

Ciencias de la ingeniería Mecatrónica (CIMT)**Análisis de parámetros Denavit-Hartenberg con LabVIEW® con Método de Matricial****Denavit-Hartenberg Parameter Analysis with LabVIEW® with Matrix Method**

**Jorge Oswaldo Rivera-Nieblas ^{a, b*}, Juan Carlos Grijalva-Acuña ^b, Eduardo Chávez-Mendiola ^{a, b},
Rogelio Acedo-Ruiz ^b, Eusebio Jiménez-López ^c, Jesús Andrés Peinado-González ^d**

^a Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Carreras de Ingeniería Biomédica, Semiconductores y Electrónica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuar, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^b Departamento de Metal-Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuar, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^c Tecnológico Nacional de México/ITS de Cajeme-ULSA Noroeste, Cd. Obregón, Sonora, 85024, México.

^d Carrera de Ingeniería Biomédica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuar, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

Correo electrónico: jorge.riveran@hermosillo.tecnm.mx

(Recibido: 20 de junio 2024; Aceptado: 12 de julio 2024; Publicado: 01 de septiembre 2024)

Resumen

En este trabajo se hace uso del Método Matricial para analizar los parámetros Denavit-Hartenberg, para la solución de la Cinemática Directa aplicada a cadenas abiertas, utilizando el software LabVIEW®, en el cual se trabajará con la programación orientada a objetos o gráfica, para obtener la solución Cinemática por Matrices de Transformación Homogénea, para un Robot Antropomórfico de tres grados de libertad, con ello los alumnos de carreras afines a Mecatrónica, Biomédica o Electrónica, que tienen dentro de su mapa curricular la materia de Robótica, puedan asimilar la Matemática Matricial aplicada en esta investigación. LabVIEW® permite trabajar con diversos iconos para matemáticas, como por ejemplo formula node o con iconos diversos aplicados al Álgebra Matricial, estos facilitan la programación de Matrices de Transformación Homogénea. Los programas desarrollados permiten interactuar de manera más sencilla e intuitiva con Álgebra Matricial para obtener la Matriz de Transformación Homogénea del Robot Antropomórfico.

Palabras claves: Cinemática, Robótica, LabVIEW®, Método Matricial, Denavit Hartenberg, Método DH.

Abstract

In this work, the Matrix Method is used to analyze the Denavit-Hartenberg parameters, for the solution of Direct Kinematics applied to open chains, using the LabVIEW® software, in which we will work with object-oriented or graphical programming, to obtain the Kinematic solution by Homogeneous Transformation Matrices, for an Anthropomorphic Robot with three degrees of freedom, with this the students of careers related to Mechatronics, Biomedical or Electronics, who have the subject of Robotics within their curricular map, can assimilate Mathematics Matrix applied in this research. LabVIEW® allows you to work with various icons for mathematics, such as formula node or with various icons applied to Matrix Algebra, these facilitate the programming of Homogeneous Transformation Matrices. The developed programs allow you to interact in a simpler and more intuitive way with Matrix Algebra to obtain the Homogeneous Transformation Matrix of the Anthropomorphic Robot.

Keywords: Kinematics, Robotics, LabVIEW®, Matrix Method, Denavit Hartenberg, DH Method.

1. Introducción

La robótica fue impulsada sin duda por la ciencia ficción a través de la literatura, series de televisión y el cine. Las palabras Robot utilizada por Capek en una obra de teatro, Robótica usada por Asimov en una historia corta. [1] [2] En la historia humana se han descrito máquinas autónomas distintas, [1] pero la que más ha fascinado en la actualidad es llegar al robot humanoide con capacidad de razonar y tomar decisiones, usando IA como Sophia, Alice, Mark 1, Grace, Ameca robots de última generación. La realidad histórica es que se ha pasado de algo ficticio a algo real, y con la llegada de la IA y sistemas tecnológico más avanzados, la brecha de las propuestas y visión de los autores de ciencia ficción se va haciendo realidad.

En la robótica industrial es importante mencionar como en 1954, George Devol concibe la idea de un dispositivo de transferencia programable. Después 1956 George Devol y Joseph Engelberger fundan la primera compañía de Robots la Consolidated Controls Corporation (CCC), que más tarde se convierte en Unimation (Universal Automation). Y no es 1961 que Devol y Engelberger instalan en GMC® el robot esférico UNIMATE, en una línea de producción industrial, este no era un robot humanoide como se concebía por la ciencia ficción, sino un manipulador que simula desde la cintura hasta la mano. [1] [2] [3] [4]

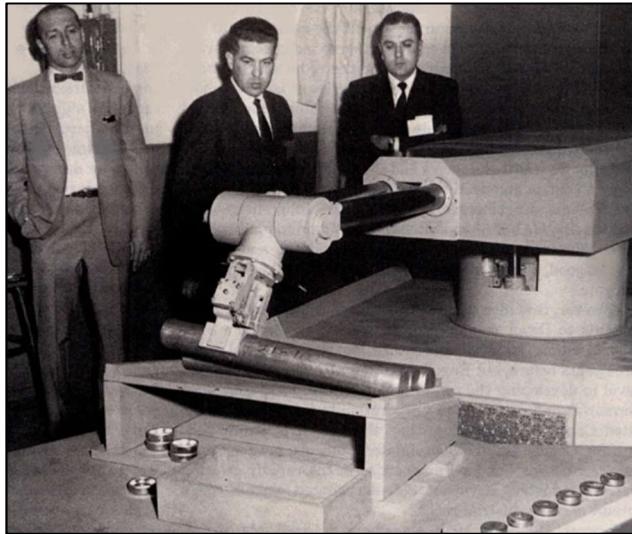


Fig. 1 Manipulador o Brazo Robótico Unimate y al fondo Devol y Engelberger de CCC.

Es importante mencionar que el desarrollo de la informática, ha permitido la simulación del robot, la cual es importante para: la aplicación de métodos, análisis de parámetros, análisis de colocación, análisis

de colisión, cinemática, la dinámica, etc. [1] [2] [4] [3] [5]

En la enseñanza de la Robótica, el alumno muchas veces llega a nuestros cursos con una expectativa muy alta, entusiasmado por la televisión, el cine, y las redes sociales. Cuando el estudiante descubre que para la robótica implica el uso de la matemática viene muchas veces el descontento y la frustración, pues saber robótica implica pues, no solo programar, conectar, enlazar, también implica el Análisis matemático del movimiento del robot llamada cinemática. Este análisis matemático debe llevar al estudiante a realizar sinergia enlazando correctamente la mecánica, métodos de solución de la cinemática y la simulación. Como objetivo un alumno de cursos de robótica debe diseñar y analizar el movimiento de un robot, para lograr utilizar las metodologías matemáticas de solución de la cinemática del robot [1] [2] para llevar está a la simulación con algún *software*. [6] [7]

Este artículo se hace uso del Método Matricial para analizar los parámetros Denavit-Hartenberg (D-H o DH), para la solución de la Cinemática Directa aplicada a cadenas abiertas, [1] [2] [3] utilizando el software de National Instruments LabVIEW®, [6] [7] en el cual se trabajará con la programación orientada a objetos o gráfica, para obtener la solución Cinemática por Matrices de Transformación Homogénea, para un Robot Antropomórfico de tres grados de libertad. [1] [2] [8]

2. Desarrollo

Un Manipulador o Brazo robótico es una máquina cuyo mecanismo esta generalmente compuesto por una serie de segmentos articulados o deslizantes unos en relación con los otros, que tiene finalidad tomar o desplazar objetos (piezas o herramientas) generalmente según varios grados de libertad (GDL o DOF). Todo robot contiene partes, como son: la estructura mecánica, el controlador, sensores y actuadores, etc. [1] Otros autores mencionaran que contiene tres subsistemas el de movimiento, reconocimiento y control. [2] [4] La estructura mecánica de un robot puede estar compuesta de articulaciones, eslabones, reductores, trasmisiones, pares, entre otros. [1] [2] Un eslabón es un cuerpo rígido que mantiene unidas las articulaciones. Una articulación (joint) es un tipo de enlace entre dos sólidos que obliga a que ambos se muevan compartiendo un punto común, trasladándose juntos, pero dejando libre algunos de los grados de libertad de orientación entre ambos. Los grados de libertad (GDL) son el número de parámetros

independientes que fijan la posición del robot, es decir las articulaciones del dispositivo. Generalmente, el número de grados de libertad suele coincidir con el número de eslabones de la cadena cinemática. [5] [8]

En robótica podemos utilizar las articulaciones Prismáticas (1 GDL) que realiza movimiento lineal, Rotacional o Revoluta (1 GDL) que realiza movimiento giratorio, (ver figura 2) y la de Tornillo (1 GDL) de manera lineal, que en la práctica ya no se usa por cuestión de mantenimiento. [1] [2]

Debido a la importancia del vital líquido para el desarrollo nacional. El agua como fuente renovable de energía, contribuye de modo significativo a garantizar el crecimiento ecológico, que presupone el rechazo gradual por parte de la economía del uso de fuentes de energía no renovables.

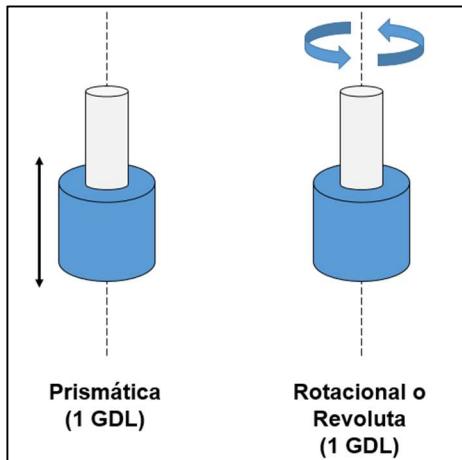


Fig. 2 Articulación Prismática y Rotacional.

Los robots manipuladores pueden contener los siguientes tipos de cadenas cinemáticas:

- 1) Cadena abierta. Sus elementos se encuentran conectados uno a uno en serie.
- 2) Cadena cerrada. Sus elementos están conectados en paralelo. En esta la cadena se forma un lazo o ciclo u otra manera es ir de un punto al cual regresamos.

Los robots de cadena abierta se pueden clasificar según su estructura en:

- 1) Cartesianos.
- 2) Cilíndricos.
- 3) Esféricos o Polares.
- 4) Antropomórficos o Articulares.
- 5) SCARA.

La figura 3 presenta ejemplo de los tipos de estructuras de cadena abierta. [1] [2]

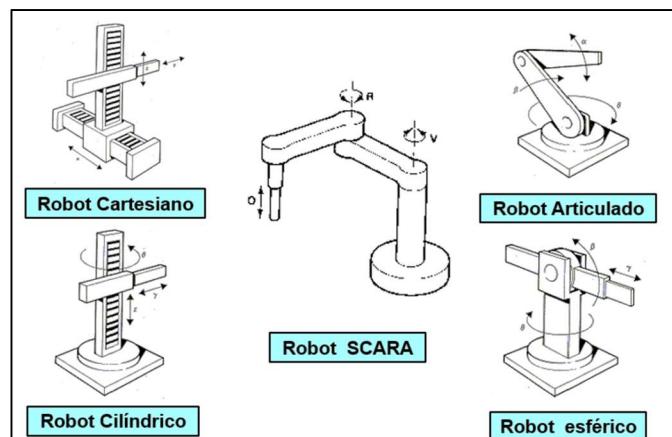


Fig. 3 Tipos de estructuras de cadena abierta en Robots

La Cinemática del robot se define como la rama de la robótica que estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen. [1] La figura 4 muestra un esquema de cómo se puede resolver la cinemática de un robot.

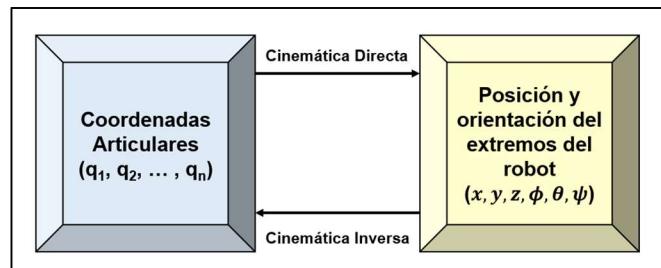


Fig. 4 Cinemática del Robot.

En un robot el problema cinemático puede analizarse de manera:

- 1) Cinemática directa. Este consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.
- 2) Cinemática inversa. Este resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas. [1] [2]

La resolución del problema cinemático directo permite conocer cuál es la posición y orientación que adopta el extremo del robot cuando cada una de las variables que fijan la posición u orientación de sus

articulaciones toma valores determinados. Para resolver la cinemática directa podemos usar:

- 1) Métodos geométricos. Son adecuados para casos simples, pero al no ser sistemáticos, su aplicación queda limitada a robots con pocos grados de libertad.
- 2) Métodos basados en cambios de sistemas de referencia. Permiten de manera sistemática abordar la obtención del modelo cinemático directo del robot para robots de n-grados de libertad, son frecuentemente los más utilizados, en particular los que usan las matrices de transformación homogénea.

Dado que son las variables articulares las que pueden ser leídas directamente de los correspondientes sensores por la unidad de control del robot, el modelo cinemático directo será utilizado por éste, entre otros fines, para presentar al usuario información relativa a la localización del extremo del robot.

3. Metodología

En resumen, las metodologías más comunes para resolver la cinemática directa que aparecen en la literatura son:

- Método Geométrico. (Máximo 3 gdl)
- Método con Matrices de transformación homogénea.
- Método con Cuaternios.

En este artículo usaremos el Método con Matrices de transformación homogénea y utilizaremos el software LabVIEW® de National Instruments® por su programación gráfica y fácil asimilación, aplicación de instrumentación virtual.

Para el desarrollo de la simulación en este artículo debemos de:

- 1) Análisis de necesidades.
- 2) Tipo de cadena cinemática.
- 3) Medidas de eslabones.
- 4) Grados de libertad.
- 5) Método de solución de la cinemática.
- 6) Selección del software.
- 7) Tipo de Simulación.

3.1 Matriz de Transformación

Una Matriz Homogénea se define como una matriz 4x4 que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro. [1] [2]

La Matriz Homogénea se compone de:

- 1) Matriz de rotación. (submatriz R_{3x3})
- 2) Vector de traslación. (P_{3x1})
- 3) Transformación de perspectiva. (f_{1x3})
- 4) Escalado global, submatriz w . (w_{1x1})

Se puede representar como:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

En robótica generalmente solo nos interesa conocer el valor de Rotación y de Traslación. Los componentes de las matrices de, Perspectiva se considera como nula (0) y la de Escalado con valor de una unidad (1). De esta manera la Matriz de transformación homogénea queda de la siguiente manera:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La ventaja principal de las Matrices Homogéneas es que se puede orientar y posicionar al mismo tiempo. [1] [2]

3.2 Parámetros Denavit Hartenberg

Jacques Denavit y Richard Scheunemann Hartenberg publicaron en 1955 en el Journal of Applied Mechanics un artículo que describía un Método matricial, titulado: Una notación cinemática para mecanismos de pares inferiores basados en matrices (*A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*). [9]

La representación de Denavit-Hartenberg(D-H) es la forma habitual que se suele utilizar en robótica. Denavit y Hartenberg proponía un método matricial que establece la localización que debe tomar cada sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, para poder sistematizar la obtención de las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. [2] [10] [11]

Para obtener los 4 parámetros D-H se tiene que analizar las características geométricas del eslabón.

Los 4 parámetros D-H son:

- 1) Rotación en el eje z un ángulo θ .
- 2) Traslación en eje z a una distancia d .
- 3) Traslación en el x a una distancia a .
- 4) Rotación en eje x a un ángulo α .

Se recomienda que el análisis de la cadena la realicemos en una tabla.

Recordando que el producto de matrices es no conmutativo, la expresión para cada eslabón que se tenga, dependiendo del robot está dada por:

$${}^{i-1}A_i = \text{Rotz}(\theta_i) \cdot T(0, 0, d_i) \cdot T(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rotx}(\alpha_i)$$

Donde:

θ_i , d_i , a_i , α_i : Son los parámetros D-H del eslabón i.

Y realizando el producto entre matrices se obtiene:

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

Que nos da como resultado:

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

Dependiendo de los eslabones del robot tendríamos que realizar la obtención de la Matriz T:

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot \dots \cdot {}^{i-1}A_i$$

3.3 Iconos para Matrices en LabVIEW

LabVIEW® cuenta con diversos submenús para realizar operaciones matemáticas en el Diagrama de Bloques. [7]

Pero cuando se requieren operaciones complejas con matrices, LabVIEW cuenta con un submenú específico para trabajar con ellas.

Damos clic derecho en el Diagrama de Bloques para que abra la Paleta de funciones ver figura 5, de manera predeterminada esta expandida la opción *Programming*, aquí daremos clic en *Mathematics*.

La figura 6 presenta el submenú *Mathematic* expandido, después damos clic en submenú *Linear Algebra*, después clic en *Matrix*.

La figura 7 presenta el submenú *Linear Algebra*, que podemos utilizar para realizar las diversas operaciones como el producto $A \times B$, etc; después damos clic en *Matrix*.

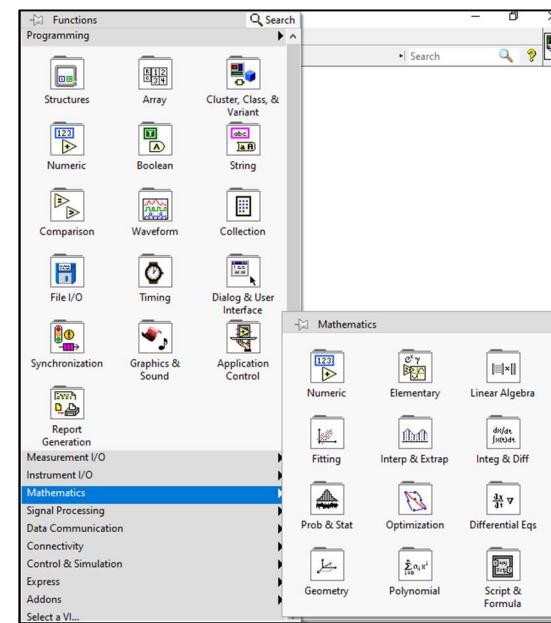


Fig. 5 Paleta de funciones.

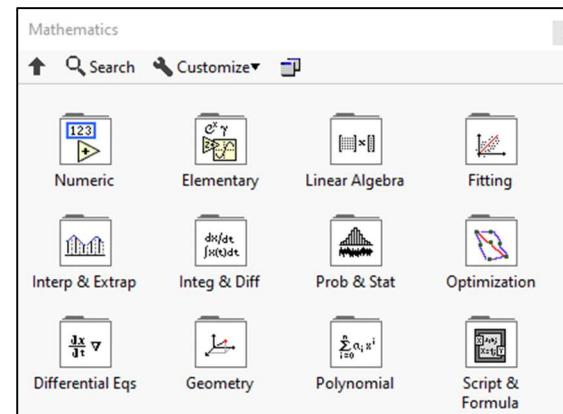


Fig. 6 Submenú Mathematics.

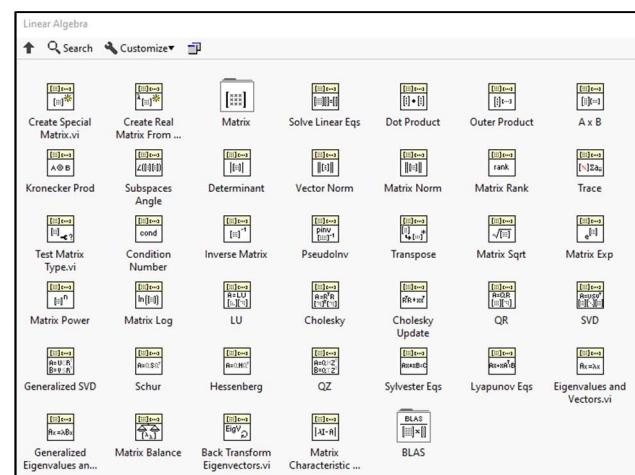


Fig. 7 Submenú Linear Algebra.

La figura 8 presenta el submenú *Matrix*, que utilizaremos para realizar las diversas operaciones con matrices.

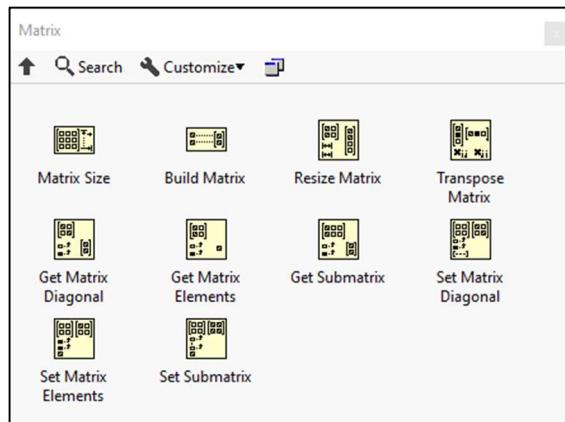


Fig. 8 Submenú *Matrix*.

3.4 Programación de Fila D-H en LabVIEW

Para iniciar se programa en LabVIEW la fila de Parámetros Denavit Hartenberg(D-H), se realizó el Panel frontal y el diagrama de Bloques como se muestran en las figuras 9 y 10.

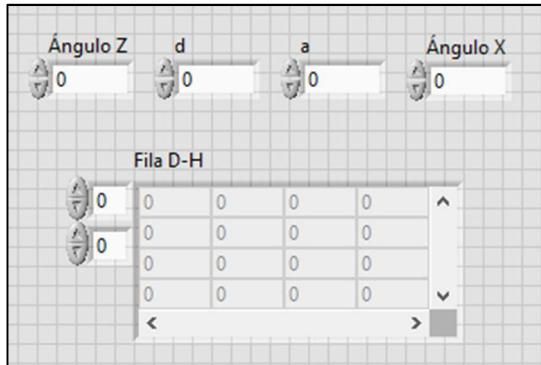


Fig. 9 Panel frontal de fila D-H.

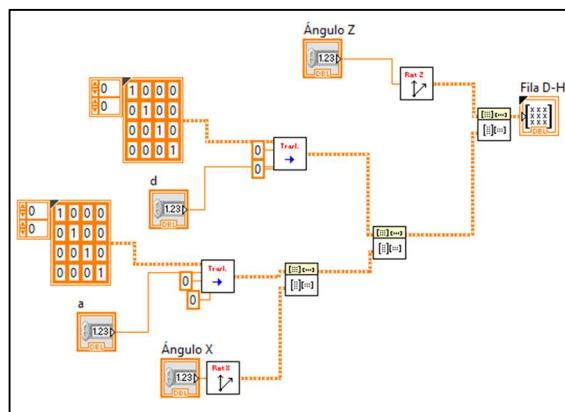


Fig. 10 Diagrama de Bloques de fila D-H.

3.5 Caso de análisis Robot Antropomórfico

En la figura 11 se observa un robot Articular o Antropomórfico de 3GDL.

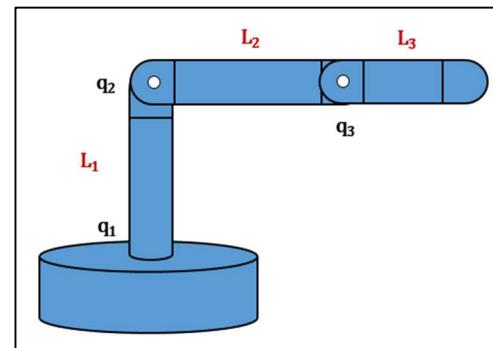


Fig. 11 Robot antropomórfico de 3 GDL.

Para el caso estudio de 3 GDL, nuestra metodología a seguir se resume en:

- 1) Análisis de necesidades: Posicionar y orientar el extremo, usando los parámetros D-H.
- 2) Tipo de cadena cinemática: Abierta.
- 3) Medidas de eslabones: L_1 , L_2 y L_3 .
- 4) Grados de libertad: 3 GDL.
- 5) Método de solución de la cinemática: Matrices de Transformación Homogénea.
- 6) Selección del software: LabVIEW
- 7) Tipo de Simulación: 3D – usar Line Graph.

En los resultados se presentará la Tabla con los parámetros D-H y la solución de las tres filas de la matriz T:

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3$$

3.6 Programación en LabVIEW del Robot 3 GDL

Para programar este caso en LabVIEW y obtener los parámetros D-H, se realizó en primer lugar el Panel Frontal como muestra la figura 12.

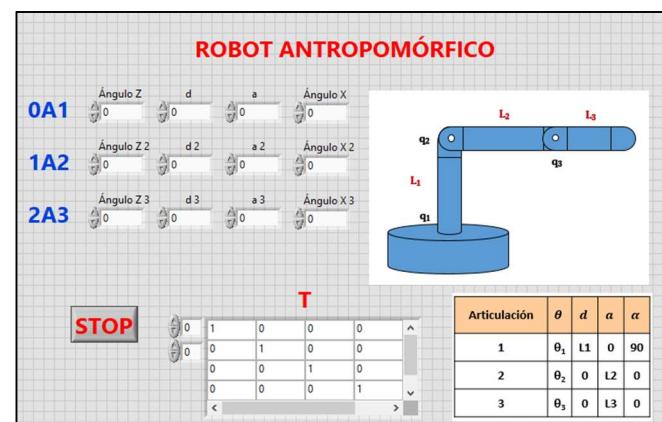


Fig. 12 Panel Frontal de Robot Antropomórfico de 3 GDL para obtención de Matriz T.

En el Panel Frontal se observa las 3 filas que se determinaron al realizar el análisis de los parámetros D-H, se observan los 4 valores de cada fila. Se presenta la figura de ayuda y la tabla; y se presenta un *array* de indicadores para la matriz.

En la figura 13 se presenta el Diagrama de Bloques donde se utilizó un subVI para desarrollar los parámetros D-H. Se utilizó la estructura *While Loop*, para utilizar un botón de *Stop*.

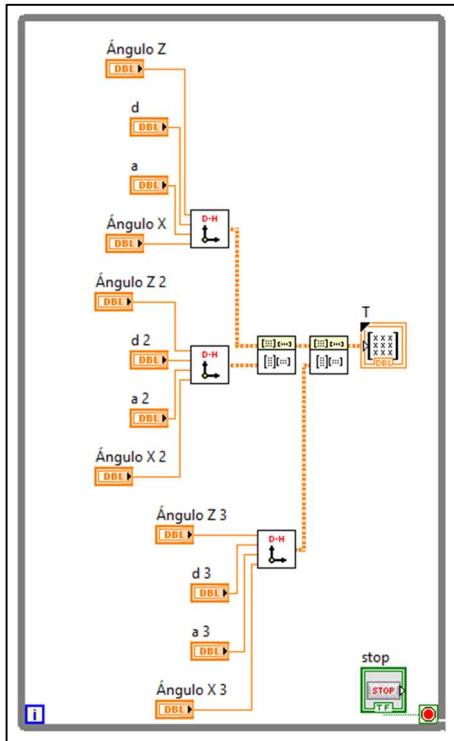


Fig. 13 Diagrama de Bloques de Robot Antropomórfico de 3 GDL para obtención de Matriz T.

Para visualizar la simulación en LabVIEW, se usará el ícono Line Graph se encuentra en la ruta: Controls >> Modern >> Graph >> 3D Graph >> Line Graph, como se muestra en la figura 14.

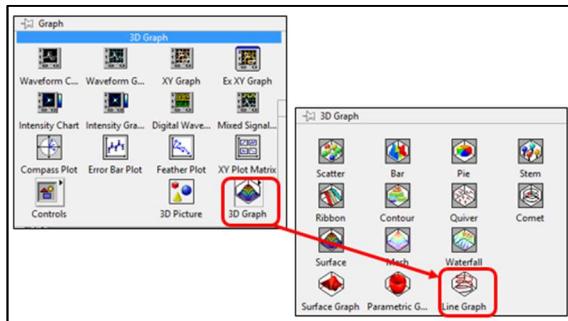


Fig. 14 Ubicación del ícono Line Graph.

El ícono *Line Graph* nos permite desplegar un gráfico en 3D en el Panel Frontal como muestra la figura 15.

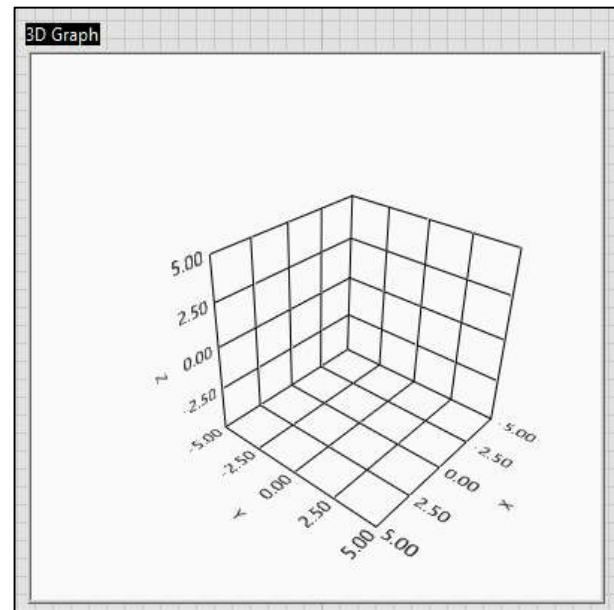


Fig. 15 Ícono 3D Graph en Panel Frontal.

4. Resultados

En el caso de la simulación de la fila de parámetro D-H se introdujeron los valores de:

- $\theta = 90$
- $d = 1$
- $a = 2$
- $\alpha = 45$

La figura 16 muestra los resultados en el Panel Frontal. Recuerde que LabVIEW nos permite modificar la forma de visualización de números.

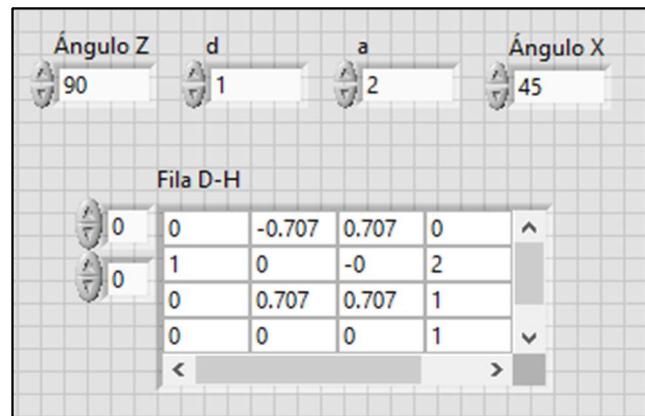


Fig. 16 Simulación en Panel frontal fila D-H.

Al obtener las filas del Robot Antropomórfico de 3 GDL de la figura 11, obtenemos la tabla de los parámetros D-H, para este caso obtendríamos 3 filas, la tabla 1 muestra los resultados.

Tabla 1 Tabla de parámetros D-H para Robot Antropomórfico de 3 GDL.

Articulación	θ	d	a	α
1	θ_1	L1	0	90
2	θ_2	0	L2	0
3	θ_3	0	L3	0

Las filas de la tabla 1 quedan representadas como:

$$\begin{aligned} {}^0A_1 &= \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^1A_2 &= \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & L2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & L2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^2A_3 &= \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & L3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & L3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La matriz T para el caso de este robot tiene la forma:

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3$$

Al colocar las filas tenemos:

$$T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & L2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & L2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & L3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & L3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En la figura 17 se presenta el Panel Frontal con los parámetros D-H analizados.

Colocando los valores de los eslabones como: L1=5, L2=3 y L3=2 y para cuestiones de prueba los valores de: $\theta_1=90$, $\theta_2=3$ y $\theta_3=90$. Con lo cual obtenemos los valores de la Matriz T.

En la figura 18 se presenta el Panel Frontal con los parámetros D-H analizados y su visualización en 3D Graph.

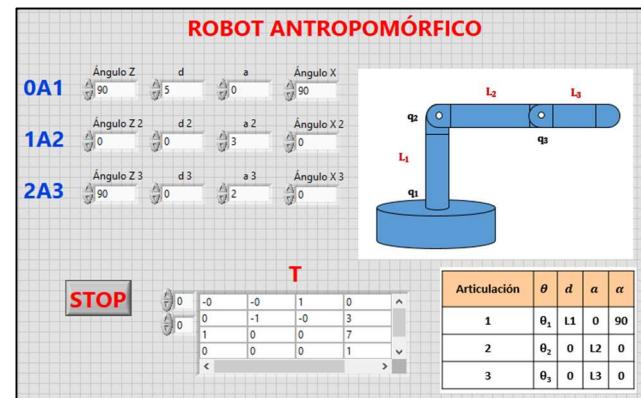


Fig. 17 Panel Frontal de tabla con parámetros D-H.

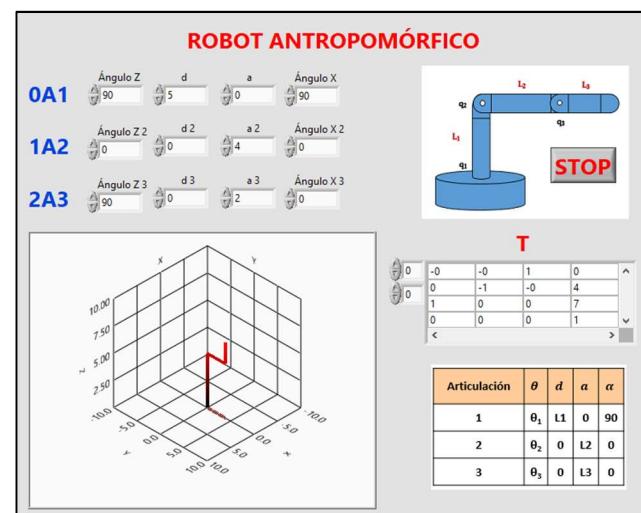


Fig. 18 Panel Frontal de tabla con parámetros D-H y su visualización en 3D Graph.

5. Conclusiones

La programación gráfica permite la asimilación de los modelos matemáticos haciéndolos interactivos, lo cual facilita la transmisión del conocimiento por parte del docente y como la mayoría de los alumnos y personas son más visuales esto facilita mejor la interacción.

El aprendizaje significativo se obtiene a través de la aplicación de Matemática Matricial, los íconos de visualización.

La obtención de los parámetros D-H y la Matriz T son cruciales para presentar la cinemática del Robot por ello debe tenerse mucho cuidado en su análisis pues la no aplicación correcta puede llevarnos a

resultados incorrectos. Para la programación es indispensable tener resuelta la matriz T.

El uso de Análisis de Cinemática con D-H requiere analizar la estructura del robot en particular y será diferente para cada caso.

El uso icono 3D Graph permite la visualización adecuada e interactiva del caso en estudio.

6. Agradecimientos

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México campus Hermosillo por todas las facilidades prestadas para el desarrollo de este trabajo, a los alumnos de la carrera de Ingeniería Biomédica, y a PRODEP por los apoyos de Fortalecimiento a Cuerpos Académicos.

7. Referencias

- [1] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, Fundamentos de Robótica, 2da Edición ed., Aravaca: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2007.
- [2] S. K. Saha, Introducción a la Robótica, Ciudad de México: McGraw-Hill/Interamericana, 2010.
- [3] J. J. Craig, Robótica, Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice Hall, 2006, p. 408.
- [4] W. Bolton, Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 6ta ed., Editorial Alfaomega, 2017, p. 664.
- [5] A. Ollero Baturone, Robótica Manipuladores y robots móviles, Barcelona: Marcombo, 2001.
- [6] J. R. Lajara y J. Pelegrí, LabVIEW: entorno gráfico de programación, 2da edición ed., Alfaomega, 2011, p. 480.
- [7] R. W. Larsen, LabVIEW for Engineers, New Jersey: Prentice Hall, 2011.
- [8] C. E. Conejo Benítez, Tesis de Maestría: Modelado y control de un brazo Robótico de 3 grados de libertad, Salamanca, Guanajuato, 2021.
- [9] J. Denavit y R. S. Hartenberg, «A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices,» Journal of Applied Mechanics, vol. 22, nº 2, pp. 215-221, 01 06 1955.
- [10] P. I. Corke, «A simple and systematic approach to assigning Denavit–Hartenberg parameters,» IEEE transactions on robotics, vol. 23, nº 3, pp. 590-594, 01 06 2007.
- [11] A. A. Hayat, R. G. Chittawadigi, A. D. Udai y S. K. Saha, «Identification of Denavit–Hartenberg Parameters of an Industrial Robot,» AIR, pp. 1-6, 04 07 2013.