

# Robot educativo de bajo costo que interpretamelodías enpiano

## Low Cost Educational Robot Interpreter of Melodies on Piano

Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2012  
Fecha de aprobación: 4 de diciembre de 2012

Yeison Alberto Buitrago Suescún\*  
Jennyfer Consuelo Prieto Ramírez\*\*  
César Augusto Peña Cortés\*\*\*

### Resumen

Presenta el diseño de un robot educacional que interpreta melodías en un piano. El propósito principal de este robot es servir como instrumento de prácticas en materias relacionadas con fundamentos de robótica, especialmente en los temas de análisis cinemático. Su control se implementó en el software Matlab, que es de uso común en las universidades. Los materiales y equipos utilizados para su implementación son de fácil adquisición y bajo costo, con el fin de que pueda ser replicado fácilmente por un estudiante. La aplicación del intérprete de melodías en un piano estimula a los estudiantes desde edades tempranas a incursionar en esta área tan importante.

**Palabras clave:** Robótica, Música, Educación.

### Abstract

It presents an educational robot's design, which interprets melodies on piano. The robot is very useful, as a test instrument on similar subjects with robotics fundamentals, especially in kinematic analysis. The robot control was implemented on Matlab which is commonly used software at universities. The materials and equipment used for the implementations are easy to acquire and at low cost, which helps to be replicated easily by any student. The applications on piano by the melodies interpreter stimulate students from early ages to engage in this important area.

**Keywords:** Robotics, Music, Education.

\* Ingeniero Mecatrónico (c), Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona – Colombia. yeison\_buitragos@hotmail.com  
\*\* Ingeniero Mecatrónico (c), Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona – Colombia. jenny\_prieto88@hotmail.com  
\*\*\* Ph.D. Automática y Robótica, M.Sc. Ingeniería Electrónica y de Computadores, Ing. Electromecánico, Grupo de Automatización y Control (A&C), Profesor asociado Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona – Colombia. cesarapc@unipamplona.edu.co

## I. INTRODUCCIÓN

La robótica es una ciencia que estudia el diseño y la construcción de máquinas capaces de realizar tareas que comúnmente hace el ser humano (caminar, bailar, escribir, dibujar, tocar instrumentos musicales y correr, entre otras) o labores en las cuales se afecte la salud o integridad física de las personas. Además, existen tareas que un robot realiza con mayor nivel de exactitud y efectividad, por lo que son utilizados en la industria, en pos de incrementar la producción. Por esta razón se han creado diferentes tipos de estructuras robóticas, como el SCARA, antropomórfico, cilíndrico y el delta, entre muchos otros, teniendo en cuenta las tareas por realizar y el área de trabajo disponible.

Los robots en el mundo han tenido un crecimiento muy importante, ya que están siendo utilizados en otros campos, como la medicina, la exploración, el entretenimiento, la construcción, la vigilancia, el servicio, la agricultura y el rescate, entre otros.

En cuanto a robots musicales, se presume que en nuestro país no se ha desarrollado ningún prototipo, sin embargo, existen aplicaciones creadas en otros países, tal es el caso del robot antropomórfico flautista, creado por la Universidad de Waseda, Japón, [1], [2], el cual también es capaz de interpretar el saxofón [3], [4]. Además, se han desarrollado robots capaces de bailar, como el robot bailarín financiado por la Academia China de Ciencias, cuya función es seguir el ritmo de las diferentes señales musicales que recibe [5]; en esta categoría también se encuentran el robot bípedo de Honda «Asimo», que es un robot humanoide al cual se le implementaron oídos que le permiten percibir los sonidos de su entorno de tal manera que baila dependiendo de los ritmos musicales que escuche [6]; otro ejemplo de robot bailarín es el robot humanoide HRP-2, presentado en la conferencia internacional sobre robots y sistemas inteligentes [7]. Las aplicaciones de los robots musicales son diversas y pueden llegar a tener gran complejidad; es el caso de los robots para la enseñanza musical, como el creado por la Universidad Nacional de Educación

Chungbuk, Corea [8]. Este tipo de robots pueden llegar a ser de gran importancia, debido a que pueden ser utilizados como alternativa de entretenimiento o para fines académicos.

En este artículo se propone el desarrollo de un robot de bajo costo y fácil replicación e implementación, con fines académicos, que permita a los estudiantes fortalecer conceptos básicos y fundamentales en robótica, tales como cinemática directa, cinemática inversa, espacio de trabajo, planeación de trayectorias y control cinemático, estimulándolos por medio de una aplicación lúdica.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección II se presenta la descripción del robot propuesto; en la sección III, las generalidades del diseño mecánico; en la IV, el análisis cinemático; en la V, el diseño electrónico, y por último, los resultados y las conclusiones, en la VI y VII, respectivamente.

## II. DESCRIPCIÓN DEL ROBOT

El robot propuesto es un brazo de tipo antropomórfico (ver Fig. 1), con cuatro grados de libertad, los cuales proporcionan los movimientos básicos e independientes; sus cuatro articulaciones son rotacionales y sus actuadores son eléctricos (servomotores); se optó por este tipo de robot debido a que se adapta a cualquier área de trabajo y por ser el más versátil, ya que para la aplicación es necesario que este tenga rapidez en la ejecución de los movimientos; además, este tipo de estructura es la más utilizada en robótica industrial, según la Federación Internacional de Robótica (IFR), por lo cual es uno de los robots que los estudiantes deben tener más presentes y dominar con facilidad.

Se tuvieron en cuenta tres componentes principales:

- Estructura mecánica
- Circuitos electrónicos
- Software

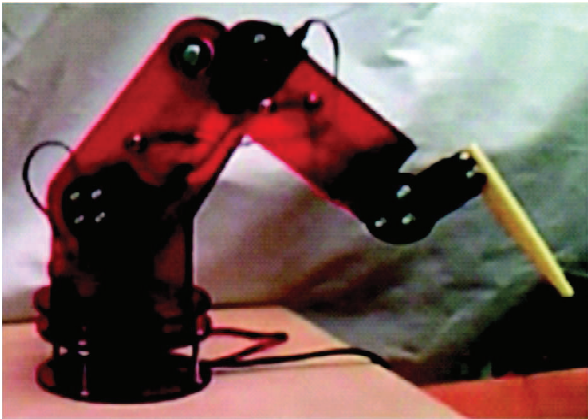


Fig.1. Modelo real brazo robótico

Para el control de los servomotores (motores de uso común en cursos de electrónica) se realizó el código en el software Matlab®, en donde se ingresan, por medio de una matriz, las notas musicales de cualquier partitura y el tiempo en que cada nota permanece presionada. Posteriormente, mediante el análisis cinemático, se calculan los ángulos de rotación correspondientes para cada una de las articulaciones de acuerdo con la nota musical requerida para que el efector final interprete correctamente las notas musicales de la partitura. En la Fig. 1 se muestra la forma como se encuentra estructurado el algoritmo de control, ilustrando las etapas en que se encuentra dividido el programa.

### III. DISEÑO MECÁNICO

La forma general del diseño obedece a una estructura de un robot antropomórfico. En la Fig. 1 se muestra el modelo real del brazo robótico, que consta de cuatro grados de libertad o articulaciones de tipo rotacional, las cuales son controladas por medio de 4 servomotores (*hexTronik, HX12K*) que permiten su movimiento, el cual tiene un rango de movimiento de 180 grados de rotación. Para su diseño se utilizó la herramienta computacional Solid Edge.

La estructura mecánica está diseñada por medio de eslabones de acrílico (material bastante económico, liviano, reciclable y de fácil adquisición) que se

encuentran acoplados a los ejes de rotación de los servomotores correspondientes a cada articulación. En el momento en que se acoplaron se tuvo en cuenta en dónde iniciaba y finalizaba la rotación del eje del servomotor, para que cuando este se uniera con el eslabón, el ángulo que pudiera girar fuera el máximo que el servomotor permite. Para el efector final se utilizó una barra que permite presionar las teclas del piano según la melodía.

En la Fig. 3 se puede observar el modelo virtual del brazo robótico. Se debe recalcar que es un diseño bastante simple, esto con el fin de que su construcción y replicación puedan ser realizadas por una persona con bajos conocimientos en el tema en un corto tiempo.

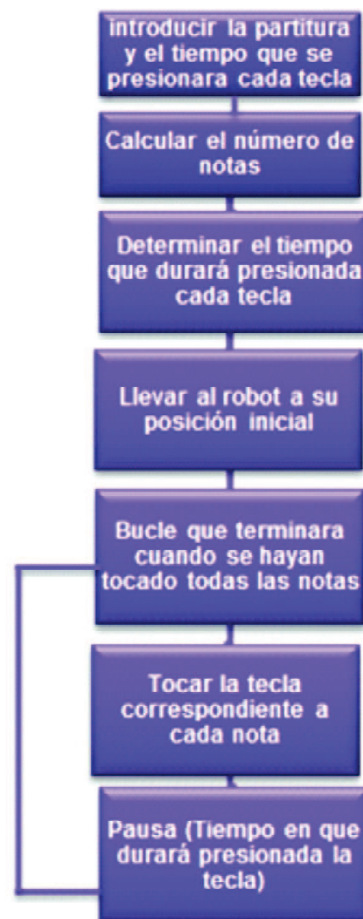


Fig. 2. Estructura del algoritmo de control

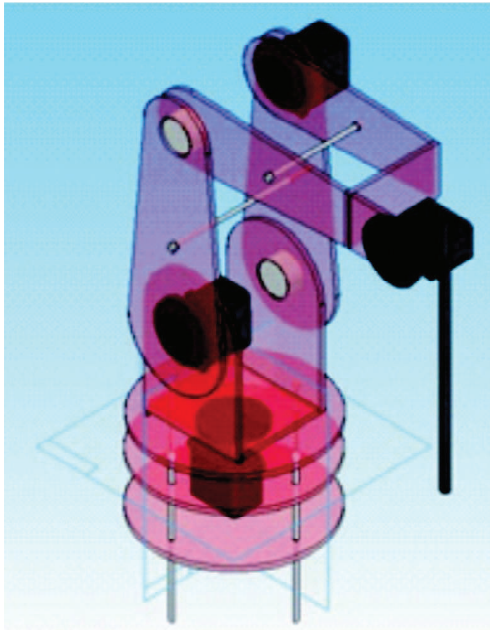


Fig.3. Modelo virtual del brazo robótico

IV. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL BRAZO ROBÓTICO

A. Cinemática directa

El objetivo de la cinemática directa es encontrar la posición y orientación del efector final (extremo del robot) con respecto a un sistema de referencia coordinado, conociendo los valores de las coordenadas articulares y las dimensiones de los eslabones del robot, ya sea mediante métodos geométricos, teoría de *screws* o métodos basados en cambios de base (Denavit-Hartenberg).

Para realizar el análisis cinemático directo es necesario ubicar los sistemas coordinados tanto del sistema de referencia como el de las articulaciones; en la Fig. 4 se puede observar el diagrama esquemático del robot con la distribución de ejes coordinados; posterior a esto se determinan los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) para cada articulación, los cuales se encuentran en la Tabla 1.

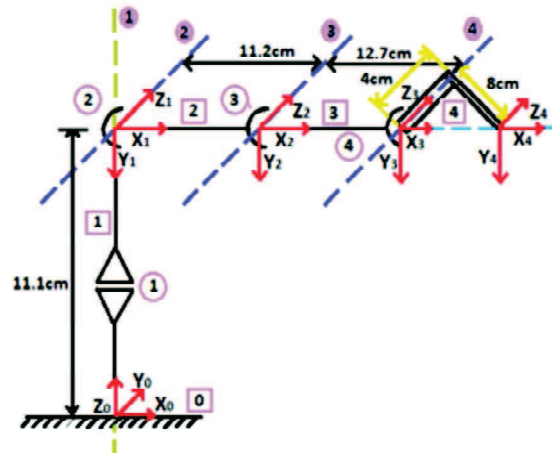


Fig. 4. Diagrama esquemático

Tabla 1. Parámetros D-H del brazo

| Articulación | $\theta$   | $d$          | $\alpha$        | $\alpha$     |
|--------------|------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1            | $\theta_1$ | $l_1 = 11.1$ | 0               | $l_1 = 11.1$ |
| 2            | $\theta_2$ | 0            | $\alpha = 11.2$ | 0            |
| 3            | $\theta_3$ | 0            | $L = 12.7$      | 0            |
| 4            | $\theta_4$ | 0            | $L_4 = 8.94$    | 0            |

Con los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) obtenidos (Tabla 1) se calculan las matrices de transformación homogénea, las cuales definen el cambio de base de un sistema al siguiente; la ecuación (1) se obtiene al realizar la multiplicación de los cambios de base para obtener la matriz de transformación homogénea entre el origen (S0) y el efector final o extremo del robot; las ecuaciones (2-10) representan la orientación, y las ecuaciones (11-13) representan la posición del efector final, donde *C* es coseno, y *S* es el seno; los subíndices corresponden al ángulo de cada articulación (notación abreviada).

$$T = \begin{bmatrix} n_x & O_x a_x & P_x \\ n_y & O_y a_y & P_y \\ n_z & O_z a_z & P_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

$$n_x = C_1 C_2 C_3 C_4 - C_2 S_2 S_3 C_4 - C_1 C_2 S_3 S_4 - C_1 S_2 C_3 S_4 \quad (2)$$

$$n_y = S_1 C_2 C_3 C_4 - S_1 S_2 S_3 C_4 - S_1 C_2 S_3 S_4 - S_1 S_2 C_3 S_4 \quad (3)$$

$$n_z = -S_2 C_3 C_4 - C_2 S_3 C_4 - S_2 S_3 S_4 - C_2 C_3 S_4 \quad (4)$$

$$O_x = -C_1 C_2 C_3 S_4 + C_1 S_2 S_3 S_4 - C_1 C_2 S_3 C_4 - C_1 S_2 C_3 C_4 \quad (5)$$

$$O_y = -S_1 C_2 C_3 S_4 + S_1 S_2 S_3 S_4 - S_1 C_2 S_3 C_4 - S_1 S_2 C_3 C_4 \quad (6)$$

$$O_z = S_2 C_3 S_4 - C_2 S_3 S_4 + S_2 S_3 C_4 - C_2 C_3 C_4 \quad (7)$$

$$a_x = -S_1 \quad (8)$$

$$a_y = 0 \quad (9)$$

$$a_z = 0 \quad (10)$$

$$P_x = 8,94 C_4 [C_1 C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3] + 8,94 S_4 [-C_1 C_2 S_3 - C_1 S_2 C_3] + 12,7 C_1 C_2 C_3 - 12,7 S_2 S_3 + 11,2 C_1 C_2 \quad (11)$$

$$P_y = 8,94 [S_1 C_2 C_3 - S_1 S_2 S_3] + 8,94 S_4 [-S_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 C_3] + 12,7 S_1 C_2 C_3 - 12,7 S_1 S_2 S_3 + 11,2 S_1 C_2 \quad (12)$$

$$P_z = 8,94 C_4 [-S_2] - 8,94 S_4 [C_2] - 11,2 S_2 + 11,1 \quad (13)$$

## B. Cinemática inversa

El objetivo de la cinemática inversa es determinar los valores que deben tomar las coordenadas articulares ( $q_1, q_2 \dots q_n$ ) del robot, las cuales darán la configuración adecuada para que el extremo del robot alcance una orientación y posición determinadas.

Para realizar el análisis de la cinemática inversa se toma un punto de vista del robot donde se puedan apreciar con claridad las rotaciones de cada articulación.

Para el cálculo del ángulo de la primera articulación ( $q_1$ ) se observa el brazo desde la vista superior (ver figura 5); en esta vista se aprecia que los catetos del triángulo que se genera al girar esta articulación son las coordenadas  $px$  e  $py$  del efector final, con estos se calcula el ángulo de la primera articulación ( $q_1$ ), utilizando la función  $\text{atan2-ver}$  (14). Esta función permite calcular la tangente inversa de un ángulo, teniendo en cuenta el cuadrante en el que se encuentra.

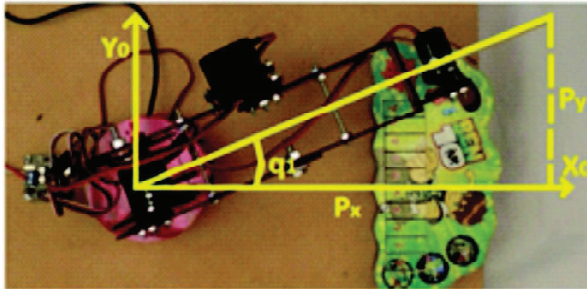


Fig. 5. Vista superior del desplazamiento de la primera articulación

$$q_1 = \text{atan2}(p_y, p_x) \quad (14)$$

Para hallar  $q_2$  es necesario calcular  $r$  (15), la cual es la proyección de los eslabones 2 y 3 del brazo sobre el plano xy del sistema S0 (sistema de la base del robot).

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (15)$$

Posteriormente se calcula el punto tres ( $p_3$ ), que es la ubicación de la articulación 4 con respecto al origen (16) (Fig.6).

$$p_3 = p_4 - d_4 x_4 \quad (16)$$

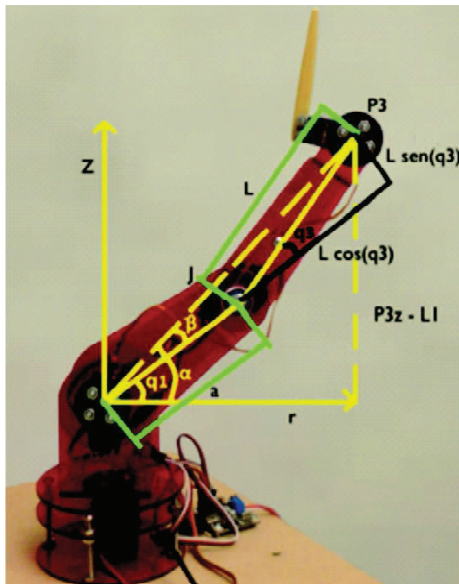


Fig.6. Vista frontal del desplazamiento de la segunda y la tercera articulación

En seguida se calcula  $J$ , utilizando el teorema de Pitágoras (17) y la ley del coseno (18).

$$J^2 = (p_{3z} - l_1)^2 + r^2 \quad (17)$$

$$J^2 = a^2 + l^2 - 2al \cos(180 - q_3) \quad (18)$$

Despejando de esta ecuación el coseno ( $q_3$ ), se obtiene (19).

$$\cos q_3 = \frac{J^2 - a^2 - l^2}{2al} \quad (19)$$

Por medio de la identidad trigonométrica (20) se obtiene el seno ( $q_3$ )(21).

$$\text{sen}^2 q_3 + \cos^2 q_3 = 1 \quad (20)$$

$$\text{sen} q_3 = \sqrt{1 - \cos^2 q_3} \quad (21)$$

Teniendo las ecuaciones (19) y (20) se calcula  $q_3$  (22), utilizando la función atan2.

$$q_3 = \text{atan2}(\text{sen} q_3, \cos q_3) \quad (22)$$

Luego se calcula  $\alpha$  (23) y  $\beta$  (24) con la función atan2

$$\alpha = \text{atan2}(p_{3z} - l_1, r) \quad (23)$$

$$\beta = \text{atan2}(l \text{sen} q_3, a + l \cos q_3) \quad (24)$$

Conociendo estos valores se halla el valor de  $q_2$  (25).

$$q_2 = \alpha - \beta \quad (25)$$

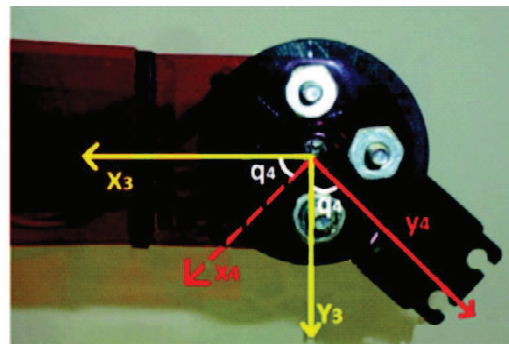


Fig.7. Vista frontal del desplazamiento de la cuarta articulación

Teniendo  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$ , se introducen en las matrices correspondientes obtenidas en la cinemática directa para obtener la matriz del sistema 3 con respecto al cero y con ello obtiene  $x_3$ ,  $y_3$ ,  $z_3$ , luego se realiza el producto punto entre  $x_3$  y  $x_4$  (26).

$$X_4 \cdot X_3 = |X_4||X_3|\cos q_4 \quad (26)$$

Simplificando (26), se obtiene el coseno ( $q_4$ ), (27).

$$X_4 \cdot X_3 = \cos q_4 \quad (27)$$

Posteriormente se realiza el producto punto entre  $y_3$  y  $x_4$  (28).

$$X_4 \cdot Y_3 = |X_4||Y_3|\cos(90 + q_4) \quad (28)$$

De esta última ecuación se obtiene el seno ( $q_4$ ), (29).

$$X_4 \cdot Y_3 = -\sin q_4 \quad (29)$$

Conociendo el coseno y el seno de ( $q_4$ ) se calcula  $q_4$  (30).

$$q_4 = \text{atan2}(-X_4 \cdot Y_3, X_4 \cdot X_3) \quad (30)$$

## V. DISEÑO ELECTRÓNICO

El brazo será controlado por medio de la tarjeta SERCOM (Fig. 8.), con la cual se pueden controlar 8 servomotores simultáneamente, manteniéndolos energizados; se utiliza esta tarjeta para controlar los servomotores de robots móviles, brazos robóticos y en general en aplicaciones en las cuales sea necesario controlar el giro de servos; la comunicación con el ordenador se ejecuta por medio del Bus USB o por medio del puerto RS232.

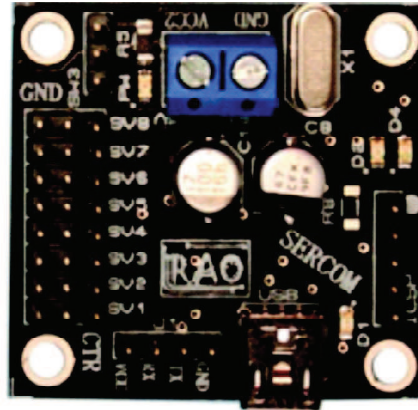


Fig. 8. Tarjeta SERCOM

## VI. RESULTADOS

Para verificar el correcto funcionamiento del brazo, se realizó una prueba con las notas musicales de una canción infantil (*Los pollitos*), obteniéndose buenos resultados. Se escogió una canción infantil con el fin de motivar a niños de cortas edades a interactuar con robots, sin embargo, el robot es capaz de reproducir gran variedad de canciones. Las Gráficas 9 y 10 muestran la evolución de las coordenadas articulares y el efector final en el tiempo al interpretar las primeras notas de esta partitura. En estas gráficas se puede corroborar el buen funcionamiento de la cinemática directa e inversa. Además, los usuarios se ven en la necesidad de involucrar la variable de tiempo, con el fin de reproducir melodías de forma armoniosa; esto lleva a implementar algoritmos de planeación de trayectorias y el respectivo control cinemático.

En la Fig. 11 se puede apreciar el robot interpretando una melodía.

Robot educativo de bajo costo que interpreta melodías en piano

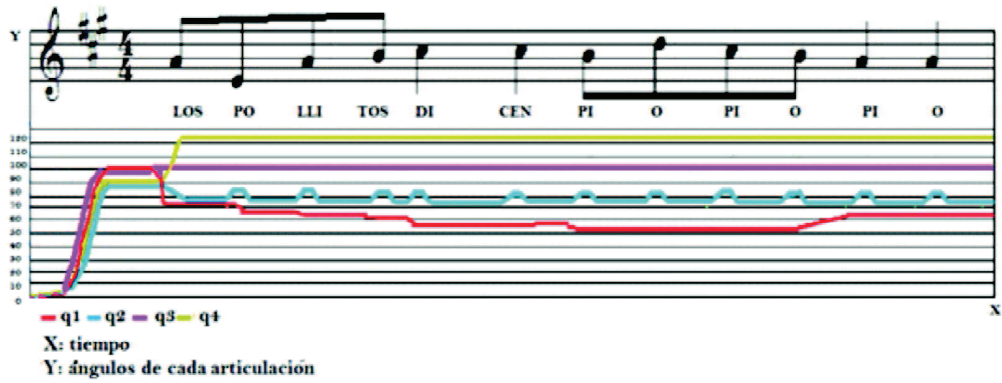


Fig. 9. Coordenadas articulares

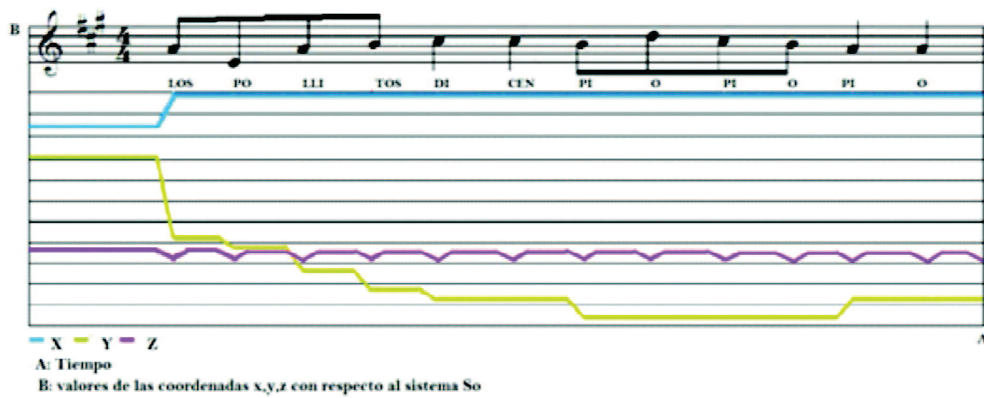


Fig.10.Coordenadas efector final

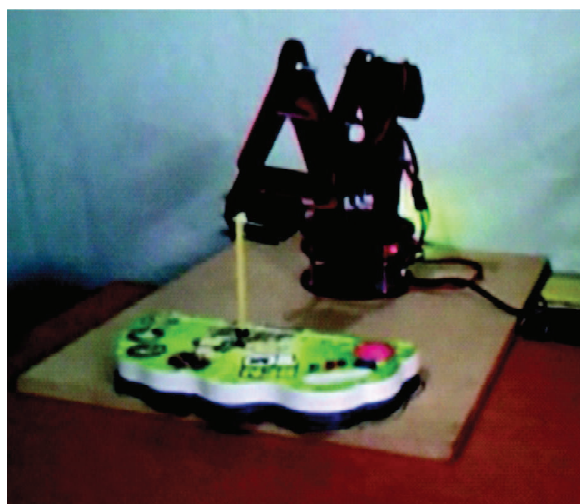


Fig.11. Brazo robótico interpretando una melodía



## VII. CONCLUSIONES

Los materiales usados para fabricar el robot permiten que este sea económico y de fácil replicación; esto lleva a que los estudiantes lo puedan fabricar, brindándoles un mayor estímulo en el aprendizaje en cursos de robótica. Esta característica permite que universidades o institutos de bajos recursos económicos puedan enseñar conceptos básicos, pero fundamentales, en robótica, evidenciándolos en aplicaciones reales y no solamente en simulaciones.

El robot puede interpretar melodías relativamente complejas debido a su rapidez, sin embargo, estas se encuentran restringidas al uso de una tecla a la vez.

La aplicación del intérprete musical cautiva la atención especialmente de los niños, lo cual podría utilizarse como medio o herramienta para introducir la enseñanza de estas tecnologías en la población a una temprana edad.

El desarrollo de este prototipo permite a los estudiantes universitarios fortalecer conceptos teóricos tales como la cinemática directa e inversa, espacio de trabajo, planeación de trayectorias y control cinemático. A pesar de que la aplicación es aparentemente sencilla, involucra variables o consideraciones que son muy importantes en el quehacer industrial; una de ellas es el tiempo. No basta posicionar y orientar el efector final del robot a lo largo de una trayectoria, sino que es necesario realizarlo en los tiempos adecuados, de lo contrario la melodía se distorsiona. Esto se podría comparar con una aplicación de soldadura, donde no basta con suministrar el material a lo largo de la trayectoria, sino que toca hacerlo en los tiempos exactos y a una velocidad adecuada para que ni se acumule ni falte el material aportado. La idea de este prototipo es enseñar conceptos importantes por medio de experiencias sencillas que un usuario no experto pueda comprender con facilidad.

## REFERENCIAS

- [1] J. Solis, K. Taniguchi, T. Ninomiya, T. Yamamoto, A. Takanishi, «Development of Waseda flutist robot WF-4RIV: Implementation of auditory feedback system», *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008)*, pp.3654-3659, 19-23 May. 2008.
- [2] J. Solis, K. Petersen, T. Ninomiya, M. Takeuchi, A. Takanishi, «Development of anthropomorphic musical performance robots: From understanding the nature of music performance to its application to entertainment robotics», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, pp.2309-2314, 10-15 Oct. 2009.
- [3] J. Solis, K. Petersen, T. Yamamoto, M. Takeuchi, S. Ishikawa, A. Takanishi, K. Hashimoto, «Implementation of an Overblowing Correction Controller and the proposal of a quantitative assessment of the sound's pitch for the anthropomorphic saxophonist robot WAS-2» *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, pp.1943-1948, 18-22 Oct. 2010.
- [4] J. Solis, K. Petersen, T. Yamamoto, M. Takeuchi, S. Ishikawa, A. Takanishi, K. Hashimoto, «Imitating the Saxophone playing by the anthropomorphic saxophonist robot», *3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2010)*, pp.270-275, 26-29 Sept. 2010.
- [5] Gao Qiao, Zhang Bin, Wu Xinyu, Cheng Zhu, Ou Yongsheng, Xu Yangsheng, «A music dancing robot based on beat tracking of musical signal», *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2010)*, pp.1536-1541, 14-18 Dec. 2010.

- [6] K. Yoshii, K. Nakadai, T. Torii, Y. Hasegawa, H. Tsujino, K. Komatani, T. Ogata, H. G. Okuno, «A biped robot that keeps steps in time with musical beats while listening to music with its own ears», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*, pp. 1743-1750, Oct. 29-Nov. 2, 2007.
- [7] T. Okamoto, T. Shiratori, S. Kudoh, K. Ikeuchi, «Temporal scaling of leg motion for music feedback system of a dancing humanoid robot», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, pp. 2256 - 2263, Oct 2010.
- [8] Han Jeong-Hye, Kim Dong-Ho, Kim Jong-Won, «Physical Learning Activities with a Teaching Assistant Robot in Elementary School Music Class» *Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC (NCM 2009)*, pp. 1406-1410, 25-27 Aug. 2009.