

Sintonía con PSO de un controlador PID para la regulación de posición de una articulación motriz pendular

David Alonso Pimienta Berrelleza
Tecnológico Nacional de México
 Instituto Tecnológico de La Paz
 La Paz, B.C.S., México
 M19310016@lapaz.tecnm.mx

Jesús Alberto Sandoval Galarza
Tecnológico Nacional de México
 Instituto Tecnológico de La Paz
 La Paz, B.C.S., México
 jesus.sg@lapaz.tecnm.mx

Marco Antonio Castro Liera
Tecnológico Nacional de México
 Instituto Tecnológico de La Paz
 La Paz, B.C.S., México
 marco.cl@lapaz.tecnm.mx

Iliana Castro Liera
Tecnológico Nacional de México
 Instituto Tecnológico de La Paz
 La Paz, B.C.S., México
 iliana.cl@lapaz.tecnm.mx

Resumen — En este trabajo se presenta una aplicación del método de optimización por enjambre de partículas (PSO) para la sintonía de un controlador PID aplicado al control de posición de una articulación motriz pendular acoplada a un servomotor. La novedad es la definición de la aptitud, como una sumatoria de índices de desempeño que incluye la magnitud del voltaje del motor, a diferencia de otros trabajos que no lo incluyen. Una ventaja del esquema propuesto es la adecuada selección de ganancias del controlador que permiten el cumplimiento del objetivo de control de regulación de posición, sin exceder el voltaje nominal del motor. Para ilustrar el desempeño del controlador aplicando el esquema de sintonía, se presentan resultados de simulación y experimentales con un servomotor de la marca Quanser.

Palabras clave — Método PSO, regulación de posición, control PID, par, SRV02 Quanser.

I. INTRODUCCIÓN

Entre los métodos más populares para la sintonía de controladores podemos encontrar los siguientes: Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Lopez et al., Sung et al., Chien-Hrones-Reswick, entre otros [1]. De los métodos anteriores, la selección de las ganancias de cada controlador se basa en la experiencia del usuario. Sin embargo, en algunos casos su aplicación no es práctica, por ejemplo, cuando se desconoce la función de transferencia o cuando no se cuenta con el tiempo suficiente para su aplicación [2]. A pesar de ello, existen alternativas como los métodos heurísticos, los cuales ofrecen soluciones adecuadas, en un tiempo computacional aceptable [3].

Entre las alternativas para la sintonía de controladores mediante métodos no convencionales, donde el problema de sintonía es visto como un problema de optimización que presenta limitaciones, una de estas alternativas es el uso de métodos metaheurísticos como PSO [4].

El PSO es un método diseñado para encontrar mínimos y máximos globales de una función de aptitud que puede tener múltiples índices de desempeño. Este es capaz de optimizar un problema mediante la generación de un enjambre de partículas donde cada partícula representa una solución candidata. Las partículas tienen una posición \vec{k} y una velocidad \vec{v} , con la cual se ubica y se mueve, respectivamente, dentro del espacio de búsqueda [5]. Cada partícula es afectada en su movimiento a partir de la mejor posición encontrada de manera individual como de manera grupal, esto con el fin de lograr converger en las posiciones cercanas a la óptima. Cuando esto es aplicado al PID se puede entender que cada solución candidata contiene el grupo de ganancias para el controlador.

Este artículo propone realizar la sintonía de un controlador PID mediante el uso de PSO con un esquema para la aptitud donde se considera la magnitud de voltaje del motor con el fin de lograr un buen desempeño, que cumpla con el objetivo de control sin sobrepasar el voltaje nominal. Esto permitiría, por un lado, evitar que por una mala selección de las ganancias del controlador se exceda el voltaje nominal, y por otro lado, se cumplieran índices de desempeño (integral del error de posición ponderado en el tiempo, integral del sobre-impulso de posición, integral del sobre-impulso de voltaje, etc.) dados por el usuario sobre la respuesta del sistema.

El resto del trabajo está organizado como sigue: en la Sección 2 se describe el modelo dinámico de la articulación motriz pendular, en la Sección 3 se describe el método PSO y se establecen los índices de desempeño, en la Sección 4 se muestran los resultados de simulación y experimentales, y finalmente en la Sección 5 se muestran las conclusiones del trabajo.

II. ARTICULACIÓN MOTRIZ PENDULAR

La articulación motriz pendular consta de un servomotor cuyo eje está conectado en uno de sus extremos a una barra de carga, y esta a su vez a un disco de carga, como se muestra en la figura 1, para la cual el significado de las variables y parámetros se muestra en la tabla I. El motor de CD a partir de un voltaje de entrada genera un par τ , el cual está relacionado con la posición angular q .

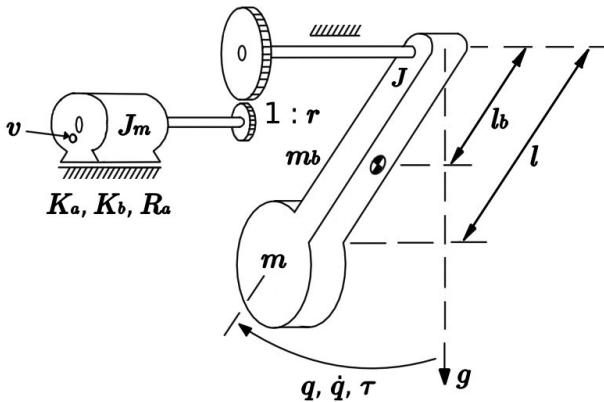


Figura 1. Articulación motriz pendular (motor de CD+péndulo)

 Tabla I
 VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA ARTICULACIÓN MOTRIZ PENDULAR

| Símbolo | Descripción | Unidades |
|------------|--|--------------------|
| R_a | Resistencia de armadura | Ω |
| K_a | Constante motor-par | Nm/A |
| K_b | Constante de contrarreacción electromotriz | Vs/rad |
| r | Relación de reducción de engranes (en general $r > 1$) | |
| v | Voltaje de armadura | V |
| τ | Par en el eje de la carga | Nm |
| q | Posición angular del eje de la carga | rad |
| \dot{q} | Velocidad angular del eje de la carga | rad/s |
| \ddot{q} | Aceleración angular del eje de la carga | rad/s ² |
| J_m | Inercia del rotor | kg m ² |
| J | Inercia del brazo | kg m ² |
| m_b | masa del brazo | kg |
| m | masa de la carga | kg |
| l_b | distancia desde el eje de giro al centro de masa del brazo (sin carga) | m |
| l | distancia desde el eje de giro a la carga m | m |
| g | aceleración de la gravedad | m/s ² |

II-A. Modelo dinámico

Como se busca regular la posición angular del eje de carga de la articulación motriz pendular, se seleccionó el error de posición angular \tilde{q} como la variable de realimentación para el controlador del sistema en el lazo cerrado, donde el error de posición angular \tilde{q} y su derivada temporal $\dot{\tilde{q}}$ están dadas por las siguientes dos definiciones [6]:

$$\tilde{q} = q_d - q \quad (1)$$

$$\dot{\tilde{q}} = -\dot{q} \quad (2)$$

Nótese que para el caso de regulación de posición q_d es constante para todo $t \geq 0$, por tanto, $\dot{q}_d = 0$.

A partir de las ecuaciones que representan un modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad (g.d.l.), un motor de CD ideal y una ecuación que contemple la relación de engranes y la conexión del péndulo al motor, es posible establecer el modelo dinámico del sistema, donde se representa la relación del voltaje de entrada v con la posición angular obtenida en el eje de carga q , dando como resultado el siguiente par de ecuaciones [7]:

El modelo dinámico completo de la articulación motriz pendular puede ser escrito como:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \frac{1}{J_m} \left[\frac{K_a}{rR_a} v - \frac{K_a K_b}{R_a} \dot{q} \right] \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde el voltaje v , después de algunas manipulaciones algebraicas, está dado por:

$$v = \frac{rR_a}{K_a} \left[[M^{-1}J_m] [\tau - g(q)] + \frac{K_a K_b}{R_a} \dot{q} \right] \quad (4)$$

donde

$$g(q) = [m_b l_b + ml]g \sin(q), \quad (5)$$

y

$$M = J + ml^2 \quad (6)$$

Nótese que hemos omitido la inductancia de armadura L_a , al igual que la fricción en el soporte del brazo f_L y la fricción del rotor f_m , por tanto: $L_a = 0$, $f_L = 0$ y $f_m = 0$.

II-B. Ley de control y objetivo de control

La ley de control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) está representada por la siguiente ecuación:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + K_i \xi \quad (7)$$

donde

$$\dot{\xi} = \tilde{q} \quad (8)$$

Para este trabajo se estableció arbitrariamente como referencia q_d las posiciones deseadas de 90° (1.571 [rad]) y 45° (0.785 [rad]). El objetivo de control es seleccionar apropiadamente las ganancias K_p , K_v y K_i en (7) tal que logre llevar la posición angular q a la posición deseada q_d . Formalmente el objetivo de control anterior se expresa de la siguiente manera:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |q(t) - q_d| = 0 \quad (9)$$

II-C. Método de sintonía basado en Kelly y Santibáñez (2003)

Basados en el método de sintonía introducido en [7] los valores de K_p , K_v y K_i del controlador PID (7)-(8) deben satisfacer las siguientes tres desigualdades:

$$\lambda_{Max}\{K_i\} \geq \lambda_{min}\{K_i\} > 0, \quad (10)$$

$$\lambda_{Max}\{K_p\} \geq \lambda_{min}\{K_p\} > k_g, \quad (11)$$

$$\lambda_{Max}\{K_v\} \geq \lambda_{min}\{K_v\} > \frac{[\lambda_{Max}\{K_i\}][\lambda_{Max}^2\{M\}]}{[\lambda_{min}\{K_p\} - k_g][\lambda_{min}\{M\}]} \quad (12)$$

donde k_g se calcula de la siguiente manera:

$$k_g = n \left[\text{Max}_{i,j,q} \left| \frac{\partial g_i(q)}{\partial q_j} \right| \right] \quad (13)$$

Debido a que en este trabajo se trata de un servomecanismo de 1 g.d.l. las matrices K_p , K_v y K_i que representan al controlador contienen un solo elemento cada una, por lo cual las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) se pueden reescribir como simples escalares:

$$k_i > 0, \quad (14)$$

$$k_p > k_g, \quad (15)$$

$$k_v > \frac{k_i[M^2]}{[k_p - k_g]M}, \quad (16)$$

$$k_g = [m_b l_b] g. \quad (17)$$

Enseguida se presenta un procedimiento de sintonía en el que las ganancias k_p , k_v y k_i son seleccionadas inicialmente de manera arbitraria, pero cumpliendo con (14), (15) y (16). Posteriormente, mediante prueba y error, se modifican las ganancias con el fin de reducir el tiempo de establecimiento y el sobre-impulso. Usando este procedimiento heurístico se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla II.

Tabla II
PROPUESTA DE SINTONÍA BASADO EN KELLY Y SANTIBÁÑEZ (2003)

| Ganancias del controlador PID (7) para cada posición deseada | | |
|--|------------|------------|
| q_d | 90° | 45° |
| k_p | 0.75 | 1 |
| k_v | 0.09 | 0.1 |
| k_i | 0.21 | 0.69 |

III. SINTONÍA DEL CONTROLADOR MEDIANTE PSO

La figura 2 muestra el diagrama de flujo del PSO. Se utilizaron los siguientes valores para los parámetros del PSO: los coeficientes de confianza $c_1 = c_2 = 1.62$ y el peso inercial $w = 0.8$. Su selección se hizo de acuerdo a los resultados satisfactorios mostrados en otro trabajo [8], [9]. La velocidad con la que inicializan las partículas es igual a cero, y se utilizó un tamaño de enjambre de 20 partículas. Las propuestas de sintonía se encontraron mediante pruebas donde se utilizó una configuración de 1000 iteraciones.

Los rangos de creación y de exploración de las partículas para cada una de las posiciones deseadas, fueron definidos en base a los resultados obtenidos en la subsección II-B. Para el caso con $q_d = 90^\circ$ (1.571 rad) el rango de exploración fue de 0 a 0.75, mientras que para $q_d = 45^\circ$ (0.785 rad) fue de 0 a 1. El tiempo de muestreo utilizado para los dos casos mencionados es de 10 segundos y el paso de integración es 0.0001 segundos.

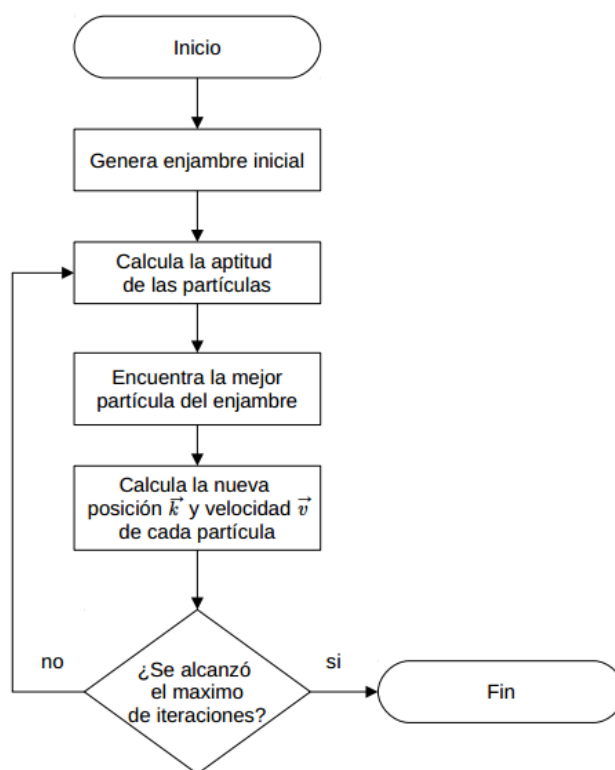


Figura 2. Diagrama de flujo del PSO

III-A. Aptitud e índices de desempeño

Una vez creado el enjambre (recordando que cada partícula representa una solución candidata, que contiene ganancias para el controlador PID), se procede con el cálculo de la aptitud de las partículas. Para ello se establecieron los siguientes índices de desempeño:

Integral del error de posición ponderado en el tiempo, abreviado como *ISTE*: Este error se define como la diferencia

entre la posición angular deseada q_d y la posición angular obtenida q_t en el instante t [6]. Es decir, este índice de desempeño evalúa la posición de la barra de carga q_t otorgando una calificación proporcional a la diferencia entre esta y la posición deseada q_t , tal que entre mayor es la diferencia, mayor será el valor de $ISTE$. Nótese que entre mayor sea la cantidad de tiempo transcurrido t la diferencia entre q_d y q_t tendrá una mayor valoración, misma razón por la que se decidió que al instante t le fuera sumada una unidad, con el fin de que la diferencia de posiciones se valorara desde el primer instante. Este se calcula mediante:

$$ISTE = \int_0^{\infty} (t+1)(q_d - q_t)^2 dt \quad (18)$$

Integral del sobre-impulso de posición IO : Se define como la diferencia entre la posición angular deseada q_d , y la posición angular obtenida q_t en el instante t , cuando la posición angular obtenida q_t es mayor a la posición angular deseada q_d . En otras palabras, este índice de desempeño aumentara de valor cuando la posición angular de la barra de carga sobrepase la posición angular deseada q_d . Este se calcula mediante:

$$IO = \int_0^{\infty} o(q_t) dt \quad (19)$$

siendo $o(q_t)$

$$o(q_t) = \begin{cases} 0, & \text{si } q_d > q_t \\ \alpha_o(q_t - q_d), & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (20)$$

donde α_o es un factor de peso establecido por el usuario de manera arbitraria e indica la severidad con la que se evalúa el índice de desempeño. Para este trabajo $\alpha_o = 100$.

Integral del sobre-impulso de voltaje IV , se calcula mediante (21). Se define como la diferencia entre el voltaje nominal del motor de CD v_n y la magnitud del voltaje calculado antes del limitador de voltaje v_t , cuando la magnitud del voltaje calculado es mayor a la nominal v_n , es decir, este índice de desempeño aumentará de valor cuando el voltaje calculado sobrepase el voltaje con el cual el equipo puede operar de manera segura. Este se calcula mediante:

$$IV = \int_0^{\infty} s(v_t) dt \quad (21)$$

siendo $s(v_t)$

$$s(v_t) = \begin{cases} 0, & \text{si } \alpha_p v_n > v_t \\ \alpha_v(v_t - \alpha_p v_n), & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (22)$$

donde α_v es un factor de peso establecido por el usuario de manera arbitraria e indica la severidad con la que se evalúa el índice de desempeño, y α_p es un factor de tolerancia que multiplica al voltaje nominal v_n e indica la proximidad de la magnitud del voltaje calculado v_t al voltaje nominal v_n , donde un $\alpha_p = 1$ permitiría que v_t pueda igualar el valor de v_n , o donde un $\alpha_p = 0.5$ permitiría que v_t pueda alcanzar hasta el 50 del valor de v_n . Para este trabajo se seleccionó arbitrariamente $\alpha_v = 100$ y $\alpha_p = 0.99$ (99%).

A diferencia de otros trabajos [2], [9], [10], en los que el valor de la aptitud de las soluciones candidatas es dada por un índice de desempeño, u otros [1], [11], [12] donde se suele omitir la magnitud del voltaje y el voltaje nominal dentro del cálculo de la aptitud, en este trabajo, la aptitud calculada usando PSO, es el resultado de sumar los tres índices definidos en (18), (19) y (21), y se calcula mediante (23).

$$A(PID) = ISTE + IO + IV \quad (23)$$

La ventaja de utilizar la integral del sobre-impulso de voltaje IV como un componente del cálculo de la aptitud $A(PID)$ es que en la evaluación de las partículas del PSO se puede penalizar aquellas que en su cálculo de voltaje v_t sobrepasen el voltaje nominal v_n , lo que permite la búsqueda de soluciones con un v_t menor a v_n .

III-B. Propuesta de sintonía PSO

Después de realizar 10 ejecuciones del algoritmo PSO, de las soluciones candidatas obtenidas, se seleccionó aquella que presentó la mejor aptitud para cada uno de los dos casos y estas son tomadas como propuestas de sintonía. Las ganancias y la aptitudes $A(PID)$ de las propuesta de sintonía resultantes de este procedimiento se muestran en la tabla III.

Tabla III
PROPUESTAS DE SINTONÍA MEDIANTE PSO

| Ganancias del controlador PID (7) para cada posición deseada | | |
|--|----------|---------|
| q_d | 90° | 45° |
| k_p | 0.459 | 0.957 |
| k_v | 0.057 | 0.085 |
| k_i | 0.296 | 0.524 |
| $A(PID)$ | 2539.203 | 403.616 |

IV. RESULTADOS

El software utilizado para la simulación y el experimento es MATLAB R2012 en su versión para Windows, con el complemento de Simulink y las librerías de Quanser correspondientes para el SRV02. La configuración utilizada fue la siguiente: El tiempo de simulación utilizado fue de 85 segundos, el método numérico seleccionado fue Runge-Kutta de paso de integración de 0.01 segundos.

Para evaluar el funcionamiento de un controlador PID suelen tomarse en cuenta algunas de las siguientes propiedades: error en estado estacionario, sobre-impulso, tiempo de subida y tiempo de establecimiento [9], [13]. A diferencia de otros trabajos se decidió agregar la magnitud del voltaje (a la salida del controlador) y el par motor como criterios para la evaluación de la respuesta, esto con el fin de obtener más información que permita contrastar el resultado obtenido mediante los métodos de sintonía presentes en este trabajo.

Para las simulaciones y los experimentos, los parámetros del motor de CD de la articulación motriz pendular se extrajeron del manual de usuario del SRV02 de QUANSER [16], con excepción de: $g = 9.81$ [m/s]² y $l_b = 0.045$ [m], este último obtenido simplemente por medición. Con base en el mismo

manual, se agregó un limitador de voltaje, con el objetivo de no sobrepasar el voltaje nominal (6 [V]) a la entrada de la alimentación del motor.

Las tablas y figuras que se muestran en las subsecciones IV-A y IV-B contienen los resultados de cuatro evaluaciones donde se utilizaron las ganancias para el PID mostradas en las tablas II y III. Para facilitar la visualización de los resultados se decidió expresar q_d en grados para ambos casos. Los resultados consideran un "tiempo de establecimiento" en el rango de $q_d \pm 2\%$, y el "Tiempo de subida" desde el 10% hasta 90% tomando como valor final q_d [13]. De acuerdo a las tablas IV-VII, un valor menor significa un mejor resultado en las evaluaciones. Los porcentajes de diferencia mostrados posteriormente a las tablas se han calculado mediante la ecuación (24) donde a y b son los valores numéricos de los criterios de desempeño de cada método de sintonía, tal que a tomaría los correspondientes al método de sintonía basado en Kelly y Santibáñez (2003), mientras que b tomaría los de la sintonía PSO.

$$\frac{(a - b)}{(a + b)/2} \times 100\% \quad (24)$$

Se puede entender que cuando el porcentaje de diferencia es representado con un valor negativo, en ese apartado el método de sintonía basado en Kelly y Santibáñez (2003) obtuvo un mejor resultado en comparación al método de sintonía PSO, en caso contrario, en ese apartado el método de sintonía PSO obtuvo un mejor resultado en comparación al método de sintonía basado en Kelly y Santibáñez (2003). Específicamente en el cálculo de los porcentajes de diferencia de los criterios de desempeño llamados "sobre-impulso (grados)" y "error en estado estacionario (grados)" se optó por sumar el valor de q_d en grados a cada criterio debido a la dificultad que provocaría obtener porcentajes cuando algún valor es igual a 0, p. ej. tomando los valores del sobre-impulso de la tabla IV se obtendría lo siguiente (25):

$$\frac{(0 + 95) - (0.112 + 90)}{[(0 + 95) + (0.112 + 90)]/2} \times 100\% = -0.1 \quad (25)$$

De la ecuación (25) se puede entender que en ese apartado el método de sintonía basado en Kelly y Santibáñez (2003) obtuvo un mejor resultado en comparación al método de sintonía PSO en un 0.1%, tal como se muestra en la figura 5.

IV-A. Simulaciones numéricas

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones de regulación de posición de la articulación motriz pendular cuando $q_d = 90^\circ$, donde las figuras 3 y 4 representan las respuestas del sistema, en la primera se observa el registro completo de los 85 segundos de muestreo de q y en la segunda se muestra un acercamiento a los primeros 2 segundos del muestreo de q . La tabla IV y la figura 5 representan las evaluaciones de la respuesta del sistema y la comparativa de las respuestas entre los dos métodos de sintonía respectivamente. De igual manera para el caso donde $q_d = 45^\circ$, las figuras 6 y 7 representan las respuestas del sistema, mientras la tabla V

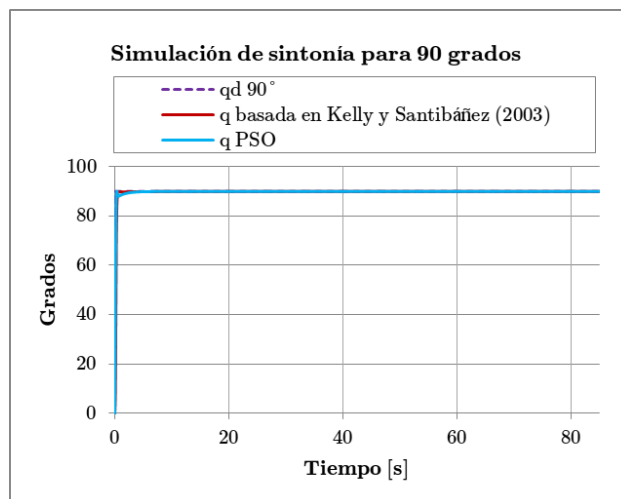


Figura 3. Simulación de sintonía para 90° (85 segundos)

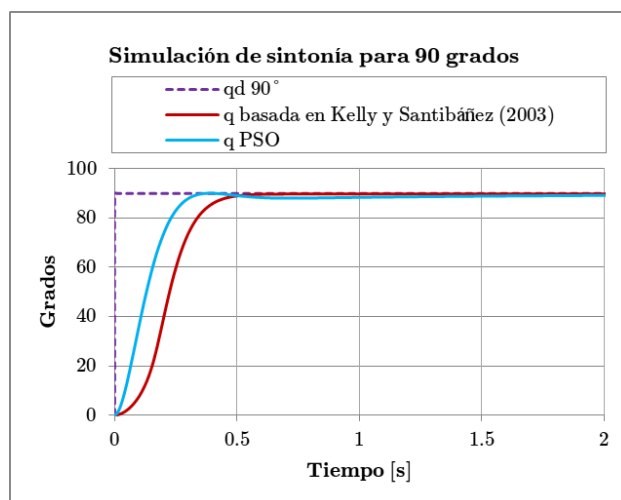


Figura 4. Simulación de sintonía para 90° (2 segundos)

y la figura 8 representan las evaluaciones y la comparativa de las respuestas respectivamente.

Tabla IV
EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE SINTONÍA PARA 90°

| Simulación de sintonía para 90° | | |
|--|-------------------------------------|-------|
| Criterios de desempeño del controlador | Método de sintonía | |
| | Basado en Kelly y Santibáñez (2003) | PSO |
| Sobre-impulso (grados) | 0 | 0.112 |
| Error en estado estacionario (grados) | 0 | 0 |
| Tiempo de subida (segundos) | 0.24 | 0.2 |
| Tiempo de establecimiento (segundos) | 0.45 | 0.3 |
| Voltaje máximo antes del limitador (volts) | 9.31 | 5.946 |
| Valor máximo del par (Newton metro) | 1.174 | 0.697 |

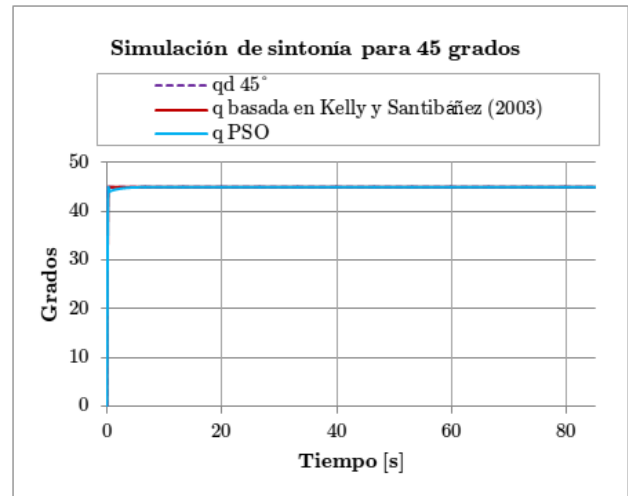


Figura 6. Simulación de sintonía para 45°

Porcentaje de diferencia de sintonía PSO con respecto a sintonía basada en Kelly y Santibáñez (2003) en simulación para 90 grados

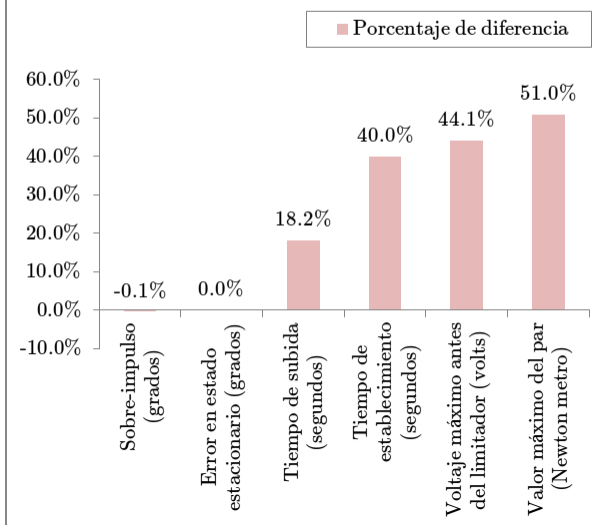


Figura 5. Comparativa de la simulación de sintonía para 90°

Tabla V
EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE SINTONÍA PARA 45°

| Simulación de sintonía para 45° | | |
|--|-------------------------------------|-------|
| Criterios de desempeño del controlador | Método de sintonía | |
| | Basado en Kelly y Santibáñez (2003) | PSO |
| Sobre-impulso (grados) | 0.038 | 0 |
| Error en estado estacionario (grados) | 0 | 0 |
| Tiempo de subida (segundos) | 0.16 | 0.14 |
| Tiempo de establecimiento (segundos) | 0.24 | 0.2 |
| Voltaje máximo antes del limitador (volts) | 6.116 | 5.892 |
| Valor máximo del par (Newton metro) | 0.747 | 0.717 |

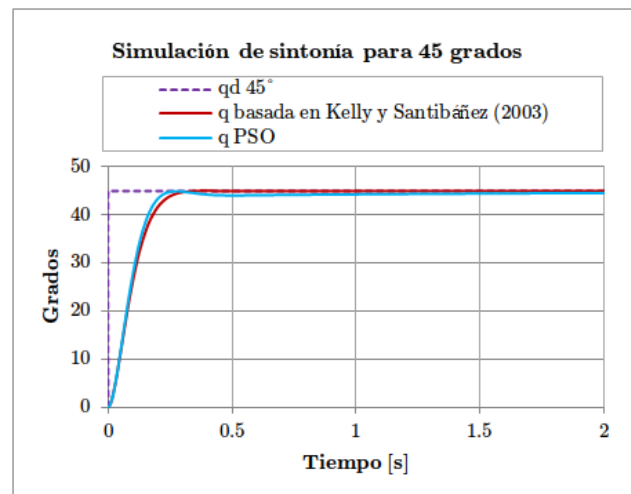


Figura 7. Simulación de sintonía para 45°

Cabe destacar que como se muestra en las tablas IV y V la magnitud de los voltajes máximos medidos utilizando la sintonía PSO no excede el voltaje nominal del equipo (6 [V]) a diferencia de cuando se aplicó la sintonía basada en Kelly y Santibáñez (2003) que si lo excede.

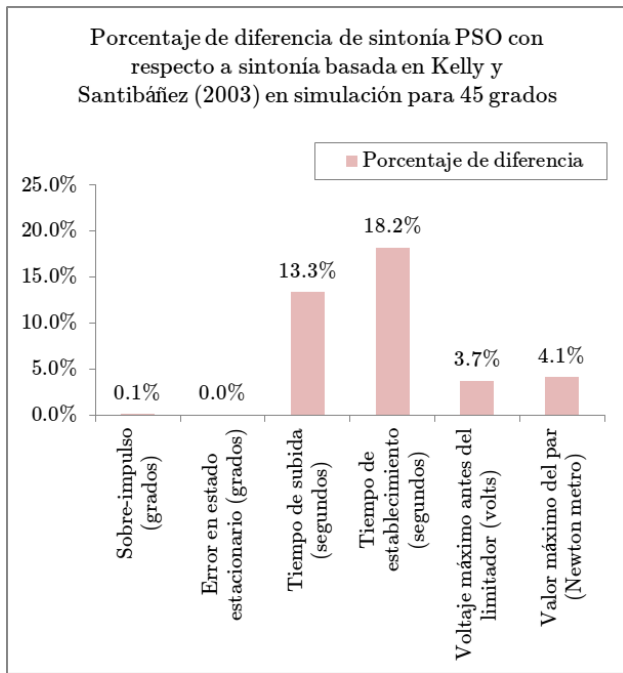


Figura 8. Comparativa de la simulación de sintonía para 45°

Como se puede observar en las comparativas de las figuras 5 y 8 la sintonía PSO obtuvo mejores resultados en la mayoría de los criterios de desempeño excepto en el error en estado estacionario, donde se obtuvo el mismo valor en ambos métodos de sintonía, y el sobre-impulso cuando $q_d = 90^\circ$ donde la sintonía basada en Kelly y Santibáñez (2003) obtuvo un mejor resultado en un 0.1%.

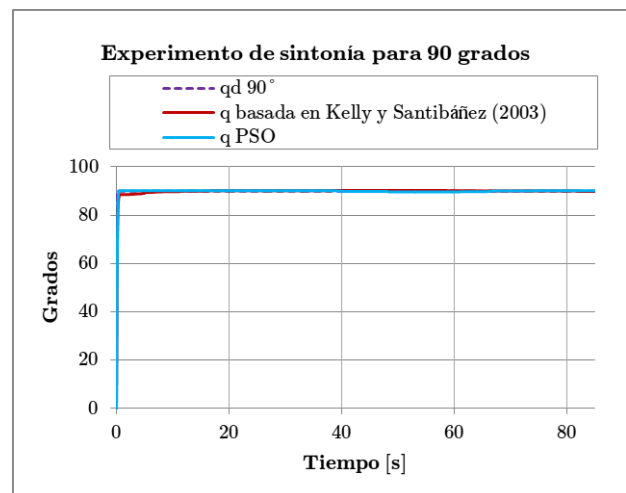
IV-B. Evaluación experimental

Para el experimento se utilizó el equipo SRV02 de la marca Quanser, bajo la configuración mostrada en la figura 9 como posición inicial, colocando la barra de carga en su punto medio sobre el eje de carga. Posteriormente se colocó el disco sobre uno de los extremos de la barra de carga, el cual se posicionó sobre la marca de 0° situada en el cuerpo metálico del equipo. La cara del equipo donde sobresale el eje de carga se colocó de manera vertical, quedando situado el disco apuntando hacia el suelo. Para la toma de datos de posición y la velocidad del disco, se utilizó el encoder integrado en el equipo (US Digital S1) [16]. Después de cada ejecución el equipo fue colocado en la posición inicial.



Figura 9. SRV02 de Quanser como articulación motriz pendular

A continuación se muestran los resultados experimentales cuando $q_d = 90^\circ$, donde las figuras 10 y 11 representan las respuestas del sistema, en la primera se observa el registro completo de los 85 segundos de muestreo de q y la segunda es un acercamiento a los primeros 2 segundos del muestreo de q . La tabla VI y la figura 12 representan las evaluaciones y la comparativa de las respuestas de los dos métodos de sintonía respectivamente. De igual manera para el caso donde $q_d = 45^\circ$, las figuras 13 y 14 representan las respuestas del sistema, mientras la tabla VII y la figura 15 representan las evaluaciones y la comparativa de las respuestas respectivamente.


 Figura 10. Experimento de sintonía para 90° (85 segundos)

Cabe destacar que como se muestra en las tablas VI y VII la magnitud de los voltajes máximos medidos utilizando la sintonía PSO no excede el voltaje nominal del equipo (6 [V])

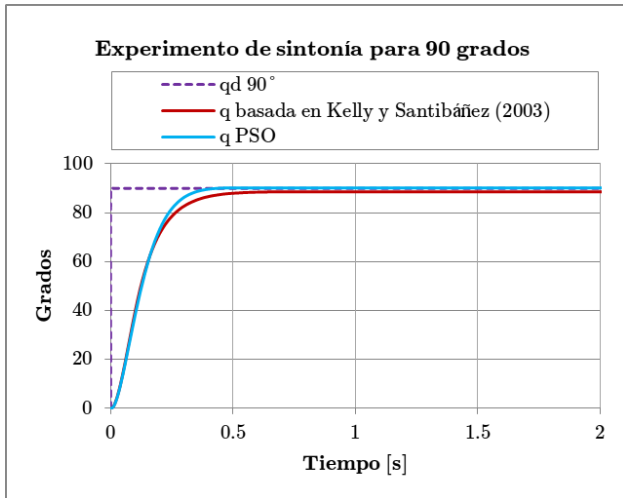


Figura 11. Experimento de sintonía para 90° (2 segundos)

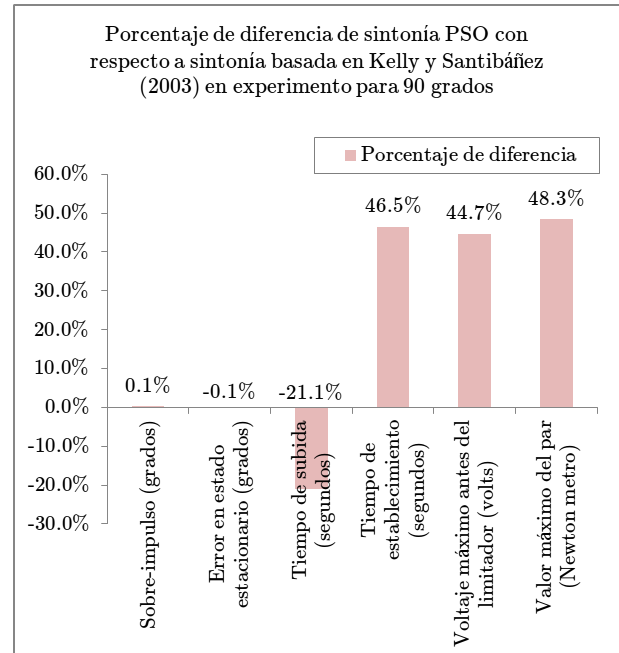


Figura 12. Comparativa del experimento para 90°

Tabla VI
EVALUACIÓN DEL EXPERIMENTO DE SINTONÍA PARA 90°

| Experimento de sintonía para 90° | | |
|--|-------------------------------------|-------|
| Criterios de desempeño del controladora | Método de sintonía | |
| | Basado en Kelly y Santibáñez (2003) | PSO |
| Sobre-impulso (grados) | 0.308 | 0.176 |
| Error en estado estacionario (grados) | 0.110 | 0.176 |
| Tiempo de subida (segundos) | 0.17 | 0.21 |
| Tiempo de establecimiento (segundos) | 0.53 | 0.33 |
| Voltaje máximo antes del limitador (volts) | 9.319 | 5.913 |
| Valor máximo del par (Newton metro) | 1.179 | 0.72 |

Tabla VII
EXPERIMENTO DE SINTONÍA PARA 45°

| Experimento de sintonía para 45° | | |
|--|-------------------------------------|-------|
| Criterios de desempeño del controlador | Método de sintonía | |
| | Basado en Kelly y Santibáñez (2003) | PSO |
| Sobre-impulso (grados) | 0.33 | 0.154 |
| Error en estado estacionario (grados) | 0 | 0.44 |
| Tiempo de subida (segundos) | 0.18 | 0.15 |
| Tiempo de establecimiento (segundos) | 0.29 | 0.28 |
| Voltaje máximo antes del limitador (volts) | 6.217 | 5.948 |
| Valor máximo del par (Newton metro) | 0.786 | 0.752 |

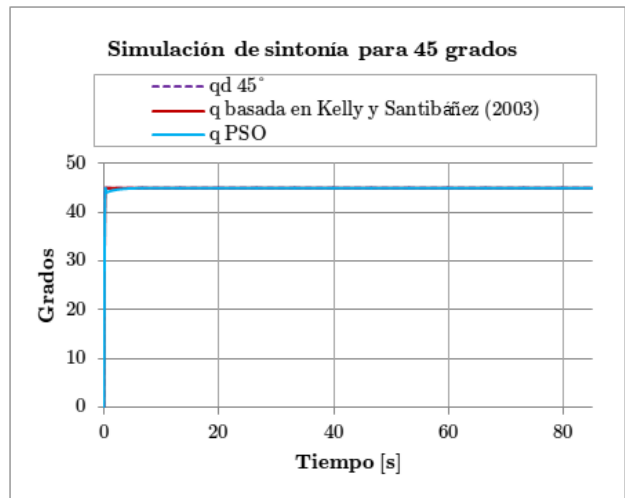


Figura 13. Experimento de sintonía para 45° (85 segundos)

a diferencia de cuando se aplicó la sintonía basada en Kelly y Santibáñez (2003) que si lo excede.

Como se puede observar en las comparativas de las figuras 12 y 15 la sintonía PSO obtuvo mejores resultados en la mayoría de los criterios de desempeño excepto en el error en estado estacionario y el sobre-impulso cuando $q_d = 90^\circ$ donde la sintonía basada en Kelly y Santibáñez (2003) obtuvo un mejor resultado en un 0.1 y 21.1 respectivamente, y en el error en estado estacionario cuando $q_d = 45^\circ$ donde la sintonía basada en Kelly y Santibáñez (2003) obtuvo un mejor resultado en un 0.1.

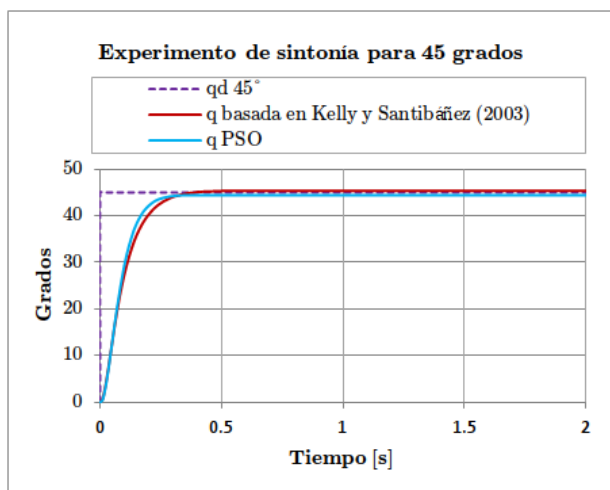


Figura 14. Experimento de sintonía para 45° (2 segundos)

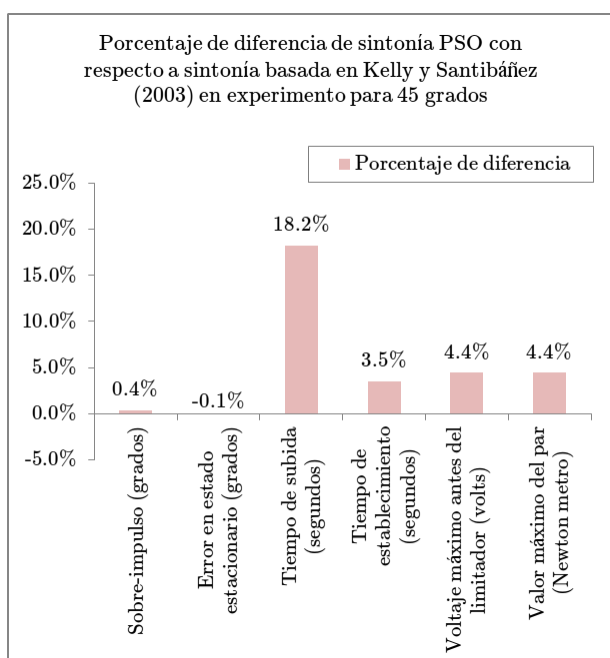


Figura 15. Comparativa del experimento para 45°

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró que la estrategia de sintonía mediante PSO con el esquema de aptitud presentado en la subsección III-A, obtuvo mejores resultados en la mayoría de los criterios de desempeño, que la sintonía que utilizaba las propiedades establecidas por Kelly y Santibáñez (2003) [7] en simulaciones y experimentos, como se muestra en las graficas comparativas de las figuras 5, 8, 12 y 15.

La inclusión de la magnitud del voltaje y el voltaje nominal como un índice de desempeño muestra que se puede lograr una sintonía adecuada, que permite a una articulación motriz pendular cumplir con $q_d = 90^\circ$ y $q_d = 45^\circ$ sin la necesidad

de sobrepasar el voltaje nominal.

Queda para futuras investigaciones llevar a cabo la sintonía de controladores PID aplicados en la regulación de posición de robots tipo articulación motriz pendular, con un mayor número de grados de libertad, la implementación de técnicas de optimización heurísticas multi-objetivo que permita realizar la sintonía tomando en cuenta una serie de funciones de aptitud de manera simultánea, que sea capaz de encontrar un conjunto de soluciones no dominadas [8], y comparar la estrategia con otros métodos de sintonía establecidos dentro del área de la ingeniería de control.

VI. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindar su apoyo a través de la beca para estudios de maestría y permitir la elaboración a tiempo completo de esta investigación. Así mismo se agradece al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico de la Paz (ITLP) por facilitar el equipo para las pruebas experimentales.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Azar, S. L. Martínez, E. E. Tarifa, S. F. Domínguez, J. J. Gutiérrez, y E. Arte, "Sintonía de Controladores Inteligentes Mediante Estrategia Híbrida Fuzzy-PSO Contexto," *Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, pp. 830–836, 2016.
- [2] L. Santos, F. Durand, y T. Abrão, "Sintonía adaptativa de algoritmos PID de controle de potência em redes ng-pon baseado em PSO," in *Anais de XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. São Pedro: Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2017, pp. 3–6. [Online]. Disponible en: <http://biblioteca.sbrt.org.br/articles/441>
- [3] R. Valerdi, "Heuristics for systems engineering cost estimation," *IEEE Systems Journal*, vol. 5, pp. 91–98, mar 2011. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5556044/>
- [4] C. Blum y A. Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization," *ACM Computing Surveys*, vol. 35, no. 3, pp. 268–308, sep 2003. [Online]. Disponible en: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/937503.937505>
- [5] J. Kennedy y R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4. Perth: IEEE, 1995, pp. 1942–1948. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/488968/>
- [6] O. Arrieta Orozco y V. M. Alfaro Ruíz, "Sintonización de controladores PI y PID utilizando los criterios integrales IAE e ITAE," *Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 13, no. 1-2, jul 2011. [Online]. Disponible en: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/618>
- [7] R. Kelly y V. Santibáñez, *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*, Madrid, 2003.
- [8] M. Clerc, "The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, vol. 3. Washington: IEEE, 1999, pp. 1951–1957. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/785513/>
- [9] J. A. Morales Viscaya, A. Rochín Ramírez, M. A. Castro Liera, y J. A. Sandoval Galarza, "AG y PSO como métodos de sintonía de un PID para el control de velocidad de un motor CD," *Nuevos avances en robótica y computación*, pp. 81–87, 2015. [Online]. Disponible en: <http://posgrado.itlp.edu.mx/CIRC2015/CIRC2015.pdf>
- [10] S. GirirajKumar, D. Jayaraj, y A. Kishan, "PSO Based Tuning of a PID Controller for a High Performance Drilling Machine," *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, no. 19, pp. 12–18, 2010.
- [11] L. H. S. De Andrade, B. L. G. Costa, y B. A. Angélico, "PSO aplicado a sintonía do controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didáctica industrial." Fortaleza: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013, p. 6. [Online]. Disponible en: <https://docplayer.com.br/6043150-Poso-aplicado-a-sintonia-do-controlador-pi-pid-da-malha-de-nivel-de-uma-planta-didatica-industrial.html>

- [12] Z. Jun y Z. Kanyu, "A particle swarm optimization approach for optimal design of PID controller for temperature control in HVAC," *Proceedings - 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2011*, vol. 1, no. 2, pp. 230–233, 2011.
- [13] T. T. Tay, I. M. Y. Mareels, y J. B. Moore, *High Performance Control*, ser. Systems and Control: Foundations and Applications. Boston: Birkhauser, 1997.
- [14] A. B. d. S. Serapião, "Busca harmônica aplicada à sintonia automática de controladores pid a," *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, vol. X, pp. 99–104, 2011. [Online]. Disponible en: <https://fei.edu.br/sbai/SBAI2011/81013.pdf>
- [15] A. Oi, C. Nakazawa, T. Matsui, H. Fujiwara, K. Matsumoto, H. Nishida, J. Ando, y M. Kawaura, "Development of PSO-based PID tuning method," in *2008 International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2008*. Tokyo: IEEE, oct 2008, pp. 1917–1920. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4694410/>
- [16] QUANSER, "Rotatory motion servo plant: SRV02 user manual," p. 31, 2008. [Online]. Disponible en: <http://www2.hawaii.edu/~gurdal/EE351L/srv02.pdf>