

Núcleo Híbrido de Transición de Estados, una metodología de control inteligente implementada en un robot tipo PUMA

Ruiz Ascencio José, Alcocer Rosado Wilberth Melchor, Figueroa Díaz Rafael Alfonso
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (www.cenidet.edu.mx)
Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.

Resumen

En este artículo se presenta la metodología del Núcleo Híbrido de Transición de Estados (NHTE) para la identificación y control de un sistema físico, asimismo, se comparan los resultados del desempeño de un controlador tipo PID contra el desempeño de un controlador utilizando la metodología del NHTE, ambos implementados en las articulaciones de la cintura y hombro de un brazo robótico de tres grados de libertad, tipo PUMA.

Palabras clave: metodología NHTE, control PID, robot tipo PUMA, desempeño de un controlador.

1. Introducción

La metodología del Núcleo Híbrido de Transición de Estados (NHTE) nació en el área de las Ciencias Computacionales del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet), utiliza herramientas de la inteligencia artificial, permite identificar y controlar un sistema dinámico, basada en el concepto de función de transición de estados para el caso particular en que los tiempos de muestreo y los valores de entrada son constantes (en cada período de muestreo) y que requiere de un proceso de sintonización de parámetros que usualmente se ha realizado mediante redes neuronales o lógica difusa.

La metodología del NHTE puede resumirse en tres fases fundamentales: i) adquisición de datos, ii) sintonización y iii) control, las cuales se comentarán más adelante, en el punto 5.

2. Objetivo

Implementación de la metodología del NHTE para el control desacoplado del seguimiento de trayectorias de las articulaciones de la cintura y hombro de un brazo robótico tipo PUMA y la comparación de su desempeño referido al de un controlador tipo PID.

3. Brazo robótico tipo PUMA

La construcción del brazo se realizó en el CNAD (Centro Nacional de Actualización Docente en Mecatrónica), se decidió llamarlo “Gorgorito”, (Figura 1), se tuvo como referencia la arquitectura del PUMA 200 de UNIMATE y para su diseño se utilizó el software de CAD SolidWorks® [1].



Figura 1. PUMA Gorgorito.

3.1 Estructura

El brazo no cuenta con efector final, por lo que tiene solamente tres GDL, tiene sus mecanismos al descubierto a modo de poder observarlos.

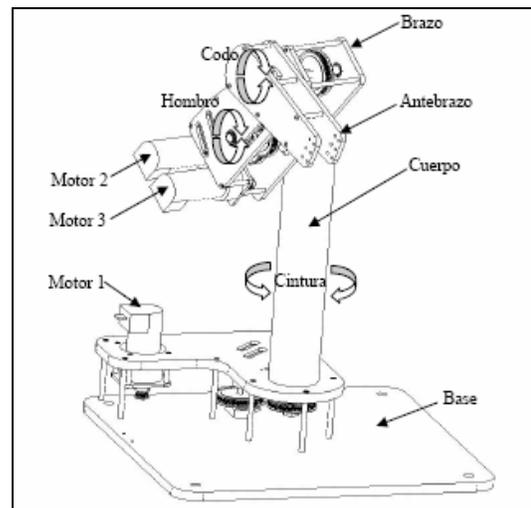


Figura 2. Eslabones, articulaciones y motores del brazo.

3.2 Modelo cinemático directo

Para el obtención del modelo cinemático directo del prototipo se utilizaron los criterios y convenciones de Denavit-Hartenberg, los parámetros y sus valores se muestran en la figura 3 y la tabla 1.

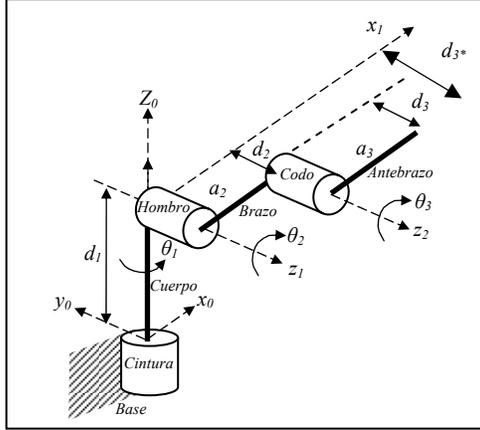


Figura 3. Estructura del prototipo y sus parámetros.

Tabla 1. Valores de los parámetros DH				
Eslabón	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	90°	d_1 (350 mm)	θ_1
2	a_2 (150 mm)	0°	d_2 (100 mm)	θ_2
3	a_3 (150 mm)	0°	d_3 (60 mm)	θ_3

Una vez identificados los parámetros, se pueden obtener las matrices de transformación de cada uno de los eslabones, T_0^1 , T_1^2 y T_2^3 ; y con ellas la siguiente matriz de transformación homogénea, en donde $C_i = \text{Cos}\theta_i$ y $S_i = \text{Sen}\theta_i$ [2]

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} C_1(C_2C_3 - S_2S_3) & -C_1(C_2S_3 + S_2C_3) & S_1 & a_3(C_1C_2C_3 - C_1S_2S_3) + d_3S_1 + a_2C_1C_2 + d_2S_1 \\ S_1(C_2C_3 - S_2S_3) & -S_1(C_2S_3 + S_2C_3) & -C_1 & a_3(S_1C_2C_3 - S_1S_2S_3) - d_3C_1 + a_2S_1C_2 - d_2C_1 \\ S_2C_3 + C_2S_3 & C_2C_3 - S_2S_3 & 0 & a_3(S_2C_3 + C_2S_3) + a_2S_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Por lo que, conociendo los valores de θ_1 , θ_2 y θ_3 , es posible calcular la posición del extremo del eslabón 3 mediante las siguientes ecuaciones:

$$p_x = a_3(C_1C_2C_3 - C_1S_2S_3) + d_3S_1 + a_2C_1C_2 + d_2S_1 \quad (2)$$

$$p_y = a_3(S_1C_2C_3 - S_1S_2S_3) - d_3C_1 + a_2S_1C_2 - d_2C_1 \quad (3)$$

$$p_z = a_3(S_2C_3 + C_2S_3) + a_2S_2 + d_1 \quad (4)$$

4. Implementación del control de posición PID

Para el control de posición del brazo, se implementó un control PID de manera independiente en las tres articulaciones (cintura, hombro y codo). Las dinámicas de las otras articulaciones se consideran perturbaciones (p_k) que el PID compensa (figura 4) [3].

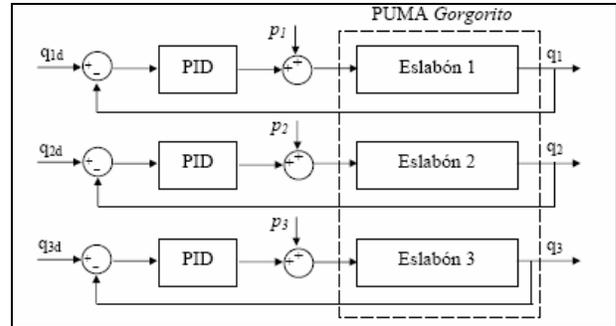


Figura 4. Control de posición PID en cada articulación.

El tipo de trayectoria generada en cada articulación para alcanzar la posición final deseada, fue el LSPB (Linear Segments with Parabolic Blends). La trayectoria LSPB es tal que la velocidad se incrementa inicialmente a un valor específico, se mantiene constante y después se disminuye hasta alcanzar la posición final (Figura 5).

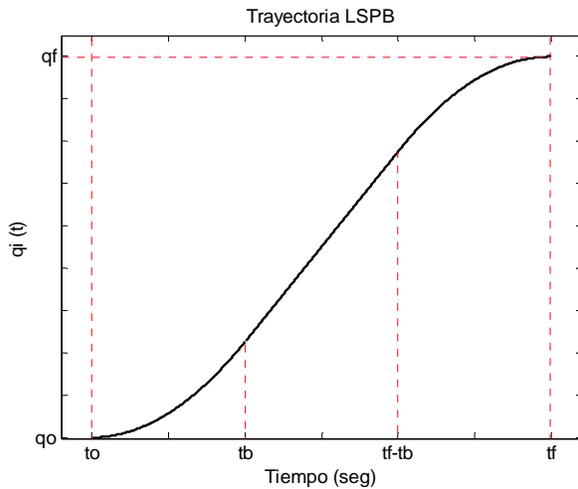


Figura 5. Trayectoria LSPB, gráfica posición-tiempo.

Con el control PID implementado, se lograron elaborar rutinas de seguimiento con movimientos simultáneos de 90° de amplitud en las tres articulaciones, así como movimientos simultáneos sinusoidales modulados en amplitud, siendo 90° la máxima amplitud, como se muestra en la siguiente figura.

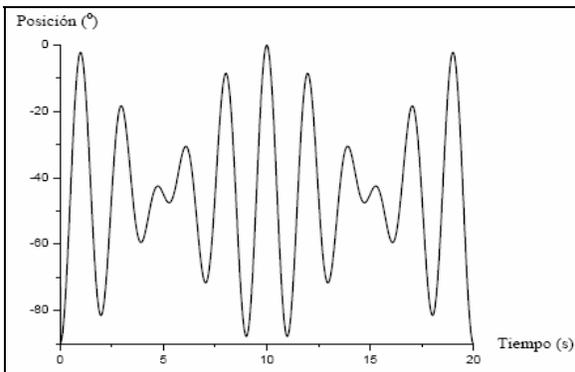


Figura 6. Señal sinusoidal modulada en amplitud.

5. Descripción de la metodología NHTE

Es una metodología que usa herramientas de la inteligencia artificial, que permite identificar y controlar un sistema dinámico, basada en el concepto de función de transición de estados para el caso particular en que los tiempos de muestreo y los valores de entrada son constantes (en cada período de muestreo). Requiere de un proceso de sintonización de parámetros que usualmente se ha realizado mediante redes neuronales o lógica difusa; se trata de un esquema de aproximación discreta a sistemas dinámicos invariantes que pueden ser discretos o continuos [4].

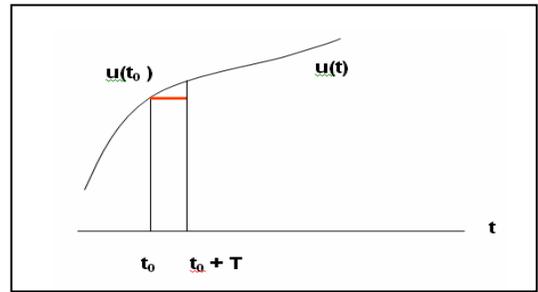


Figura 7. Las entradas del sistema se restringen a ser constantes en cada intervalo de muestreo.

La metodología del NHTE puede resumirse en tres fases fundamentales:

5.1 Fase de adquisición de datos

En esta etapa se requiere estimular la planta para obtener sus respuestas y capturar algunos datos intrínsecos a su dinámica. El sistema se supone observable, y debe conocerse su orden y especificarse un tiempo de muestreo sobre el cual hay considerable flexibilidad.

Se muestrearon datos de la dinámica de la planta cada 20 ms siguiendo la trayectoria LSPB generada con el control de posición PID, es decir, se adquirieron los datos que la planta genera (posición, velocidad y error) a causa de su propia dinámica.

La información obtenida debe ser suficiente para estimar el estado del sistema. En este caso se tomaron como datos de entrenamiento ternas de valores de error, velocidad angular y voltaje ($e, \dot{\theta}, V$), con los dos primeros como antecedentes y el último como consecuente o salida, en una gráfica como la de la figura 8.

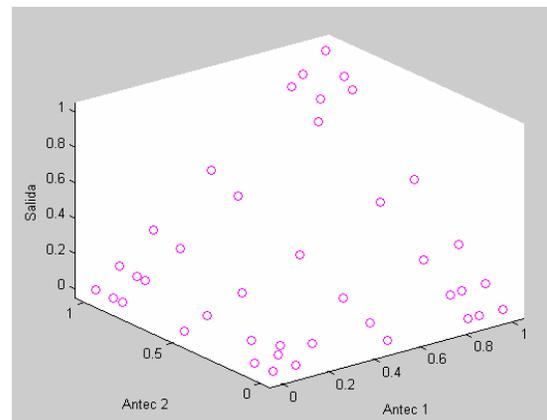


Figura 8. Gráfica de los datos de entrenamiento que representan el comportamiento de una planta.

5.2 Fase de sintonización

Esta fase está orientada a identificar el controlador tomando como información fuente los datos de la sección anterior. El objetivo es aproximar los datos adquiridos mediante función que tomando como argumentos cualquier estado inicial y cualquier consigna, nos entregue el esfuerzo de control que logre dicha transición de estado. Esto es posible mediante los llamados “aproximadores universales”: redes neuronales, lógica difusa y otros.

La sintonización del controlador difuso se hizo con la herramienta computacional desarrollada en la tesis de Castillo [5], la cual se aplica a sistemas MISO haciendo uso del algoritmo de Nomura [6], que sintoniza el peso de las reglas, las bases y los centros de los conjuntos difusos por medio del método de gradiente descendente.

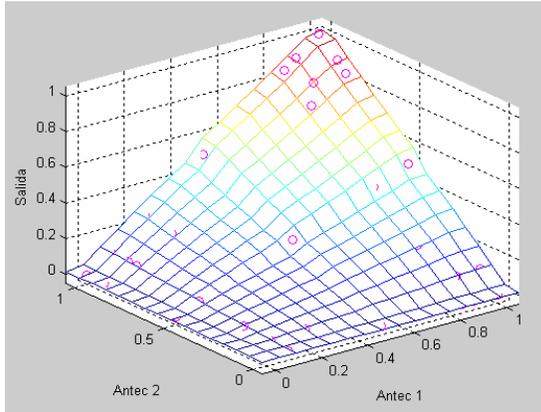


Figura 9. Representación gráfica de una función de aproximación.

5.3 Fase de control

En esta fase la intención es hacer uso de la función difusa obtenida en la fase anterior para controlar la planta. El estado del robot como sistema dinámico se aproxima a partir de mediciones sucesivas de su posición. La consigna es el producto de un generador de trayectorias descrito más adelante.

Se trata de un proceso mediante el cual los argumentos de la función, de tipo preciso, son transformados a valores difusos, posteriormente se evalúan las reglas de tipo Sugeno de la base de reglas del sistema, y finalmente, el resultado del conjunto se convierte a un valor de tipo preciso mediante el método de centroide, el cual representa la acción del control difuso; estos procesos, y el control PID, fueron programados en lenguaje C.

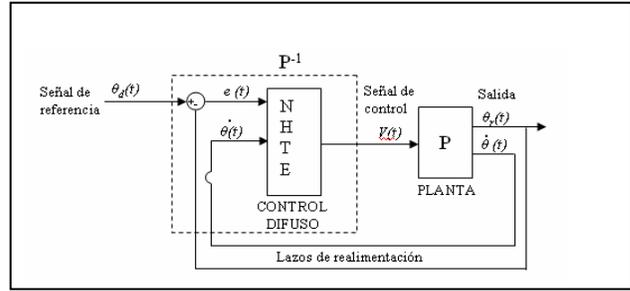


Figura 10. Control difuso NHTE basado en modelo inverso.

6. Señales de entrenamiento utilizadas

Para el caso particular del brazo robótico tipo PUMA con que se trabajó, con el objeto de obtener los datos de entrenamiento de las articulaciones de la cintura y el hombro, se implementaron diversas señales de consigna, con la intención de capturar la dinámica de la planta y que en la muestra de datos se incluyera una amplia combinatoria de estados de la planta y entradas. No es fácil garantizar una cobertura uniforme de un espacio de trabajo dado, y fue necesario experimentar señales con diversas amplitudes y frecuencias, de tal forma que las señales con que se trabajaron en la fase de adquisición son las que se muestran en las figuras 11 y 12 [7].

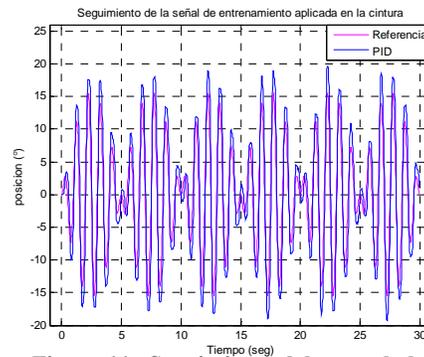


Figura 11. Seguimiento del controlador PID con consigna sinusoidal en cintura.

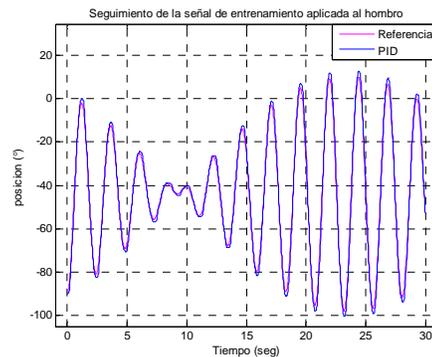


Figura 12. Seguimiento del controlador PID con consigna sinusoidal en hombro.

7. Análisis de resultados

Las pruebas realizadas con el control PID comprenden las tres articulaciones, mientras que las realizadas con el controlador difuso NHTE corresponden a las articulaciones de la cintura y el hombro, en todos los casos se trata de control desacoplado, es decir, solamente se considera la dinámica de la articulación correspondiente, las interacciones con las otras articulaciones y eslabones del sistema se consideran únicamente como perturbaciones.

Se realizó un número considerable de pruebas tanto con el control PID como con el control NHTE en las articulaciones de la cintura y el hombro, por restricciones de espacio, en este trabajo únicamente se comparan dos resultados, obtenidos en las articulaciones de hombro y cintura. El hombro tiene la dinámica más compleja, por el efecto de la gravedad.

En las figuras 13 y 14 se muestran los seguimientos y errores de seguimiento a una misma señal de tipo LSPB con un control PID y con un control NHTE, respectivamente.

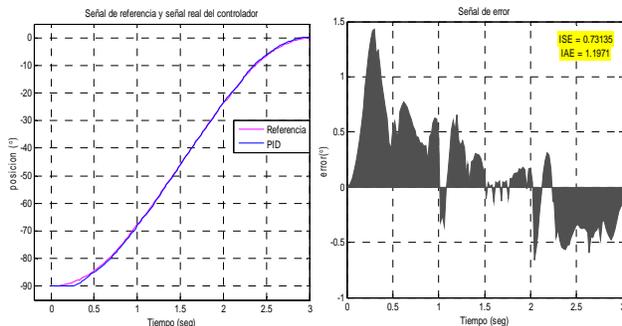


Figura 13. Seguimiento del controlador PID en el hombro bajo consigna LSPB y error de seguimiento.

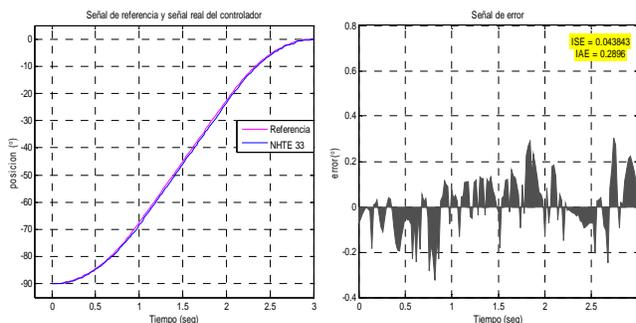


Figura 14. Seguimiento del controlador NHTE 33 en el hombro bajo consigna LSPB y error de seguimiento.

En el seguimiento de la consigna LSPB con control PID de la Figura 13, la cintura permaneció fija, obteniendo a los 3 seg. un error en estado estable de -0.1555° e índices de error $ISE=0.7313$ e $IAE=1.1971$; bajo las mismas circunstancias, el seguimiento con el controlador NHTE 33 presenta un error en estado estable de 0.0951° a los 3seg., y sus índices de error son: $ISE=0.043$ e $IAE=0.289$.

Para simular trayectorias en los límites de rendimiento de los controladores, se usaron señales sinusoidales, en las figuras 15 y 16 se muestran los seguimientos y errores de seguimiento a una misma señal de tipo sinusoidal con un control PID y un control NHTE en la articulación de la cintura.

Una comparación a la misma frecuencia, pero en el hombro, ya no es posible porque el control PID no es capaz de seguir la consigna.

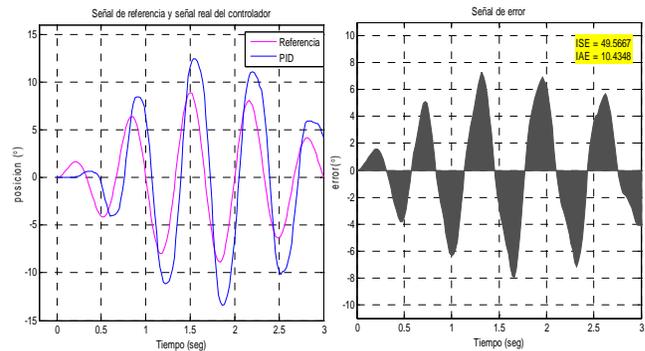


Figura 15. Seguimiento del controlador PID en la cintura bajo consigna sinusoidal y error de seguimiento.

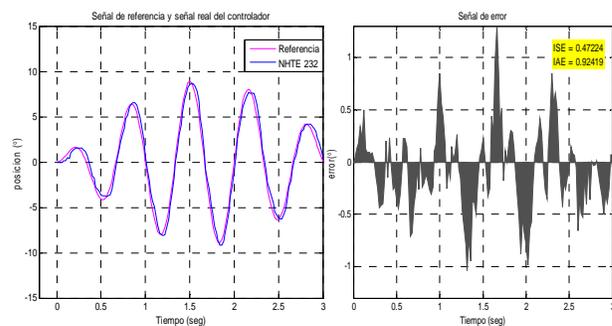


Figura 16. Seguimiento del controlador NHTE 232 en la cintura bajo consigna sinusoidal y error de seguimiento.

Para el caso de la figura 15, el experimento se realizó teniendo en cintura una consigna sinusoidal, mientras que el hombro permaneció fijo en posición vertical hacia abajo, obteniendo un error en estado estable a un tiempo de 3 seg. de -4.1392° y los índices de error son $ISE=49.5667$ e

IAE=10.4348, mientras que en el controlador NHTE 232 de la figura 16 presenta un error en estado estable de -0.0975° a los 3 seg., e índices de error ISE=0.4722 e IAE=0.9242[7].

8. Conclusiones

En este trabajo se presentan algunos resultados obtenidos mediante la implementación de un controlador PID y de la metodología del NHTE para el control desacoplado de seguimiento de trayectoria de las articulaciones de la cintura y el hombro de un brazo robótico de tres grados de libertad, tipo PUMA. El control PID tiene el doble papel de permitir tomar datos de entrada –salida y de servir de referencia para evaluar el comportamiento del control inteligente.

Resulta importante que la señal de entrenamiento que se utiliza para estimular la planta y con ello capturar su dinámica sea tal que incluya una combinatoria extensa y diversa en términos de los estados y salidas de la planta, reflejándose esto en una mejor identificación y sintonización de la planta.

Se compara el desempeño de la planta, con base en índices de error ISE e IAE, con un controlador PID y un controlador implementado mediante la metodología NHTE y se observa un mejor desempeño del control difuso NHTE a medida que las señales de consigna aumentan su frecuencia. Esto es una consecuencia del gran ancho de banda que tiene un control no lineal cuyo objetivo es alcanzar la consigna al final de cada tiempo de muestreo.

La metodología propuesta está basada en primeros principios de la formulación de espacio de estados, ha sido probada en el control de una variedad de sistemas simulados y físicos y es independiente de la herramienta de aproximación. En este trabajo se comprueba que es una alternativa práctica para un control de alto rendimiento para robots, sin conocer ninguno de sus parámetros, a condición sólo de tener una buena muestra de datos de entrada y salida.

9. Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen sinceramente la promoción recibida de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, para el desarrollo del mismo, a través del apoyo financiero otorgado al proyecto de investigación con clave 443.05-P.

Referencias

- [1] Bautista R., Jiménez D, Ramírez J. “*Construcción, caracterización y control de un brazo tipo PUMA de tres GDL*”, Congreso anual de la AMCA, 2004.
- [2] Spong M., Vidyasagar M., “*Robot dynamics and control*”, EUA, John Wiley & Sons, 1989, 336 p.
- [3] Jiménez D, Ramírez J., “*Construcción de un brazo robótico de tres GDL y su control mediante el núcleo híbrido de transición de estados*”, Tesis para la obtención del grado de M.C. en Ingeniería Mecatrónica, Cenedet, febrero 2005.
- [4] Ruiz J., Castillo R., “*Self-Tuning Fuzzy Identification and Control Using a Hybrid State Transition Kernel*”, CIMCA 1999, International Conference on Computational Intelligence for Modeling and Control, Viena, Austria, febrero 1999.
- [5] Castillo R., “*Sintonización de controladores difusos basada en el método de gradiente descendente*”, Tesis para la obtención del grado de M.C. en Ciencias Computacionales, Cenedet, mayo 1999.
- [6] Nomura H, Hayashi I, Wakami N. “*A learning method of fuzzy inference rules by descent method*”, Proceedings IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp 203-210, San Diego, Cal., USA, march 1992.
- [7] Figueroa R., “*Control inteligente vía NHTE en un robot de 3 GDL*”, Tesis para la obtención del grado de M.C. en Ingeniería Mecatrónica, Cenedet, mayo 2007.