

Prototipo para análisis cinemático de configuración robótica angular

Prototype for angular robotic kinematic analysis

RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo†*, LÓPEZ-ÁLVAREZ, Yadira Fabiola, JARA-RUIZ, Ricardo y GARCÍA-RODRÍGUEZ, Juan Carlos

Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes. Av. Universidad #1001, Estación Rincón, 20400, Rincón de Romos, Ags.

ID 1^{er} Autor: *Martín Eduardo, Rodríguez-Franco* / ORC ID: 0000-0002-6804-4777, Researcher ID Thomson: T-1539-2018, CVU CONACYT ID: 660892

ID 1^{er} Coautor: *Yadira Fabiola, López-Álvarez* / ORC ID: 0000-0002-9041-1908, Researcher ID Thomson: T-1555-2018, CVU CONACYT ID: 375952

ID 2^{do} Coautor: *Ricardo Jara-Ruiz* / ORC ID: 0000-0001-7725-4138, Researcher ID Thomson: T-1532-2018, CVU CONACYT ID: 630276

ID 3^{er} Coautor: *Juan Carlos, García-Rodríguez* / ORC ID: 0000-0002-3602-7809, Researcher ID Thomson: J-8291-2017, CVU CONACYT ID: 677265

Recibido: 15 de Enero, 2018; Aceptado 11 de Marzo, 2018

Resumen

La integración de prototipos de prueba promueve la incursión del alumno de ingeniería en los conocimientos de su especialidad, no únicamente de forma teórica o parcialmente práctica, en caso de poseer alguna limitación para el acceso al equipamiento real, necesario para el desarrollo de las competencias profesionales propias. El presente estudio expone una alternativa para el análisis introductorio de la robótica a través de la implementación de un prototipo de configuración robótica angular, constituida por dispositivos de fácil manejo y bajo costo. Este trabajo explica el panorama previo y los objetivos planteados. Se detalla la solución matemática para la constitución del prototipo físico, la programación del controlador y su comunicación con una interfaz gráfica por computadora. Los resultados corroboran la funcionalidad del sistema integrado y su operatividad desde la computadora para lograr los comportamientos deseados. Las conclusiones exhiben la fiabilidad del prototipo al ser empleado como material de apoyo en el proceso de enseñanza-aprendizaje, para lo cual ha sido desarrollado.

Prototipo de prueba, Configuración robótica angular, Problema cinemático, Programación de controlador, Interfaz gráfica por computadora

Abstract

The integration of test prototypes promotes the incursion of the engineering student in the knowledge of their specialty, not only in a theoretical or partially practical way, in case of having any limitation for access to real equipment, necessary for the development of professional skills own. The present study exposes an alternative for the introductory analysis of robotics through the implementation of a prototype of angular robotic configuration, constituted by easy-to-use and low-cost devices. This work explains the background and the objectives established. The mathematical solution for the constitution of the physical prototype, the programming of the controller and its communication with a graphical interface by computer are detailed. The results corroborate the functionality of the integrated system and its operation from the computer to achieve the desired behaviours. The conclusions show the reliability of the prototype to be used as support material in the teaching-learning process, for which it has been developed.

Test prototype, Angular robotic configuration, Kinematic problem, Controller programming, Computer graphic interface

Citación: RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo, LÓPEZ-ÁLVAREZ, Yadira Fabiola, JARA-RUIZ, Ricardo y GARCÍA-RODRÍGUEZ, Juan Carlos. Prototipo para análisis cinemático de configuración robótica angular. Revista de Ingeniería Tecnológica. 2018 2-5: 17-26

* Correspondencia del Autor (correo electrónico: martin.rodriguez@utna.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Un robot es definido como un manipulador reprogramable y multifuncional cuya función principal es el movimiento de objetos a partir de la descripción de trayectorias variadas (Barrientos, 2007). Es así que dentro de los múltiples sistemas de manufactura en que puede ser integrado, el robot realiza esencialmente tareas de recuperación y posicionamiento (*pick and place*) de piezas o materiales (Huang, 2015); siendo requerida la utilización de pinzas robóticas o *gripper* para efectuar la mayor parte de las operaciones de agarre con alta precisión (Birglen, 2018), como parte de las exigencias actuales de la industria.

Al ser definido como una cadena cinemática abierta, el robot consta de un conjunto de eslabones unidos mediante articulaciones de rotación o traslación (Mann, 2017). Por lo que, con la finalidad de ejecutar una operación dada, se vuelve necesaria la consideración de una posición específica del extremo final del mismo en referencia a su base, dando paso a la solución de los problemas cinemáticos: directo e inverso (Abele, 2007); cuyo apoyo en la teoría del control ha permitido alta precisión en la respuesta de éstos sistemas (Zhang, 2017). Además de comprender, a partir del análisis matemático, las implicaciones del fenómeno del movimiento transmitido a cada uno de los elementos que le constituyen (Dumas, 2011).

Problemática y justificación

Las Universidades Tecnológicas poseen por prioridad brindar a sus estudiantes una educación basada en 70% de aplicación práctica mientras el 30% restante corresponde a la formalidad teórica, para programas educativos de Técnico Superior Universitario (CGUTyP, 2010). Por lo cual se vuelve exigible contar con las instalaciones adecuadas en que el alumno pueda llevar a cabo el ejercicio para desarrollar competencias específicas, según sea el programa de estudios cursado (INIFED, 2015).

Para programas de ingeniería, tal necesidad no se limita solo a contar con infraestructura, sino también con equipamiento que acerquen al alumno con el entorno laboral en que se desenvolverá concluida su formación (CGUTyP, 2002).

La mayor parte de los cuales implican una alta erogación económica. Por lo que considerando la situación geográfica y económica un gran número de Universidades Tecnológicas en el país, es preciso resaltar la ajustada posibilidad que algunos planteles poseen para acceder a condiciones de equipamiento óptimas que permitan el aseguramiento de las competencias de corte tecnológico a desarrollar (Flores, 2009).

Un caso particular de la situación planteada se presenta en el programa educativo de TSU en Mecatrónica área Sistemas de Manufactura Flexible, en que para la impartición de la asignatura de Robótica, es requerido como equipamiento mínimo un robot industrial, del cual puede no disponerse. Es por esto, que la integración de sistemas de prueba desarrollados a partir de materiales de fácil adquisición y bajo costo, pueden significar la oportunidad de que el alumno vea aplicados los conocimientos valorados de forma teórica en asignaturas vitales para su área de especialidad.

Además de que, al ser estos implementos constituidos desde cero, podrían permitir la comprensión por parte del alumno de las etapas que le conforman, su sinergia y operación final. Por lo que el presente estudio se centra en la integración de un sistema robótico para la realización de pruebas de manipulación, así como para el análisis y la aplicación de la teoría de la robótica, en la comprensión de los tópicos específicos de solución de los problemas cinemáticos directo e inverso, a partir de una configuración robótica angular.

Objetivos

Integrar un sistema electrónico en comunicación con una interfaz gráfica por computadora para el control de posición del extremo final de un robot angular a partir de la solución de los problemas cinemático directo e inverso.

- a) Desarrollar la solución de los problemas cinemáticos directo e inverso de una configuración robótica angular.
- b) Programar el algoritmo en Arduino para el control de movimiento simultáneo de los actuadores del robot.

- c) Integrar la interfaz gráfica en LabVIEW para la manipulación del robot a partir de la solución de los problemas cinemáticos.
- d) Establecer comunicación entre la interfaz gráfica y el controlador del robot.

Prototipo de configuración robótica angular

Un robot angular o antropomórfico es el tipo de configuración serial de mayor utilidad en la industria, debido a la posibilidad de adquirir prácticamente cualquier posición dentro de un espacio de trabajo que forma una esfera (Saha, 2010), según se aprecia en la figura 1. Tal implemento consta de tres eslabones unidos por medio de articulaciones de tipo rotacional, formando una cadena mecánica abierta, cuyo extremo inicial está unido a una base, mientras en el extremo o efector final es dispuesta algún tipo de herramienta o *gripper* (Craig, 2006).

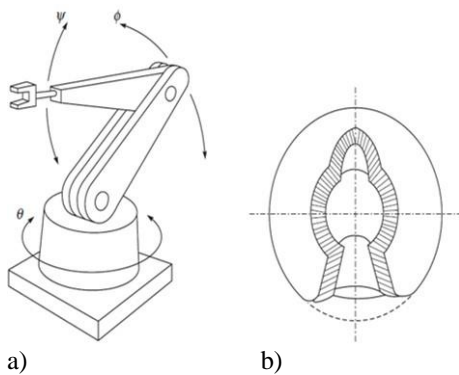


Figura 1 a) Configuración robótica angular y b) espacio de trabajo

Fuente: (Saha, 2010).

La base brinda estabilidad al robot para el posicionamiento de sus articulaciones, y por ende, de su extremo final, en cualquier punto que le permita su propia estructura (Markus, 2016). Por su parte, la herramienta acoplada al efector final permite el desempeño de la tarea específica a cubrir, existiendo un sinnúmero de posibilidades de aplicación (Björnsson, 2018). Por lo que, para llevar a cabo el presente estudio se empleó un prototipo físico que consta de un brazo robótico angular mismo que dispone de tres grados de libertad y de un *gripper*, según se muestra en la figura 2; tal robot fue adquirido del medio comercial y posee características aceptables de estabilidad, diseño y presentación.

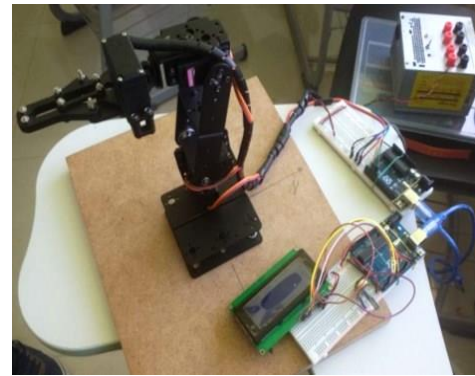


Figura 2 Prototipo físico empleado en el desarrollo de pruebas

Fuente: *Elaboración Propia*, 2018

Puesto que se trata de un modelo para la comprobación física de tópicos teóricos de robótica, los actuadores utilizados para suministrar el movimiento a cada articulación del robot fueron servomotores. Este tipo de motor no requiere la implementación de un control robusto para llevar a cabo su función, sino que a partir del suministro del voltaje necesario, una señal de tierra y otra de control a frecuencia fija, cuyo ancho de pulso pueda variar, es posible la ubicación del eje del mismo en una posición específica (Maloney, 2006), permaneciendo en este punto mientras tal señal mantenga las condiciones dadas.

La base y eslabones del robot están elaborados a partir de acero, realizando la unión entre estos y los servomotores, por medio de tornillería. Las especificaciones dimensionales de los eslabones se exponen en la tabla 1, donde el espesor de la base es contemplado dentro de la longitud del primer eslabón, por lo que el sistema de referencia del robot fue asignado sobre la base de madera en que el mismo descansa. Y con la finalidad de ocultar en lo mayor posible cualquier cableado y conexión eléctrica, se sugirió el uso de espiral plástico para la sujeción y agrupamiento de conectores.

| Eslabón | Longitud |
|---------|----------|
| l_1 | 9 cm |
| l_2 | 10.7 cm |
| l_3 | 15.5 cm |

Tabla 1 Especificaciones dimensionales de los eslabones del robot

Fuente: *Elaboración Propia*, 2018

Solución a los problemas cinemáticos

La cinemática se ocupa del estudio del movimiento con respecto a un sistema de referencia, sin tomar en cuenta las causas que le originan, a través de su descripción analítica como una función del tiempo (Barrientos, 2007). Es así que, para que el robot pueda adquirir alguna posición determinada por el usuario, habrá de gestionarse la potencia necesaria para que los actuadores empleados realicen un movimiento específico (Dixon, 2004); existiendo dos métodos en los cuales es preciso efectuar la distribución de movimiento a partir de considerar al robot como una estructura mecánica integrada por eslabones y articulaciones, siendo estas últimas el medio para el suministro de movimiento al sistema.

Se incluye el término “problema” para englobar la necesidad de un análisis matemático que permita la deducción de ecuaciones algebraicas que, para la solución cinemática directa, establezcan las coordenadas de posición del efector final a partir de un movimiento específico de cada actuador (Abele, 2007). Mientras que para la solución cinemática inversa, determinen el movimiento que deba poseer cada actuador derivado de una posición cartesiana específica propuesta para el efector final (Young, 2016). Cabe mencionar que las ecuaciones deducidas habrán de variar de acuerdo a la configuración robótica que se trate, por lo que un cambio en su morfología implicará el establecimiento de un modelo cinemático distinto al inicial.

Con la finalidad de dar solución al problema cinemático directo, Jacques Denavit y Richard Hartenberg propusieron el desarrollo de un método sistemático que permite representar la posición y la orientación de cada elemento de un robot con respecto a un sistema de referencia, colocado en la base de éste (Craig, 2006). Describiendo de tal manera, la relación existente entre dos elementos sucesivos, a través de matrices, para establecer un sistema de coordenadas asociado a cada eslabón que forma al robot, lo que lleva a determinar las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. Es a través de la elección adecuada de los sistemas de coordenadas por eslabón, que es posible abordar uno a partir del otro mediante cuatro transformaciones básicas (Saha, 2010):

1. Rotación alrededor del eje Z, un ángulo θ .
2. Translación a lo largo del eje Z, una distancia d.
3. Translación a lo largo del eje X, una distancia a.
4. Rotación alrededor del eje X, un ángulo α .

Realizando las transformaciones y el producto de éstas en el orden dado, es posible determinar la matriz de transformación homogénea (1) que lleve del sistema anterior al sistema actual en el robot analizado.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Una representación clara para la deducción de los parámetros propuestos por Denavit-Hartenberg (D-H) correspondientes a la configuración robótica angular, se visualiza en la figura 3. Asimismo, los parámetros respectivos se presentan la tabla 2.

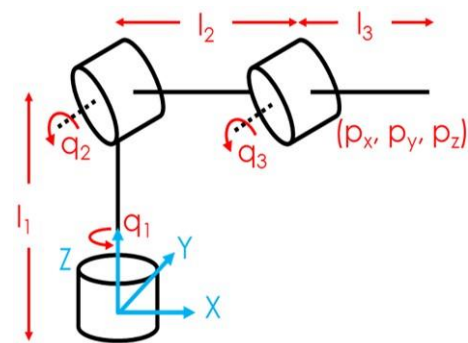


Figura 3 Representación del robot angular para deducción de parámetros D-H

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

| Sistema | θ | d | a | α |
|-----------|------------|-------|-------|------------|
| 0A_1 | q_1 | l_1 | 0 | 90° |
| 1A_2 | q_2 | 0 | l_2 | 0 |
| 2A_3 | q_3 | 0 | l_3 | 0 |
| 3A_4 | 90° | 0 | 0 | 90° |

Tabla 2 Parámetros D-H del robot angular

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

Una vez obtenidos los parámetros D-H, es posible el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot, ya que vienen dadas por las matrices que se establecen a partir de (1).

La relación existente entre el conjunto de eslabones que conforman a la configuración robótica en estudio se determina por la matriz T (2), resultado del producto de consecutivo de las matrices mencionadas.

$$T = \begin{bmatrix} Cq_1S(q_2+q_3) & Sq_1 & Cq_1C(q_2+q_3) & Cq_1[l_2Cq_2+l_3C(q_2+q_3)] \\ Sq_1S(q_2+q_3) & Cq_1 & Sq_1C(q_2+q_3) & Sq_1[l_2Cq_2+l_3C(q_2+q_3)] \\ C(q_2+q_3) & 0 & S(q_2+q_3) & l_1+l_2Sq_2+l_3S(q_2+q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Obtenida la matriz T , esta expresará la orientación y posición del extremo final del robot en función de sus coordenadas articulares. Por tanto, las coordenadas del extremo final quedan en función de (3), (4) y (5), respectivamente.

$$p_x = Cq_1[l_2Cq_2+l_3C(q_2+q_3)] \quad (3)$$

$$p_y = Sq_1[l_2Cq_2+l_3C(q_2+q_3)] \quad (4)$$

$$p_z = l_1+l_2Sq_2+l_3S(q_2+q_3) \quad (5)$$

Para el caso del problema cinemático inverso, el proceso que habrá de comprenderse para la obtención de ecuaciones respectivas, se encuentra en gran medida determinado por la configuración del robot analizado (Barrientos, 2007). Desarrollándose algunas metodologías que brindan la posibilidad de ser programadas en alguna aplicación o entorno computacional.

Tal es el caso del método geométrico, el cual permite calcular los valores de las variables articulares que realizan el posicionamiento del robot sin preocuparse por la orientación de su extremo final. Lo anterior, a través de uso de relaciones trigonométricas de los elementos que integran a la configuración analizada cuya base es la solución de triángulos que relacionan sus eslabones y articulaciones (Saha, 2010). Siendo un método práctico para robots con pocos grados de libertad.

Así, a partir de la identificación de los parámetros geométricos de la configuración a analizar y el efecto del movimiento en las articulaciones que les integran, se formulan las relaciones geométricas entre éstos y la coordenada que es preciso, llegue a alcanzar el extremo final del robot (Craig, 2006). Tales relaciones se muestran en la figura 4.

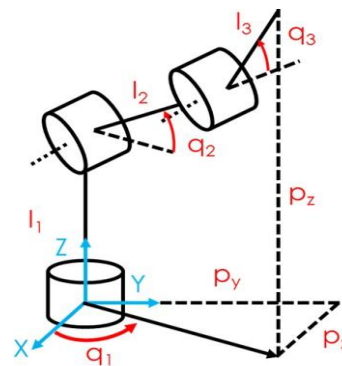


Figura 4 Representación de variables articulares y coordenadas del extremo final del robot

Fuente: Elaboración Propia, 2018

A partir de la coordenada en la que se requiere posicionar el extremo del robot (p_x, p_y, p_z) respecto al sistema de referencia asignado en la base del robot, y considerando que la estructura es planar, es que queda definido el ángulo adquirido por la variable articular q_1 con (6).

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Py}{Px}\right) \quad (6)$$

Empleando el teorema del coseno únicamente sobre los eslabones 2 y 3 del robot es posible obtener el valor de la tercera variable articular q_3 a través de (7).

$$q_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\cos^2 q_3}}{\cos q_3}\right) \quad (7)$$

Donde:

$$\cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (8)$$

Finalmente, considerando una configuración de codo abajo, (7) permite la determinación del valor de la segunda variable articular q_2 , misma que es definida por (9).

$$q_2 = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right) \quad (9)$$

Programación del controlador

Los valores de movimiento a destinarse a cada uno de los motores utilizados, habrán de convertirse en las señales eléctricas correspondientes a partir del uso de una tarjeta electrónica (Markus, 2016), que tomé los valores matemáticos determinados por la solución de los problemas cinemáticos directo e inverso.

El algoritmo para el control de movimiento fue realizado a partir del entorno de programación Arduino, mismo que brinda sencillez para la edición de código al poseer como base la programación C, sin embargo, adicionando a su funcionalidad la posibilidad de orientar el mismo a hardware, es decir, para la manipulación del estado de terminales de entrada y salida físicas de la tarjeta electrónica utilizada, en este caso, un Arduino UNO R3 que además de tener en disposición una buena cantidad de terminales de entrada y salida tanto digital como analógica, distribuidas en tres puertos del microcontrolador ATmega358, se encuentra disponible en el mercado a precios muy accesibles.

El algoritmo desarrollado para el control de movimiento en cada servomotor a partir de la previa solución de los problemas cinemáticos directo e inverso y la emisión de los valores correspondientes, se muestra en el diagrama de la figura 5.

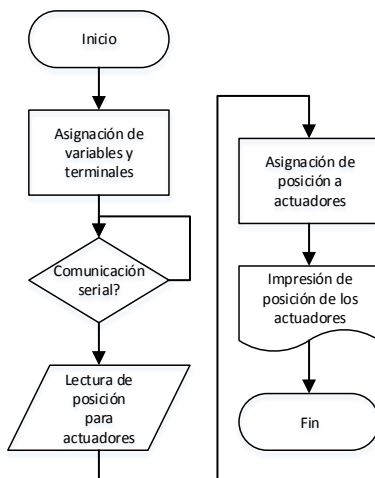


Figura 5 Diagrama de flujo del algoritmo para el movimiento de los actuadores

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

El algoritmo de programación parte de la designación de las variables a emplear y las terminales de salida para la conexión de los servomotores a la tarjeta. Posterior a lo cual, la misma buscará establecer comunicación con la interfaz gráfica por computadora a partir de protocolo serial RS232 vía USB (*Universal Serial Bus*). Por lo que de existir comunicación entre la interfaz gráfica y la tarjeta electrónica, esta última comenzará con la lectura de los valores de movimiento específico para cada servomotor considerando un rango de acción de entre 0 y 180°.

Después de realizar el registro y almacenamiento de los valores de interés, habrá de realizarse el envío de los valores específicos a las terminales de salida correspondientes, las cuales deberán ser del tipo PWM (*Pulse With Modulation*) para que se posibilite la generación de señales variables en ancho de pulso proporcional al voltaje que requiriera ser enviado a los servomotores para activar su movimiento y comportamiento estacionario, una vez que adquiera la posición indicada por la interfaz. Será necesaria la retroalimentación en todo momento de los valores de posición adquiridos por cada servomotor, esto con la finalidad de visualizar la evolución en el comportamiento de cada uno desde un punto de inicio (Dixon, 2004), que puede ser una posición de reposo del robot, o bien se trate de alguna previamente asignada por el usuario.

Es a través de la comunicación entre la tarjeta Arduino empleada y la computadora que contenga la interfaz gráfica de usuario, que será posible la manipulación de los actuadores del robot mediante la designación directa de un movimiento específico por servomotor o a partir de la designación de una coordenada dentro de un espacio cartesiano a ser alcanzada por medio del efector final del robot. Además del monitoreo de la evolución en cada uno de éstos.

Desarrollo de la interfaz gráfica

Una interfaz gráfica asociada a un sistema físico con funciones de supervisión de control y adquisición de datos, deberá permitir no únicamente la visualización de la evolución en el comportamiento del mismo con el tiempo, sino a través de empleo de las herramientas de comunicación adecuadas, el control del mismo (Rodríguez, 2007). Tal es el caso del modelo de pruebas propuesto, en el cual con la finalidad de aplicar de manera interactiva los principios teóricos deducidos con anterioridad, se integra un entorno cuya características de sencillez y accesibilidad permitan al usuario la modificación de las consignas dadas al sistema, además de su monitoreo (Gasparic, 2017).

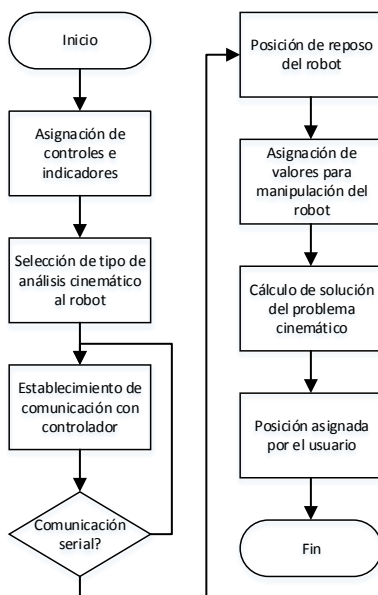


Figura 6 Diagrama de flujo del algoritmo de la funcionalidad de la interfaz gráfica
Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

Fue a través de empleo del sistema de desarrollo LabVIEW que fue posible la integración de una interfaz gráfica que incluyera las funciones propuestas. Esta es constituida por las dos ventanas expuestas en las figuras 7a y 7b, a partir de las cuales se posibilita al usuario para la manipulación del robot, pudiendo efectuar el movimiento directo de los actuadores o la asignación de una coordenada específica a ser adquirida por parte del efector final.

En la figura 7a, justo en su orientación izquierda, se visualizan tres controles para el ingreso de las dimensiones de los eslabones del robot, por parte del usuario. Asimismo, en la porción central se cuenta con otros tres controles que permiten la asignación del valor respectivo a cada actuador empleado.

Una vez presionado el botón: calcular, también dispuesto al centro de la ventana, serán emitidas las coordenadas correspondientes a los valores de las variables articulares previamente ingresados, separando cada componente a partir del eje específico, así como enviados los datos necesarios para la modificación de la posición en cada actuador, según sea propuesto.

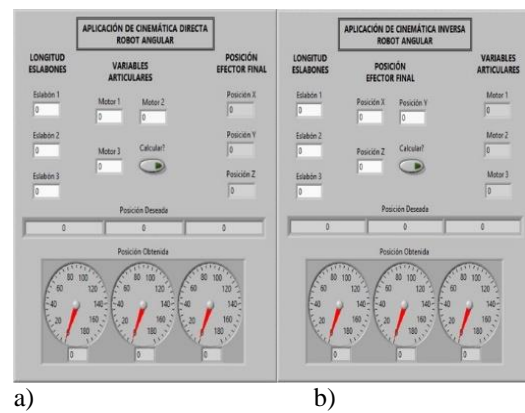


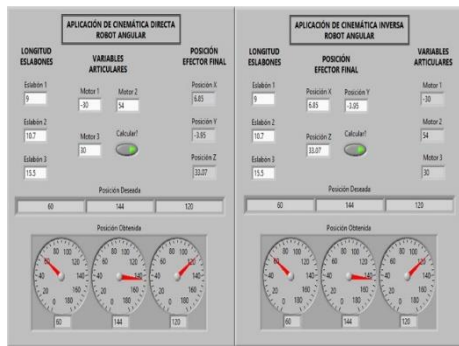
Figura 7 Panel frontal de la interfaz gráfica desarrollada para la solución de los problemas cinemáticos a) directo y b) inverso y la comunicación de datos
Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

Para la representación de la cinemática inversa, de la figura 7b, puede verse el cambio en el ingreso de las coordenadas en las cuales se desea sea localizado el extremo final del robot. Por lo que los valores emitidos corresponden a las variables articulares necesarias para dar alcance a la posición propuesta por el usuario. En ambas ventanas, es de mencionarse el uso de un arreglo de indicadores que permite validar los datos numéricos que han sido enviados a la tarjeta electrónica para su respectiva interpretación y manipulación de cada actuador.

Resultados

La realización de las pruebas constató la efectividad de los algoritmos desarrollados tanto para la solución de los problemas cinemáticos directo e inverso, así como para la programación del controlador empleando, y en última instancia, de la interfaz gráfica integrada para el monitoreo y control del sistema físico.

El uso de la fórmulas deducidas a partir de la aplicación de las metodologías para la solución de los problemas cinemáticos directo e inverso permitió una respuesta favorable, dada la propuesta de valores específicos para el posicionamiento a adquirir por los actuadores empleados, emitiendo los resultados correspondientes para cada componente de la coordenada deducida, en la cual se posicionó el extremo final del robot, dentro de la interfaz gráfica desarrollada como puede verse en las figuras 8a y 8b.



a) b)

Figura 8 Resultados emitidos por la interfaz gráfica desarrollada para la solución de los problemas cinemáticos a) directo y b) inverso, dados valores de prueba

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

Por lo que la combinación de los resultados calculados a partir de la solución del problema cinemático directo, su procesamiento y adaptación, posibilitó contar con un dato adecuado y por tanto, la transferencia del mismo hacia el controlador de robot utilizado, es decir, la tarjeta electrónica Arduino UNO. Esta realizó la gestión de las señales eléctricas pertinentes a cada actuador según fuera la posición en específico a adquirir, con lo que para el punto determinado con los valores articulares propuestos en la figura 8a, se determinó el movimiento del robot según se aprecia en la figura 9.

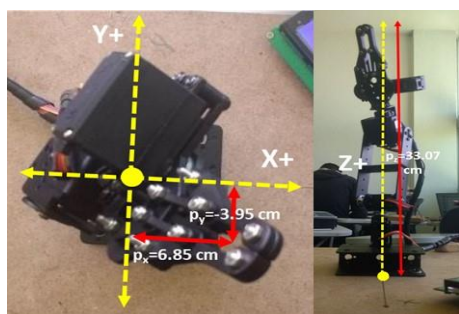


Figura 9 Componentes de posición en el extremo final del robot mediante la solución del problema cinemático directo

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

Fue así, que al emplear tales resultados de la solución del problema cinemático directa, es decir, las coordenadas de la posición alcanzada por el efector final del robot, como parámetros para la solución del problema cinemático inverso, fueron obtenidos los valores correspondientes a las variables articulares del robot que habían sido inicialmente ingresados para la solución del problema cinemático anterior, como se constata en la figura 8b exponiéndose el movimiento solicitado en los actuadores según la figura 10.

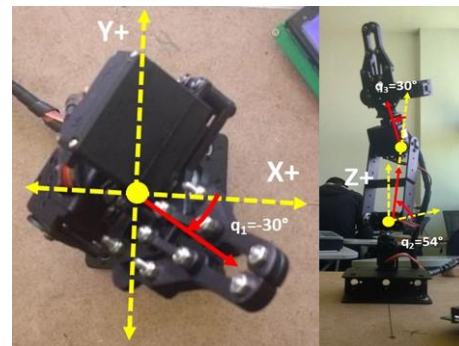


Figura 10 Valores de las variables articulares del robot mediante la solución del problema cinemático inverso

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

Las tablas 3 y 4 exponen los resultados alcanzados a partir de la aplicación de la interfaz gráfica en la solución de los problemas cinemáticos, bajo la propuesta de seis conjuntos de valores para las variables articulares en cinemática directa, así como de seis coordenadas para el extremo final del robot mediante cinemática inversa, cuyos parámetros fueron los resultados dados por la primera.

| No. | q1 | q2 | q3 | px | py | pz |
|-----|-----|-----|-----|-------|--------|-------|
| 1 | 32 | 67 | 85 | -8.06 | -5.04 | 26.13 |
| 2 | -30 | 54 | 30 | 6.85 | -3.95 | 33.07 |
| 3 | -12 | -35 | 89 | 17.48 | -3.72 | 15.40 |
| 4 | -65 | -10 | -54 | 7.32 | -15.71 | -6.79 |
| 5 | 89 | -5 | -17 | 0.44 | 25.03 | 2.26 |
| 6 | 7 | 13 | -34 | 24.71 | 3.03 | 5.85 |

Tabla 3 Resultados de la solución del problema cinemático directo

Fuente: *Elaboración Propia, 2018*

| No. | px | py | pz | q1 | q2 | q3 |
|-----|-------|--------|-------|-----|-----|----|
| 1 | -8.06 | -5.04 | 26.13 | 32 | 6 | 85 |
| 2 | 6.85 | -3.95 | 33.07 | -30 | 54 | 30 |
| 3 | 17.48 | -3.72 | 15.40 | -12 | -35 | 89 |
| 4 | 7.32 | -15.71 | -6.79 | -65 | -75 | 54 |
| 5 | 0.44 | 25.03 | 2.26 | 89 | -25 | 17 |
| 6 | 24.71 | 3.03 | 5.85 | 7 | -27 | 34 |

Tabla 4 Resultados de la solución del problema cinemático inverso

Fuente: *Elaboración Propia, 2018.*

Nótese que el reporte de los parámetros propuestos en las variables articulares engloba únicamente valores enteros positivos y negativos, esto es debido a que el servomotor opera estrictamente con valores enteros. Respecto a la posibilidad de ingresar, tanto valores positivos y negativos sin distinción, se realizó la adecuación para que de los 180° de movilidad que posee un servomotor ordinario, la mitad de tal rango de acción mantuviera la polaridad negativa, mientras la mitad restante trabajara con la polaridad positiva.

De esta manera se asegura el análisis del efecto dado una vez que son ingresados valores negativos, brindando además la posibilidad de trabajar en las dos orientaciones de cada eje del espacio coordinado. También puede observarse una discrepancia entre los datos calculados, la cual es ocasionada porque la solución del problema cinemático inverso realiza una distinción cuando la configuración robótica adopta una orientación de codo abajo o codo arriba, esta última fue empleada; pudiendo existir más de una combinación de valores articulares que permitan llevar al efector a una posición o coordenada específica.

Sin embargo, respecto a la libertad de orientación que podrá adquirir cada eje se sugiere verificar que los valores ingresados específicamente en el eje Z no sean o generen valores negativos, según el problema cinemático resuelto, pues aunque la solución matemática existe, de forma física se estará propiciando una coalición entre el robot y la base sobre la cual se encuentra soportado, al sobresalir las dimensiones de esta última de las correspondientes a la base.

Conclusiones

El equipamiento industrial de las instituciones de educación superior, para el cumplimiento de los objetivos de las asignaturas impartidas dentro de los programas de estudios de corte ingenieril, si bien, resulta necesario para el desarrollo de las competencias necesarias en el alumno, no implica ser una razón definitiva para que los conocimientos amparados sean abordados meramente en forma teórica o parcialmente aplicados. Opciones como la planteada por este estudio brindan la posibilidad de llevar este tipo de conocimiento a la aplicación real, ya sea con disposición de tal equipamiento o como apoyo para el entendimiento de su función de manera previa a su operación.

La fundamentación de un prototipo desarrollado en los principios científicos que le rigen, provee el éxito en los resultados alcanzados, como en esta ocasión; donde el empleo de métodos sistemáticos del estudio de la robótica permitieron la deducción de los modelos matemáticos a partir de los cuales es posible realizar el posicionamiento de un robot en una localización específica dentro del espacio cartesiano.

Es así, que la solución de los problemas cinemáticos directo e inverso previamente analizados, implicaron el conocimiento de áreas de las ciencias básicas, como matemáticas y física, para hacer posible la determinación de comportamientos certeros que pudieron ser llevados a la realidad.

La combinación de los conocimientos de las ciencias básicas con áreas de la tecnología permitieron a su vez, no sólo el análisis formal de una estructura robótica, sino la construcción de un prototipo de pruebas físicas cuya manipulación fue posible a través de un controlador electrónico simple y económico, en comunicación real con una interfaz gráfica desarrollada en una aplicación por computadora, realizando la conjunción de áreas tan variadas como mecánica, electrónica, control y computación, base de la mecatrónica, disciplina a la que originalmente fue destinado el prototipo; sin embargo, está probado que su alcance puede ser mayor.

Por lo que resta resaltar que aun pese a disponer de dispositivos de fácil manejo fue posible la integración de una tarea compleja, por el grado de complementación y la gran cantidad de áreas de conocimiento incluidas, lo que puede significar el principio para la iniciación del alumno en el saber de los sistemas de manufactura flexible, aplicación común de los sistemas robóticos; siendo posible la escalabilidad del presente estudio.

Agradecimiento

A los alumnos del Programa Educativo de TSU en Mecatrónica área Sistemas de Manufactura Flexible de la Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes (UTNA), generación 2016-2018, por ser el soporte para la aplicación de la metodología expuesta durante la impartición de clase; por aceptar el reto, compartir sus experiencias, inquietudes y puntos de mejora al respecto. Este aporte es para ustedes

Referencias

Abele, E. (2007). *Modeling and identification of an industrial robot for machining applications*. CIRP Annals, 387-390.

Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo, LÓPEZ-ÁLVAREZ, Yádira Fabiola, JARA-RUIZ, Ricardo y GARCÍA-RODRÍGUEZ, Juan Carlos. Prototipo para análisis cinemático de configuración robótica angular. Revista de Ingeniería Tecnológica. 2018

- Birglen, L. (2018). *A statistical review of industrial robotic grippers*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 88-97.
- Björnsson, A. (2018). *Automated material handling in composite manufacturing using pick-and-place systems - a review*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 222-239.
- CGUTyP, C. G. (2002). *Políticas para la operación, desarrollo y consolidación del Subsistema de Universidades Tecnológicas*. Ciudad de México: CGUTyP-SEP-SES.
- CGUTyP, C. G. (2010). *Lineamientos de operación de los programas educativos por competencias profesionales*. Ciudad de México: CGUTyP-SEP-SES.
- Craig, J. (2006). *Robótica*. Ciudad de México: Pearson Educación.
- Dixon, W. (2004). *Global robust output feedback tracking control of robot*. Robotica, 351-357.
- Dumas, C. (2011). *Joint stiffness identification of industrial serial robots*. Robotica, 649-659.
- Flores, P. (2009). *Trayectoria del modelo de Universidades Tecnológicas*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gasparic, M. (2017). *A graphical user interface for presenting integrated development environment command recommendations: desing, evaluation, and implementation*. Information and Software Technology, 236-255.
- Huang, Y. (2015). *Robust multi-robot coordination in pick-and-place tasks based on part-dispatching rules*. Robotics and Autonomous Systems, 70-83.
- INIFED, I. N. (2015). *Guía de operación del programa de construcción, equipamiento, mantenimiento y rehabilitación de infraestructura física de educación superior*. Ciudad de México: INIFED-SEP.
- Maloney, T. (2006). *Electrónica industrial moderna*. Ciudad de México: Pearson Educación.
- Mann, M. (2017). *Minimally actuated serial robot*. Robotica, 408-426.
- Markus, E. (2016). *Coordination control of robot manipulators using flat outputs*. Robotics and Autonomous Systems, 169-176.
- Rodríguez, A. (2007). *Sistemas SCADA*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Saha, K. S. (2010). *Introducción a la robótica*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Young, C.-P. (2016). *The spherical motion based on the inverse kinematics for a delta robot*. 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics, 29-33.
- Zhang, D. (2017). *A review on model reference adaptative control of robotic manipulators*. Annual Reviews in Control, 188-198.