

DISEÑO, MODELO CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT NEUMÁTICO DE 4 DOF

DESIGN, KINEMATIC MODEL AND SIMULATION OF A 4 DOF PNEUMATIC ROBOT

José Armando Pérez Delgado

Universidad Autónoma de Querétaro
jperezdb2013@gmail.com

Juan Manuel Ramos Arreguín

Universidad Autónoma de Querétaro
jsistdig@yahoo.com.mx

Gerardo Israel Pérez Soto

Universidad Autónoma de Querétaro
israel.perez@uaq.mx

Efrén Gorrostieta Hurtado

Universidad Autónoma de Querétaro
efrengorrostieta@gmail.com

Resumen

En el desarrollo de la tecnología industrial, los robots industriales juegan un papel muy importante para una gran variedad de tareas, como es traslado de materiales, aplicación de soldadura, aplicación de pintura, entre otros. Actualmente, gran parte de los sistemas robóticos son accionados mediante actuadores eléctricos debido a su fácil control. Sin embargo, los actuadores eléctricos tienen una relación potencia-peso baja. Esto es, para levantar poco peso, requieren de una gran cantidad de energía. Los actuadores eléctricos no son los únicos que pueden ser utilizados, también se tienen actuadores neumáticos, pero en menor cantidad que los eléctricos. Los actuadores neumáticos tienen una alta relación potencia-peso, pues pueden levantar mayor peso con menos energía y sin riesgo de daños. La fuente de energía de un actuador neumático es el aire comprimido, por lo que no se genera contaminantes y en caso de que el actuador se sobrecargue, simplemente no se va a mover y no se genera daño alguno. En este trabajo se presenta el desarrollo de la simulación

de la planeación de trayectoria de un robot neumático de 4 grados de libertad (DOF), a partir del desarrollo del modelo cinemático. Así mismo, se presenta el análisis cinemático de velocidad del robot y el análisis de posición de un mecanismo de 4 barras del manipulador presente en el diseño del robot neumático.

Palabra(s) Clave: Cinemática, Planeación de trayectoria, Robots neumáticos.

Abstract

In the development of industrial technology, industrial robots have a very important role in different tasks, such as, material displacement, welding processes, paint application, among others. Currently, most of the robotic systems are powered by electric actuators due to its easy control. However, electric actuators have a low power-to-weight ratio. In other words, in order to lift little weight, they require a large amount of energy. Not only electric actuators can be used, but also there are pneumatic actuators that are in fewer quantities than the electric ones. Pneumatic actuators have a high power-to-weight ratio, because they can lift more weight with less energy and without damage risk. The source of energy of a pneumatic actuator is compressed air, so contaminants are not generated and in case the actuator is overloaded, it would simply not move and no damage generated. This paper presents the development of the simulation of the planning trajectory of a pneumatic robot with 4 degrees of freedom (DOF), from the kinematic model development. Additionally, it presents the kinematic analysis of the robot's speed and the position analysis of a 4-bar mechanism from the manipulator in the design of the pneumatic robot.

Keywords: *pneumatic robot, kinematic model, planning trajectory.*

1. Introducción

Actualmente, la implementación de actuadores neumáticos orientados a aplicaciones industriales comprende generalmente procesos de automatización, donde son utilizados para tareas de avance y retroceso, aplicaciones de baja precisión o exactitud. Lo anterior, debido a que el aire tiene un comportamiento

altamente no lineal asociados a las propiedades de expansión y compresión. En consecuencia, los actuadores neumáticos son poco usados en aplicaciones de robótica, siendo los más utilizados los actuadores eléctricos. Se ha demostrado que los robots que usan actuadores neumáticos tienen grandes ventajas frente a los actuadores eléctricos. Algunas de estas ventajas son la alta relación de potencia-peso, menor costo, mayor factor de seguridad, y son más limpios y menos contaminantes (Chang, 2010).

El desarrollo de robots neumáticos está teniendo un gran crecimiento. En 2005, Kiyama presenta el modelo y control de un manipulador neumático de un grado de libertad, el diseño del manipulador neumático propone el uso de un mecanismo de 4 barras (Fco, Trabajo, Industrial, & Doctoral, 2005). González Castillo presenta el diseño en SolidWorks de un robot neumático de 6 grados de libertad y se implementa solamente de 3 grados de libertad los cuales son controlados mediante un sistema electrónico basado en un microcontrolador (Castillo, Eduardo, Arreguín, Manuel, & Dimas, 2016). Gonzales Trejo presenta el diseño, implementación y simulación de un robot bípedo de 6 grados de libertad, utiliza el método de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático (Trejo et al., 2014). El prototipo usa servomotores eléctricos, siendo un prototipo de baja potencia mecánica (Trejo et al., 2014). Petrescu presenta una revisión de la implementación del método geométrico para la obtención del modelo cinemático inverso de diferentes sistemas robóticos y valida sus resultados obteniendo el modelo cinemático inverso de un robot de 3 DOF (Petrescu et al., 2017). García López presenta el análisis de la cinemática inversa y directa de un robot hexápodo para el desarrollo del modelo cinemático utiliza la convención Denavit-Hartenberg, para validar el movimiento del robot desarrolla la simulación de planeación de trayectoria en una interfaz Open GL en base a un CAD del robot hexápodo (García-López et al., 2012).

Abdallah Abdelwahab presenta el modelado y simulación de un sistema robótico de prótesis bilateral. El sistema es implementado en SimMechanics en Matlab, basándose en un modelo CAD (Abdelwahab, 2017). Sergio Velásquez presenta el modelo y simulación de sistemas caóticos a través de péndulos acoplados, el

modelo dinámico del sistema es simulado usando SimMechanics en Matlab (Velásquez & Velásquez, 2014). García Badillo presenta el diseño de un robot neumático de 4 DOF, además presenta el hardware electrónico y un algoritmo de control implementado en un DSP Delfino C2000 (Gaspar-Badillo et al., 2017). Sánchez Solar presenta en simulador grafico basado en librerías Open GL para un robot neumático de dos grados de libertad, propone la implementación de una red neuronal back-propagation para el control del robot neumático (Sanchez-Solar, Rivas-Araiza, Gorrostieta-Hurtado, & Ramos-Arreguin, 2017).

2. Métodos

Esta sección presenta el diseño del robot neumático, así mismo la metodología para la obtención del modelo cinemático del robot y el análisis de posición del mecanismo de 4 barras presente en la morfología del robot neumático.

En la siguiente sección se muestra el modelo cinemático del robot. El análisis cinemático de posición directa e inversa será necesario para evaluar la planeación de trayectoria asumiendo que se conocen las coordenadas cartesianas del robot para una trayectoria deseada.

Diseño conceptual del robot neumático de 4 DOF

La morfología del robot neumático consta de 4 DOF. El robot neumático es accionado mediante 4 articulaciones de revoluta, 2 de las articulaciones generadas en la morfología asociada, están basadas en el diseño del manipulador de Kiyama (Fco, Trabajo, Industrial, & Doctoral, 2005). Así mismo, las articulaciones restantes son generadas mediante el acoplamiento de motores neumáticos. La morfología que se presenta en la figura 1 está conformada de 3 articulaciones de revoluta para la posición del robot en el plano y una articulación para su orientación. Las especificaciones de los actuadores neumáticos presentes en la morfología del robot se describen en la tabla 1.

Análisis cinemático de posición directa del robot neumático de 4 DOF

La metodología implementada para la obtención de la cinemática directa de posición, consta de la implementación de la convención Denavit-Hartenberg (D-H).

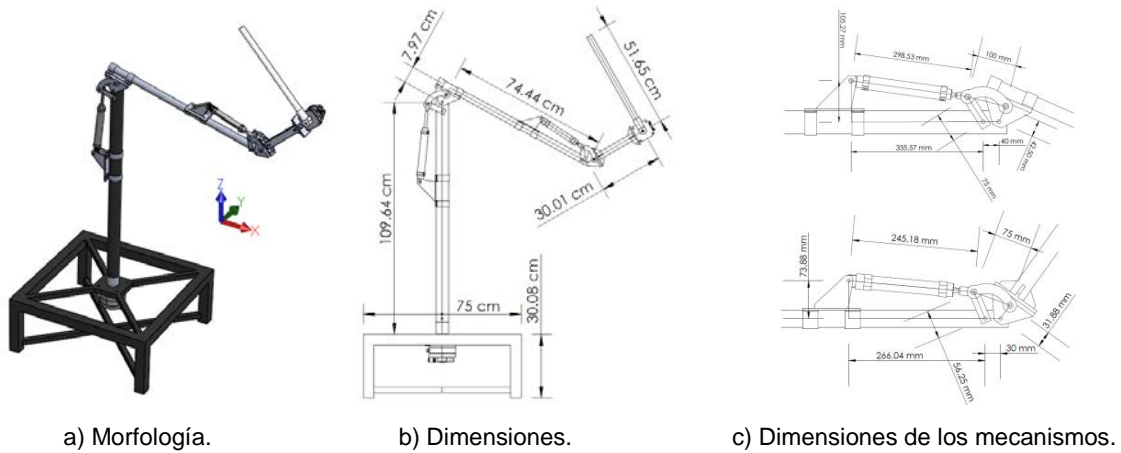


Figura 1 Robot neumático.

Tabla 1 Especificaciones de los actuadores neumáticos.

Actuador neumático	Presión de trabajo	Angulo de giro
FESTO DSMI-40-270-AB	1.5 a 10 bar	0 a 270°
FESTO DSMI-25-270-AB	1.5 a 10 bar	0 a 210°
Actuador neumático	Presión de trabajo	Desplazamiento del pistón
CM2YC32-150Z	0.02 a 0.7 MPa	0 a 150 mm
CM2YC25-100Z	0.02 a 0.7 MPa	0 a 100 mm

Este método propone el movimiento articulado de un robot con n articulaciones que puede ser expresado mediante los siguientes parámetros:

θ_i es el ángulo formado entre el eje x_i y el eje x_{i+1} a lo largo del eje z_i .

d_i es la distancia entre el eje x_i y el eje x_{i+1} a lo largo del eje z_i .

α_i es el ángulo formado entre el eje z_i y el eje z_{i+1} a lo largo del eje x_{i+1} .

a_i es la distancia entre el eje z_i y el eje z_{i+1} a lo largo del eje x_{i+1} .

La matriz de transformación homogénea definida por T_i , representa el movimiento articulado de i a la articulación $i+1$ en la ecuación 1.

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & a_i \text{sen}(\theta_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriz de posición de D-H está definida por T en la ecuación 2.

$$T_R = T_i * T_{i+1} * \dots * T_{n-1} * T_n \quad (2)$$

La figura 2, presenta la representación asociada de la convención D-H, la tabla 2 presenta los parámetros de D-H asociados al robot neumático.

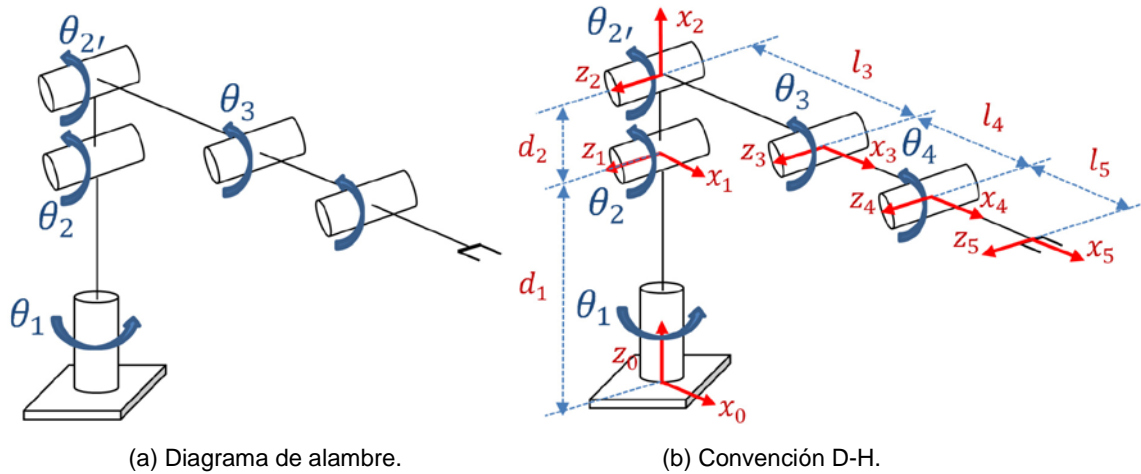


Figura 2 Robot neumático.

Tabla 2 Parámetros del robot neumático.

Parámetros D-H					Valores numéricos de los parámetros D-H				
Articulación i	θ_i	d_i	α_i	a_i	Articulación i	θ_i	d_i	α_i	a_i
1	θ_1	l_1	0	90°	1	θ_1	109.64 cm	0	90°
2	θ_2	0	l_2	0	2	θ_2	0	7.97 cm	0
3	$\theta_{2'}$	0	l_3	0	3	-90°	0	74.44 cm	0
4	θ_3	0	l_4	0	4	θ_3	0	30 cm	0
5	θ_4	0	l_5	0	5	θ_4	0	51.65 cm	0

La matriz de posición obtenida mediante la convención D-H está dada por la ecuación 3.

$$T_i = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde de la ecuación 4 a la 12 se definen los términos de la ecuación 3.

$$a_x = -\cos(q_1)\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) \quad (4)$$

$$a_y = -\text{sen}(q_1)\cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (5)$$

$$a_z = -\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) \quad (6)$$

$$b_x = \cos(q_1)\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) \quad (7)$$

$$b_y = \text{sen}(q_1)\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) \quad (8)$$

$$b_z = -\cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (9)$$

$$c_x = \text{sen}(q_1) \quad (10)$$

$$c_y = -\cos(q_1) \quad (11)$$

$$c_z = 0 \quad (12)$$

$$c_z = 0$$

En las ecuaciones 13, 14 y 15 se expresa la posición del robot.

$$p_x = \cos(q_1)[l_4\text{sen}(q_2 + q_3) + l_5\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) + l_2\cos(q_2) + l_3\text{sen}(q_2)] \quad (13)$$

$$p_y = \cos(q_1)[l_4\text{sen}(q_2 + q_3) + l_5\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) + l_2\cos(q_2) + l_3\text{sen}(q_2)] \quad (14)$$

$$p_z = l_1 - l_4\cos(q_2 + q_3) - l_5\cos(q_2 + q_3 + q_4) - l_3\cos(q_2) + l_2\text{sen}(q_2) \quad (15)$$

Análisis cinemático de posición inversa del robot neumático de 4 DOF

En base a la morfología asociada de la figura 1, las coordenadas cartesianas p_x , p_y y p_z representan la posición del efector final. Donde el primer grado de libertad q_1 expresa el movimiento rotacional del plano generado por las variables articulares q_2 , q_3 y q_4 tal como se presenta en la figura 3.

La rotación generada por la articulación q_1 está dada por la ecuación 16.

$$q_1 = a \tan 2 \left(\frac{p_y}{p_x} \right) \quad (16)$$

La metodología propuesta para la obtención de las variables articulares q_2 , q_3 y q_4 del plano generado por la figura 3 consiste en proponer un ángulo q_p para la orientación del último eslabón. En las ecuaciones de la 17 a la 24 se presentan las variables necesarias para la solución de la cinemática inversa mediante el método geométrico.

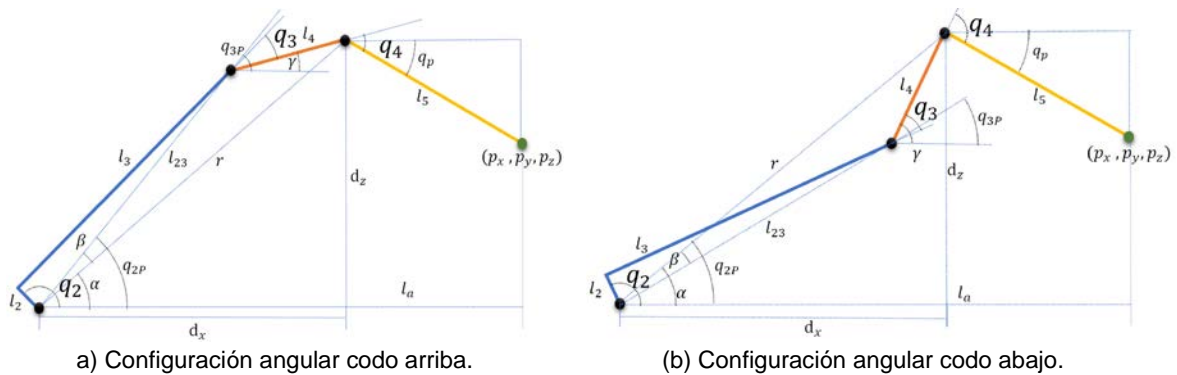


Figura 3 Proyección geométrica.

$$l_a = \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2} \quad (17)$$

$$d_x = l_a - l_5 \cos(q_p) \quad (18)$$

$$d_z = p_z - l_1 - l_5 \sin(q_p) \quad (19)$$

$$l_{23} = \sqrt{(l_2)^2 + (l_3)^2} \quad (20)$$

$$r = \sqrt{(d_x)^2 + (d_z)^2} \quad (21)$$

$$\alpha = a \tan 2 \left(\frac{d_z}{d_x} \right) \quad (22)$$

$$\cos(\beta) = \frac{l_{23}^2 + r^2 - l_4^2}{2l_{23}r} \quad (23)$$

$$\sin(\beta) = \sqrt{1 - (\cos(\beta))^2} \quad (24)$$

La solución de β para la configuración angular codo arriba se muestra en la ecuación 25.

$$\beta = a \tan 2 \left(\frac{\text{sen}(\beta)}{\text{cos}(\beta)} \right) \quad (25)$$

La solución de β para la configuración angular codo abajo se muestra en la ecuación 26.

$$\beta = a \tan 2 \left(\frac{-\text{sen}(\beta)}{\text{cos}(\beta)} \right) \quad (26)$$

En la ecuación 28 y 28 se describen las variables q_{2P} y q_{3P} .

$$q_{2P} = \alpha + \beta \quad (27)$$

$$\gamma = a \tan 2 \left(\frac{d_z - l_{23} \text{sen}(q_{2P})}{d_x - l_{23} \text{cos}(q_{2P})} \right) \quad (28)$$

$$q_{3P} = -q_{2P} + \gamma \quad (29)$$

En las ecuaciones 30, 31 y 32 se encuentra la solución de las variables articulares q_2 , q_3 y q_4 .

$$q_2 = q_{2P} + a \tan 2 \left(\frac{l_3}{l_2} \right) \quad (30)$$

$$q_3 = -q_{2P} + \gamma + a \tan 2 \left(\frac{l_2}{l_3} \right) \quad (31)$$

$$q_4 = q_p - q_{2P} - q_{3P} \quad (32)$$

Análisis de posición inversa del mecanismo de 4 barras

El modelo cinemático del robot neumático presenta 4 articulaciones, donde 2 de estas articulaciones corresponden de dos mecanismos de 4 barras, los cuales generan la posición angular requerida, esto gracias a la implementación de un

cilindro neumático, el cual, mediante control neumático, puede obtenerse el control de posición del vástago del cilindro. Las proyecciones geométricas generadas por el mecanismo de 4 barras se presentan en la figura 4.

Donde la proyección geométrica del mecanismo de 4 barras con un ángulo q_i mayor de 90° está dado por $\beta = 270^\circ + q_i$, la solución de la proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i menor de 90° está dado por $\beta = 90^\circ + q_i$.

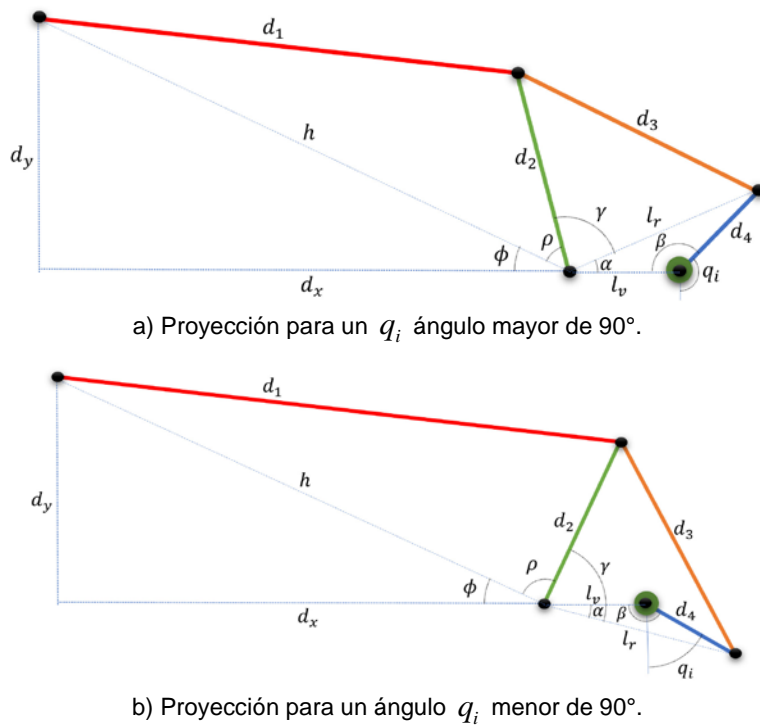


Figura 4 Proyección geométrica del mecanismo de 4 barras.

En las ecuaciones 33 a 39 se presenta las variables para la solución del análisis de posición inversa del mecanismo de 4 barras mediante el método geométrico, para ello se asume que se conocen los parámetros d , d_2 , d_3 , d_4 , d_x y d_y .

$$\phi = a \tan 2 \left(\frac{d_y}{d_x} \right) \quad (33)$$

$$h = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (34)$$

$$l_r = \sqrt{l_v^2 + d_4^2 - 2d_4l_v \cos(\beta)} \quad (35)$$

$$\alpha = a \cos 2 \left(\frac{l_r^2 + l_v^2 - d_4^2}{2l_rl_v} \right) \quad (36)$$

$$\gamma = a \cos 2 \left(\frac{l_r^2 + d_2^2 - d_3^2}{2l_rd_2} \right) \quad (37)$$

$$\rho = 180^\circ + \alpha - \gamma - \phi \quad (38)$$

$$d_1 = \sqrt{d_2^2 + h^2 - 2hd_2 \cos(\rho)} \quad (39)$$

El desplazamiento del pistón con base al análisis de posición del mecanismo está dado por la ecuación 40, donde d_1 representa la distancia necesaria para el ángulo q_i dado y d es la distancia del pistón retraído.

$$s = d_1 - d \quad (40)$$

Análisis cinemático de velocidad del robot neumático de 4 DOF

La metodología planteada por el jacobiano analítico consiste de un método más directo, el cual plantea diferenciar las ecuaciones correspondientes del modelo cinemático de posición. Donde la matriz jacobiana $J(q)$ está expresada en la ecuación 41.

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_1} & \ddots & \frac{\partial f_y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_z}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_z}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (41)$$

La matriz jacobiana $J(q)$ del robot está dada por la ecuación 42.

$$J(q) = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Donde los términos de ecuación 42 están descritos en las ecuaciones 43 a la 54.

$$a_1 = -\text{sen}(q_1)[l_4 \text{sen}(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_3 \text{sen}(q_2) + l_5 \text{sen}(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (43)$$

$$a_2 = \cos(q_1)[l_4 \text{sen}(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_3 \text{sen}(q_2) + l_5 \text{sen}(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (44)$$

$$a_3 = 0 \quad (45)$$

$$b_1 = \cos(q_1)[l_4 \cos(q_2 + q_3) - l_2 \text{sen}(q_2) + l_3 \cos(q_2) + l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (46)$$

$$b_2 = \text{sen}(q_1)[l_4 \cos(q_2 + q_3) - l_2 \text{sen}(q_2) + l_3 \cos(q_2) + l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (47)$$

$$b_3 = l_4 \text{sen}(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_3 \text{sen}(q_2) + l_5 \text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) \quad (48)$$

$$c_1 = \cos(q_1)[l_4 \cos(q_2 + q_3) + l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (49)$$

$$c_2 = \text{sen}(q_1)[l_4 \cos(q_2 + q_3) + l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (50)$$

$$c_3 = l_4 \cos(q_2 + q_3) + l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (51)$$

$$d_1 = l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \cos(q_1) \quad (52)$$

$$d_2 = l_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \text{sen}(q_1) \quad (53)$$

$$d_3 = l_5 \text{sen}(q_2 + q_3 + q_4) \quad (54)$$

3. Resultados

La figura 5 presenta el perfil de posición de las variables articulares q_2 y q_3 resultantes del análisis de posición inverso de los mecanismos de 4 barras con base a las dimensiones dadas por la tabla 3.

La figura 6 presenta el espacio de trabajo del robot neumático generado por las variables articulares de los límites de trabajo del robot presentados en la tabla 4.

SimMechanics es una herramienta que proporciona un entorno de simulación para sistemas mecánicos 3D. Además, esta herramienta proporciona la simulación a partir de las características mecánicas, tales como masas, inercias, articulaciones, etc., basándose en un modelo de geometría 3D.

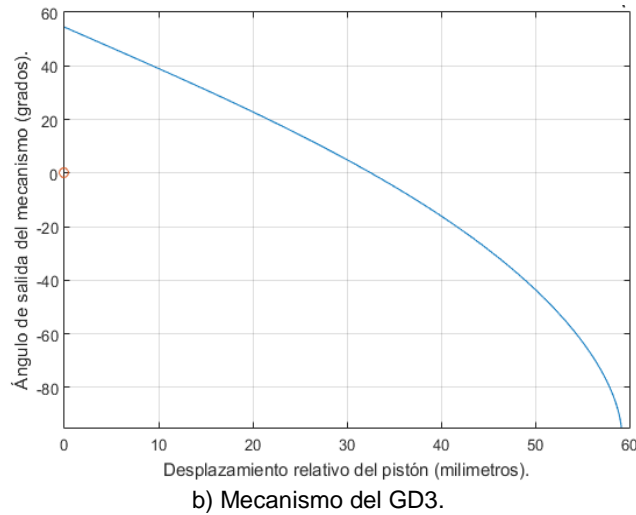
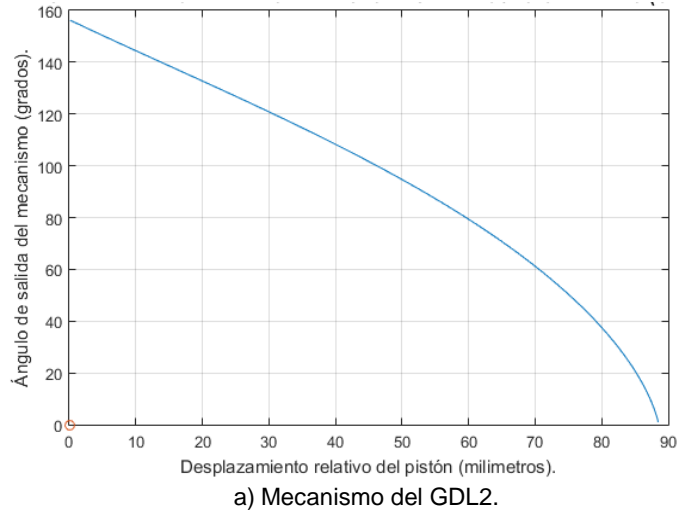


Figura 5 Desplazamiento relativo del pistón vs el ángulo generado en el mecanismo.

Tabla 3 Dimensiones de los parámetros de los mecanismos de 4 barras.

Parámetro	Mecanismo del GDL2	Mecanismo del GDL3
$d(mm)$	284.0249	245.1735
$d_2(mm)$	75	56.25
$d_3(mm)$	100	75
$d_4(mm)$	42.5	31.875
$d_x(mm)$	319.5405	266.0421
$d_y(mm)$	104.3657	73.8733
$l_v(mm)$	40	30

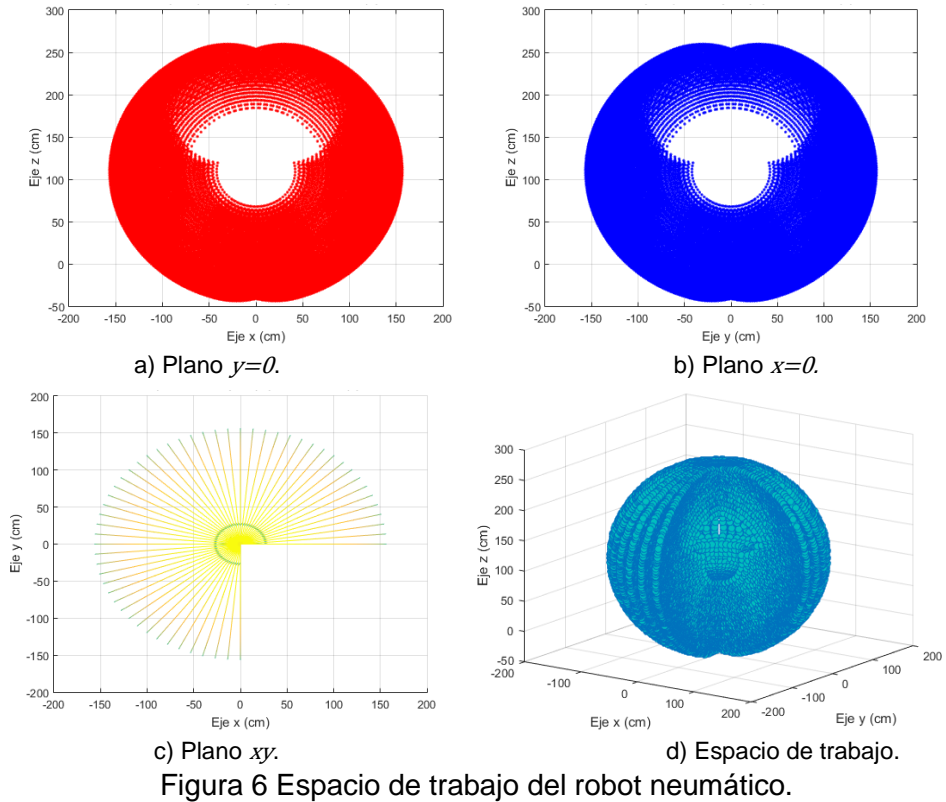


Tabla 4 Límite de trabajo de las variables articulares del robot neumático.

Dimensión	Límite mínimo	Límite máximo
q_1	0°	270°
q_2	0°	150°
q_3	-90°	55°
q_4	-90°	90°

La metodología implementada para la simulación del sistema robótico consta de la implementación de la herramienta, tal como se presenta en la figura 7.

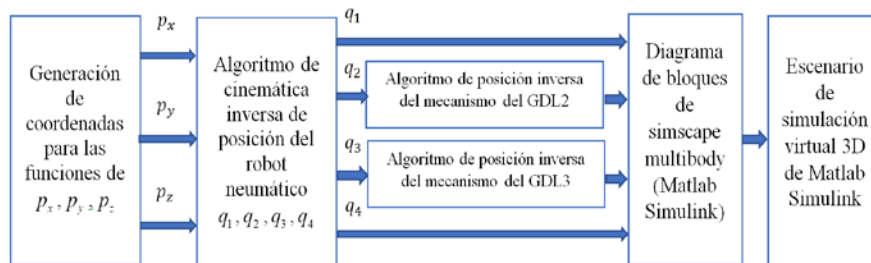


Figura 7 Metodología implementada para la simulación del sistema robótico.

La figura 8 presenta la implementación de la planeación de trayectoria utilizando la cinemática inversa del robot neumático.

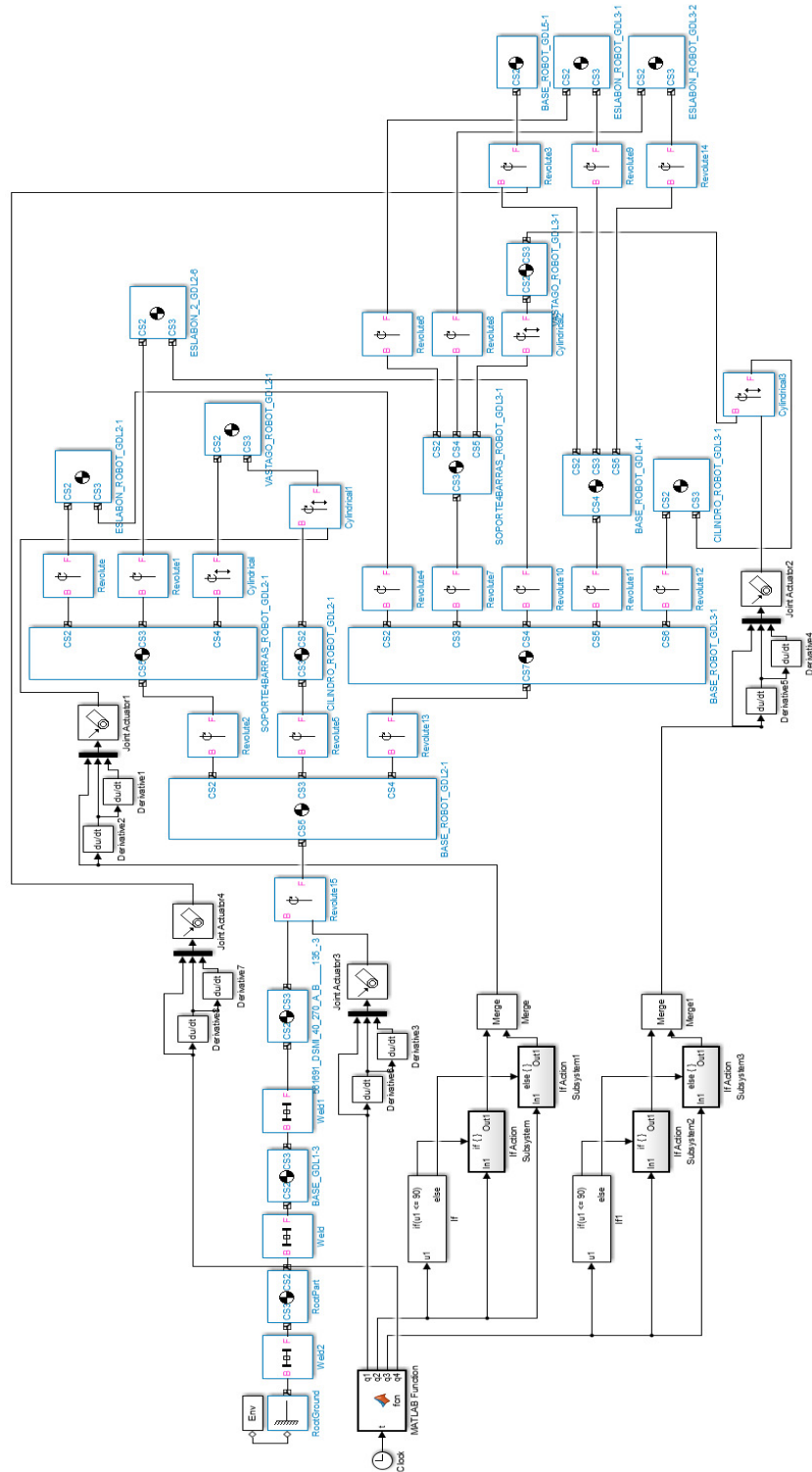


Figura 8 Implementación de la planificación de trayectoria del robot neumático al diagrama de bloques generado por SimMechanics.

La trayectoria planificada consiste en un círculo descrito por las funciones de las ecuaciones 55, 56 y 57, así mismo en la figura 9 se presenta el perfil de posición de las variables articulares obtenidas.

$$p_x = 130 + 10 \cos(t + \pi) \quad (55)$$

$$p_y = 0 \quad (56)$$

$$p_z = 140 + 10 \sin(t + \pi) \quad (57)$$

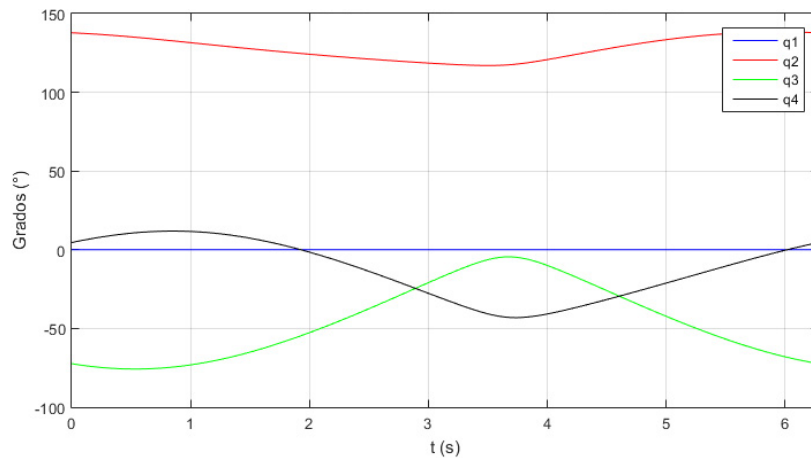


Figura 9 Perfil de posición de las variables articulares de la planeación de trayectoria.

La figura 10 presenta la simulación del robot neumático obtenido en SimMechanics de Matlab.

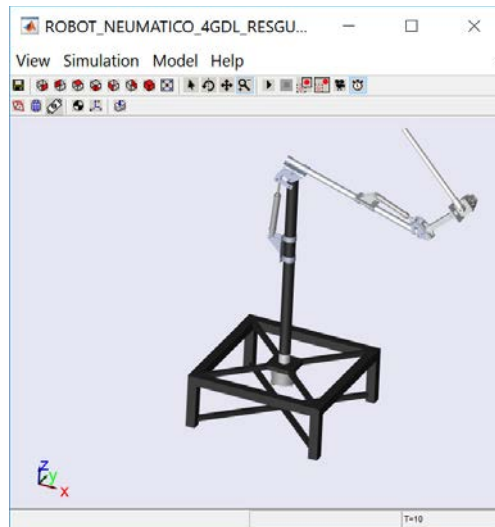


Figura 10 Simulación del robot neumático.

4. Discusión

SimMechanics representa una herramienta competente en la simulación de sistemas tanto robóticos como de control. La planeación de trayectoria propuesta en este trabajo fundamenta el movimiento generado por los actuadores neumáticos. Por otro lado, modela el manipulador flexible del mecanismo de 4 barras propuesto por Kiyama en 2005 (Fco, Trabajo, Industrial, & Doctoral, 2005), de tal manera que mediante algoritmos de control inteligente podrá reducirse el error de posición del sistema. El análisis del mecanismo y su perfil de posición angular, discute la necesidad de modificar las dimensiones del mecanismo, de tal manera que permita tener un mayor espacio de trabajo del robot, lo cual se verá directamente en los límites de trabajo de las variables articulares q_2 y q_3 , las cuales serán mayores respectivamente de los parámetros actuales.

Con base a lo anterior y como parte de futuras aplicaciones del trabajo presentado, existe la necesidad de implementar técnicas de control en el sistema robótico asumiendo las no linealidades presentes en los actuadores neumáticos. De tal manera que el sistema puede tener un control neumático asumiendo un modelo dinámico del robot.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Abdelwahab, S. A. (2017). Modeling and simulation of lower limb dynamics using simmechanics for potential applications in bilateral prosthesis control. *Merit Research Journal of Medicine and Medical Sciences*, (May).
- [2] Castillo, G., Eduardo, E., Arreguín, R., Manuel, J., & Dimas, V. (2016). Diseño de un Robot Neumático de 6 Grados de Libertad. *La Mecatrónica En México*, 5(3), 92–103.
- [3] Trejo, G., Enrique, J., Cruz, R., Ángel, L., López, A. E., Ortega, P., Rosas, D. (2014). Diseño, Modelado y Simulación de un Robot Bípedo. *La Mecatrónica En México*, 3(1), 11–22.
- [4] Chang, M. K. (2010). An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle

- actuators. *Control Engineering Practice*, 18(1), 13–22.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.08.005>
- [5] Fco, F., Trabajo, K. M., Industrial, D., & Doctoral, J. (2005). Modelado de un robot manipulador.
- [6] García-López, M. C., E. Gorrostieta-Hurtado, Vargas-Soto, E., Ramos-Arreguín, J. M., Sotomayor-Olmedo, A., & Morales, J. C. M. (2012). Kinematic analysis for trajectory generation in one leg of a hexapod robot. *Procedia Technology*, 3, 342–350.
- [7] Gaspar-Badillo, J.-E., Ramos-Arreguin, J.-M., Macias-Bobadilla, G., Talavera-Velazquez, D., Rivas-Araiza, E.-A., & Victor-Alexis, H.-B. (2017). Four DOF pneumatic robot design and hardware interface. In 2017 XIII International Engineering Congress (CONIIN) (pp. 1–7). IEEE.
- [8] Petrescu, R. V. V., Aversa, R., Akash, B., Bucinell, R. B., Corchado, J. M., Berto, F., ... Petrescu, F. I. T. (2017). Inverse Kinematics at the Anthropomorphic Robots, by a Trigonometric Method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(2), 394–411.
- [9] Sanchez-Solar, S.-D., Rivas-Araiza, E.-A., Gorrostieta-Hurtado, E., & Ramos-Arreguin, J.-M. (2017). Simulation of a two DOF pneumatic manipulator robot using control based on back propagation neural network. In 2017 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP) (pp. 1–8). IEEE.
- [10] Velásquez, S., & Velásquez, R. (2014). Modelado y simulación de sistemas caóticos a través de péndulos acoplados usando SimMechanics de Simulink. *Revista Interdisciplinaria de Estudios En Ciencias Básicas e Ingeniería*, (1).