo con un control en lazo abierto. Posteriormente, se selecciona una estructura de modelo. Las estructuras utilizadas comúnmente son lineales [4], no lineales [5], obtenidas tras un análisis de mecánica clásica [6], o adoptan modelos computacionales sofisticados como las redes neuronales [7]. Una vez definido el modelo, sus parámetros se determinan con un método de estimación que puede ser clásico o aproximado [8], [9]. Finalmente, la estructura de modelo ajustada se evalúa para determinar si es adecuada para el propósito de la aplicación.

Una vez que se obtiene un modelo adecuado del sistema, puede utilizarse para realizar tareas como la sintonización de controladores. En este sentido, la sintonización de controladores consiste en probar distintas configuraciones de un controlador sobre el modelo identificado hasta encontrar la que produce un mejor rendimiento (e.g., en términos de precisión al realizar una tarea, bajo consumo energético, o características deseables de la salida del sistema) [10].

Muchos de los trabajos en la literatura especializada realizan la identificación de sistemas dinámicos complejos pero no abordan el despliegue del modelo obtenido en tareas prácticas como la sintonización de controladores [11]. Análogamente, otras investigaciones se enfocan a la sintonización de controladores, pero asumen que el modelo se conoce *a priori* [12].

Este trabajo describe un enfoque de optimización inteligente con base en cómputo evolutivo para las tareas de identificación y control de sistemas mecánicos. El enfoque se introduce a partir del caso de estudio de un mecanismo de cuatro barras.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección II describe los problemas de identificación y

sintonización de controladores para el mecanismo de cuatro barras. La Sección III muestra el enfoque de solución inteligente basado en cómputo evolutivo. Los experimentos y resultados se discuten en la Sección IV. Por último, la Sección V presenta las conclusiones.

II. LOS PROBLEMAS DE IDENTIFICACIÓN Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

En términos generales, la identificación busca los parámetros de una estructura de modelo que permita generalizar el comportamiento de un sistema en términos de sus entradas y salidas, i.e., minimizar las diferencias entre la salida del modelo y la salida del sistema real cuando ambos tienen las mismas entradas. Asimismo, la sintonización busca los parámetros de un controlador que incrementan el rendimiento de un sistema en la realización de una tarea particular, e.g., minimizando las diferencias entre la salida deseada y la salida del sistema al utilizar las señales producidas por el controlador.

Con base en lo anterior ambos problemas pueden establecerse formalmente y de forma general como sigue:

$$\min J(p) \quad (1)$$

sujeto a:

$$g_i(p) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n_g \quad (2)$$

$$h_j(p) = 0, j = 1, 2, \dots, n_h \quad (3)$$

En el problema anterior se busca el vector de variables de diseño p que minimiza el valor de la función objetivo J en (1) y satisface las restricciones de igualdad y desigualdad en (3) y (2), respectivamente.

A. El problema de identificación

El caso de estudio que se aborda en este trabajo se enfoca en el mecanismo de cuatro barras en configuración manivela-biela-balancín de la Fig. 1. Este mecanismo es de un solo grado de libertad y cuenta con cuatro eslabones rígidos acoplados que forman un bucle o cadena cinemática cerrada. Lo anterior implica que el movimiento de uno de los eslabones repercute en el resto. Los mecanismos de este tipo son utilizados comúnmente en aplicaciones industriales debido a su elevada precisión y fuerza en comparación con los mecanismos de cadena cinemática abierta [13]. En el sistema de la Fig. 1, las variables q_i , l_i , l_{c_i} , m_i , m_{c_i} , e I_i , son respectivamente la posición angular medida desde la horizontal, la longitud, la longitud al centro de masa, la masa, la posición del centro de masa y la inercia del i -ésimo eslabón en el mecanismo. La configuración del sistema se puede determinar a partir de la coordenada generalizada q_2 que corresponde a la posición angular de la manivela.

Como se mencionó con anterioridad, la identificación de sistemas requiere, en primera instancia, de pares de entradas y salidas reales del sistema. Para esto se debe utilizar un control en lazo abierto que excite, durante un periodo de tiempo t_{fi} , la mayor variedad posible de comportamientos en el sistema y la información de entradas y salidas debe

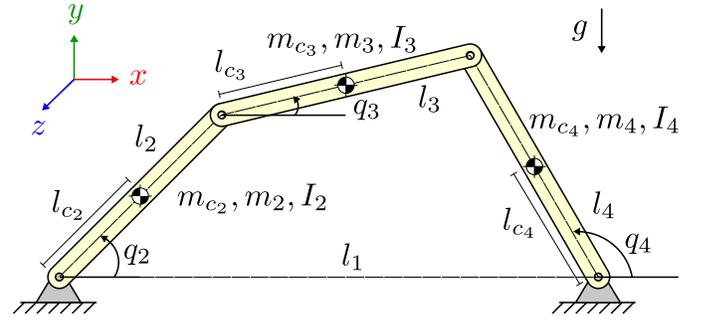


Fig. 1. El mecanismo de cuatro barras.

adquirirse periódicamente, e.g., en intervalos fijos de tiempo dt . En este sentido, la información que mejor describe el comportamiento de un sistema dinámico en cualquier instante de tiempo es el estado. El estado de un sistema dinámico comúnmente incluye a sus coordenadas generalizadas y a sus primeras derivadas temporales. Para el mecanismo de cuatro barras el estado puede elegirse como:

$$z = [q_2, \dot{q}_2]^T \quad (4)$$

Entonces, la información de entrada y salida que debe adquirirse desde el sistema real puede incluir los valores de $z(t)$ y de la entrada de control $u(t)$ para $t \in [0, t_{fi}]$.

Posteriormente, la identificación de sistemas requiere de la selección de una estructura de modelo. Entre las estructuras de modelo disponibles, aquellas derivadas de un análisis de mecánica clásica pueden ser más fieles al comportamiento del sistema, aunque pueden llegar a ser altamente no-lineales y difíciles de ajustar. En el presente trabajo, se adopta una estructura de este tipo, y es derivada de un análisis de Euler-Lagrange [14]. Entonces, el modelo del mecanismo de la Fig. 1 en espacio de estado es:

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{q}_2 \\ \frac{u - (2J_2 S_1 D_{S_1} + 2J_3 S_2 D_{S_2} + P_1 S_1 D_{C_1} + P_1 C_1 D_{S_1}) \dot{q}_2^2 + D_{G_1}}{2(J_1 + J_2 S_1^2 + J_3 S_2^2 + P_1 C_1 S_1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde:

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{1}{2} (m_2 \hat{l}_{c_2}^2 + \hat{I}_2 + m_3 l_2^2) \\ J_2 &= \frac{1}{2} (m_3 \hat{l}_{c_3}^2 + \hat{I}_3) \\ J_3 &= \frac{1}{2} (m_4 \hat{l}_{c_4}^2 + \hat{I}_4) \\ P_1 &= m_3 l_2 \hat{l}_{c_3} \\ C_1 &= \cos(\hat{q}_2 - \hat{q}_3) \\ G_1 &= -m_2 g \hat{l}_{c_2} \sin(\hat{q}_2) - m_3 g (l_2 \sin(\hat{q}_2) \\ &\quad + \hat{l}_{c_3} \sin(\hat{q}_3)) - m_4 g \hat{l}_{c_4} \sin(\hat{q}_4) \\ D_{S_1} &= \frac{\partial S_1}{\partial \hat{q}_2} + \frac{\partial S_1}{\partial \hat{q}_3} S_1 + \frac{\partial S_1}{\partial \hat{q}_4} S_2 \\ D_{S_2} &= \frac{\partial S_2}{\partial \hat{q}_2} + \frac{\partial S_2}{\partial \hat{q}_3} S_1 + \frac{\partial S_2}{\partial \hat{q}_4} S_2 \\ D_{C_1} &= \frac{\partial C_1}{\partial \hat{q}_2} + \frac{\partial C_1}{\partial \hat{q}_3} S_1 \\ D_{G_1} &= \frac{\partial G_1}{\partial \hat{q}_2} + \frac{\partial G_1}{\partial \hat{q}_3} S_1 + \frac{\partial G_1}{\partial \hat{q}_4} S_2 \end{aligned} \quad (6)$$

con las derivadas:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial S_1}{\partial \hat{q}_2} &= -\frac{l_2 \cos(\hat{q}_2 - \hat{q}_4)}{l_3 \sin(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)} \\
 \frac{\partial S_1}{\partial \hat{q}_3} &= \frac{l_2 \sin(\hat{q}_2 - \hat{q}_4) \cos(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)}{l_3 \sin^2(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)} \\
 \frac{\partial S_1}{\partial \hat{q}_4} &= -\frac{l_2 \sin(\hat{q}_2 - \hat{q}_4)}{l_3 \sin^2(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)} \\
 \frac{\partial S_2}{\partial \hat{q}_2} &= -\frac{l_2 \cos(\hat{q}_2 - \hat{q}_3)}{l_4 \sin(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)} \\
 \frac{\partial S_2}{\partial \hat{q}_3} &= \frac{l_2 \sin(\hat{q}_2 - \hat{q}_4)}{l_4 \sin^2(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)} \\
 \frac{\partial S_2}{\partial \hat{q}_4} &= -\frac{l_2 \sin(\hat{q}_2 - \hat{q}_3) \cos(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)}{l_4 \sin^2(\hat{q}_3 - \hat{q}_4)} \\
 \frac{\partial C_1}{\partial \hat{q}_2} &= -\sin(\hat{q}_2 - \hat{q}_3) \\
 \frac{\partial C_1}{\partial \hat{q}_3} &= \sin(\hat{q}_2 - \hat{q}_3) \\
 \frac{\partial G_1}{\partial \hat{q}_2} &= -m_1 g \hat{l}_{c_2} \cos(\hat{q}_2) - m_2 g l_2 \cos \hat{q}_2 \\
 \frac{\partial G_1}{\partial \hat{q}_3} &= -m_2 g \hat{l}_{c_3} \cos(\hat{q}_3) \\
 \frac{\partial G_1}{\partial \hat{q}_4} &= -m_3 g \hat{l}_{c_4} \cos(\hat{q}_4)
 \end{aligned} \tag{7}$$

y con u como la señal de control.

El modelo en (5) tiene una serie de parámetros que deben ajustarse, los cuales, están representados con gorro. Los parámetros ajustables se eligen como aquellos que son difíciles de medir o calcular en la práctica, o aquellos en los que las mediciones pueden presentar diferencias con la realidad en el ensamble del mecanismo. En este sentido, es menos útil ajustar parámetros que pueden medirse con instrumentos convencionales, e.g., la longitud y la masa de las barras, o cuyo valor es conocido universalmente, e.g., la aceleración de la gravedad.

Con base en lo anterior el problema de identificación del mecanismo de cuatro barras se puede establecer como:

$$\min J_i(p_i) = \int_{t=dt}^{t_{f1}} (z(t) - \hat{z}(t))^T (z(t) - \hat{z}(t)) dt \tag{8}$$

con:

$$p_i = [\hat{l}_{c_2}, \hat{l}_{c_3}, \hat{l}_{c_4}, \hat{l}_2, \hat{l}_3, \hat{l}_4]^T \tag{9}$$

donde $\hat{z}(t) = [\hat{q}_2, \dot{\hat{q}}_2]^T$ es la solución al problema de valor inicial asociado a la ecuación diferencial en (5) con los parámetros dinámicos en p_i y la entrada de control $u(t)$, sujeta a la condición inicial $\hat{z}_0 = z(t - dt)$, i.e., es la respuesta que genera el modelo del mecanismo de cuatro barras cuando se considera la misma configuración inicial del sistema real y se le inyecta la misma señal de control.

Entonces, la solución al problema en (8)-(9) incluye a los parámetros dinámicos del modelo que generaliza de mejor manera el comportamiento del mecanismo de cuatro barras real.

B. El problema de sintonización de controladores

Para establecer este problema, primero se debe definir la tarea que debe realizar el sistema. Para el mecanismo de cuatro barras, dicha tarea puede establecerse en términos de los estados que debe tener este sistema en cada instante de tiempo:

$$\bar{z} = [\bar{q}_2, \dot{\bar{q}}_2]^T \tag{10}$$

Posteriormente, es necesario seleccionar una estructura de control adecuada para realizar la tarea anterior. Entre

las múltiples opciones, el controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) resalta por su simplicidad, alto rendimiento y uso extendido en aplicaciones industriales, por lo que se adopta en el caso de estudio del mecanismo de cuatro barras. La ecuación del controlador PID se muestra en (11), en donde k_p , k_i y k_d son respectivamente las ganancias proporcional, integral y derivativa, y $e(t)$ es el error en la realización de la tarea predeterminada. Si se utiliza el modelo del mecanismo de cuatro barras en (5), el error puede expresarse como $e(t) = \bar{q}_2 - \hat{q}_2$, y $\dot{e}(t) = \dot{\bar{q}}_2 - \dot{\hat{q}}_2$.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \dot{e} \tag{11}$$

Entonces, el problema de sintonización del controlador PID para el mecanismo de cuatro barras queda como:

$$\min J_s(p_s) = \int_{t=0}^{t_{fs}} t (\bar{z}(t) - \hat{z}(t))^T (\bar{z}(t) - \hat{z}(t)) dt \tag{12}$$

con:

$$p_s = [k_p, k_i, k_d]^T \tag{13}$$

en donde la función objetivo J_s es el índice de rendimiento de la Integral del Error al Cuadrado ponderada por el Tiempo (ITSE, por sus siglas en inglés), que cuantifica los errores en la realización de una trayectoria en proporción al tiempo, el vector p_s incluye a las ganancias del controlador PID, y $\hat{z}(t) = [\hat{q}_2, \dot{\hat{q}}_2]^T$ es la solución al problema de valor inicial asociado al modelo identificado del mecanismo en (5) con la entrada de control $u(t)$ generada por el controlador PID, sujeta a la condición inicial $\hat{z}_0 = z(0)$ (i.e., el estado inicial del mecanismo real).

De esta manera, la solución al problema en (12)-(13) incluye a las ganancias del controlador del PID que reducen el error en la realización de la tarea predefinida con el modelo identificado del sistema. El rendimiento del sistema real al implantarle estas ganancias dependerá, en gran medida, de la precisión del modelo identificado.

III. EL ENFOQUE DE SOLUCIÓN INTELIGENTE

El problema de identificación en (8)-(9) incluye términos altamente no lineales y discontinuos inducidos por la complejidad de la estructura del modelo escogida para el mecanismo de cuatro barras. De igual forma, estas características están presentes en el problema de sintonización de controladores en (12)-(13). Lo anterior, limita la efectividad de las técnicas clásicas de optimización en la búsqueda de soluciones pertinentes [9].

Por fortuna, las técnicas de optimización aproximadas de cómputo inteligente conocidas como metaheurísticas, son capaces de obtener soluciones buenas a problemas complejos como el de la identificación y sintonización a un costo computacional razonable.

En la actualidad, existe una vasta variedad de técnicas metaheurísticas de cómputo evolutivo e inteligencia de enjambres [9]. Una de las alternativas más simples que ha mostrado ser altamente efectiva en la solución de problemas complejos en ingeniería es Evolución Diferencial (ED) [15].

Algoritmo 1: Evolución Diferencial

Entradas: Número de generaciones (G_{max}), Número de individuos (NP), Probabilidad de cruce (CR), Factor de escala (F).

Salidas: El mejor vector de variables de diseño (p_{best}).

- 1 $G \leftarrow 0$
- 2 Genera una población inicial P_G con NP individuos aleatorios.
- 3 **while** $G < G_{max}$ **do**
- 4 Selecciona al mejor individuo p_{best} de la población P_G .
- 5 **foreach** $p_i \in P_G$ **do**
- 6 Selecciona tres individuos p_{r1} y p_{r2} aleatoriamente de la población P_G tal que $r1 \neq r2 \neq i$.
- 7 Genera un individuo mutante
 $v_i = p_{best} + F(p_{r2} - p_{r3})$.
- 8 Genera un individuo descendiente
 $u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j}, & \text{if } rnd(0,1) < CR \text{ or } j = j_{rnd} \\ p_{i,j}, & \text{otherwise} \end{cases}$,
 con j_{rnd} como una variable de diseño aleatoria y $rnd(0,1)$ un número aleatorio en $[0, 1]$.
- 9 Elige entre p_i y u_i al individuo más apto que prevalecerá en la población P_{G+1} .
- 10 $G \leftarrow G + 1$
- 11 Selecciona al mejor individuo p_{best} de la población P_G .
- 12 **return** p_{best}

El Algoritmo 1 muestra la operación de la variante *best/1/bin* de ED. ED *best/1/bin* inicia en la primera generación (iteración) $G = 0$ con una población P_G que contiene NP individuos generados aleatoriamente (cada individuo es una posible solución a un problema de optimización) (líneas 1 y 2). A continuación, el algoritmo realiza un ciclo evolutivo durante G_{max} generaciones (línea 3) para actualizar a cada uno de los individuos base en la población (línea 5). En cada generación, ED selecciona al mejor individuo en la población actual (línea 4) y, para cada individuo base, elige aleatoriamente a dos individuos de la misma población (línea 6). Utilizando la información de los tres individuos anteriores, ED genera a un mutante por medio del operador de mutación *best/1* (línea 7) y el factor de escala $F \in [0, 1]$. Posteriormente, ED combina al individuo base con el mutante a través del operador de cruce *bin* (línea 8) y la probabilidad de $CR \in [0, 1]$ para generar a un individuo descendiente. El individuo base y su descendiente compiten para determinar a la alternativa más apta que permanecerá en la población para la siguiente generación (línea 9). Conforme avanzan las generaciones (línea 10), los individuos más aptos persisten en la población. El individuo más apto de la última generación se elige como la solución al problema de optimización (líneas 11 y 12).

La variante *best/1/bin* de ED se utiliza en este trabajo debido a su rápida convergencia [16] para resolver a los problemas de identificación y sintonización de controladores como sigue:

- Primero se utiliza ED *best/1/bin* para resolver el problema de identificación del mecanismo de cuatro barras.
- El resultado obtenido en el punto anterior se utiliza para definir al problema de sintonización del controlador PID

 TABLA I
 PARÁMETROS DEL MECANISMO DE CUATRO BARRAS.

Parámetro	Valor nominal	Parámetro	Valor nominal
l_1	0.4 (m)	l_{c2}	0.05 (m)
l_2	0.1 (m)	l_{c3}	0.15 (m)
l_3	0.3 (m)	l_{c4}	0.1 (m)
l_4	0.2 (m)	I_2	0.0004 (kg m ²)
m_2	0.5 (kg)	I_3	0.0112 (kg m ²)
m_3	1.5 (kg)	I_4	0.0040 (kg m ²)
m_4	1.2 (kg)	g	9.81 (m/s ²)

(recordar, que la sintonización requiere del modelo que se obtiene en la identificación). Este problema se resuelve también con ED *best/1/bin*.

- Finalmente, las ganancias del controlador PID que se obtienen a partir de la solución del problema de optimización, se implantan en el controlador del mecanismo de cuatro barras real.

IV. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

A. Descripción de los experimentos

Para los experimentos en simulación, se asume que el mecanismo de cuatro barras real presenta los parámetros cinemáticos y dinámicos de la Tabla I. El modelo en (5) con los parámetros nominales de la Tabla I se utiliza para generar los pares de entrada y salida requeridos por el problema de identificación en (8)-(9) durante $t_{fi} = 10$ (s). Esta información de entrada y salida se adquiere cada $dt = 5$ (ms). Para ello, se ocupa el controlador en lazo abierto siguiente:

$$u(t) = 1 + \cos(t) \quad (14)$$

El comportamiento del mecanismo real, en términos de sus estados, al utilizar el controlador en lazo abierto en (14) se ilustra en la Fig. 2.

En el proceso de identificación, los parámetros del modelo del mecanismo se buscan en el espacio comprendido entre $p_{min} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ y $p_{max} = [0.3, 0.3, 0.3, 0.02, 0.02, 0.02]^T$. Estos parámetros se propusieron considerando el triple de los valores nominales de la barra más grande con el fin de evaluar la efectividad de la propuesta.

El proceso de sintonización del controlador PID se lleva a cabo utilizando $t_{fs} = 10$ (s) y $dt = 5$ (ms). La tarea que debe realizar este mecanismo está dada por:

$$\bar{q}_2(t) = \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) \quad (15)$$

$$\dot{\bar{q}}_2(t) = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \quad (16)$$

En este caso, el espacio de búsqueda para las ganancias del controlador PID se encuentra entre $p_{min} = [0, 0, 0]^T$ y $p_{max} = [1000, 1000, 1000]^T$. Este espacio se eligió con la intención de no obtener un controlador de alta ganancia y facilitar su implementación práctica.

En cuanto al enfoque de solución inteligente para los problemas de identificación y control, los parámetros que se

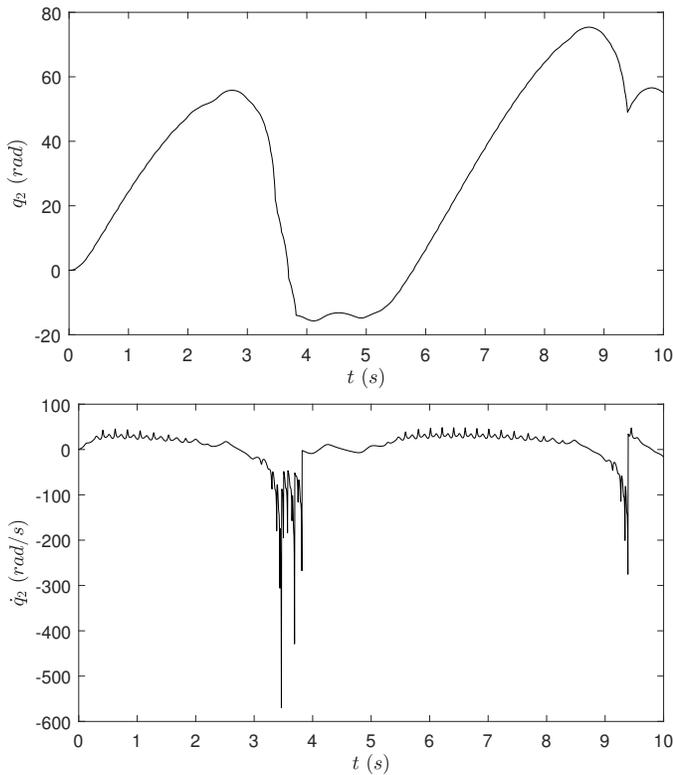


Fig. 2. Estados del mecanismo al utilizar el controlador en lazo abierto.

eligen para ED *best/1/bin* son: $G_{max} = 2000$, $NP = 50$, $CR = 0.5$ y $F = 0.5$. Estos parámetros se seleccionan con base en las sugerencias en [17].

Tanto los problemas como el enfoque de solución inteligente se implementaron en el lenguaje de programación *C++* y las simulaciones se ejecutaron en una computadora con Intel(R) Core(TM) i5-10400F CPU @ 2.90GHz y 64GB de RAM.

B. Resultados y discusión

Debido a la naturaleza estocástica de ED *best/1/bin*, se realizaron 30 ejecuciones independientes de este algoritmo para solucionar al problema de identificación del mecanismo de cuatro barras. Estas ejecuciones permiten obtener información acerca del comportamiento de ED y elegir la solución más conveniente. La Tabla II muestra los resultados de las 30 ejecuciones, incluyendo el número de la ejecución, los parámetros identificados y su valor correspondiente de función objetivo (8). En la parte inferior de la tabla se incluye el resumen estadístico. A partir de los resultados de J_i en la tabla, se puede observar que todas las alternativas de parámetros para el modelo pueden generalizar de forma adecuada el comportamiento del mecanismo real de cuatro barras, a pesar de que los valores de desviación estándar de los parámetros son grandes comparados con el promedio, i.e., puede haber diferencias significativas entre ellos.

Los mejores parámetros de la Tabla II (se resaltan en negritas), con base en el menor valor de J_i , se utilizan en la definición del problema de sintonización del controlador PID

en (12)-(13). Cabe mencionar que los mejores parámetros en esta tabla se desvían hasta en un 4% de su valor nominal correspondiente. Lo anterior resalta la capacidad de este enfoque para identificar modelos de sistemas altamente no lineales de forma efectiva.

Al igual que en el problema de identificación, ED *best/1/bin* se ejecuta 30 veces para resolver el problema de sintonización del controlador PID y así obtener información relevante sobre el proceso. Los resultados de estas ejecuciones se muestran en la Tabla III. Esta tabla incluye el número de la ejecución, las ganancias del controlador PID obtenidas y el valor de la función objetivo en (12). En esta tabla se observa que, con base en el valor de J_s , el rendimiento que se alcanza con las distintas configuraciones del controlador PID es muy similar. Lo anterior tiene relación con el valor reducido de la desviación estándar para las ganancias k_p y k_d , comparado con el promedio. En cuanto a la ganancia k_i , su valor es pequeño en comparación con las otras dos ganancias y podría bastar con un controlador PD para realizar la tarea deseada.

Finalmente, las mejores ganancias del controlador PID una gráfica con la mejor configuración de PID de la Tabla III (se indican en negritas), se implantan en el mecanismo de cuatro barras real. La Fig. 3 muestra el comportamiento del mecanismo de cuatro barras real con el controlador PID sintonizado con las mejores ganancias de la Tabla III. En esta figura se puede observar que no existen diferencias perceptibles entre la respuesta del mecanismo y la referencia. El rendimiento del controlador PID con el mecanismo real es $J_s = 5.5592E-07$.

V. CONCLUSIONES

La identificación y la sintonización de controladores son dos tareas fundamentales para explotar el funcionamiento de los sistemas mecánicos en las aplicaciones tecnológicas actuales. Ambas tareas son complicadas y se han abordado de manera aislada en la gran mayoría de trabajos en la literatura especializada. En este trabajo se utiliza un enfoque de optimización inteligente con base en cómputo evolutivo para resolver los problemas de identificación y sintonización, utilizando al mecanismo de cuatro barras como caso de estudio. El enfoque requiere del establecimiento formal de un problema de optimización para ambas tareas. Los dos problemas resultantes pueden resolverse entonces con la ayuda de cómputo inteligente.

Los resultados en simulación muestran la eficacia de este enfoque de solución para llevar a cabo la identificación del mecanismo de cuatro barras y la sintonización de su controlador PID para la tarea de seguimiento de trayectorias. Los modelos identificados con ED pueden generalizar de manera adecuada el comportamiento del mecanismo real a pesar de las diferencias entre ellos y de las discrepancias con los parámetros de dicho mecanismo. De esta forma, pueden usarse como reemplazo del mecanismo real para la tarea sintonización. Por su parte, la tarea de sintonización del controlador PID da origen a configuraciones de ganancias con pocas variaciones entre ellas. Estas configuraciones se pueden

TABLA II
 RESULTADOS DEL PROBLEMA DE IDENTIFICACIÓN DEL MECANISMO DE CUATRO BARRAS.

Ejecución	\hat{I}_{c_2}	\hat{I}_{c_3}	\hat{I}_{c_4}	I_2	I_3	I_4	J_i
1	0.0462	0.1462	0.1031	4.0950E-04	0.0112	0.0039	4.1600E-22
2	0.0514	0.1514	0.0987	4.1559E-04	0.0112	0.0039	6.2100E-23
3	0.0777	0.1777	0.0768	3.1000E-05	0.0100	0.0033	2.2400E-20
4	0.0212	0.1212	0.1239	4.4000E-06	0.0100	0.0033	2.4000E-20
5	0.0692	0.1692	0.0839	2.3138E-04	0.0106	0.0036	1.0800E-20
6	0.0722	0.1722	0.0814	1.6911E-04	0.0105	0.0035	1.4400E-20
7	0.0673	0.1673	0.0855	2.6568E-04	0.0107	0.0037	8.7800E-21
8	0.0788	0.1788	0.0759	7.8300E-08	0.0100	0.0033	2.4200E-20
9	0.0211	0.1211	0.1240	1.8400E-06	0.0100	0.0033	2.4100E-20
10	0.0688	0.1688	0.0842	2.3863E-04	0.0107	0.0037	1.0400E-20
11	0.0630	0.1630	0.0891	3.3189E-04	0.0109	0.0038	4.9300E-21
12	0.0591	0.1591	0.0924	3.7510E-04	0.0111	0.0039	2.4200E-21
13	0.0364	0.1364	0.1112	3.2539E-04	0.0109	0.0038	5.3100E-21
14	0.0402	0.1402	0.1081	3.6901E-04	0.0111	0.0039	2.7700E-21
15	0.0267	0.1267	0.1194	1.4543E-04	0.0104	0.0035	1.5800E-20
16	0.0280	0.1280	0.1183	1.7547E-04	0.0105	0.0035	1.4000E-20
17	0.0463	0.1463	0.1030	4.1009E-04	0.0112	0.0039	3.8300E-22
18	0.0787	0.1787	0.0760	2.3200E-06	0.0100	0.0033	2.4100E-20
19	0.0788	0.1788	0.0759	1.5800E-06	0.0100	0.0033	2.4200E-20
20	0.0731	0.1731	0.0807	1.4956E-04	0.0104	0.0035	1.5500E-20
21	0.0787	0.1787	0.0760	3.5400E-06	0.0100	0.0033	2.4000E-20
22	0.0701	0.1701	0.0832	2.1383E-04	0.0106	0.0036	1.1800E-20
23	0.0394	0.1394	0.1087	3.6139E-04	0.0110	0.0039	3.2200E-21
24	0.0356	0.1356	0.1119	3.1427E-04	0.0109	0.0038	5.9600E-21
25	0.0773	0.1773	0.0771	4.1300E-05	0.0101	0.0033	2.1800E-20
26	0.0211	0.1211	0.1240	1.7300E-06	0.0100	0.0033	2.4100E-20
27	0.0451	0.1451	0.1040	4.0481E-04	0.0112	0.0039	6.8900E-22
28	0.0661	0.1661	0.0865	2.8623E-04	0.0108	0.0037	7.5900E-21
29	0.0637	0.1637	0.0885	3.2171E-04	0.0109	0.0038	5.5200E-21
30	0.0585	0.1585	0.0928	3.7988E-04	0.0111	0.0039	2.1400E-21
Mínimo	0.0211	0.1211	0.0759	7.8256E-08	0.0100	0.0033	6.2122E-23
Máximo	0.0788	0.1788	0.1240	4.1559E-04	0.0112	0.0039	2.4232E-20
Promedio	0.0553	0.1553	0.0955	2.1273E-04	0.0106	0.0036	1.1866E-20
Desviación estándar	0.0194	0.0194	0.0162	1.5267E-04	0.0004	0.0002	8.8859E-21

utilizar de forma efectiva en el mecanismo real para realizar la tarea deseada con alto rendimiento.

REFERENCIAS

[1] S. Bennett, "The past of pid controllers," *Annual Reviews in Control*, vol. 25, pp. 43–53, 2001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578801000050>

[2] S. Skogestad, "Modelling and control of distillation columns as 5x5 systems," *Dechema Monographs*, vol. 116, pp. 403–411, 1989.

[3] V. Vijayalakshmi, "Design of superheated steam temperature control using fuzzy logic controller," in *2017 Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM)*, 2017, pp. 1076–1084.

[4] P. Beirdol, D. Valerio, and J. S. da Costa, "Linear model identification of the archimedes wave swing," in *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2007, pp. 660–665.

[5] E. Wernholt and S. Gunnarsson, "Nonlinear identification of a physically parameterized robot model 1," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 1, pp. 143–148, 2006, 14th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015352526>

[6] J. Lai and H. X. Lan, "Identification of dynamic parameters in lagrange robot model," in *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 1, 1988, pp. 90–93.

[7] X. Yu, S. Wei, and L. Guo, "Nonlinear system identification of bicycle robot based on adaptive neural fuzzy inference system," in *Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, F. L. Wang, H. Deng, Y. Gao, and J. Lei, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 381–388.

[8] S. S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2019.

[9] J. C. Bansal, P. K. Singh, and N. R. Pal, *Evolutionary and swarm intelligence algorithms*. Springer, 2019, vol. 779.

[10] O. Serrano-Pérez, M. G. Villarreal-Cervantes, J. C. González-Robles, and A. Rodríguez-Molina, "Meta-heuristic algorithms for the control tuning of omnidirectional mobile robots," *Engineering Optimization*, vol. 52, no. 2, pp. 325–342, 2020.

[11] C. Gaz, M. Cognetti, A. Oliva, P. Robuffo Giordano, and A. De Luca, "Dynamic identification of the franka emika panda robot with retrieval of feasible parameters using penalty-based optimization," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 4147–4154, 2019.

[12] V. H. Alves Ribeiro and G. R. Meza, "Multi-objective pid controller tuning for an industrial gasifier," in *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 2018, pp. 1–6.

[13] A. Rodríguez-Molina, M. G. Villarreal-Cervantes, E. Mezura-Montes, and M. Aldape-Pérez, "Adaptive controller tuning method based on online multiobjective optimization: A case study of the four-bar mechanism," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1272–1285, 2021.

[14] K. Ogata, *System dynamics / Katsuhiko Ogata.*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.

[15] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of global optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997.

[16] E. Mezura-Montes, J. Velázquez-Reyes, and C. A. Coello Coello, "A comparative study of differential evolution variants for global optimization," in *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2006, pp. 485–492.

[17] E. Mezura-Montes, J. Velázquez-Reyes, and C. A. Coello Coello, "A comparative study of differential evolution variants for global optimization," in *Proceedings of the 8th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, ser. GECCO '06. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2006, p. 485–492. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1143997.1144086>

TABLA III
RESULTADOS DEL PROBLEMA DE SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID.

Ejecución	k_p	k_i	k_d	J_s
1	672.7250	6.8100E-05	4.8885	3.1801E-04
2	665.1070	3.9100E-10	4.7459	3.2170E-04
3	665.1070	2.7400E-09	4.7459	3.2170E-04
4	665.1070	8.6600E-09	4.7459	3.2170E-04
5	665.1070	8.4200E-10	4.7459	3.2170E-04
6	644.6400	5.4500E-08	4.5817	3.2554E-04
7	644.6400	3.8900E-09	4.5817	3.2554E-04
8	665.1070	1.2100E-08	4.7459	3.2170E-04
9	644.6400	1.7200E-08	4.5817	3.2554E-04
10	644.6400	5.2600E-11	4.5817	3.2554E-04
11	644.6410	4.6500E-08	4.5817	3.2554E-04
12	665.1060	2.8500E-09	4.7459	3.2170E-04
13	665.1070	6.3300E-09	4.7459	3.2170E-04
14	644.6410	3.6100E-08	4.5817	3.2554E-04
15	665.1070	4.3800E-09	4.7459	3.2170E-04
16	665.1070	7.5200E-09	4.7459	3.2170E-04
17	665.1070	6.4800E-09	4.7459	3.2170E-04
18	665.1060	8.0900E-10	4.7459	3.2170E-04
19	665.1070	1.6200E-08	4.7459	3.2170E-04
20	665.1070	3.4200E-09	4.7459	3.2170E-04
21	644.6400	1.1400E-08	4.5817	3.2554E-04
22	665.1070	3.8700E-09	4.7459	3.2170E-04
23	665.1070	6.8300E-09	4.7459	3.2170E-04
24	665.1070	1.5400E-08	4.7459	3.2171E-04
25	665.1070	6.1500E-09	4.7459	3.2170E-04
26	665.1070	4.1400E-09	4.7459	3.2170E-04
27	644.6400	2.2500E-08	4.5817	3.2554E-04
28	665.1070	1.3800E-08	4.7459	3.2170E-04
29	665.1070	6.7500E-09	4.7459	3.2170E-04
30	665.1070	3.4700E-09	4.7459	3.2170E-04
Mínimo	644.6400	5.2566E-11	4.5817	3.1801E-04
Máximo	672.7250	6.8131E-05	4.8885	3.2554E-04
Promedio	659.9030	2.2819E-06	4.7069	3.2260E-04
Desviación estándar	9.303599	1.2228E-05	0.0796	1.8913E-05

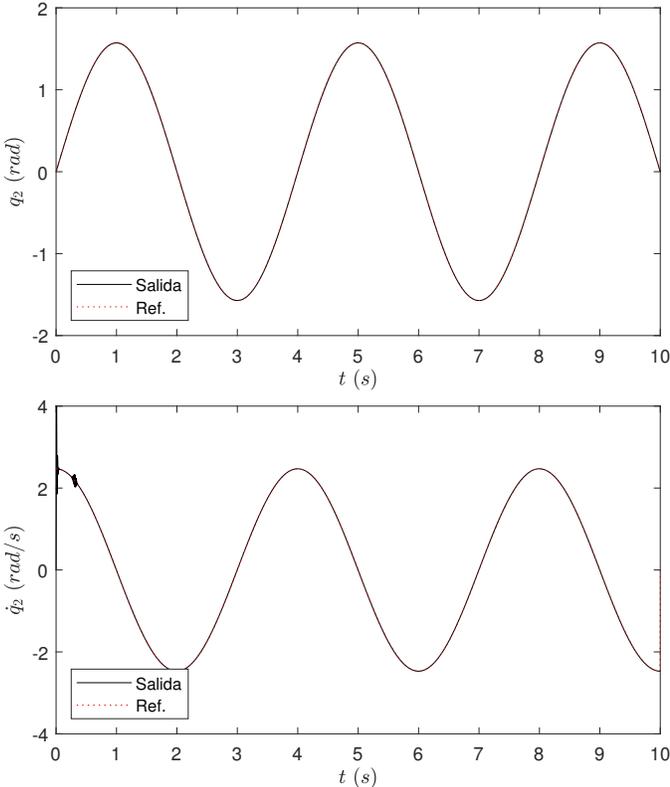


Fig. 3. Comportamiento del mecanismo de cuatro barras real con el controlador PID sintonizado.