



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Instrumentación y
Control Automático

Modelado y simulación de un robot neumático de 4 grados de libertad
TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

José Armando Pérez Delgado

Dirigido por:

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín

SINODALES

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín
Presidente

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega
Secretario

Dr. Saul Tovar Arriaga
Vocal

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado
Suplente

Dr. Juvenal Reséndiz Rodríguez
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, QRO
México.
Junio 2019

© 2019 - José Armando Pérez Delgado

All rights reserved.

This thesis is dedicated to my family

Agradecimientos

La gran satisfacción de poder dedicar este proyecto a quienes han sido pilares de mi formación académica y la motivación personal para el desarrollo de este trabajo es a mis padres, quienes me han motivado a desarrollar este proceso de formación personal, al Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín por el apoyo constante y la confianza depositada en mí, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo financiero brindado durante la maestría.

Abstract

This thesis performs the modeling and simulation of a robot actuated by pneumatic actuators, which comprised four degrees of freedom. Through the use of techniques robotic advanced, such as the Denavit Hartenberg method and Geometric Methods, the direct and inverse kinematic model corresponding to the robotic system is obtained, to generate the planning of defined trajectories, In addition, the work presents the development of the dynamic model of the robot, which allows the application of control techniques, for jcontrol of the joints of the robotic system. The virtual simulation interface is developed using software tools such as Matlab Simulink and its Simscape Multibody package. The mechanical design of the robotic system is developed in software CAD SolidWorks. The implemented controller is developed in Matlab, due to the high non-linearities of the system is necessary the application of intelligent controllers to reduce the position error, thus, we opted for a controller based on fuzzy logic.

Keywords: control, robotics, dynamic modeling.

Resumen

Esta tesis realiza el modelado y la simulación de un robot accionado por actuadores neumáticos, que comprende cuatro grados de libertad. A través del uso de técnicas robóticas avanzadas, como el método Denavit Hartenberg y los Métodos Geométricos, se obtiene el modelo cinemático inverso y directo correspondiente al sistema robótico, para generar la planificación de trayectorias definidas. Además, el trabajo presenta el desarrollo del Modelo dinámico del robot, que permite la aplicación de técnicas de control, para el control de las articulaciones del sistema robótico. La interfaz de simulación virtual se desarrolla utilizando herramientas de software como Matlab Simulink y su paquete Simscape Multibody. El diseño mecánico del sistema robótico está desarrollado en el software CAD SolidWorks. El controlador implementado se desarrolló en Matlab, debido a las elevadas no linealidades del sistema, es necesario la aplicación de controladores inteligentes para reducir el error de posición, por lo tanto, optamos por un controlador basado en lógica difusa.

Palabras claves: control, robótica, modelación dinamica.

Índice general

Agradecimientos	I
Abstract	III
Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Hipotesis y objetivos	2
1.3.1. Hipotesis	2
1.3.2. Objetivo general	3
1.3.3. Objetivos particulares	3
1.4. Estructura de Tesis	3
2. Investigación literaria	5
2.1. Antecedentes	5
2.1.1. Robots neumáticos	6
2.1.2. Control neumático	6
2.1.3. Modelación cinemática	7
2.1.4. Modelación dinámica	7
2.1.5. Entornos de simulacion virtual	8
2.2. Marco Teórico	8
2.2.1. Neumática	8
2.2.2. Actuadores Neumáticos	10
2.2.3. Modelo temo-mecánico de un cilindro neumático	11
2.2.4. Robótica	13
2.2.5. Cinemática directa e inversa de un robot	13
2.2.6. Cinemática de velocidad	15
2.2.7. Planificación de trayectorias en un robot	16
2.2.8. Dinámica de robots	17
2.2.9. Tipos de controladores	19

3. Metodología	21
3.1. Morfología propuesta del robot neumático	22
3.2. Modelo cinemático del robot neumático de 4DOF	23
3.2.1. Cinemática de posición directa del robot neumático de 4GL	23
3.2.2. Cinemática de posición inversa del robot neumático de 4 DOF.	26
3.2.3. Cinemática de velocidad directa del robot neumático de 4 DOF	29
3.3. Modelo dinámico de la estructura rígida del robot neumático de 4DOF	31
3.4. Análisis de posición del mecanismo de 4 barras del manipulador flexible	36
3.5. Espacio de trabajo robot neumático de 4GDL	39
3.6. Simulación del robot neumático de 4GDL	40
4. Resultados y Discusión	43
4.1. Resultados	43
4.1.1. Trayectoria del robot neumático de 4GDL mediante el método de integración de Euler.	43
4.1.2. Entorno virtual de simulación del robot neumático de 4GDL	46
4.2. Control dinámico PID de la estructura rígida del robot neumático de 4GDL	47
4.3. Control dinámico PID-Difuso de la estructura rígida del robot neumático de 4GDL	50
4.3.1. Control difuso para la ganancia K_p	53
4.3.2. Control difuso para la ganancia K_i	55
4.3.3. Control difuso para la ganancia K_d	56
4.4. Publicaciones	57
4.4.1. Diseño, modelo cinemático y simulación de un robot neumático de 4 DOF	57
4.5. Trabajos futuros	57
5. Conclusiones	59
References	61

Índice de figuras

2.1. Circuito neumático.	5
2.2. Circuito neumático.	9
2.3. Tipos de actuadores neumáticos.	10
2.4. Diagrama de bloques del modelo del manipulador flexible (Kiyama y Vargas, 2005).	11
2.5. (a) Articulación prismática. (b) Articulación de revoluta. (c) Articulación cilíndrica. (c) Articulación esférica.	13
2.6. (a) Robot cartesiano. (b) Robot cilíndrico. (c) Robot esférico. (d) Robot SCARA. (e). Robot angular o antropomórfico.	14
2.7. Cinemática directa e inversa de un robot.	15
2.8. Cinemática directa e inversa de un robot.	16
2.9. Control cinemático de un robot.	17
3.1. Metodología de tesis.	21
3.2. (a) Morfología inicial del robot neumático. (b) Morfología final del robot neumático.	22
3.3. Dimensiones presentes en la morfología del robot.	23
3.4. (a) Morfología del robot neumático. (b) Diagrama de alambre del robot neumático.	24
3.5. (a) Morfología alterna para cálculo de los parámetros de Denavit Hartenberg. (b) Parámetros de Denavit Hartenberg.	25
3.6. (a) Configuración angular codo arriba y ángulo q_p positivo. (b) Configuración angular codo arriba y ángulo q_p negativo. (c) Configuración angular codo abajo y ángulo q_p positivo. (c) Configuración angular codo abajo y ángulo q_p negativo.	27
3.7. (a) Proyección geométrica para configuración angular codo arriba. (b) Proyección geométrica para configuración angular codo abajo.	28
3.8. Relación angular del plano generado.	28
3.9. Representación simbólica de los centros de masas del robot neumático.	32
3.10. Medición del ángulo generado en el manipulador de Kiyama en 2005.	36
3.11. (a)Proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i mayor de 90° . (b) Proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i menor de 90°	37
3.12. (a) Desplazamiento relativo del pistón vs el ángulo generado en el mecanismo del GDL2. (b) Desplazamiento relativo del pistón vs el ángulo generado del mecanismo del GDL3.	39
3.13. (a) Plano XY del espacio de trabajo. (b) Plano Y=0 del espacio de trabajo. (c) Plano X=0 del espacio del trabajo. (d) Espacio de trabajo del robot neumático.	40

3.14. Entorno virtual de simulación 3D del robot neumático.	41
3.15. Diagrama de bloques construido por la herramienta SimMechanics.	42
4.1. (a) Trayectoria a planificar mediante la integración de Euler. (b) Perfil de posiciones articulares de la trayectoria.	44
4.2. (a) Trayectoria generada mediante integración de Euler con un incremento $\Delta t=0.1$. (b) Error de posición de X, Y, Z obtenido para $\Delta t=0.1$. (c) Trayectoria generada mediante integración de Euler con un incremento $\Delta t=0.01$. (d) Error de posición de X, Y y Z obtenido para $\Delta t=0.01$. (e) Trayectoria generada mediante integración de Euler con un incremento $\Delta t=0.001$. (f) Error de posición X, Y, Z obtenido para $\Delta t=0.001$	45
4.3. Metodología de la simulación de la planificación de trayectorias.	46
4.4. Implementación en Matlab Simulink de la simulación de la planificación de trayectorias.	46
4.5. (a) Perfil de posición articular para la articulación del GDL1. (b) Perfil de posición articular para la articulación del GDL4. (c) Perfil de posición relativo para el actuador neumático del mecanismo de 4 barras del GDL2. (d) Perfil de posición relativo para el actuador neumático del mecanismo de 4 barras del GDL3.	47
4.6. Control PID.	48
4.7. (a) Posición articular q_1 . (b) (a) Error articular q_1 . (c) Torque articular q_1 . (d) Posición articular q_2 . (e) Error articular q_2 . (f) Torque articular q_2 . (g) Posición articular q_3 . (h) Error articular q_3 . (i) Torque articular q_3 . (j) Posición articular q_4 . (k) Error articular q_4 . (l) Torque articular q_4	49
4.8. Implementación del controlador PID.	50
4.9. Control PID-Difuso.	51
4.10. (a) Implementación del controlador PID-Difuso. (b) Implementación del ajuste de ganancias del PID.	51
4.11. (a) Posición articular q_1 . (b) (a) Error articular q_1 . (c) Torque articular q_1 . (d) Posición articular q_2 . (e) Error articular q_2 . (f) Torque articular q_2 . (g) Posición articular q_3 . (h) Error articular q_3 . (i) Torque articular q_3 . (j) Posición articular q_4 . (k) Error articular q_4 . (l) Torque articular q_4	52
4.12. (a) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_1 . (b) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_2 . (c) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_3 . (d) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_4	53
4.13. Descripción del controlador difuso para la ganancia K_p	54
4.14. (a) Funciones de membresía de la entrada del controlador. (b) Funciones de membresía de la salida del controlador.	54
4.15. Descripción del controlador difuso para la ganancia K_i	55
4.16. (a) Funciones de membresía de la entrada del controlador. (b) Funciones de membresía de la salida del controlador.	55
4.17. Descripción del controlador difuso para la ganancia K_d	56
4.18. (a) Funciones de membresía de la entrada del controlador. (b) Funciones de membresía de la salida del controlador.	56

Índice de tablas

2.1. Características de distintos tipos de actuadores.	14
3.1. Especificaciones de los actuadores neumáticos presentes en la morfología del robot. .	22
3.2. Parámetros Denavit Hartenberg.	24
3.3. Parámetros del modelo dinámico.	36
3.4. Parámetros de los mecanismos de 4 barras.	38
3.5. Límites de espacio de trabajo del robot.	39
4.1. Parámetros del controlador PID.	48
4.2. Reglas difusas del controlador para K_p	54
4.3. Reglas difusas del controlador para K_i	55
4.4. Reglas difusas del controlador para K_d	56

Introducción

Un robot es una maquina controlada mediante un computador, la cual es programada para realizar actividades repetitivas, difíciles e incluso peligrosas de una manera segura y precisa en relación a la mano de obra humana. Un robot suele estar compuesto mediante diferentes componentes como es una unidad de control y actuadores. El actuador es la unidad que realiza las acciones programadas en la unidad de control.

En la actualidad, las aplicaciones industriales orientadas a neumática, generalmente estan relacionadas a procesos de automatizacion, donde la actividades desarrolladas por los actuadores neumáticos comprenden simples tareas de avance y retroceso, aplicaciones donde no son requeridas precision o exactitud, por lo tanto mediante el control neumático puede reducirse la falta de precisión en la naturaleza de los actuadores neumáticos, de tal manera que los actuadores neumáticos puedan ser utilizados en sistemas de mayor precisión como robótica.

1.1. Descripción del problema

La originalidad del proyecto consiste en el desarrollo de técnicas avanzadas que permitan modelar y simular el control de posición de un robot con cuatro grados de libertad. La contribución del trabajo presenta el desarrollo de la modelación cinemática y dinámica del sistema, así como el desarrollo de simulaciones de control del sistema mismo mediante herramientas de software matemático, además, el desarrollo de una herramienta de software que permita simular la planeación de trayectorias.

Gran parte de las aplicaciones enfocadas a actividades industriales involucran el uso de actuadores neumáticos, sin embargo, los actuadores neumáticos tienen aplicaciones limitadas cuando se requiere de actividades con precisión tal como Robótica, debido a las propiedades dinámicas altamente no lineales del aire, por lo tanto no existen muchos robots de accionamiento neumático que se hallan desarrollado actualmente. A pesar que los actuadores neumáticos tienen una relación de peso-fuerza mayor que los actuadores eléctricos, el coste de instalación y mantenimiento es menor frente al uso de otros tipos de actuadores y las aplicaciones desarrolladas con actuadores neumáticos presentan menos efectos nocivos de contaminantes respecto al uso de actuadores de otro tipo (Ning, 2002).

La importancia de planear trayectorias en robótica radica en controlar la posición final, así como también la velocidad y aceleración de las articulaciones en la ejecución de una actividad. Sin embargo, los actuadores neumáticos tienen un comportamiento altamente no lineal, por lo tanto, existe la necesidad de implementar acciones de control ejercidas sobre los actuadores del sistema robótico, para reducir el error de posición final a través de técnicas de control avanzado. De esta manera, los robots neumáticos pueden ser destinados a actividades con un alto grado de precisión, ejecutando controladores competentes e inteligentes.

1.2. Justificación

Las aplicaciones de control neumático son poco visibles debido a la falta de precisión en la naturaleza de los actuadores neumáticos. Actualmente las aplicaciones del actuador neumático están relacionadas con el movimiento de mecanismos mecánicos, procesos automáticos, aplicaciones mecatrónicas y en los últimos años son ampliamente utilizados en aplicaciones de rehabilitación. Sin embargo, el uso de actuadores neumáticos en aplicaciones de robótica es limitado, existen empresas, como FESTO pneumatics, los cuales son pioneros en este campo de investigación.

La fuente de energía de un actuador neumático es el uso de aire comprimido, por lo tanto, en este tipo de actuadores pueden reflejarse las características principales del aire, tales como la temperatura, presión, el grado de compresibilidad, etc., factores que han limitado el uso de actuadores neumáticos para actividades específicas y precisas tales como robots, por otro lado, se ha demostrado que los robots accionados por actuadores neumáticos tienen grandes ventajas frente a actuadores de otros tipos, tales como los eléctricos, las ventajas presentes, son una alta relación de potencia a peso, menor coste y mayor factor de seguridad, además de ser más limpios y menos contaminantes (M. Chang, 2010).

La problemática presente en las aplicaciones de actuadores neumáticos respecto a actividades de alto grado de precisión, radica en su comportamiento altamente no lineal, lo cual provoca que sean incapaces de realizar con precisión ciertas tareas dentro de un sistema y sean remplazados por actuadores de otro tipo, tal como se presenta en los sistemas robóticos accionados mediante actuadores neumáticos, en los cuales existe la necesidad de desarrollar técnicas avanzadas de control que permitan un manejo más preciso y rápido sistemas neumáticos.

1.3. Hipotesis y objetivos

1.3.1. Hipotesis

Es posible reducir el error de posición de un robot neumático de 4 grados de libertad, aplicando técnicas de control inteligente, considerando las variables térmicas y dinámicas, así como herramientas de software para comparar los resultados obtenidos con otras técnicas

1.3.2. Objetivo general

- Diseñar un algoritmo de control inteligente que reduzca el error de posición en la simulación de planeación de trayectorias aplicadas a un modelo matemático de robot neumático de cuatro grados de libertad.

1.3.3. Objetivos particulares

- Desarrollar un modelo matemático que represente la cinemática y la dinámica del robot neumático para ser utilizado en las simulaciones del robot.
- Desarrollar una herramienta de software que permita simular el comportamiento del robot neumático de 4 grados de libertad, para ser utilizado en las pruebas del algoritmo inteligente.
- Implementar técnicas de control aplicadas a un modelo matemático desarrollado previamente para el posicionamiento del robot, utilizando un algoritmo de control inteligente, como lógica difusa, redes neuronales, entre otros algoritmos de control.

1.4. Estructura de Tesis

En este primer capítulo se expone la justificación que llevo a desarrollar este proyecto de investigación, además se presenta la problemática correspondiente a resolver con esta investigación ofreciendo un panorama actual de esta línea de trabajo, así mismo se definen los objetivos e hipótesis que fundamentan este trabajo.

El segundo capítulo denominado investigación literaria, presenta una revisión literaria de los trabajos existentes que están relacionados con esta línea de investigación. En ella podemos encontrar temas relacionados con control neumático, robótica e interfaces graficas desarrolladas en relación a simulación de sistemas robóticos. Posteriormente se presenta la subsección de marco teórico, en esta se presenta la fundamentación teórica necesaria para desarrollar este proyecto, así mismo las herramientas matemáticas y tecnicas necesarias para implementar la metodología planteada.

El tercer capítulo, Metodología, se exponen las etapas a seguir para el desarrollo de este trabajo, se presentan las técnicas implementadas para el desarrollo de cada una de las etapas presentes en la metodología planteada, como son: la morfología del robot neumático, los procedimientos y herramientas implementadas en el desarrollo del modelo cinemático y del modelo dinámico, el software de simulación del robot neumático y el algoritmo de control implementado, necesario para la simulación de trayectorias.

El cuarto capítulo expone los resultados obtenidos de la experimentación desarrollada durante la elaboración de este trabajo, en ella se discuten los resultados y el impacto de este en diferentes aplicaciones, además se presenta una perspectiva hacia futuras actividades enfocadas a esta línea de investigación.

El quinto y último capítulo define las conclusiones obtenidas del desarrollo de este trabajo de acuerdo en relación a la metodología planteada, en este se evalúan los resultados obtenidos de una manera crítica de acuerdo a la hipótesis planteada previamente.

Investigación literaria

2.1. Antecedentes

Actualmente, la implementación de actuadores neumáticos orientados a aplicaciones de robótica, es comúnmente relevado por actuadores eléctricos, Ning S. en su trabajo expone la carente exactitud que no permite que los sistemas neumáticos puedan competir contra los sistemas electromecánicos, además, en su investigación, profundiza la problemática que se encuentra en el error de estado estacionario para un actuador neumático accionado por servo válvulas de control (Ning and Bone, 2002). Gran parte de los robots industriales utilizan actuadores eléctricos. Sin embargo, los actuadores neumáticos pueden ser utilizados para remplazar dichos actuadores. A diferencia de los actuadores eléctricos, los actuadores neumáticos presentan algunas ventajas, como mayor relación potencia-peso, mantenimiento más sencillo, no se dañan por sobrecarga, menor consumo de energía, más económicos, entre otros. Sin embargo, la dificultad de controlar estos actuadores es debido al alta no linealidad del aire, razón por la cual se evitan en diversas aplicaciones industriales (Chang, 2010). Debido al alta no linealidad de los sistemas neumáticos, implica la implementación de algoritmos de control complejos y por lo general relacionados con control inteligente, tal como señala J. Prieto quien presenta el esquema general en la figura 2.1, para el control de posición de robots; además señala que los sistemas difusos y redes neuronales son una opción de inteligencia computacional en el control de posición de robots neumáticos implementados al modelo dinámico de un robot (Cazarez-Castro, 2016).

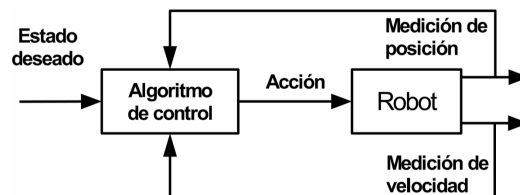


Figura 2.1: Circuito neumático.

2.1.1. Robots neumáticos

Gran parte de la tecnología industrial está enfocado al desarrollo de la robótica, gracias a las ventajas de la robótica en los distintos campos de aplicación de la industrial, La mayor de los robots son accionados mediante actuadores eléctricos, sin embargo, estos tienen una relación potencia-peso baja, 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 genera daño alguno, lo cual se ve reflejado en alto índice de seguridad industrial. Además, cabe señalar que los actuadores neumáticos presentan una solución a las exigencias y necesidades cambiantes de los procesos industriales tal como son los sistemas ecofriendly.

Hoy en día, existe un mayor aporte al control neumático, tal como es el caso de FESTO pneumatics, quienes desarrollan aplicaciones y robots neumáticos con el fin de simular los movimientos ejecutados en el cuerpo humano, como los brazos y las piernas. Además, FESTO ha desarrollado robots capaces de modelar especies animales. Los trabajos desarrollados por FESTO son accionados mediante el uso de actuadores y articulaciones neumáticas. En la actualidad FESTO es uno de los pioneros en el área de control neumático.

2.1.2. Control neumático

Debido a las propiedades dinámicas altamente no lineales del aire es necesario la implementación de algoritmos de control, En 2008, Ramos Arreguin, presenta la simulación del control de posición de un manipulador flexible de un grado de libertad accionado por un cilindro neumático. El algoritmo de control desarrollado, utiliza una retroalimentación de velocidad y se implementa un PID auto sintonizado mediante lógica difusa. Los resultados obtenidos son comparados contra un algoritmo de control clásico PID, donde se concluyen mejores resultados utilizando el algoritmo PID difuso con retroalimentación de velocidad. (Ramos-Arreguin et al., 2008). Así mismo, en 2010, Ramos-Arreguin, implementa un algoritmo de lógica difusa, para el control de posición de un manipulador flexible accionado por un cilindro neumático, el desarrollo del algoritmo es implementado en un sistema FPGA, como parte de los resultados, concluye la importancia de un algoritmo de control inteligente, debido a que un algoritmo de control clásico como el PID no es suficiente para controlar la posición del manipulador (Ramos-Arreguin, 2010). De igual manera, Alexander Hošovský, en 2012, presenta una revisión de sistemas robóticos artificiales accionados con músculos artificiales neumáticos, en esta señala el uso técnicas de control no lineales para mejorar el rendimiento de los sistemas accionados por músculos neumáticos, para validar su trabajo, Alexander Hošovský implementa un control adaptativo híbrido rápido, como rama de alimentación directa establece un controlador PD convencional y como rama de adaptación coloca un controlador difuso (Hošovský et al., 2012).

En 2015, Jin Qian implementa un algoritmo de control para el seguimiento de un musculo neumático artificial, El algoritmo implementado consta de un enfoque de modo deslizante difuso adaptativo que une algoritmos de control difuso con algoritmos de control en modo deslizante, Por

medio de la implementación del algoritmo de control se puede asegurar la estabilidad del sistema PMA de bucle cerrado basado en la teoría de Lyapunov (Jin Qian et al., 2015). Para el control de un robot neumático de 3 grados de libertad, Sánchez Solar, implementa el algoritmo de control neuro-PID, basado en una red neuronal Back-Propagation para la simulación de control, los resultados obtenidos son comparados con un algoritmo de control PID (Sanchez-Solar et al., 2017).

2.1.3. Modelación cinemática

El estudio del movimiento de un robot, debe su importancia a la cinemática directa e inversa del sistema, el cual, mediante funciones de trayectoria definidas, podremos conocer el movimiento de los actuadores como de la posición del robot mismo. Así mismo la cinemática de posición y de velocidad en un robot serán el punto de inicio para la formulación del modelo dinámico de la estructura del mismo, el cual implica la implementación de algoritmos de control y por ende el control de posición en una trayectoria planificada. Así mismo, en 2017, Petrescu presenta una revisión y señala la importancia de la implementación del método geométrico para la obtención del modelo cinemático inverso de diferentes sistemas robóticos, para validar sus resultados, obtiene el modelo cinemático inverso de un robot de 3 grados de libertad (Petrescu and Petrescu, 2016).

En 2015, A. Peidro presenta un análisis cinemático de posición directa e inversa y la simulación de un robot trepador de arquitectura serie-paralela; donde para la solución de la cinemática directa utiliza la convención Denavit Hartenberg y para la solución de la cinemática inversa utiliza métodos geométricos (Peidro et al., 2015). 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). Punnoose Valayil presenta el método de análisis cinemático para un robot utilizando la convención Denavit Hartenberg y presenta la simulación utilizando Matlab (Punnoose Valayil et al., 2018).

2.1.4. Modelación dinámica

Gran parte de los robots buscan ser capaces de realizar tareas de manera autónoma. Sin embargo, estas tareas requieren de precisión, razón por la que los algoritmos de control son necesarios para reducir el error de posición en distintas aplicaciones de la industria. Por lo tanto, la importancia del modelo dinámico de un robot se debe a que hace posible realizar una simulación de su comportamiento y control, antes de considerar la implementación en hardware y software. En 2005, Kiyama presenta el modelado matemático de un manipulador flexible accionado por un cilindro neumático, el modelo matemático aproxima la posición de un grado de libertad. El desarrollo del modelo está basado en principios termodinámicos, como el principio la conservación de la energía y la materia. El modelo matemático presentado esta construido mediante la formulación de Newton-Euler (Kiyama and Vargas, 2005). Basado en el modelo previamente desarrollado por Kiyama. Ramos Arreguin, desarrolla un nuevo modelo matemático de un cilindro neumático, para el desarrollo del modelo se basa en funciones polinomiales, con el propósito de reducir el tiempo de computo (Ramos et al., 2006). Nacsimentos Martins presenta el modelo dinámico de robot móvil tipo unicycle; para ello utiliza formulación Euler LaGrange, y para valorar su modelo dinámico propone un controlador de seguimiento de trayectoria implementado con dicho modelo (Martins et al., 2008).

En 2011, Carlos Valdiero desarrolla el modelo matemático para actuadores servo neumáticos, señala el estudio del comportamiento dinámico de estos actuadores en aplicaciones de ingeniería. El modelo matemático, corresponde a un modelo no lineal de orden 5. El modelo explica las características del sistema dinámico no lineal y la zona muerta del servo válvula de control (Valdiero et al., 2011). En 2013, Tothova and Hosovsky desarrolla el modelo matemático de una estructura compuesta de dos músculos neumáticos accionado de manera opuesta entre sí, los cuales son conectados a través de una cadena. La posición resultante del manipulador es la resultante del ángulo de brazo de carga. El modelo muscular desarrollado es basado en el modelo modificado de Hill (Tothova and Hosovsky, 2013), Eileen Cardoso presenta la modelación dinámica y cinemática de un robot de 4 grados de libertad, obtiene la modelación cinemática a partir del método geométrico y para la modelación dinámica utiliza la formulación Euler LaGrange (Eileen Cardoso et al, 2017). En 2017, F.J. López presenta el modelo dinámico de un robot esférico de 3 grados para un cuello robótico humanoide, utiliza la formulación Euler LaGrange para la modelación dinámica del robot y obtiene los parámetros físico y mecánicos del robot a partir de un entorno CAD desarrollado en Solidworks (López et al., 2017).

2.1.5. Entornos de simulacion virtual

En gran parte de los problemas de ingeniería y de la ciencia es necesario la simplificación del problema, muchas veces estas soluciones están dadas por simulaciones del problema. Los entornos de simulacion virtual de sistemas mecanicos nos ofrecen una perspectiva del sistema real implementado. Tal es el caso de la herramienta SimMechanics Link de Matlab, la cual ofrece un entorno de simulación virtual basado en la geometria 3D de un sistema mecanico, el modelo de geometría 3D previamente es desarrollado en un software de tipo CAD. El trabajo de Abdallah Abdelwahab hace uso de la herramienta SimMechanics para presentar el modelo y la simulación de un sistema robótico de prótesis bilateral (Abdelwahab, 2017). Así mismo Abhishek Kathpal utilizando la herramienta SimMechanics presenta la simulación de un péndulo invertido giratorio, el cual presenta un comportamiento no lineal e inestable, para la implementación de diversas técnicas de control (Kathpal and Singla, 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 and 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).

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Neumática

Desde la antigüedad, los fluidos a presión han sido utilizados para generar distintas formas de energía. Las ciencias que estudian los fluidos en movimiento son la neumática encargada de estudiar los fluidos gaseosos y la hidráulica que estudia los fluidos líquidos. Por lo tanto, las tecnologías neumáticas e hidráulicas son aquellas que aprovechan las propiedades de los fluidos a presión (Creus

Solé, 2007).

La neumática comúnmente emplea aire comprimido como fluido de trabajo, debido a que el aire presenta más ventajas frente a otros fluidos gaseosos, tales como:

- Disponibilidad de manera ilimitada y gratuita.
- Facilidad de almacenar y transportar.
- No genera efectos nocivos de contaminación.

Sin embargo, el aire está compuesto de diferentes elementos químicos como el nitrógeno, oxígeno, partículas de agua y otros gases, los cuales presentan las siguientes propiedades:

- Compresibilidad: Tiene la propiedad de reducir su volumen cuando este sujeto a la acción de fuerza exterior asumiendo diferente volumen.
- Elasticidad: Permite al aire, volver a un volumen inicial una vez que haya sido sujeto a una fuerza exterior.
- Expansibilidad: Propiedad que permite al aire ocupar totalmente el volumen de cualquier recipiente y adquirir la forma de este.

El aire es un fluido de comportamiento y propiedades no lineales, además el aire posee propiedades termo-mecánicas y presenta variados procesos térmicos en un proceso de compresión. De tal manera que el comportamiento del aire puede asemejarse al comportamiento de un gas ideal.

La mayoría de los sistemas neumáticos, están compuestos de circuitos neumáticos, los cuales se complementan de sistemas automáticos que componen de sensores, actuadores y de uno o varios controladores, dicho proceso se desarrolla de forma automática, controlada por un computador. En la Figura 2.2 se presenta un circuito neumático.

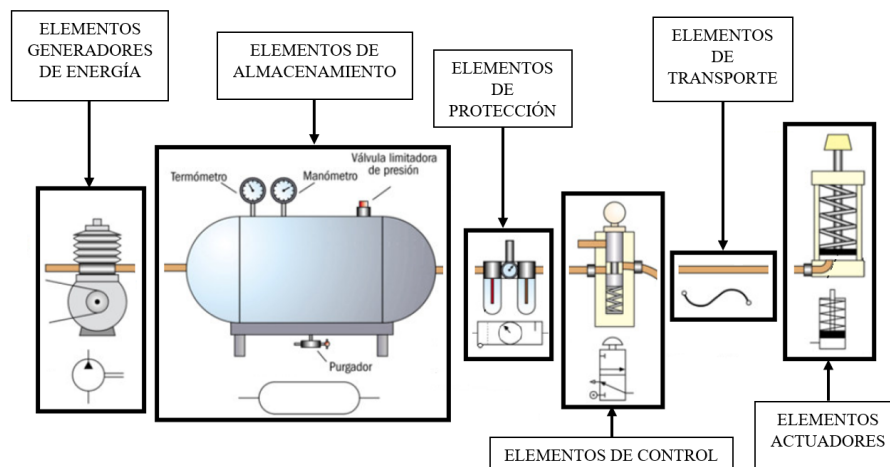


Figura 2.2: Circuito neumático.

Los circuitos neumáticos se complementan de sistemas eléctricos y electrónicos los cuales permiten al sistema obtener un alto grado de sofisticación y flexibilidad. Los sistemas neumáticos se complementan de diferentes elementos, sin embargo, un circuito neumático debe utilizar necesariamente los siguientes elementos:

- Elementos generadores de energía: en un circuito neumático los elementos generadores de energía comprenden de un compresor neumático.
- Elementos de almacenamiento: en un circuito neumático los elementos de almacenamiento son los encargados de contener el aire comprimido.
- Elementos de protección: Los elementos de protección son aquellos encargados de establecer condiciones al aire comprimido, comúnmente en una unidad de mantenimiento.
- Elemento de control: Se emplean válvulas que permiten, dirigen o impiden la circulación del fluido dentro del sistema neumático.
- Elementos de transporte: En un circuito neumático son elementos de transporte comprenden de las tuberías y conductos por los que se canaliza el aire, respectivamente.
- Elemento Actuadores: Convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico generando mediante un movimiento lineal o giratorio.

2.2.2. Actuadores Neumáticos

Los actuadores son dispositivos o elementos encargados de transformar energía a un trabajo mecánico, los actuadores neumáticos son los elementos encargados de transformar la energía contenida en un fluido a presión en un trabajo mecánico, en neumática pueden distinguirse varios tipos de actuadores neumáticos como: cilindros, motores neumáticos, etc. En la Figura 2.3 puede verse la clasificación de los actuadores neumáticos.

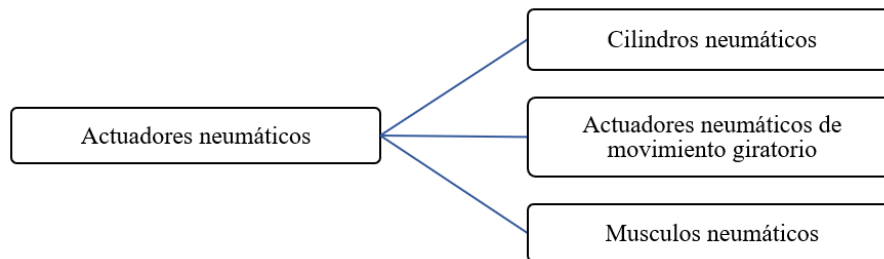


Figura 2.3: Tipos de actuadores neumáticos.

- Cilindros neumáticos: Los cilindros neumáticos constan de un tubo cilindro denominado camisa, esta herméticamente cerrada por tapaderas delantera y trasera con orificios de entrada y salida del fluido. Existen diferentes tipos de cilindros, sin embargo, los más empleados son cilindros de simple efecto y cilindros de doble efecto.

- Actuadores neumáticos de movimiento giratorio: Este dispositivo convierte el aire comprimido en trabajo mecánico a través de un movimiento rotativo. El movimiento producido en los motores neumáticos puede ser generado mediante paletas longitudinales alojadas en ranuras a lo largo del rotor o mediante el uso de pistones colocados axial o radialmente.
- Músculos neumáticos: Es un dispositivo relativamente nuevo, produce un movimiento lineal utilizando aire a presión, generado al expandir y contraer un contenedor.

2.2.3. Modelo temo-mecánico de un cilindro neumático

La modelación del manipulador flexible se compone de dos partes (Kiyama y Vargas., 2005), inicialmente se analiza la dinámica del cilindro neumático, en conjunto a esta es analizado la dinámica del brazo flexible. Tal como se presenta en el diagrama de bloques de la Figura 2.4.

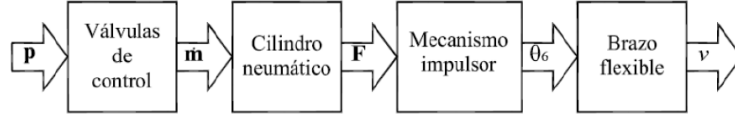


Figura 2.4: Diagrama de bloques del modelo del manipulador flexible (Kiyama y Vargas, 2005).

A continuación, se presenta el conjunto de (2.1) a (2.8), las cuales representan la posición del modelo dinámico del actuador (Ramos Arreguin, 2006):

Para $0 \leq X \leq L_{alp}$:

$$\dot{p}_{1a} = \frac{kRT_0}{A_{ap}} \left(X + \frac{\Delta A_p}{A_{ap}} \right) \left[\dot{m}_{1a} - \dot{m}_{1c} - \frac{A_{ap}}{RT_0} p_{1a} \dot{X} \right] \quad (2.1)$$

$$\dot{p}_1 = \frac{kRT_0}{(A_p - A_{ap})X} \left[\dot{m}_{1c} - \frac{(A_p - A_{ap})}{RT_0} p_1 \dot{X} \right] \quad (2.2)$$

Para $L_{alp} < X \leq L$:

$$\dot{p}_{1a} = \frac{kRT_0}{A_p(X + \Delta)} \left[\dot{m}_{1a} - \frac{A_p}{RT_0} p_{1a} \dot{X} \right] \quad (2.3)$$

$$\dot{p}_1 = \frac{kRT_0}{A_p(X + \Delta)} \left[\dot{m}_{1a} - \frac{A_p}{RT_0} p_{1a} \dot{X} \right] \quad (2.4)$$

Para $0 \leq X \leq (L - L_{alv})$:

$$\dot{p}_2 = \frac{kRT_0}{(A_p - A_v)(L - X + \Delta)} \left[\dot{m}_{2c} + \frac{(A_p - A_v)}{RT_0} p_2 \dot{X} \right] \quad (2.5)$$

$$\dot{p}_{2a} = \frac{kRT_0}{(A_p - A_v)(L - X + \Delta)} \left[\dot{m}_{2a} + \frac{(A_p - A_v)}{RT_0} p_{2a} \dot{X} \right] \quad (2.6)$$

Para $(L - L_{alv}) \leq X \leq L$:

$$\dot{p}_2 = \frac{kRT_0}{(A_p - A_v)(L - X)} \left[\dot{m}_{2c} + \frac{(A_p - A_v)}{RT_0} p_2 \dot{X} \right] \quad (2.7)$$

$$\dot{p}_{2a} = \frac{kRT_0}{L - X + \frac{\Delta A_p}{A_{av} - A_v}} \left[\frac{\dot{m}_{2a} - \dot{m}_{2c}}{A_{av} - A_v} + \frac{p_{2a}}{RT_0} \dot{X} \right] \quad (2.8)$$

El sistema de ecuaciones que describe la dinámica del manipulador flexible accionado por un cilindro neumático desarrollado por Kiyama en 2005, está representado por el siguiente sistema de ecuaciones algebraico-diferencial dado en (2.9) a (2.11).

$$\dot{q} = z \quad (2.9)$$

$$M(q)\dot{z} = h(q, z) = F^T(q)\lambda_1 \quad (2.10)$$

$$0 = f(q) \quad (2.11)$$

De acuerdo con Kiyama el sistema de ecuaciones diferenciales obtenidos mediante el estudio del cilindro neumático, así mismo del brazo flexible, podrán expresar el modelo no lineal en el espacio de estados. El modelo del sistema es:

$$T_i = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \\ f_4(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w(x) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.12)$$

Donde las funciones de estado no lineales están definidas de la siguiente manera:

- $f_1(x)$ corresponde a los términos de las ecuaciones (2.9) que son función de la velocidad del pistón neumático.
- $f_2(x)$ corresponde al vector de velocidad de la ecuación (2.10).
- $f_3(x)$ y $f_4(x)$ se obtienen a partir de la ecuación (2.11) y de la segunda derivada respecto al tiempo de la ecuación (2.13), conforme la siguiente expresión:

$$T_i = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q) & F^T(q) \\ F(q) & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} h(q, z) \\ -g(q, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_3(x) \\ f_4(x) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

- $w(x)$ corresponde a los términos de la ecuación (2.12) que corresponden a la apertura de la válvula de control.

2.2.4. Robótica

Muchas definiciones para un robot, lo cual dificulta establecer una definición formal de lo que es un robot industrial, además la actual evolución de la robótica ha provocado diferentes actualizaciones dentro de este campo y su definición como tal. La definición más aceptada para robot, es la establecida por la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), la cual establece que un robot es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar diversas tareas.

De acuerdo con las diferentes definiciones establecidas para un robot, se define que la programabilidad y multifunción se obtiene sin las modificaciones físicas de un robot. Un robot debe estar formado por una estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales. Además, un robot está formado por una serie de elementos eslabones unidos mediante articulaciones los cuales generan el movimiento del robot.

El movimiento generado de un robot, depende de cada uno de los movimientos articulados independientes que realiza cada articulación, comúnmente un robot comprende de un número de grados de libertad que comúnmente suele coincidir con el número de articulaciones que lo compone. Existen distintos tipos de articulaciones para robots, tal como se presenta en la Figura 2.5, las cuales en diferentes combinaciones dan lugar a diferentes características de diseño, construcción y la aplicación del robot.

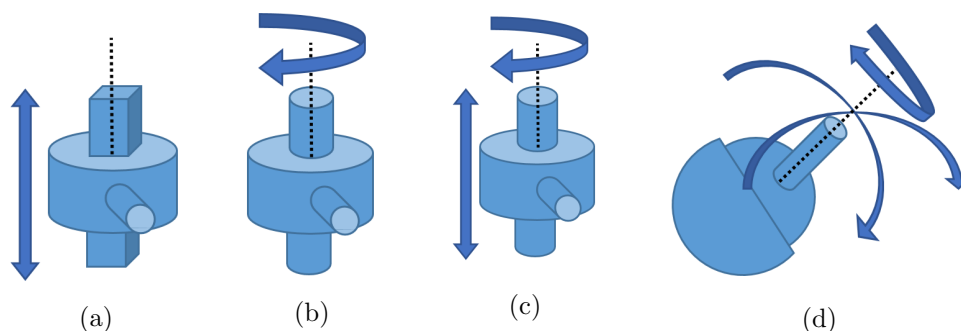


Figura 2.5: (a) Articulación prismática. (b) Articulación de revoluta. (c) Articulación cilíndrica. (d) Articulación esférica.

El actuador es el elemento encargado de generar el movimiento del robot a través de la unidad de control. Estos pueden ser neumáticos, hidráulicos y eléctricos. En la Tabla 2.1 se presenta las características de los diferentes tipos de actuadores empleados en robots de acuerdo con Antonio Barrientos. Comúnmente un robot precisa de 6 grados de libertad para alcanzar un espacio de trabajo óptimo, donde los primeros 3 grados de libertad definen la posición del robot, y los últimos 3 grados de libertad definen la orientación del robot, sin embargo, las configuraciones más frecuentes en los robots se presentan en la Figura 2.6.

2.2.5. Cinemática directa e inversa de un robot

El estudio de la cinemática es estudiar el movimiento de un cuerpo, en robótica, la cinemática del robot analiza el movimiento del robot respecto a un sistema de referencia, en la cinemática

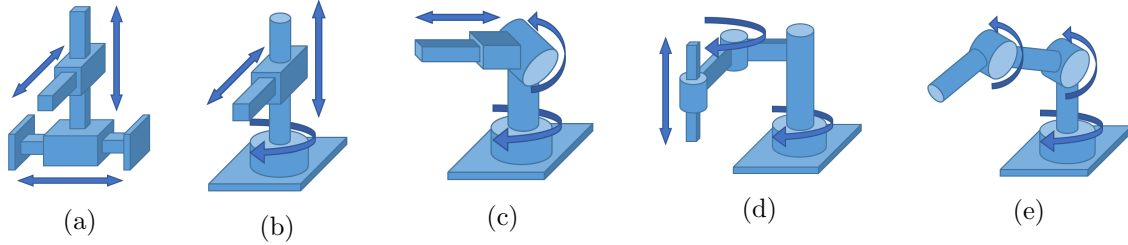


Figura 2.6: (a) Robot cartesiano. (b) Robot cilíndrico. (c) Robot esférico. (d) Robot SCARA. (e). Robot angular o antropomórfico.

Tabla 2.1: Características de distintos tipos de actuadores.

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	Aire a presión (5 – 10) bar	Aceite mineral (50 – 100) bar	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros. Motor de paletas. Motor de pistón.	Cilindros. Motor de paletas. Motor de pistones axiales.	Motor CD. Motor CA. Motor paso a paso.
Ventajas	Baratos. Rápidos. Sencillos. Robustos.	Rápidos. Alta relación potencia-peso. Auto lubricantes. Alta capacidad de carga.	Precisos. Fiables. Fácil control. Sencilla instalación. Silenciosos.
Desventajas	Dificultad de control. Instalación especial. Ruidoso.	Difícil mantenimiento. Instalación especial. Caros. Frecuentes fugas.	Potencia limitada.

de robots, existen dos problemas fundamentales cuando planteamos la cinemática de un robot, las cuales son la cinemática directa de un robot y la cinemática inversa de un robot. La Figura 2.7 presenta la definición de cinemática de posición de un robot.

Existen diferentes métodos para la solución de la cinemática directa de un sistema robótico, sin embargo, el método propuesto por la convención Denavit y Hartenberg propone un método sistemático para la representación espacial de la geometría de los elementos en una cadena cinemática considerando una referencia fija. Este es un método para el movimiento articulado de un robot con n articulaciones que puede ser expresado por una matriz denominada Denavit-Hartenberg, la cual está definida por T , donde;

- θ_i es el ángulo formado entre x_i y x_{i+1} a lo largo de z_i .
- d_i es la distancia entre x_i y x_{i+1} a lo largo de z_i .
- α_i es el ángulo formado entre z_i y z_{i+1} a lo largo de x_{i+1} .
- a_i es la distancia entre z_i y z_{i+1} a lo largo de x_{i+1} .

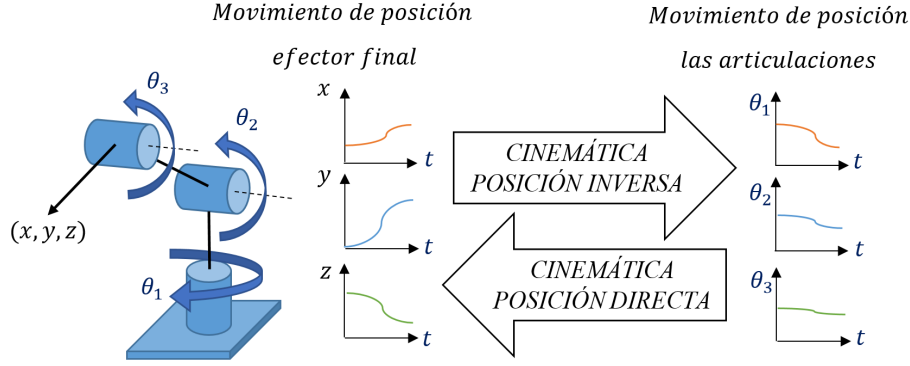


Figura 2.7: Cinemática directa e inversa de un robot.

El movimiento articulado generado de la articulación i a la articulación $i+1$, estará representado por (2.14).

$$T_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & a_i\text{sen}(\theta_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Donde la cinemática directa del robot representa un sistema de matrices formadas a partir de los parámetros de Denavit-Hartenberg, la matriz resultante de posición es la multiplicación de cada matriz homogénea del sistema robótico dado por (2.15)

$$T_R = T_i T_{i+1} \dots T_{n+1} T_n \quad (2.15)$$

2.2.6. Cinemática de velocidad

La relación existente entre las variables articulares, la posición expresada en coordenadas cartesianas y la orientación de un robot está dada por el modelo cinemático, sin embargo, es de gran utilidad disponer de una relación entre las velocidades articulares, la matriz jacobiana permite conocer las velocidades del efector final, respecto a las velocidades de cada articulación. La Figura 2.8 presenta la definición de cinemática de velocidad inversa y directa.

Existe 2 metodologías planteadas para el cálculo del jacobiano, las cuales son el jacobiano geométrico y el jacobiano analítico. El jacobiano geométrico está dada en términos de coordenadas cartesianas, Para articulaciones prismáticas, está dado por (2.16).

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Las articulaciones de revoluta estarán dadas por (2.17).

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1}x(p_e - p_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

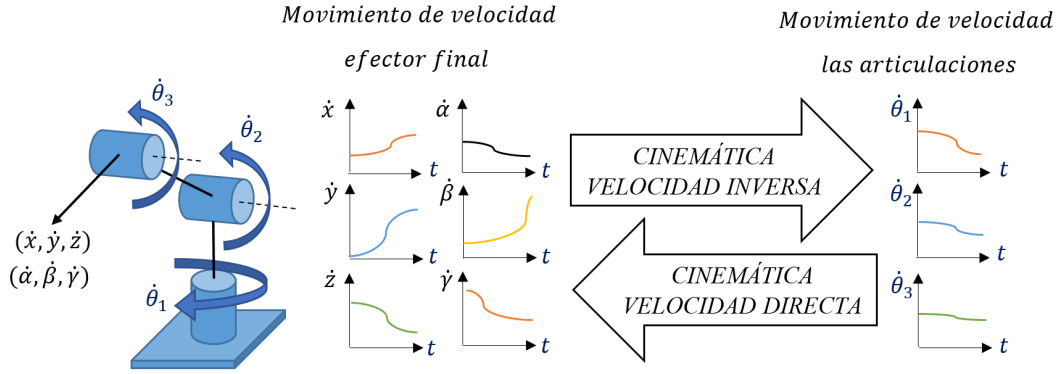


Figura 2.8: Cinemática directa e inversa de un robot.

La matriz jacobiana estará dada por (2.18).

$$J(q) = [J_1 \quad \cdots \quad J_n] \quad (2.18)$$

Por lo tanto, el vector de velocidad generado mediante el jacobiano geométrico estará dado por (2.19).

$$v_e = J(q)\dot{q} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{P}_e \\ \dot{w}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

El jacobiano analítico consiste de un método más directo, el cual plantea diferenciar las ecuaciones correspondientes al modelo cinemático. Donde la matriz jacobiana J es (2.20).

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_z}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_z}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Por lo tanto, el vector de velocidad v_e , dado por el jacobiano analítico, está dado por (2.21).

$$v_e = J(q)\dot{q} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = [\dot{P}_e] = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.2.7. Planificación de trayectorias en un robot

En robótica, la generación de trayectoria de un sistema robótico consiste en la aplicación de algoritmos de control y de funciones de control cinemático al modelo cinemático y dinámico de un sistema. La Figura 2.9 presenta la metodología establecida para el control cinemático de un sistema

robótico.

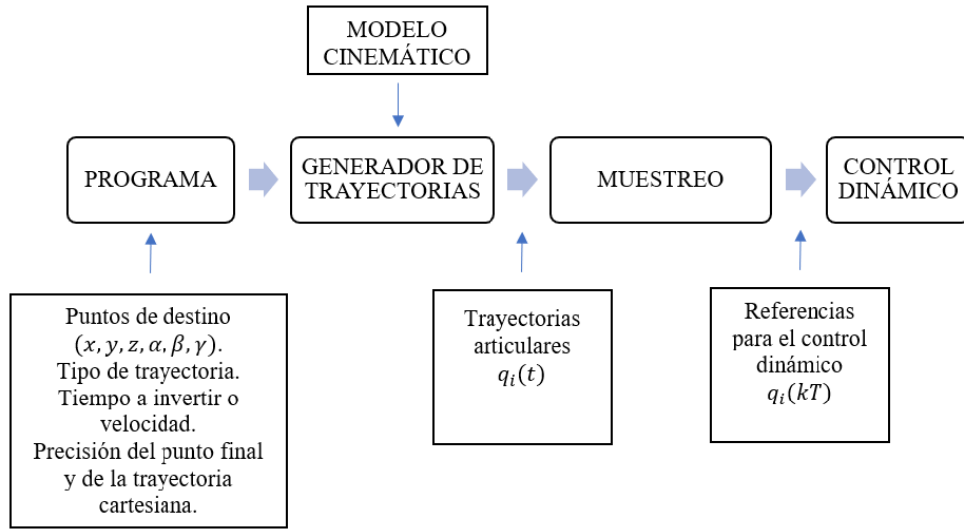


Figura 2.9: Control cinemático de un robot.

Implementar una tarea determinada en un robot consiste en mover desde un punto inicial a un punto final, dicho movimiento puede ser generado asumiendo distintas trayectorias espaciales. De tal manera, que el tipo de trayectoria que puede encontrarse en robots dispongan de trayectorias punto a punto, coordenadas y continuas:

- Trayectoria punto a punto: el robot debe realizar la interpolación entre los puntos especificados, de forma tal que, posteriormente sea posible realizar el control de movimientos para que el robot pase por dichos puntos.
- Trayectorias coordinadas: Plantea un movimiento simultáneo de las articulaciones, ralentizándolas articulaciones más rápidas, para que todas tarden el mismo tiempo en acabar el movimiento.
- Trayectorias continuas: En este tipo de trayectoria, es preciso calcular de manera continua las trayectorias en línea recta o en arco de círculo a una trayectoria especificada por el usuario. Una vez realizada la planificación de trayectorias, es necesario generar los movimientos concretos y controlarlos para mantener al robot en la trayectoria planificada.

2.2.8. Dinámica de robots

El concepto que define la relación entre las fuerzas que actúan sobre una cadena cinemática y el movimiento que se origina a partir de estas cargas mecánicas es el modelo dinámico del robot, este modelo dinámico define entre otras cosas: la posición del robot definida por sus variables articulares, así mismo la velocidad y aceleración de las mismas, las fuerzas y pares aplicados en cada articulación y los parámetros dimensionales del robot como: longitud, masas e inercias de sus

elementos.

El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot radica en la necesidad de implementar un algoritmo de control, debido a que el movimiento del robot mismo involucra la posición, velocidad, aceleración y la estructura mecánica del cuerpo.

La obtención del modelo dinámico de un robot a partir de la formulación Euler LaGrange, se basa fundamentalmente en el equilibrio de fuerzas definida por la segunda ley de Newton, a partir de su movimiento rotacional denominado ley de Euler.

Donde el equilibrio de fuerzas o pares está dada por (2.22) y (2.23).

$$\sum F = \frac{d}{dt}(mv) \quad (2.22)$$

$$\sum T = \frac{d}{dt}(Iw) = I\dot{w} + w \times (Iw) \quad (2.23)$$

El equilibrio de los torques o pares da como resultado las ecuaciones (2.24) y (2.25)

$$\tau - MgL\cos(\theta) = I\frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.24)$$

$$\tau = MgL^2\ddot{\theta} + MgL\cos(\theta) \quad (2.25)$$

El algoritmo para la obtención del modelo dinámico, mediante la formulación Euler LaGrange consiste en establecer condiciones de energía. La formulación Euler LaGrange está definida por las ecuaciones (2.26) y (2.27).

$$L = E_C - E_P = \frac{1}{2}m\dot{q} - mgh \quad (2.26)$$

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{dL}{dq_i} - \frac{dL}{dq_i} \quad (2.27)$$

Donde:

- L : Función LaGrange.
- E_C : Energía cinética.
- E_P : Energía potencial.
- \dot{q}_i : Velocidad articular.
- q_i : Posición articular.
- τ_i : Torque articular.
- m : masa del eslabón.
- g : gravedad.

- h : altura del eslabón.

Mediante la formulación Euler LaGrange el modelo dinámico obtenido está dado por (2.28)

$$\tau = D\ddot{q} + H + C \quad (2.28)$$

Donde:

- τ : Vector de torques articulares.
- $D(q)$: Matriz de inercias cuyos elementos están en función de q .
- $H(q, \dot{q})$: Matriz de fuerzas de coriolis dependientes de q y \dot{q} .
- $C(q)$: Matriz de gravedad dependiente de q .

El modelo dinámico obtenido mediante la formulación Newton Euler parte del principio de equilibrio mecánico en fuerzas y toques o pares en cada elemento del sistema, siendo un algoritmo compuesta puramente de operaciones vectoriales. Donde las ecuaciones (2.29) y (2.30) presenta el algoritmo para la obtención del modelo dinámico.

$$\sum F_i = \frac{d}{dt}(m_i v_i) = \dot{m}_i v_i \quad (2.29)$$

$$\sum T_i = \frac{d}{dt}(I_i w_i) = I_i \dot{w}_i + w_i \times (I_i w_i) \quad (2.30)$$

Donde:

- F_i : Fuerzas ejercidas en el eslabón i .
- T_i : Torques ejercidos en el eslabón i .
- m_i : Masa del eslabón i .
- I_i : Tensor de inercias en el eslabón i en torno a su centro de masas.
- v_i, \dot{v}_i : Velocidad y aceleración lineal del centro de masa de la articulación i .
- w_i, \dot{w}_i : Velocidad y aceleración angular de la articulación i .

2.2.9. Tipos de controladores

Un controlador es un elemento de software aplicado a una maquina computador, la cual es desarrollada para realizar actividades repetitivas, difíciles e incluso peligrosas de una manera segura y precisa en relación a una actividad definida. Comúnmente los robots se componen de elementos eléctricos como electrónicos, como son una unidad de control, sensores y actuadores.

Los controladores pueden clasificarse en dos altas gamas, los controladores clásicos, como también los controladores inteligentes. Actualmente existe una gran variedad de controladores, los cuales pueden partir desde controladores con funcionamiento basado en inteligencia artificial, genética, entre otros muchos tipos de controladores.

Es necesario hacer una revisión de los controladores clásicos que actualmente podemos encontrar:

- Control ON-OFF: Este es el tipo de control más simple, comúnmente basado en sistemas binarios, el cual se simplifica a tareas de verdadero y falso para un sistema MIMO.

Los sistemas de control automático, usualmente son sistemas sintonizados por ganancias y constantes definidas, un algoritmo de control clásico proporcionara una respuesta de acuerdo a el tipo de acción de control ejercida, por lo tanto, las técnicas de control clásico más utilizadas son:

- Control Proporcional-Integral (PI): La acción de control de este controlador está compuesto por dos constantes ajustables para el controlador, su respuesta en el tiempo se ve reducida en su acción además se tiene una respuesta mayor a la esperada, sin embargo, puede eliminar el error en estado estable.
- Control Proporcional-Derivativo: De la misma manera que un controlador PI, el control PD, está compuesta por dos constantes ajustables, las cuales mediante la acción del controlador nos ofrecerán una respuesta más ajustada y con un grado de tolerancia menor, de la misma manera la respuesta tendrá un menor tiempo de estabilización.
- Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID): La acción del control derivativo, la acción del control integral y si también la acción del control proporcional, ofrecen un nuevo controlador con tres ganancias ajustables, las cuales ofrecen las acciones de cada uno de los controles de manera individual.

Como resultado de nuevas herramientas y métodos de control, existe el control inteligente, el cual es la ciencia que pretende la combinación de nuevos métodos para ofrecer sistemas de control expertos o inteligentes, los controladores o métodos de control más comunes en esta ciencia son:

- Lógica difusa: Es una de la técnica de programación que mayor respuesta ofrecen en el tiempo, Este controlador, a diferencia de otros controladores comprende totalmente de un algoritmo de programación, basada en reglas que interactúan para ofrecer una respuesta, a diferencia de otros controladores, la interacción MIMO suele ser estar más simplificada que otros controladores.
- Las redes neuronales: En control se utilizan por su capacidad de aprender el comportamiento no lineal de las variables de un proceso. Esta capacidad se puede utilizar para el diseño de sistemas que funcionen como simulador, identificador o controlador.
- Los algoritmos genéticos: Se están utilizando en control, entre otras aplicaciones, para depurar de forma automática las reglas que forman la base de conocimiento. Proporcional-Integral-Derivativo (PID): La acción del control derivativo, la acción del control integral y si también la acción del control proporcional, ofrecen un nuevo controlador con tres ganancias ajustables, las cuales ofrecen las acciones de cada uno de los controles de manera individual.

Metodología

Es importante hacer mención sobre trabajos realizados anteriormente en esta línea de investigación. Anteriormente se propuso el uso de un robot neumático flexible compuesto por tres grados de libertad. En el desarrollo de este trabajo se propone incorporar un cuarto grado de libertad y con ello hacer estudio de este nuevo sistema. La incorporación de un nuevo grado de libertad representa un mayor espacio de trabajo del robot, así también la posibilidad de poder implementar el robot neumático a distintas actividades.

La metodología implementada para el desarrollo de este trabajo se presenta en la Figura 3.1.

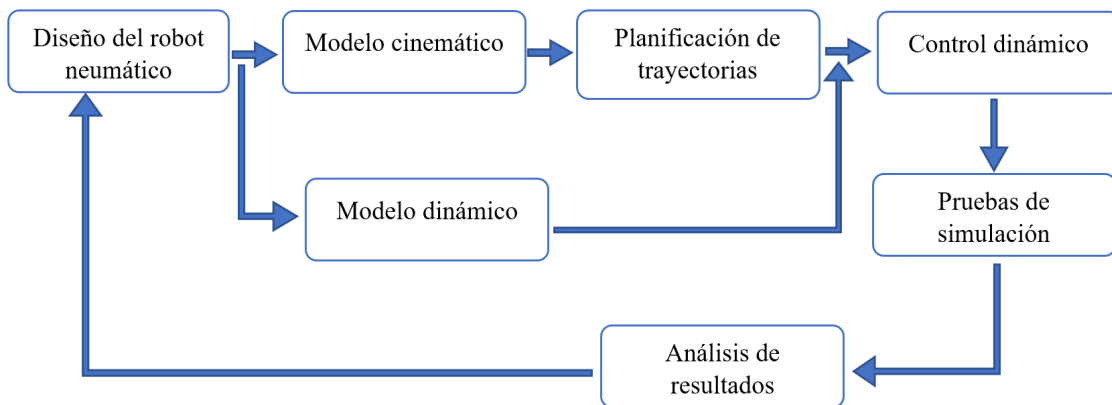


Figura 3.1: Metodología de tesis.

3.1. Morfología propuesta del robot neumático

La morfología del robot neumático que se presenta a continuación consta de 4 grados de libertad. El robot neumático comprende de 4 articulaciones de revoluta, 2 de las articulaciones generadas en la morfología asociada, están basadas en el manipulador de Kiyama de 2005, así mismo las articulaciones restantes son generadas mediante el acoplamiento de motores neumáticos. En la Figura 3.2 presenta el diseño del robot neumático desarrollado en Solidworks.

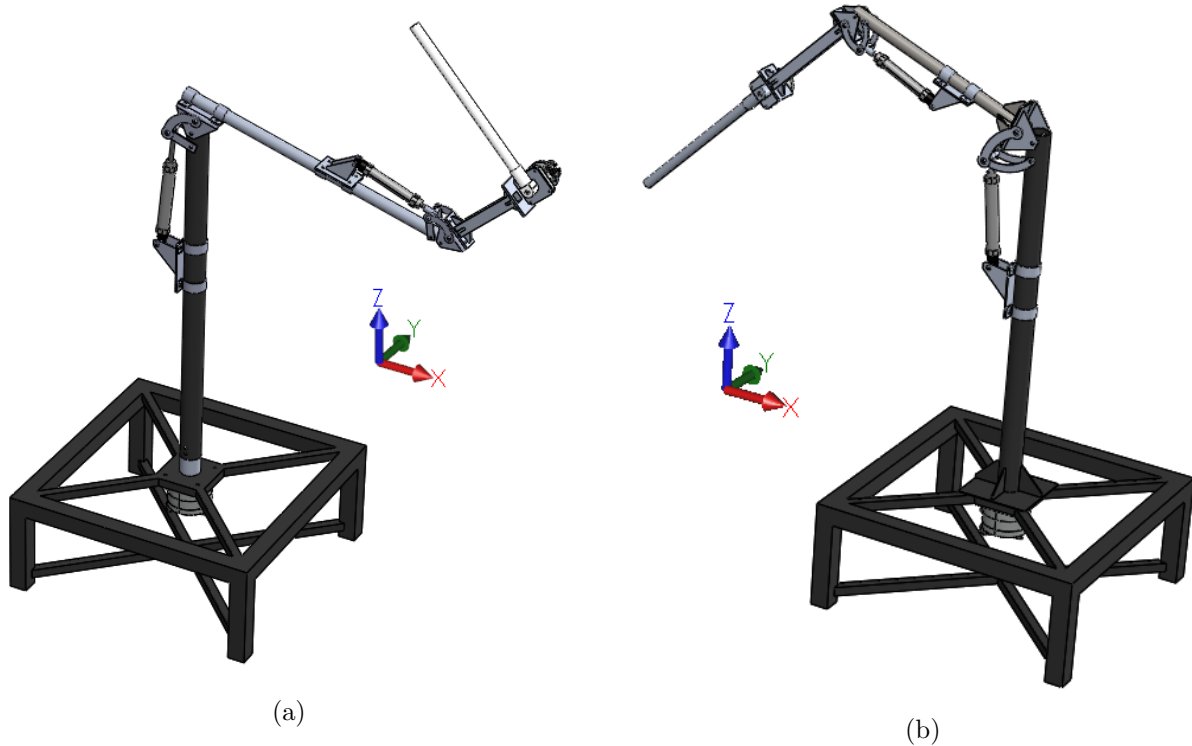


Figura 3.2: (a) Morfología inicial del robot neumático. (b) Morfología final del robot neumático.

La Figura 3.3, presenta las dimensiones del robot neumático en base al diseño propuesto. Así mismo la Tabla 3.1 presenta las especificaciones de los actuadores neumáticos presentes en la morfología del robot.

Tabla 3.1: Especificaciones de los actuadores neumáticos presentes en la morfología del robot.

Actuador neumático	Presión de trabajo	Angulo de giro
<i>FESTO DSMI – 40 – 270 – AB</i>	1,5 a 10 Bar	0 a 270°
<i>FESTO DSMI – 25 – 270 – AB</i>	1,5 a 10 Bar	0 a 270°
Actuador neumático	Presión de trabajo	Desplazamiento del pistón
<i>CM2YC32 – 150Z</i>	0,02 a 0,7 MPa	0 a 150 mm
<i>CM2YC25 – 100Z</i>	0,02 a 0,7 MPa	0 a 100 mm

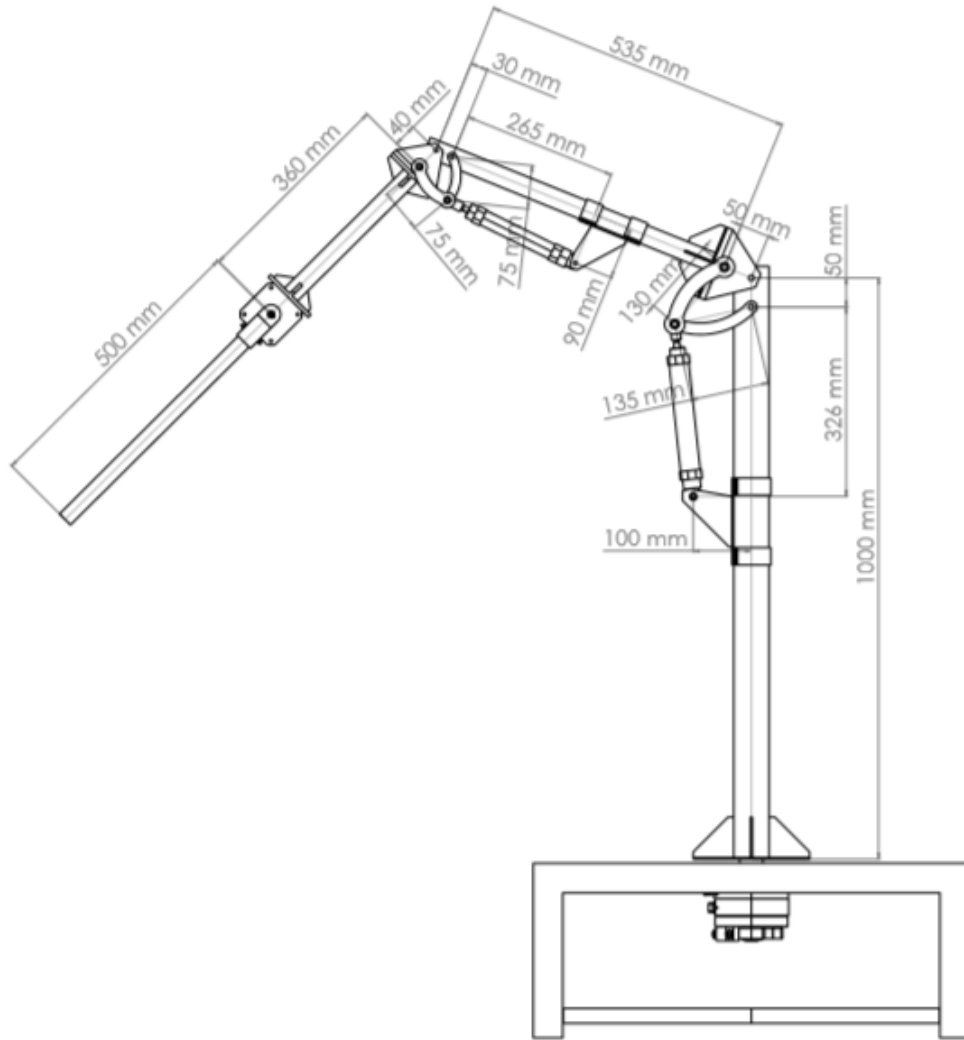


Figura 3.3: Dimensiones presentes en la morfología del robot.

3.2. Modelo cinemático del robot neumático de 4DOF

La siguiente sección presenta la solución de la problemática de posición y velocidad del efector final, así mismo la relación de estas con las posiciones y velocidades articulares presentes en la morfología del robot de la Figura 3.3.

3.2.1. Cinemática de posición directa del robot neumático de 4GL

En base a la figura 3.4, y la representación asociada de la morfología del robot se plantea la convención D-H de la tabla 3.2, asumiendo la metodología planteada de la convención D-H para un sistema robótico de cadena abierta. La Figura 3.5 presenta la morfología asociada al robot neumático.

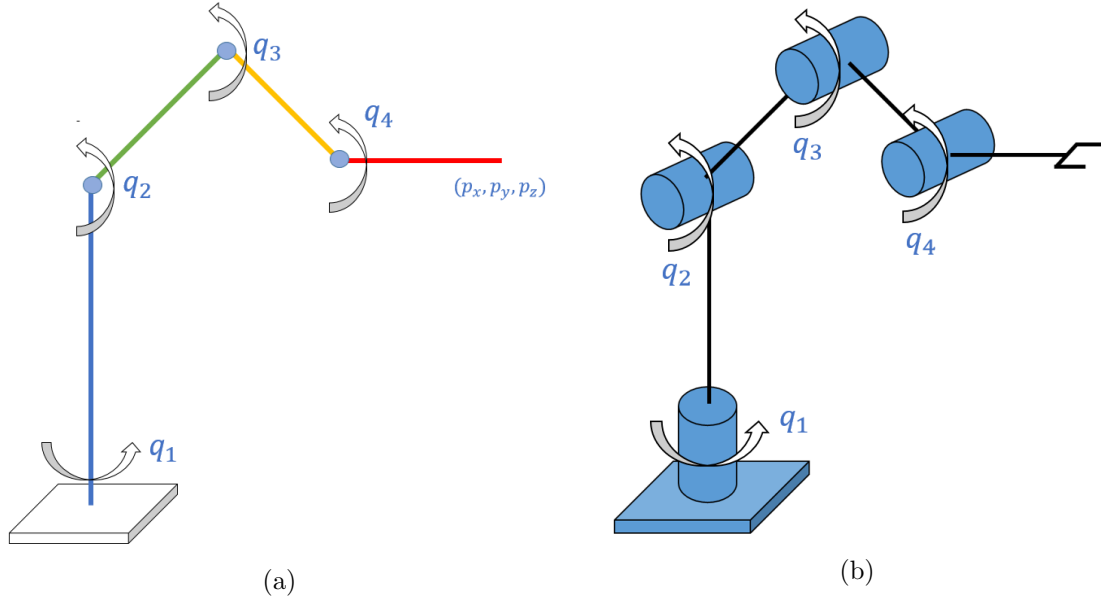


Figura 3.4: (a) Morfología del robot neumático. (b) Diagrama de alambre del robot neumático.

Tabla 3.2: Parámetros Denavit Hartenberg.

Articulación i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	l_1	0	90°
2	θ_2	0	l_2	0°
3	θ_3	0	l_3	0°
4	θ_4	0	l_4	0°

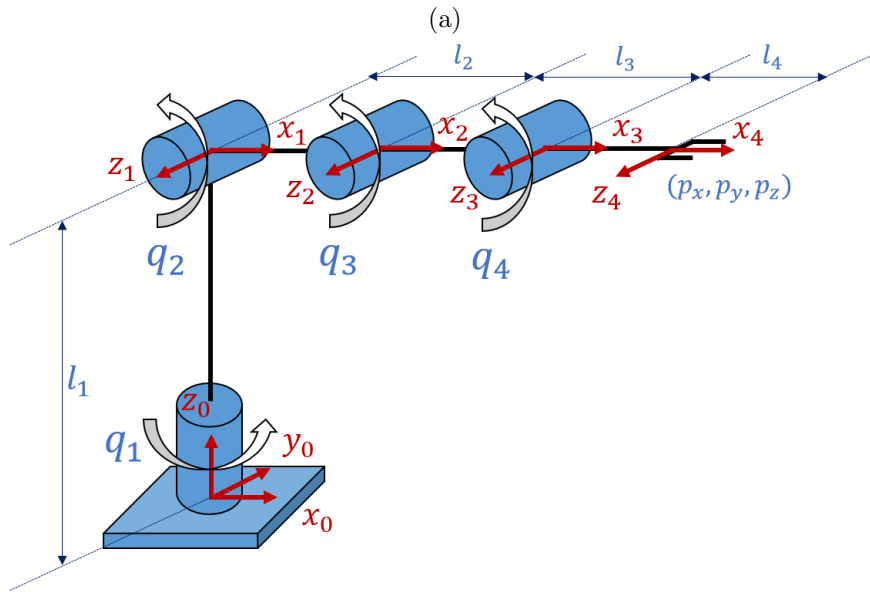
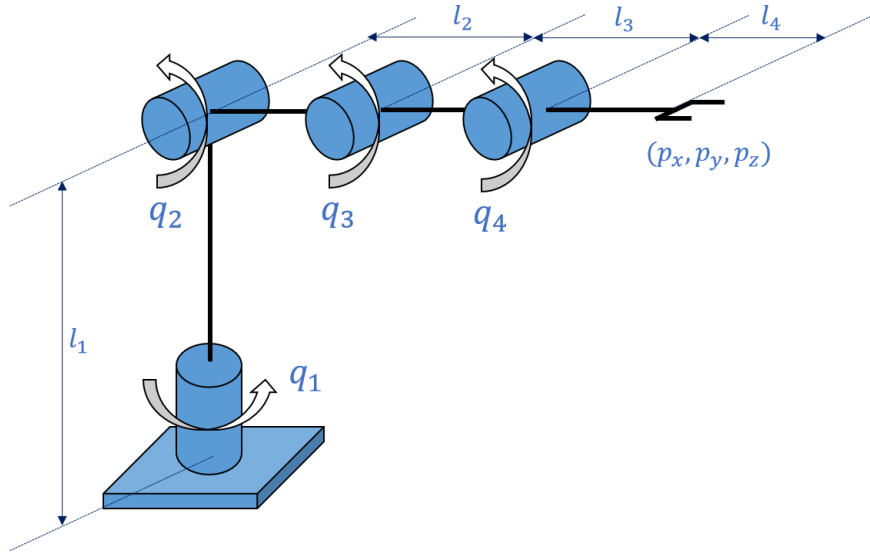
La matriz de posición obtenida por la convención Denavit Hartenberg está dada por (3.1).

$$T_i = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Los elementos de la matriz de rotación están dados por (3.2) a (3.10).

$$a_x = \cos(q_1)\cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.2)$$

$$a_y = \sin(q_1)\cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.3)$$



(b)

Figura 3.5: (a) Morfología alterna para cálculo de los parámetros de Denavit Hartenberg. (b) Parámetros de Denavit Hartenberg.

$$a_z = \sin(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.4)$$

$$b_x = -\cos(q_1)\sin(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.5)$$

$$b_y = -\sin(q_1)\sin(q_1 + q_3 + q_4) \quad (3.6)$$

$$b_z = \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.7)$$

$$c_x = \text{sen}(q_1) \quad (3.8)$$

$$c_y = -\cos(q_1) \quad (3.9)$$

$$c_z = 0 \quad (3.10)$$

Las posiciones del robot estarán dadas por (3.11), (3.12) y (3.13).

$$p_x = \cos(q_1)[l_3\cos(q_2 + q_3) + l_2\cos(q_2) + l_4\cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.11)$$

$$p_y = \sin(q_1)[l_3\cos(q_2 + q_3) + l_2\cos(q_2) + l_4\cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.12)$$

$$p_z = l - 1 + l_3\sin(q_2 + q_3) + l_2\sin(q_2) + l_4\sin(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.13)$$

3.2.2. Cinemática de posición inversa del robot neumático de 4 DOF.

El modelo cinemático inverso radica en conocer la posición articular de un robot a partir del conocimiento de las posiciones en cierto instante de tiempo, de tal manera se conoce las coordenadas cartesianas de las posiciones (p_x, p_y, p_z) que representan la posición del efector final.

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 . Así mismo se puede deducir que la rotación generada por la articulación q_1 está dada por (3.14).

$$q_1 = \tanh\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.14)$$

Asumiendo que la articulación q_1 genera la rotación del plano generado por las articulaciones q_2, q_3 y q_4 . De tal manera. La metodología para la obtención del modelo cinemático inverso, consiste en proponer la orientación del ultimo eslabón, tal como se presenta en las configuraciones angulares presentes en la Figura 3.6. Así mismo las proyecciones geométricas obtenidas a partir de las configuraciones angulares se muestran en la Figura 3.7.

Donde:

$$\begin{aligned} z' &= p_z - l_1 \\ d_z &= z' - l_4\cos(q_p) \\ a &= \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2} \\ d_x &= l_a - l_4\cos(q_p) \\ \alpha &= \text{atan2}\left(\frac{d_z}{d_x}\right) \\ h &= \sqrt{(d_x)^2 + (d_z)^2} \end{aligned}$$

Mediante la implementación de ley de senos y ley de cosenos se obtiene:

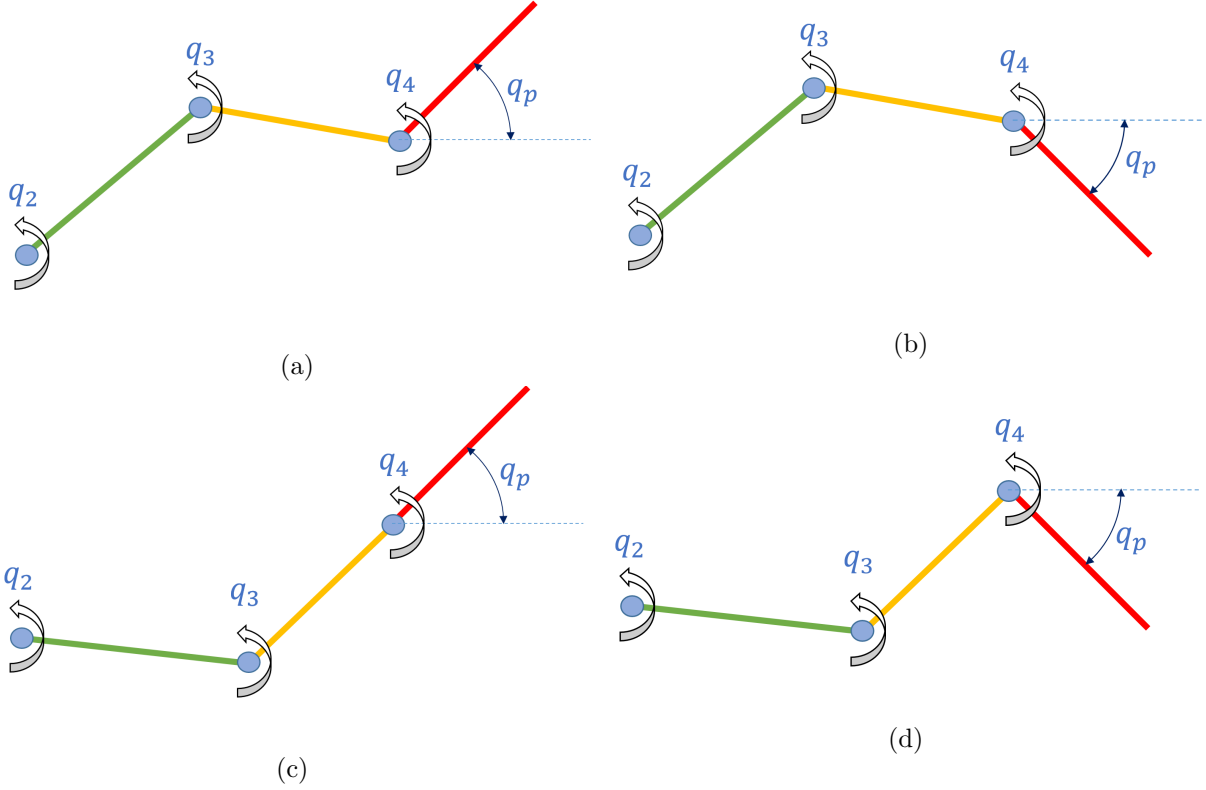


Figura 3.6: (a) Configuración angular codo arriba y ángulo q_p positivo. (b) Configuración angular codo arriba y ángulo q_p negativo. (c) Configuración angular codo abajo y ángulo q_p positivo. (d) Configuración angular codo abajo y ángulo q_p negativo.

$$\begin{aligned}
 \cos(\pi - q_3) &= -\cos(q_3) \\
 r^2 &= l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3\cos(q_3) \\
 \cos(q_3) &= \left(\frac{r^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right) \\
 \sin(q_3) &= \sqrt{1 - \cos^2(q_3)}
 \end{aligned}$$

Donde (3.16) expresa la solución cerrada para el ángulo q_3 para las posibles configuraciones angulares y (3.15) es la solución para q_2 .

$$q_2 = \text{atan2} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)} \right) \quad (3.15)$$

$$q_3 = \alpha + \beta \quad (3.16)$$

Asumiendo la proyección generada en la Figura 3.8, donde se muestra la relación angular de los ángulos generados se tiene (3.17), que expresa la solución cerrada de q_4

$$q_4 = q_p - q_2 - q_3 \quad (3.17)$$

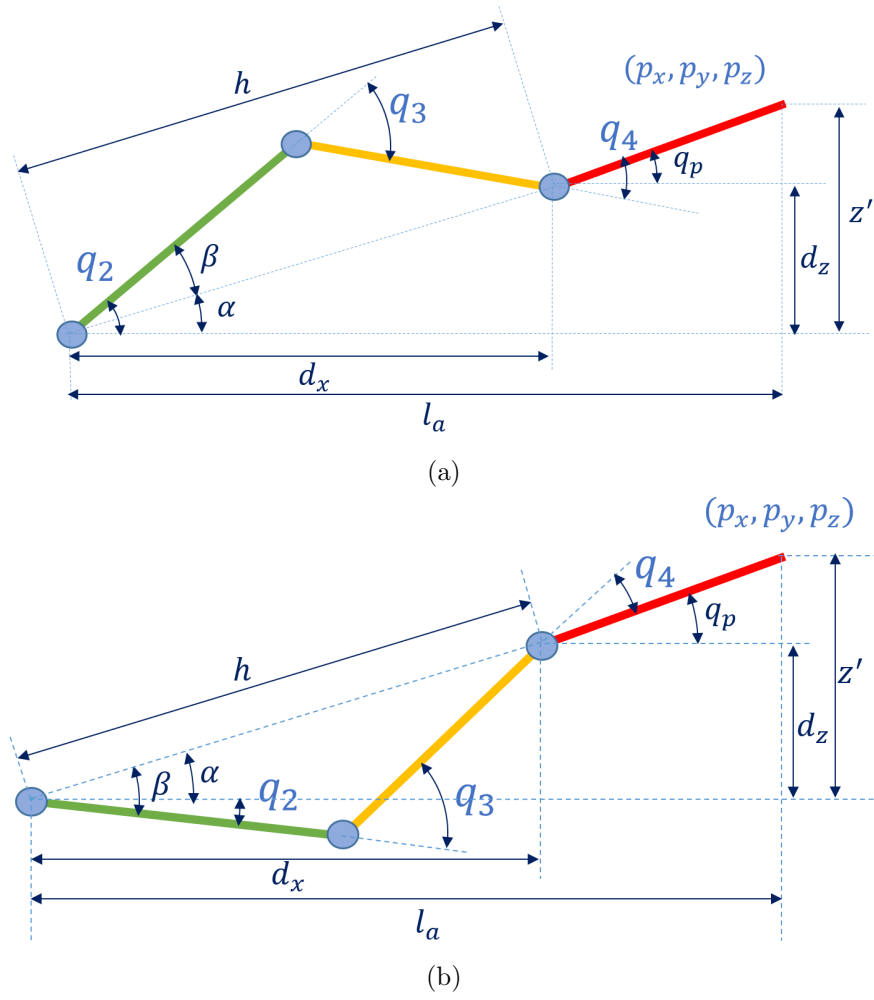


Figura 3.7: (a) Proyección geométrica para configuración angular codo arriba. (b) Proyección geométrica para configuración angular codo abajo.

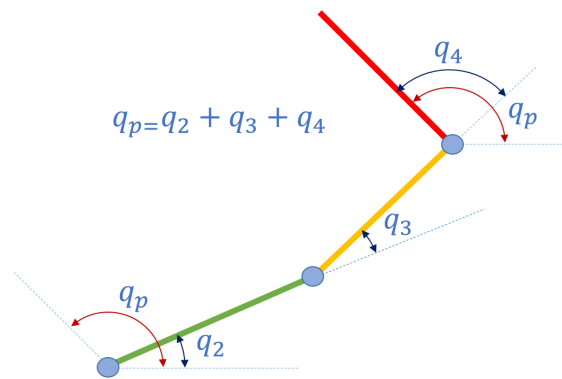


Figura 3.8: Relación angular del plano generado.

3.2.3. Cinemática de velocidad directa del robot neumático de 4 DOF

La matriz jacobiana estará dada por (3.18)

$$v_e = J(q)\dot{q} \quad (3.18)$$

Donde $J(q)$ la matriz jacobiana dada utilizando la metodología planteada por el jacobiano analítico (3.19).

$$J(q) = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & j_{34} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Los elementos de matriz jacobiana analítica están dadas por (3.20) a (3.31).

$$j_{11} = -\sin(q_1) [l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.20)$$

$$j_{21} = \cos(q_1) [(l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4))] \quad (3.21)$$

$$j_{31} = 0 \quad (3.22)$$

$$j_{12} = -\cos(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin(q_2) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.23)$$

$$j_{22} = -\sin(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin(q_2) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.24)$$

$$j_{32} = l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.25)$$

$$j_{13} = -\cos(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.26)$$

$$j_{23} = -\sin(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.27)$$

$$j_{33} = l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.28)$$

$$j_{14} = -l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \cos(q_1) \quad (3.29)$$

$$j_{24} = -l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \sin(q_1) \quad (3.30)$$

$$j_{34} = l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.31)$$

Se tiene que \dot{q} corresponde al vector de velocidades articulares. Donde la matriz jacobiana $J(q)$ está dado por el método geométrico, asumiendo que $J(q)\dot{q}$ es igual al vector de velocidades lineales y angulares del extremo final del robot dada por (3.32).

$$J(q) = \begin{bmatrix} \dot{j}_{11} & \dot{j}_{12} & \dot{j}_{13} & \dot{j}_{14} \\ \dot{j}_{21} & \dot{j}_{22} & \dot{j}_{23} & \dot{d}_{24} \\ \dot{j}_{31} & \dot{j}_{32} & \dot{j}_{33} & \dot{j}_{34} \\ \dot{j}_{41} & \dot{j}_{42} & \dot{j}_{43} & \dot{j}_{44} \\ \dot{j}_{51} & \dot{j}_{52} & \dot{j}_{53} & \dot{j}_{54} \\ \dot{j}_{61} & \dot{j}_{62} & \dot{j}_{63} & \dot{j}_{64} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Los elementos de matriz jacobiana analítica están dadas por (3.33) a (3.56).

$$j_{11} = -\sin(q_1) [l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.33)$$

$$j_{21} = \cos(q_1) [(l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4))] \quad (3.34)$$

$$j_{31} = 0 \quad (3.35)$$

$$j_{41} = 0 \quad (3.36)$$

$$j_{51} = 0 \quad (3.37)$$

$$j_{61} = 1 \quad (3.38)$$

$$j_{12} = -\cos(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin(q_2) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.39)$$

$$j_{22} = -\sin(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin(q_2) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.40)$$

$$j_{32} = l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos(q_2) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.41)$$

$$j_{42} = \sin(q_1) \quad (3.42)$$

$$j_{52} = -\cos(q_1) \quad (3.43)$$

$$j_{62} = 0 \quad (3.44)$$

$$j_{13} = -\cos(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.45)$$

$$j_{23} = -\sin(q_1) [l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4)] \quad (3.46)$$

$$j_{33} = l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.47)$$

$$j_{43} = \sin(q_1) \quad (3.48)$$

$$j_{53} = -\cos(q_1) \quad (3.49)$$

$$j_{63} = 0 \quad (3.50)$$

$$j_{14} = -l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \cos(q_1) \quad (3.51)$$

$$j_{24} = -l_4 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \sin(q_1) \quad (3.52)$$

$$j_{34} = l_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.53)$$

$$j_{44} = \sin(q_1) \quad (3.54)$$

$$j_{54} = -\cos(q_1) \quad (3.55)$$

$$j_{64} = 0 \quad (3.56)$$

3.3. Modelo dinámico de la estructura rígida del robot neumático de 4DOF

La metodología utilizada para obtener el modelo dinámico del robot consiste en las ecuaciones de Euler LaGrange, Las ecuaciones de Euler LaGrange consisten en la energía cinética rotacional o traslacional y la energía potencial de cada eslabón del robot manipulador dadas por las ecuaciones (3.57) y (3.58).

$$K_i(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \dot{q}_i^2 \quad (3.57)$$

$$U_i(q) = m_i g h_i \quad (3.58)$$

Donde m_i y v_i^2 son las masas y velocidades al cuadrado del centro de masa de cada variable articular i , el término g es la gravedad y h_i es la altura del centro de masa de la variable articular respectiva. La Figura 3.9 muestra la representación simbólica del robot y sus centros de masas.

Por lo tanto, las ecuaciones del modelo Euler LaGrange son obtenidas directamente de la ecuación lagrangiana dada por la ecuación (3.59), la cual consiste en el balance de energías de la dinámica, tanto cinética como potencial.

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) \quad (3.59)$$

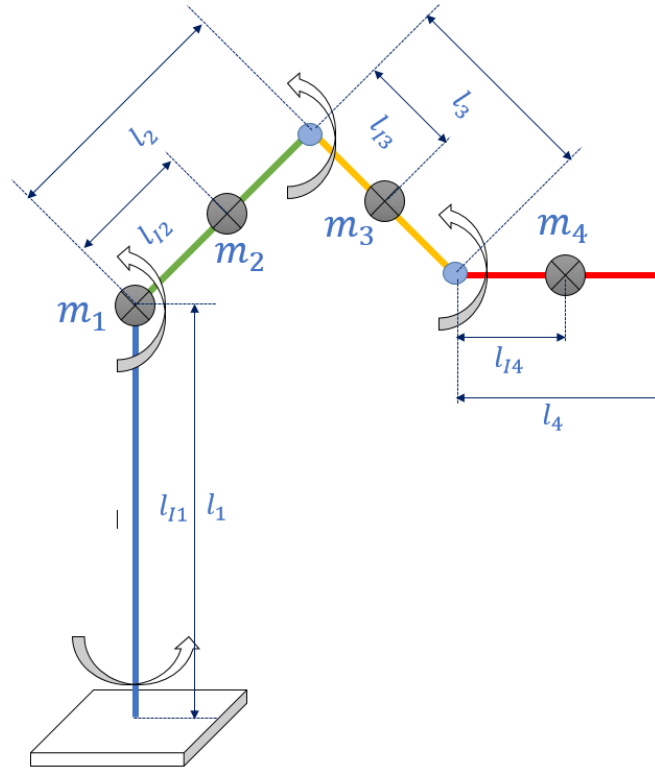


Figura 3.9: Representación simbólica de los centros de masas del robot neumático.

La ecuación de Euler LaGrange para cada grado de libertad del manipulador es la ecuación (3.60).

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{dL}{dq_i} - \frac{dL}{dq} \quad (3.60)$$

La ecuación (3.61) expresa el modelo dinámico del robot manipulador, descrita por ecuaciones de estados.

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (3.61)$$

Donde D representa la matriz de inercias, la matriz de gravedad C depende de q y la matriz de coriolis y fuerzas centrípetas C depende de q y \dot{q} .

El modelo dinámico del robot está dado por (3.62).

$$\begin{aligned} \tau = & \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} [g] \end{aligned} \quad (3.62)$$

Los valores respectivos a (3.62) están dados por (3.63) a (3.98).

$$\begin{aligned} m_{11} = & I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + (l_2^2 * m_3)/2 + \frac{1}{2}l_2^2m_4 + \frac{1}{2}l_3^2m_4 + \frac{1}{2}l_{I_2}^2m_2 + \frac{1}{2}l_{I_3}^2m_3 + \frac{1}{2}l_{I_4}^2m_4 \quad (3.63) \\ & + \frac{1}{2}l_2^2m_3\cos(2q_2) + \frac{1}{2}l_2^2m_4\cos(2q_2) + \frac{1}{2}l_{I_2}^2m_2\cos(2q_2) + \frac{1}{2}l_{I_4}^2m_4\cos(2q_2 + 2q_3 + 2q_4) \\ & + \frac{1}{2}l_3^2m_4\cos(2q_2 + 2q_3) + l_{I_3}^2m_3\cos(2q_2 + 2q_3) + l_2l_{I_4}m_4\cos(2q_2 + q_3 + q_4) \\ & + l_2l_{I_4}m_4\cos(q_3 + q_4) + l_2l_3m_4\cos(q_3) + l_2l_{I_3}m_3\cos(q_3) + l_3l_{I_4}m_4\cos(q_4) \\ & + l_3l_{I_4}m_4\cos(2q_2 + 2q_3 + q_4) + l_2l_3m_4\cos(2q_2 + q_3) + l_2l_{I_3}m_3\cos(2q_2 + q_3) \end{aligned}$$

$$m_{12} = 0 \quad (3.64)$$

$$m_{13} = 0 \quad (3.65)$$

$$m_{14} = 0 \quad (3.66)$$

$$m_{21} = 0 \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} m_{22} = & I_2 + I_3 + I_4 + l_2^2m_3 + l_2^2m_4 + l_3^2m_4 + l_{I_2}^2m_2 + l_{I_3}^2m_3 + l_{I_4}^2m_4 \quad (3.68) \\ & + 2l_2l_{I_4}m_4\cos(q_3 + q_4) + 2l_2l_3m_4\cos(q_3) + 2l_2l_{I_3}m_3\cos(q_3) + 2l_3l_{I_4}m_4\cos(q_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{23} = & m_4l_3^2 + 2m_4\cos(q_4)l_3l_{I_4} + l_2m_4\cos(q_3)l_3 + m_3l_{I_3}^2 + l_2m_3\cos(q_3)l_{I_3} + m_4l_{I_4}^2 \quad (3.69) \\ & + l_2m_4\cos(q_3 + q_4)l_{I_4} + I_3 + I_4 \end{aligned}$$

$$m_{24} = I_4 + l_{I_4}^2m_4 + l_2l_{I_4}m_4\cos(q_3 + q_4) + l_3l_{I_4}m_4\cos(q_4) \quad (3.70)$$

$$m_{31} = 0 \quad (3.71)$$

$$m_{32} = m_4 l_3^2 + 2m_4 \cos(q_4) l_3 l_{I4} + l_2 m_4 \cos(q_3) l_3 + m_3 l_{I3}^2 + l_2 m_3 \cos(q_3) l_{I3} + m_4 l_{I4}^2 + l_2 m_4 \cos(q_3 + q_4) l_{I4} + I_3 + I_4 \quad (3.72)$$

$$m_{33} = m_4 l_3^2 + 2m_4 \cos(q_4) l_3 l_{I4} + m_3 l_{I3}^2 + m_4 l_{I4}^2 + I_3 + I_4 \quad (3.73)$$

$$m_{34} = m_4 l_{I4}^2 + l_3 m_4 \cos(q_4) l_{I4} + I_4 \quad (3.74)$$

$$m_{41} = 0 \quad (3.75)$$

$$m_{42} = I_4 + l_{I4}^2 m_4 + l_2 l_{I4} m_4 \cos(q_3 + q_4) + l_3 l_{I4} m_4 \cos(q_4) \quad (3.76)$$

$$m_{43} = m_4 l_{I4}^2 + l_3 m_4 \cos(q_4) l_{I4} + I_4 \quad (3.77)$$

$$m_{44} = m_4 l_{I4}^2 + I_4 \quad (3.78)$$

$$c_{11} = 0 \quad (3.79)$$

$$c_{12} = -\dot{q}_1 [l_3^2 m_4 \sin(2q_2 + 2q_3) + l_{I3}^2 m_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + l_2^2 m_3 \sin(2q_2) + l_2^2 m_4 \sin(2q_2) + l_{I2}^2 m_2 \sin(2q_2) + l_{I4}^2 m_4 \sin(2q_2 + 2q_3 + 2q_4) + 2l_2 l_{I4} m_4 \sin(2q_2 + q_3 + q_4) + 2l_3 l_{I4} m_4 \sin(2q_2 + 2q_3 + q_4) + 2l_2 l_3 m_4 \sin(2q_2 + q_3) + 2l_2 l_{I3} m_3 \sin(2q_2 + q_3)] \quad (3.80)$$

$$c_{13} = -\dot{q}_1 [l_3^2 m_4 \sin(2q_2 + 2q_3) + l_{I3}^2 m_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + l_{I4}^2 m_4 \sin(2q_2 + 2q_3 + 2q_4) + l_2 l_{I4} m_4 \sin(2q_2 + q_3 + q_4) + l_2 l_{I4} m_4 \sin(q_3 + q_4) + l_2 l_3 m_4 \sin(q_3) + l_2 l_{I3} m_3 \sin(q_3) + 2l_3 l_{I4} m_4 \sin(2q_2 + 2q_3 + q_4) + l_2 l_3 m_4 \sin(2q_2 + q_3) + l_2 l_{I3} m_3 \sin(2q_2 + q_3)] \quad (3.81)$$

$$c_{14} = -\dot{q}_1 l_{I4} m_4 [l_{I4} \sin(2q_2 + 2q_3 + 2q_4) + l_2 \sin(2q_2 + q_3 + q_4) + l_2 \sin(q_3 + q_4) + l_3 \sin(q_4) + l_3 \sin(2q_2 + 2q_3 + q_4)] \quad (3.82)$$

$$c_{21} = 0 \quad (3.83)$$

$$c_{22} = 0 \quad (3.84)$$

$$c_{23} = -l_2 [2\dot{q}_2 l_{I4} m_4 \sin(q_3 + q_4) + \dot{q}_3 l_{I4} m_4 \sin(q_3 + q_4) + \dot{q}_4 l_{I4} m_4 \sin(q_3 + q_4) + 2\dot{q}_2 l_3 m_4 \sin(q_3) + \dot{q}_3 l_3 m_4 \sin(q_3) + 2\dot{q}_2 l_{I3} m_3 \sin(q_3) + \dot{q}_3 l_{I3} m_3 \sin(q_3)] \quad (3.85)$$

$$c_{24} = -l_{I4} m_4 [2\dot{q}_2 l_3 \sin(q_4) + 2\dot{q}_3 l_3 \sin(q_4) + \dot{q}_4 l_3 \sin(q_4) + 2\dot{q}_2 l_2 \sin(q_3 + q_4) + \dot{q}_3 l_2 \sin(q_3 + q_4) + \dot{q}_4 l_2 \sin(q_3 + q_4)] \quad (3.86)$$

$$c_{31} = 0 \quad (3.87)$$

$$c_{32} = 0 \quad (3.88)$$

$$c_{33} = -\dot{q}_2 l_2 [l_3 m_4 \sin(q_3) + l_{I3} m_3 \sin(q_3) + l_{I4} m_4 \sin(q_3 + q_4)] \quad (3.89)$$

$$c_{34} = -\dot{q}_4 l_{I4} m_4 [2\dot{q}_2 l_3 \sin(q_4) + 2\dot{q}_3 l_3 \sin(q_4) + \dot{q}_4 l_3 \sin(q_4) + \dot{q}_2 l_2 \sin(q_3 + q_4)] \quad (3.90)$$

$$c_{41} = 0 \quad (3.91)$$

$$c_{42} = 0 \quad (3.92)$$

$$c_{43} = -\dot{q}_2 l_2 l_{I4} m_4 \sin(q_3 + q_4) \quad (3.93)$$

$$c_{44} = -\dot{q}_4 l_{I4} m_4 [\dot{q}_2 l_3 \sin(q_4) + \dot{q}_3 l_3 \sin(q_4) + \dot{q}_2 l_2 \sin(q_3 + q_4)] \quad (3.94)$$

$$g_1 = 0 \quad (3.95)$$

$$g_2 = -gl_3 m_4 \cos(q_2 + q_3) - gl_{I3} m_3 \cos(q_2 + q_3) - gl_2 m_3 \cos(q_2) - gl_2 m_4 \cos(q_2) \\ - gl_{I2} m_2 \cos(q_2) - gl_{I4} m_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.96)$$

$$g_3 = -gl_3 m_4 \cos(q_2 + q_3) - gl_{I3} m_3 \cos(q_2 + q_3) - gl_{I4} m_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.97)$$

$$g_4 = -l_{I4} m_4 g \cos(q_2 + q_3 + q_4) \quad (3.98)$$

Las ecuaciones de Euler LaGrange para cada eslabón del robot manipulador estarán dadas por las ecuaciones (3.99), (3.100), (3.101) y (3.102).

$$\tau_1 = m_{11}\ddot{q}_1 + m_{12}\ddot{q}_2 + m_{13}\ddot{q}_3 + m_{14}\ddot{q}_4 + c_{11}\dot{q}_1 + c_{12}\dot{q}_2 + c_{13}\dot{q}_3 + c_{14}\dot{q}_4 + g_1 \quad (3.99)$$

$$\tau_2 = m_{21}\dot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 + m_{23}\ddot{q}_3 + m_{24}\ddot{q}_4 + c_{21}\dot{q}_1 + c_{22}\dot{q}_2 + c_{23}\dot{q}_3 + c_{24}\dot{q}_4 + g_2 \quad (3.100)$$

$$\tau_3 = m_{31}\dot{q}_1 + m_{32}\ddot{q}_2 + m_{33}\ddot{q}_3 + m_{34}\ddot{q}_4 + c_{31}\dot{q}_1 + c_{32}\dot{q}_2 + c_{33}\dot{q}_3 + c_{34}\dot{q}_4 + g_3 \quad (3.101)$$

$$\tau_4 = m_{41}\dot{q}_1 + m_{42}\ddot{q}_2 + m_{43}\ddot{q}_3 + m_{44}\ddot{q}_4 + c_{41}\dot{q}_1 + c_{42}\dot{q}_2 + c_{43}\dot{q}_3 + c_{44}\dot{q}_4 + g_4 \quad (3.102)$$

La Tabla (3.3) presenta las dimensiones y parámetros establecidos en el modelo dinámico de la ecuación (3.62).

Tabla 3.3: Parámetros del modelo dinámico.

Eslabón i	M_i (Kg)	l_i (m)	l_{Ii} (m)	I_i (Kg/m ²)
1	7,04112	1,0	0	7608,9541582
2	2,14232	0,6	0,27457	637,0564758
3	0,69446	0,4	0,20771	126,6206213
4	0,394625	0,5	0,18713	0,010388707799

3.4. Análisis de posición del mecanismo de 4 barras del manipulador flexible

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.

La Figura 3.10 presenta un mecanismo de 4 barras implementado en un manipulador flexible desarrollado por Kiyama en 2005.

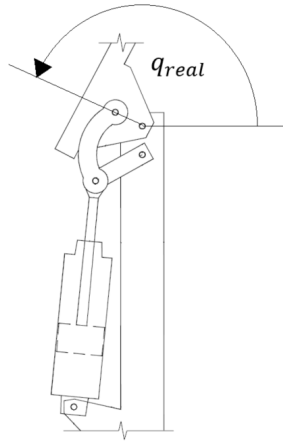
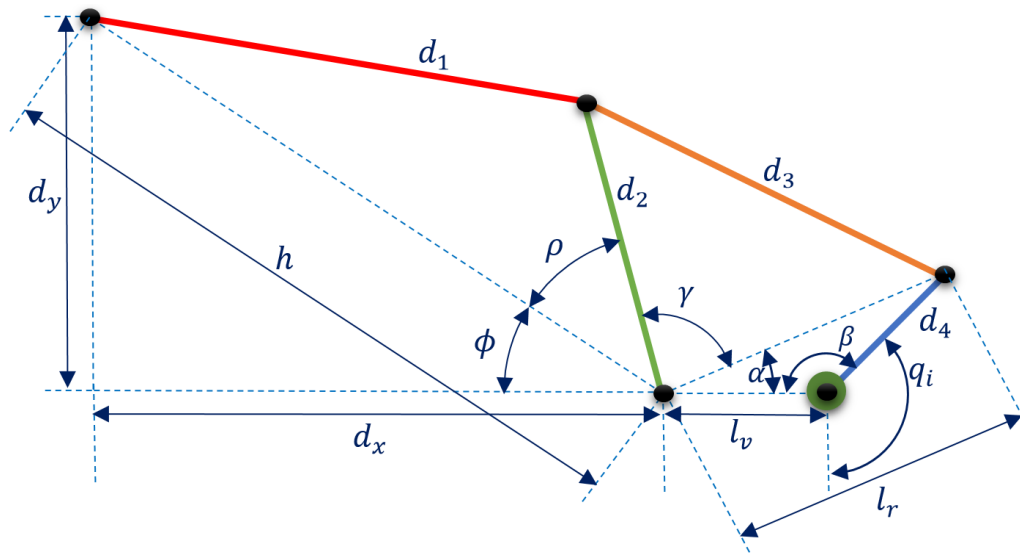


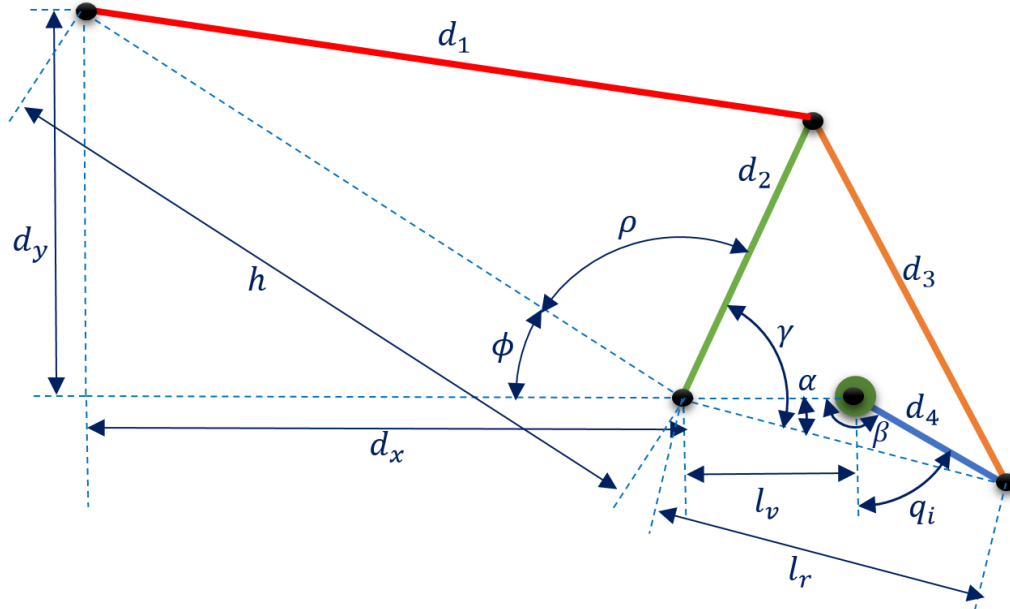
Figura 3.10: Medición del ángulo generado en el manipulador de Kiyama en 2005.

La Figura 3.11 presenta las proyecciones geométricas generadas en el mecanismo de 4 barras del manipulador flexible. La distancia d_1 representa la distancia generada en el actuador neumático, el desplazamiento del cilindro neumático está representado por s y d es la distancia del vástago del cilindro retraído.

Aplicando ley de senos y de cosenos, se obtiene la solución de las proyecciones geométricas del mecanismo de 4 barras.



(a)



(b)

Figura 3.11: (a)Proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i mayor de 90° .
 (b) Proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i menor de 90° .

$$\phi = \tanh\left(\frac{d_y}{d_x}\right)$$

$$h = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$$

la solución de la proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i menor de 90° está dado por:

$$\beta = q_i + 90^\circ$$

$$\begin{aligned}
l_r &= \sqrt{l_v^2 + d_4^2 - 2d_4l_v \cos(\beta)} \\
\alpha &= \cosh\left(\frac{l_r^2 + l_v^2 - d_4^2}{2l_rl_v}\right) \\
\gamma &= \cosh\left(\frac{l_r^2 + d_2^2 - d_3^2}{2l_rd_2}\right) \\
\rho &= 180^\circ + \alpha - \gamma - \phi \\
d_1 &= \sqrt{d_2^2 + h^2 - 2hd_2 \cos(\rho)}
\end{aligned}$$

la solución de la proyección geométrica del mecanismo de 4 barras para un ángulo q_i mayor de 90° está dado por:

$$\begin{aligned}
\beta &= 270^\circ - q_i \\
l_r &= \sqrt{l_v^2 + d_4^2 - 2d_4l_v \cos(\beta)} \\
\alpha &= \cosh\left(\frac{l_r^2 + l_v^2 - d_4^2}{2l_rl_v}\right) \\
\gamma &= \cosh\left(\frac{l_r^2 + d_2^2 - d_3^2}{2l_rd_2}\right) \\
\rho &= 180^\circ - \alpha - \gamma - \phi \\
d_1 &= \sqrt{d_2^2 + h^2 - 2hd_2 \cos(\rho)}
\end{aligned}$$

El desplazamiento s necesario para obtener el ángulo q_i dado, está dado por (3.103).

$$s = d_1 - d \quad (3.103)$$

En base al análisis de posición del mecanismo y de las dimensiones asociadas a la morfología del robot, las dimensiones están dadas por la Tabla 3.4 y la Figura 3.12 presenta el perfil de posición articular obtenido en el mecanismo.

Tabla 3.4: Parámetros de los mecanismos de 4 barras.

Mecanismo	Mecanismo del GDL2 (mm)	Mecanismo del GDL3 (mm)
$d(mm)$	298.45	245.18
$d_2(mm)$	135	75
$d_3(mm)$	130	75
$d_4(mm)$	55	40
$d_x(mm)$	316	255
$d_y(mm)$	100	90
$l_v(mm)$	50	30

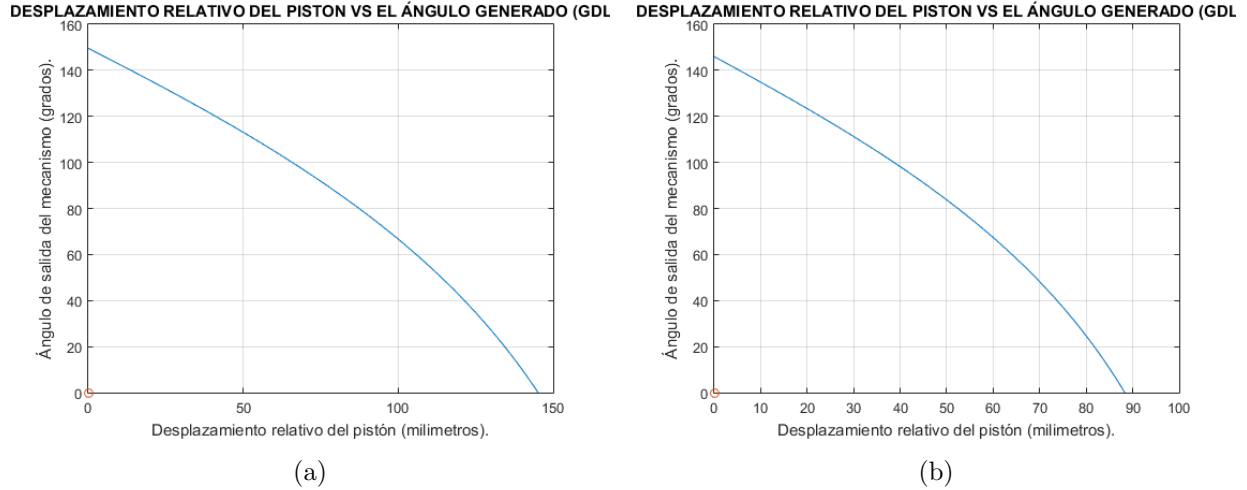


Figura 3.12: (a) Desplazamiento relativo del pistón vs el ángulo generado en el mecanismo del GDL2. (b) Desplazamiento relativo del pistón vs el ángulo generado del mecanismo del GDL3.

3.5. Espacio de trabajo robot neumático de 4GDL

El espacio de trabajo del robot neumático está dado por las variables articulares q_1 , q_2 , q_3 y q_4 . La Figura 3.13 presenta el espacio de trabajo generado de las variables articulares de los límites de trabajo del robot de la Tabla 3.5.

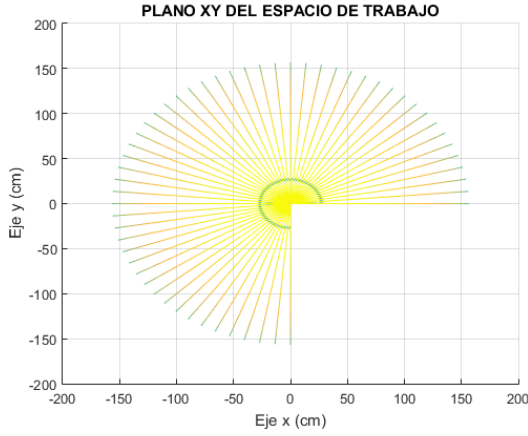
Tabla 3.5: Límites de espacio de trabajo del robot.

Grado de libertad	Límite inferior	Límite superior
1	0°	270°
2	0°	150°
3	60°	-90°
4	-90°	90°

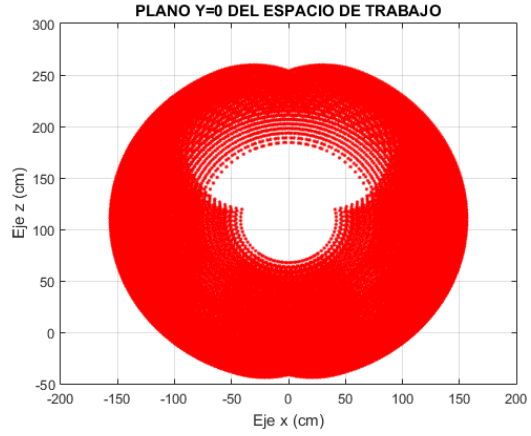
En robótica, se denominan configuraciones singulares aquellas en las que el determinante de su matriz jacobiana se anula, La matriz jacobiana estará dada por los valores dados en la ecuación 16:

$$J(q) = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

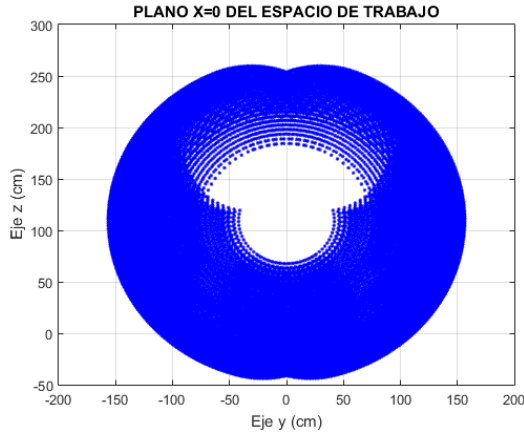
Asumiendo que los valores de $J(q)$ representan mayor información del sistema. Las configuraciones singulares del robot neumático están dadas por (3.105).



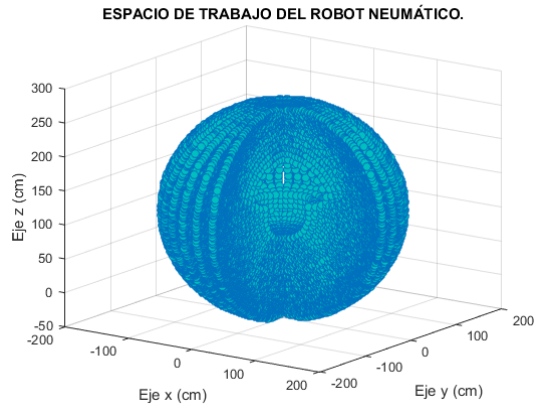
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.13: (a) Plano XY del espacio de trabajo. (b) Plano Y=0 del espacio de trabajo. (c) Plano X=0 del espacio del trabajo. (d) Espacio de trabajo del robot neumático.

$$\det [J(q)] = -l_2 l_3 \sin(q_1) \left[\frac{l_4 \sin(q_2 + 2q_3 + q_4)}{2} + \frac{l_2 \sin(q_2 + q_3)}{2} - \frac{l_4 \sin(q_2 + q_4)}{2} - \frac{l_3 \sin(q_2)}{2} - \frac{l_2 \sin(q_2 - q_3)}{2} + \frac{l_3 \sin(q_2 + 2q_3)}{2} \right] \quad (3.105)$$

Las configuraciones singulares para q_1 , q_2 , q_3 y q_4 están dadas por 0° y 180° .

3.6. Simulación del robot neumático de 4GDL

Simscape Multibody anteriormente SimMechanics es una herramienta que proporciona un entorno de simulación para sistemas mecánicos 3D, además esta herramienta proporciona la simulación

del mismo a partir de las características mecánicas, tales como masas, inercias, articulaciones, etc, basándose en un modelo de geometría 3D.

La Figura 3.14 presenta la simulación del robot neumático desarrollada en la herramienta Simulink de Matlab, la cual genera la simulación de un sistema basado en un archivo CAD. El diseño CAD del robot neumático es desarrollado en SolidWorks, así mismo la Figura 3.15 presenta el diagrama de bloques construido por la herramienta SimMechanics a partir del diseño CAD.

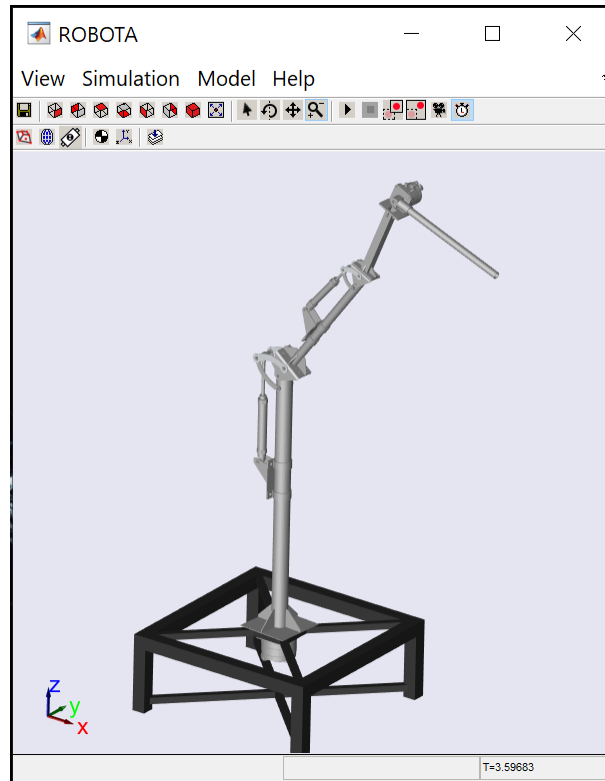


Figura 3.14: Entorno virtual de simulación 3D del robot neumático.

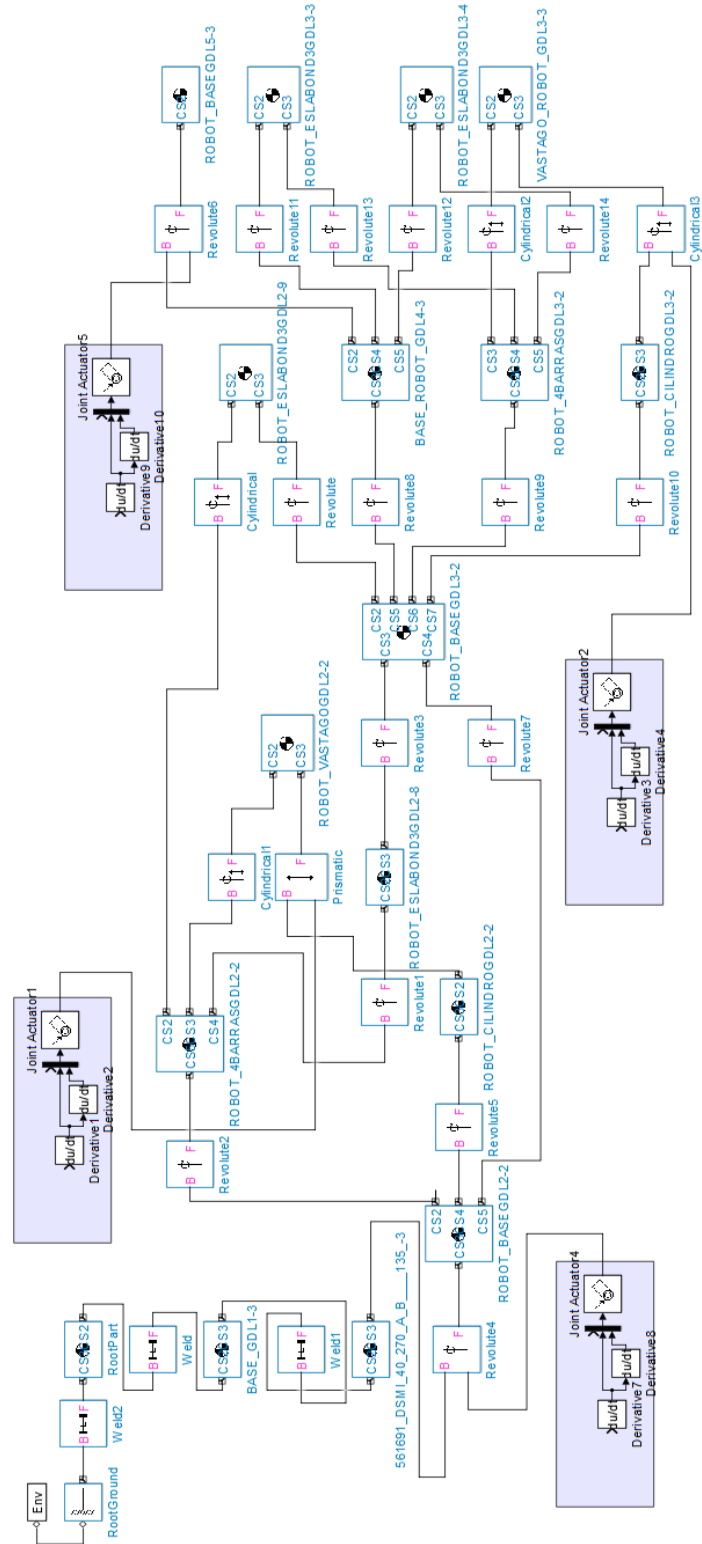


Figura 3.15: Diagrama de bloques construido por la herramienta SimMechanics.

Resultados y Discusión

4.1. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos a través de la implementación en Matlab de la planificación de trayectoria del robot neumático obtenidas a través del uso del modelo cinemático de posición, así también utilizando el método de integración de Euler y el modelo cinemático de velocidad. Además, presenta la implementación del entorno de simulación virtual aplicada a una trayectoria y la implementación de un controlador PID aplicado al modelo dinámico del robot.

4.1.1. Trayectoria del robot neumático de 4GDL mediante el método de integración de Euler.

Esta sección presenta la planeación de trayectoria del robot neumático implementada a partir del modelo cinemático diferencial o jacobiano del robot y el método numérico de integración de Euler, el algoritmo es implementado en Matlab y la metodología consiste en colocar el robot en una posición conocida denominada $q(0)$, mediante el método de integración de Euler se evalúan los valores asociados mediante un incremento denominado h y el computo de velocidades integradas sobre el tiempo, tal como se describe en las ecuaciones (4.1) y (4.1).

$$\dot{q} = J^{-1}(q)v_e \quad (4.1)$$

$$q(t) = \int_0^t \dot{q}(\varsigma) + q(0) \quad (4.2)$$

El método de integración de Euler estará dado por (4.3) y (4.4).

$$q(t_k + 1) = q \quad (4.3)$$

$$q(t) = \int_0^t \dot{q}(\varsigma) + q(0) \quad (4.4)$$

La ecuación (4.1.1) asume que las posiciones y velocidades para el tiempo t_k son conocidas, por lo que puede ser conocida la posición $t_k + 1$, considerando un incremento Δt .

$$q(t_k + 1) = q(t_k) + \dot{q}(t_k)\Delta t$$

La trayectoria a planificar consiste en las posiciones descritas por las ecuaciones (4.5), (4.6) y (4.7).

$$P_x = 90 + 13\cos(\pi + t) \quad (4.5)$$

$$P_y = 20 + 13\cos(t) \quad (4.6)$$

$$P_z = 145 + 13\sin(\pi + t) \quad (4.7)$$

La Figura 4.1 presenta la trayectoria en el espacio que se va a planificar y el perfil de posiciones articulares para el robot, los cuales son obtenidos mediante la cinemática inversa de posición del robot.

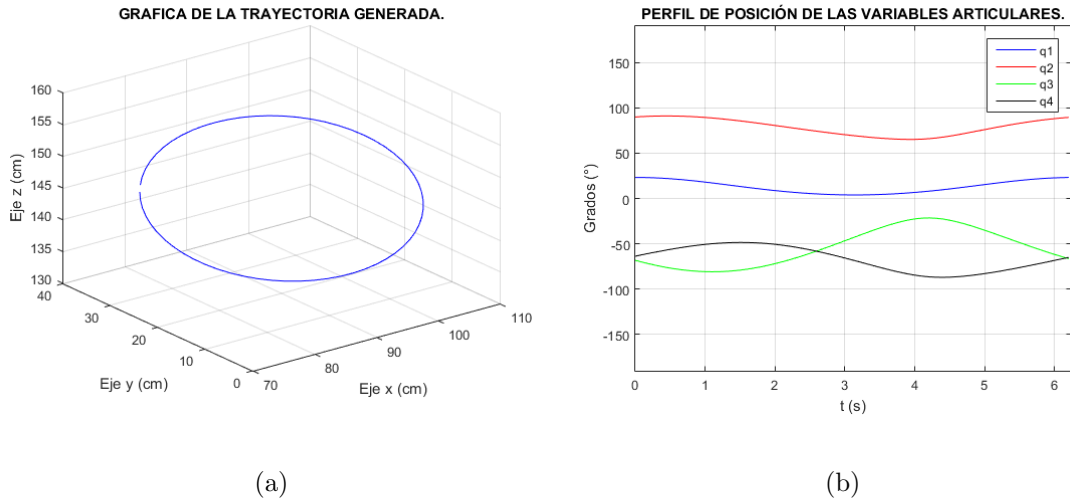
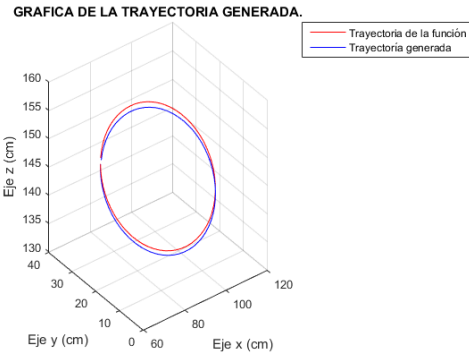
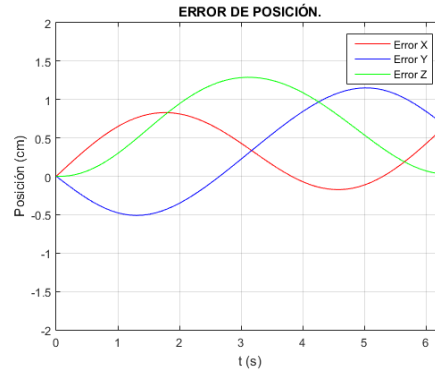


Figura 4.1: (a) Trayectoria a planificar mediante la integración de Euler. (b) Perfil de posiciones articulares de la trayectoria.

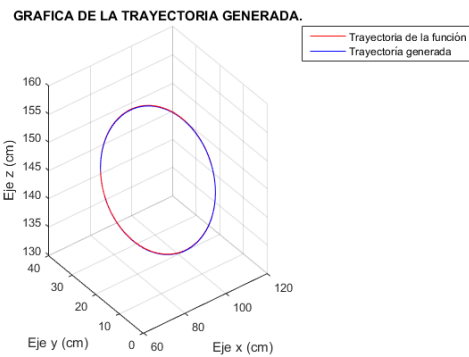
Para la planificación de trayectoria mediante el método de integración de Euler, se propone diferentes incrementos de Δt , los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.2.



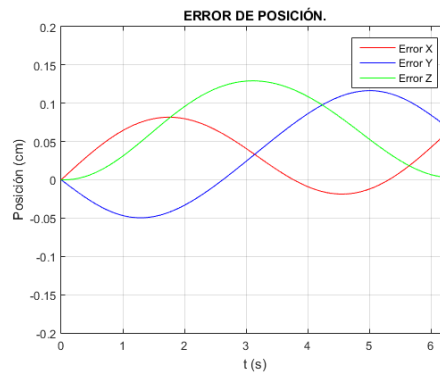
(a)



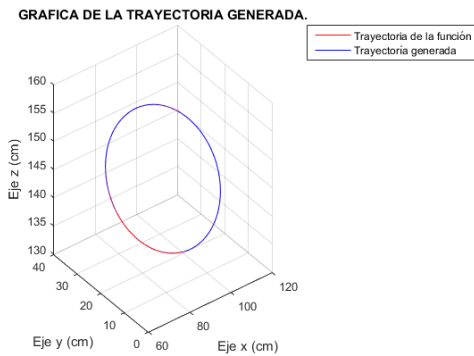
(b)



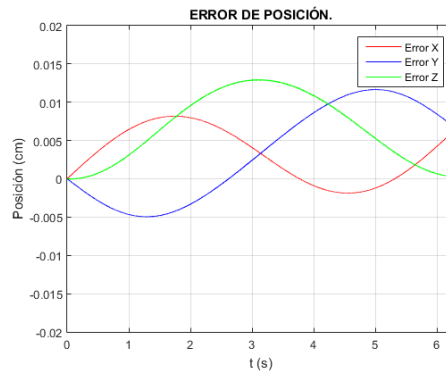
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.2: (a) Trayectoria generada mediante integración de Euler con un incremento $\Delta t=0.1$. (b) Error de posición de X, Y, Z obtenido para $\Delta t=0.1$. (c) Trayectoria generada mediante integración de Euler con un incremento $\Delta t=0.01$. (d) Error de posición de X, Y y Z obtenido para $\Delta t=0.01$. (e) Trayectoria generada mediante integración de Euler con un incremento $\Delta t=0.001$. (f) Error de posición X, Y, Z obtenido para $\Delta t=0.001$.

4.1.2. Entorno virtual de simulación del robot neumático de 4GDL

La Figura 4.3 presenta la metodología para la planificación de trayectorias dentro del entorno visual de simulación.

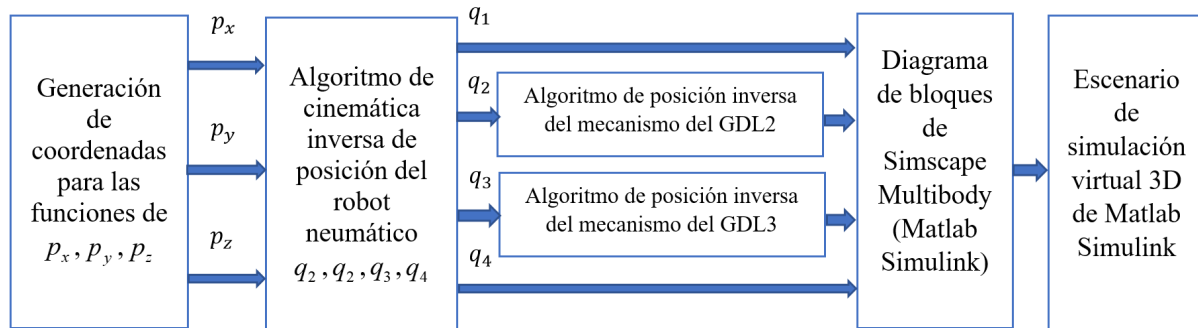


Figura 4.3: Metodología de la simulación de la planificación de trayectorias.

La simulación de la planificación de trayectorias es implementada en Matlab Simulink tal como se presenta en la figura 4.4.

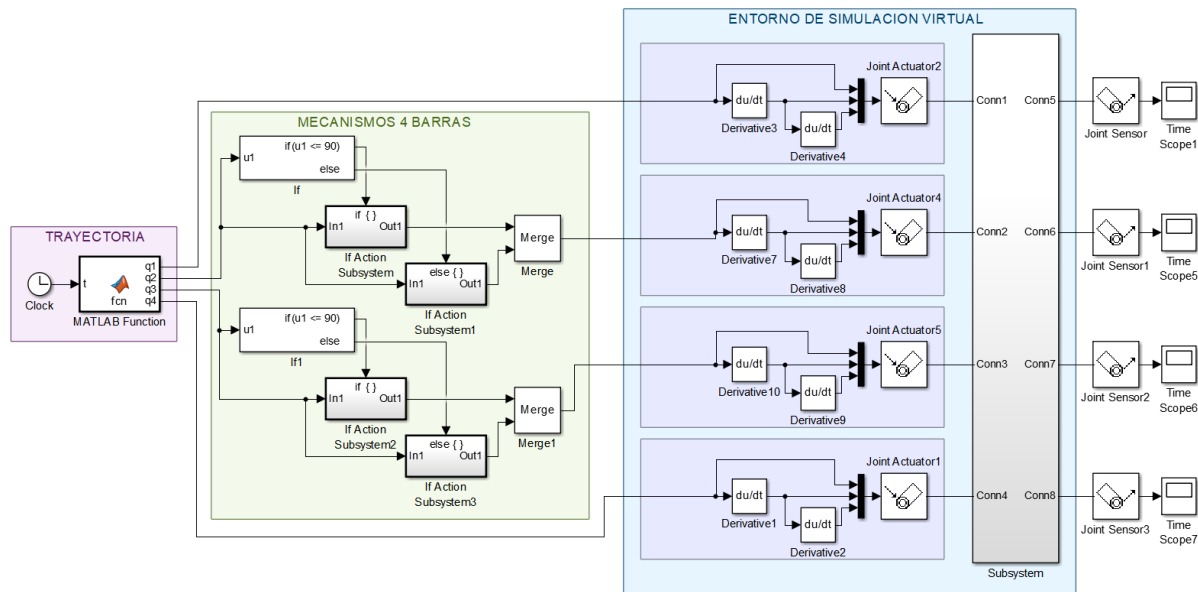


Figura 4.4: Implementación en Matlab Simulink de la simulación de la planificación de trayectorias.

La planeación de trayectoria del robot neumático es implementada a partir del modelo cinemático inverso de posición y la configuración angular presente en la cinemática de posición es codo arriba y ángulo q_p positivo de -42° . La trayectoria a planificar en simulación consiste en las posiciones descritas por las ecuaciones (4.5), (4.6) y (4.7).

La Figura 4.5 presenta los resultados obtenidos en simulación.

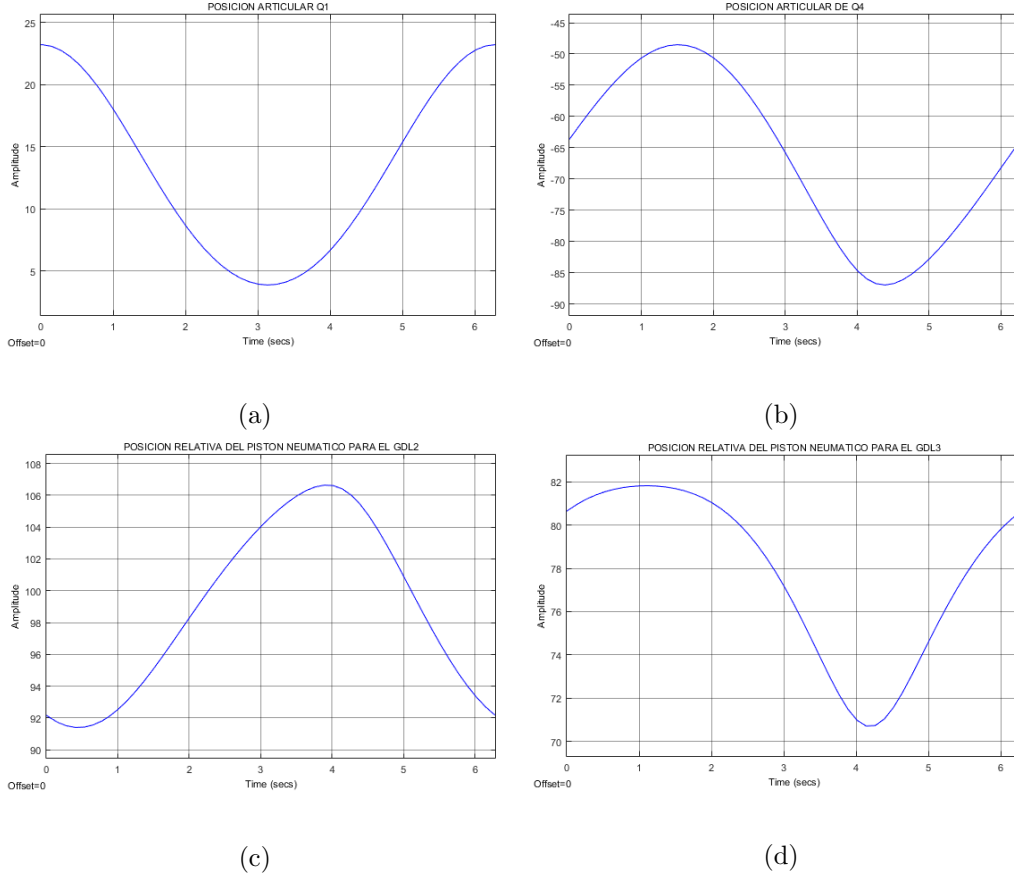


Figura 4.5: (a) Perfil de posición articular para la articulación del GDL1. (b) Perfil de posición articular para la articulación del GDL4. (c) Perfil de posición relativo para el actuador neumático del mecanismo de 4 barras del GDL2. (d) Perfil de posición relativo para el actuador neumático del mecanismo de 4 barras del GDL3.

4.2. Control dinámico PID de la estructura rígida del robot neumático de 4GDL

Un esquema general de control PID tiene la forma definida por la ecuación (4.8).

$$\tau = K_p \Delta q + K_d \frac{d}{dt} \Delta q + K_i \int_0^t \Delta q dt \quad (4.8)$$

Donde Δq es la diferencial temporal del temporal o error de posición temporal y está dada por $\tilde{q} = q_d - q$, donde q_d es la posición deseada y q la posición actual, la variable ϵ presenta la integral temporal del error cuya derivada temporal está dada por $\dot{\epsilon} = \tilde{q}$, por lo tanto $\epsilon = \int_0^t \tilde{q} dt + \epsilon(0)$. La ecuación de lazo cerrado en términos de variables de estados está dada por $[\epsilon, \tilde{q}, \dot{q}]^T$ definida por

(4.9).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ D(q)^{-1} [K_p \tilde{q} + K_d \dot{\tilde{q}} + K_i \varepsilon - C(q, \dot{q}) \dot{q} - g(q)] \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Las ganancias K_p , K_i y K_d son las ganancias proporcional, derivativa e integral las cuales son matrices positivas y generalmente diagonales. La Figura 4.6 presenta el diagrama de control PID.

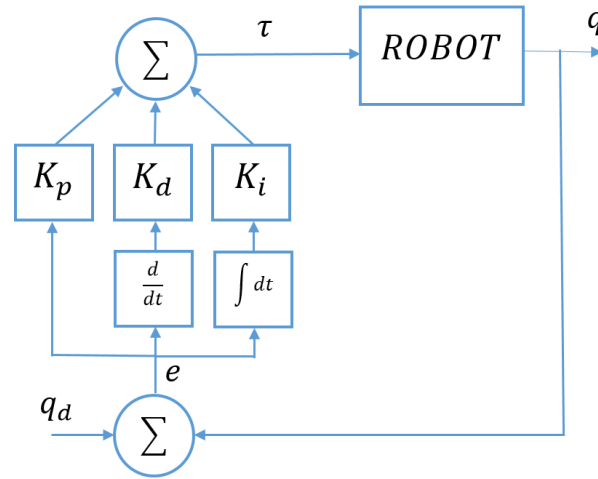


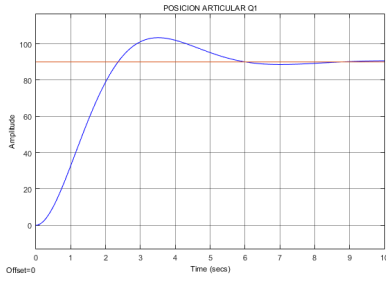
Figura 4.6: Control PID.

Mediante métodos heurísticos se obtienen las ganancias K_p , K_i y K_d para el controlador PID. La Tabla 4.1 presenta las ganancias del controlador PID.

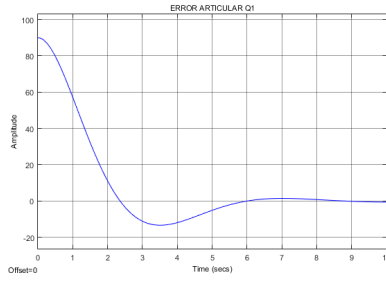
Tabla 4.1: Parámetros del controlador PID.

Articulación	K_p	K_i	K_d	q_d Radianes
1	850	4	850	$\frac{\pi}{2}$
2	500	1	750	$\frac{\pi}{2}$
3	200	2	190	$\frac{\pi}{2}$
4	80	1	75	$\frac{\pi}{2}$

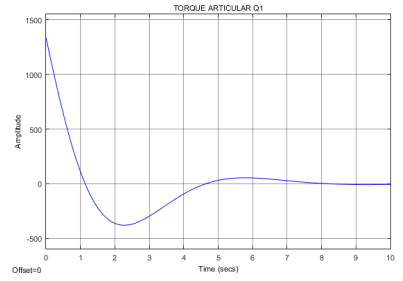
La Figura 4.7 presenta los resultados de control obtenidos para los parámetros del controlador PID de la Tabla 4.1 y la implementación de control de la Figura 4.8.



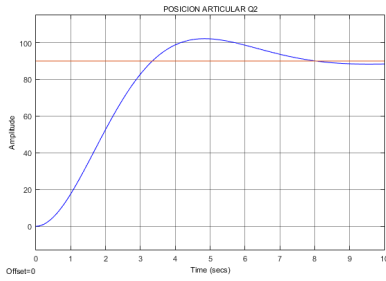
(a)



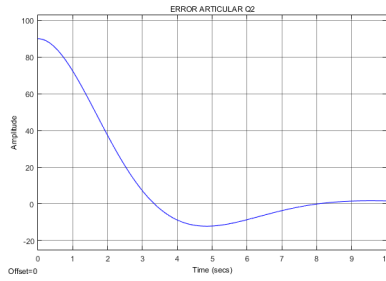
(b)



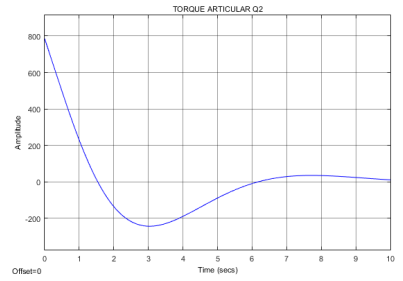
(c)



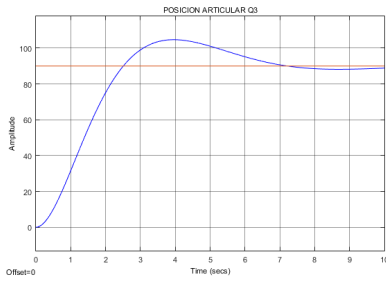
(d)



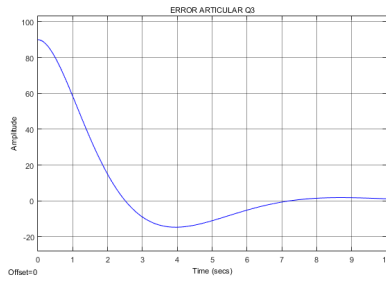
(e)



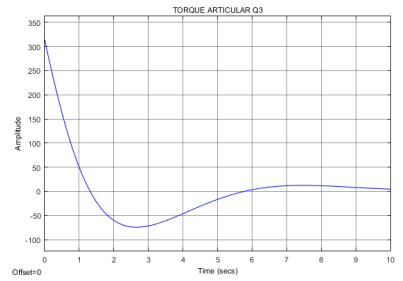
(f)



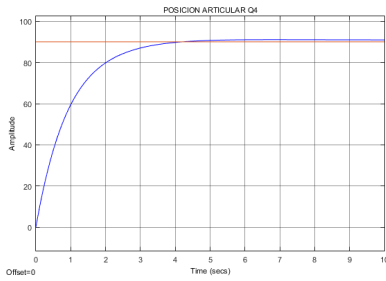
(g)



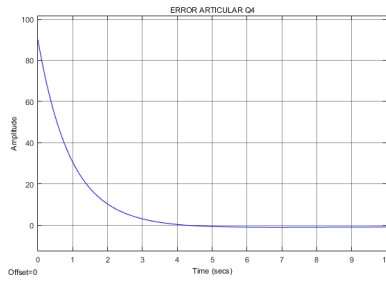
(h)



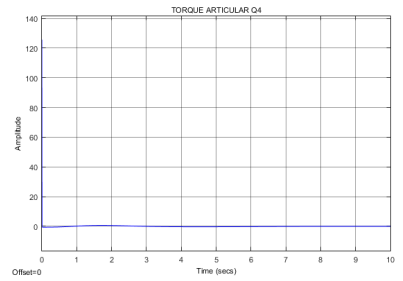
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 4.7: (a) Posición articular q_1 . (b) Error articular q_1 . (c) Torque articular q_1 . (d) Posición articular q_2 . (e) Error articular q_2 . (f) Torque articular q_2 . (g) Posición articular q_3 . (h) Error articular q_3 . (i) Torque articular q_3 . (j) Posición articular q_4 . (k) Error articular q_4 . (l) Torque articular q_4 .

La Figura 4.8 presenta la implementación en Matlab Simulink del controlador PID de la Figura 4.8 al modelo dinámico de la ecuación (3.62).

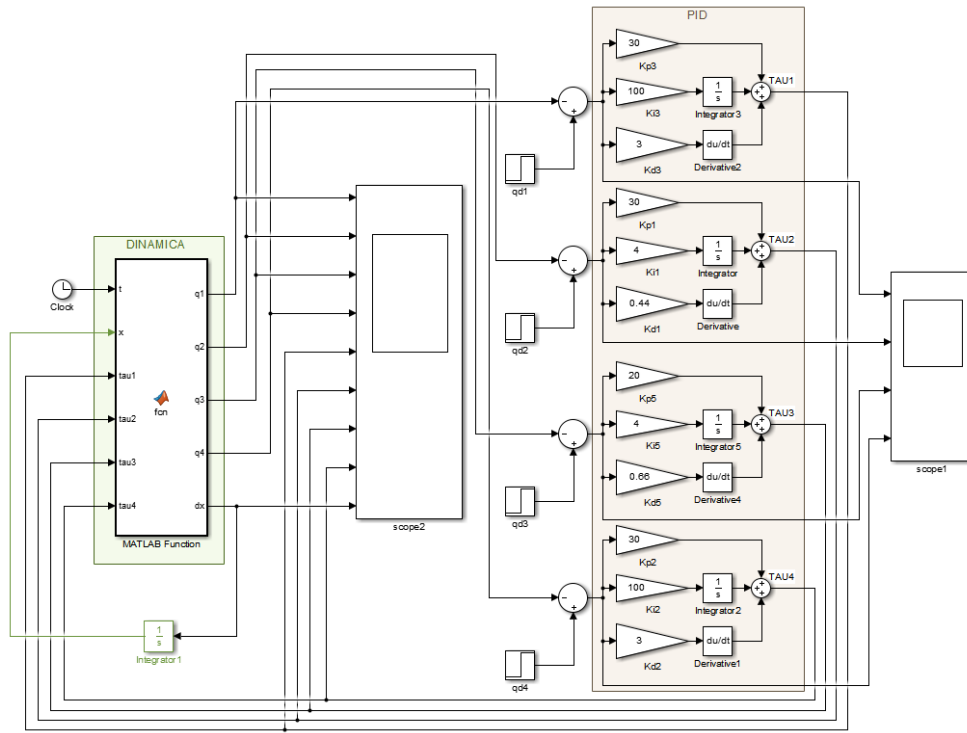


Figura 4.8: Implementación del controlador PID.

4.3. Control dinámico PID-Difuso de la estructura rígida del robot neumático de 4GDL

El esquema general de control PID definido por la ecuación (4.8), define las ganancias K_p , K_i y K_d , donde son presentadas como ganancias constantes y definidas. La Figura 4.9 presenta el diagrama de control de un PID-Difuso, el cual consta de un PID con ajuste ganancias obtenidas mediante lógica difusa.

La Figura 4.10 presenta la implementación en Matlab Simulink del controlador PID-Difuso del diagrama de la Figura 4.9 al modelo dinámico de la ecuación (3.62). Los resultados de control obtenidos para el controlador PID-Difuso se presentan en la Figura 4.11.

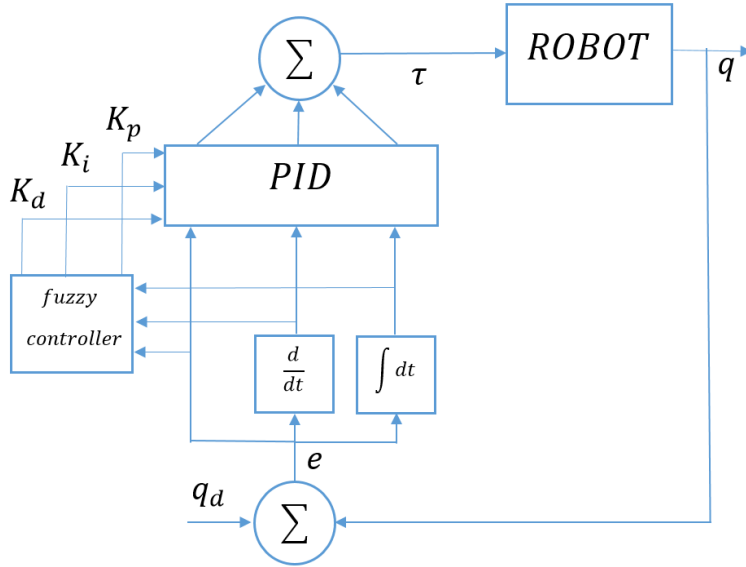


Figura 4.9: Control PID-Difuso.

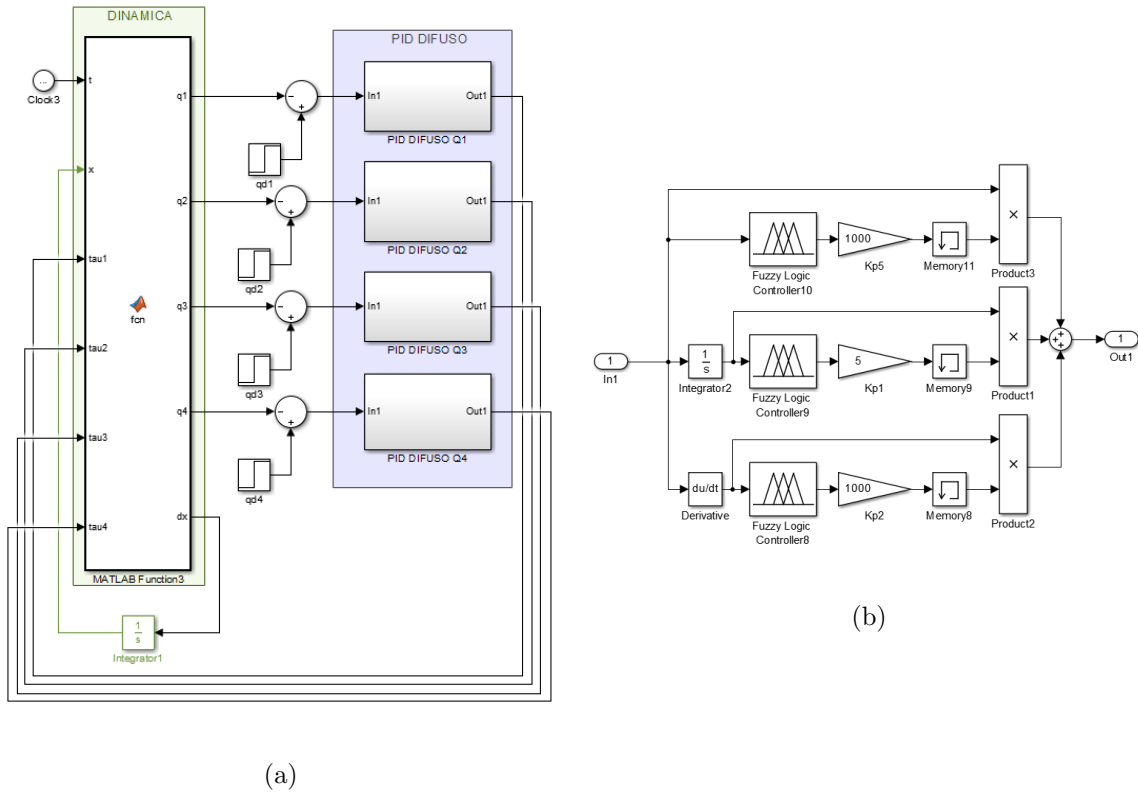
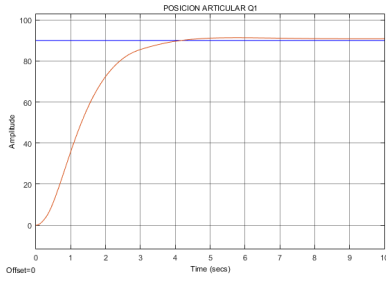
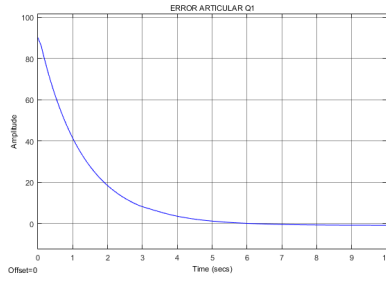


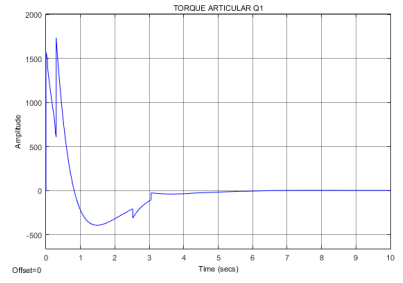
Figura 4.10: (a) Implementación del controlador PID-Difuso. (b) Implementación del ajuste de ganancias del PID.



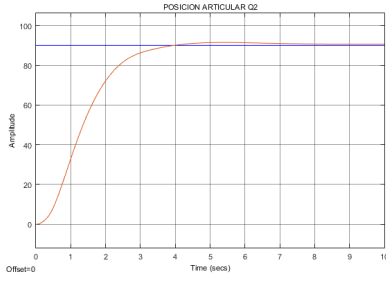
(a)



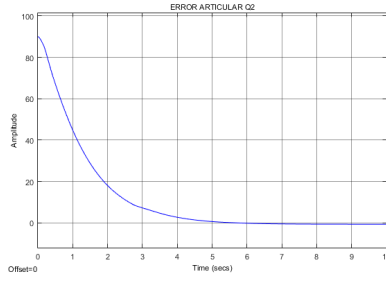
(b)



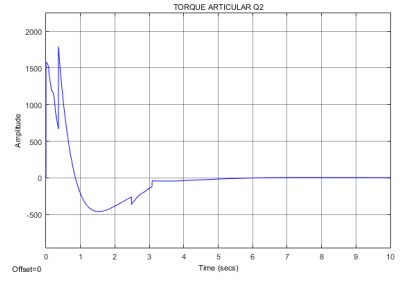
(c)



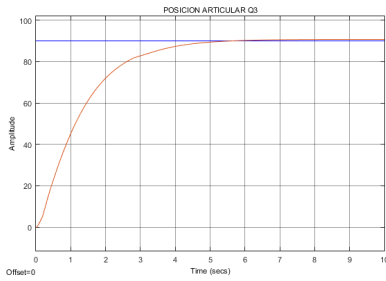
(d)



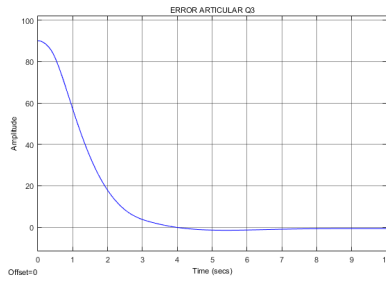
(e)



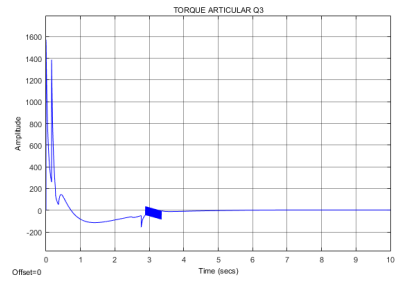
(f)



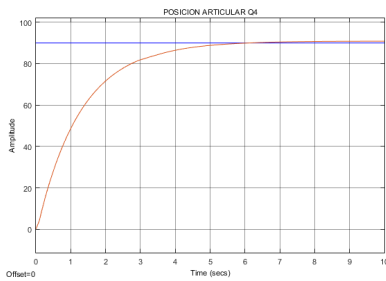
(g)



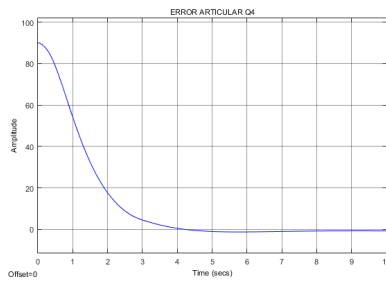
(h)



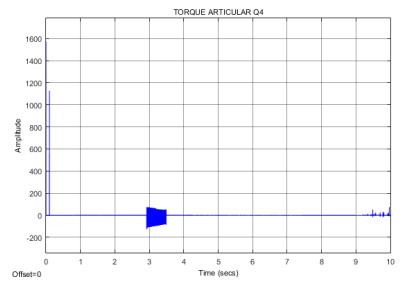
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 4.11: (a) Posición articular q_1 . (b) Error articular q_1 . (c) Torque articular q_1 . (d) Posición articular q_2 . (e) Error articular q_2 . (f) Torque articular q_2 . (g) Posición articular q_3 . (h) Error articular q_3 . (i) Torque articular q_3 . (j) Posición articular q_4 . (k) Error articular q_4 . (l) Torque articular q_4 .

La Figura 4.12 presenta una comparación del control de posición del PID de la sección anterior contra el PID-Difuso de la sección actual.

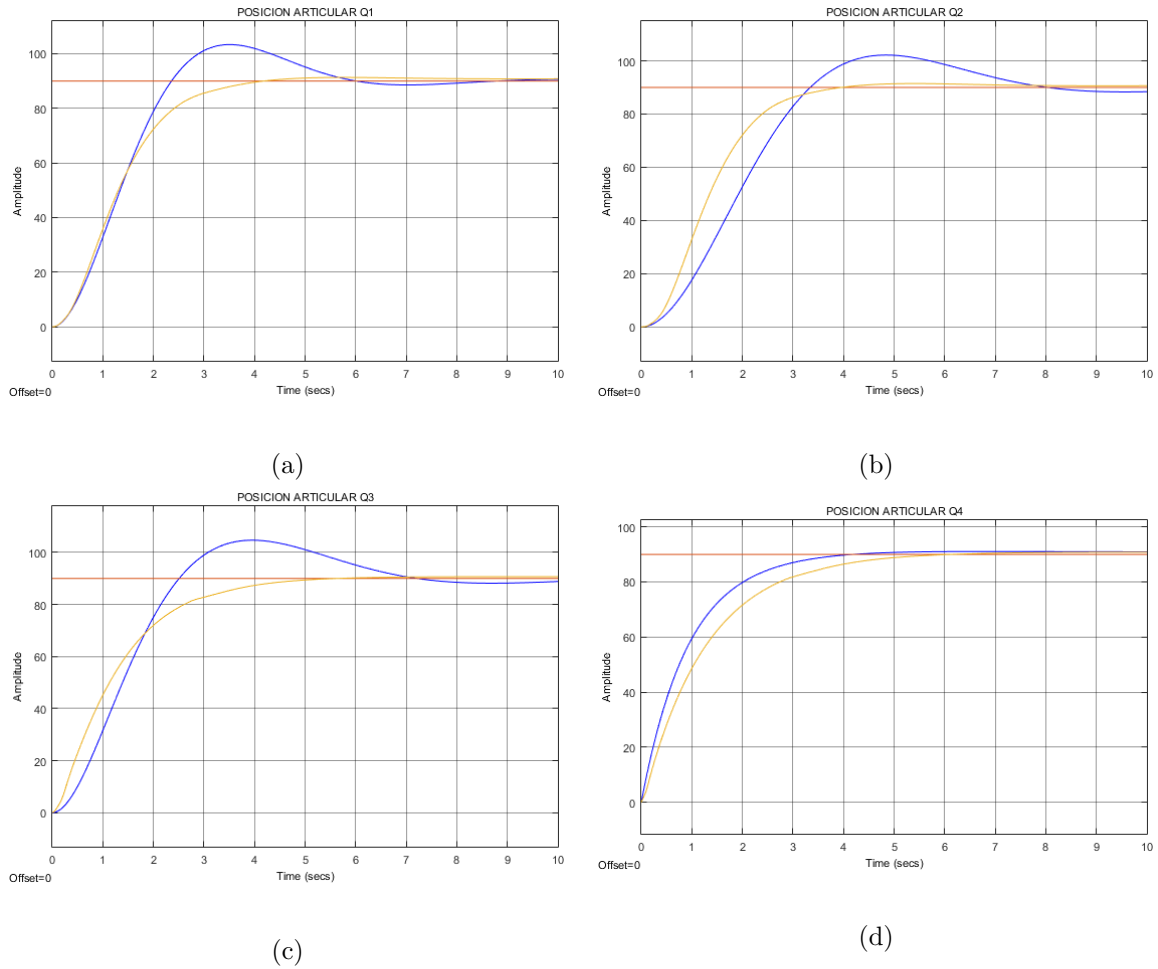


Figura 4.12: (a) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_1 . (b) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_2 . (c) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_3 . (d) Comparación de control PID vs PID-Difuso para la posición articular q_4 .

De tal manera que el controlador PID integra tres controladores difusos encargados de ajustar la sintonía de las ganancias, los cuales son descritas a continuación.

4.3.1. Control difuso para la ganancia K_p

La Figura 4.13 describe el controlador difuso para la ganancia K_p .

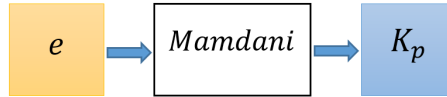
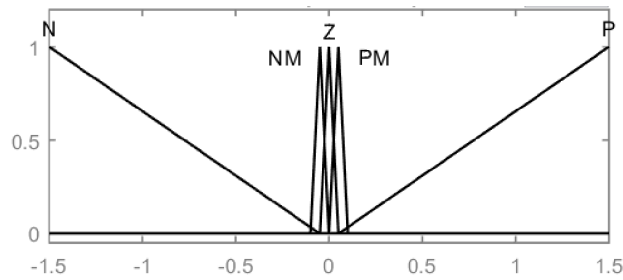
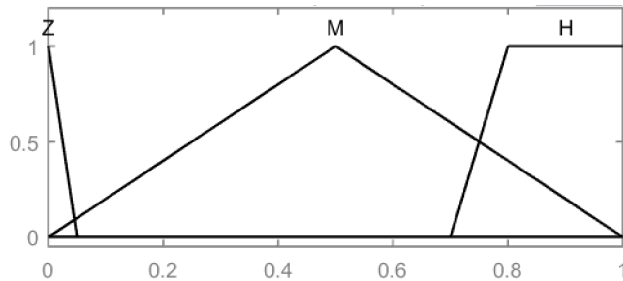


Figura 4.13: Descripción del controlador difuso para la ganancia K_p .

La Figura 4.14 presenta las funciones de membresía del controlador. La Tabla 4.2 presenta las reglas difusas presentes en el controlador difuso tipo Mamdani. Así mismo el método de defusificación es mediante centroide.



(a)



(b)

Figura 4.14: (a) Funciones de membresía de la entrada del controlador. (b) Funciones de membresía de la salida del controlador.

Tabla 4.2: Reglas difusas del controlador para K_p .

ENTRADA e	SALIDA K_p
P	H
PM	M
NM	M
N	H
Z	Z

4.3.2. Control difuso para la ganancia K_i

La Figura 4.15 describe el controlador difuso para el ajuste de ganancia K_i .

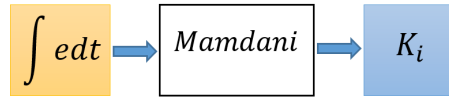


Figura 4.15: Descripción del controlador difuso para la ganancia K_i .

La Figura 4.16 presenta las funciones de membresía del controlador. La Tabla 4.3 presenta las reglas difusas presentes en el controlador difuso tipo Mamdani. Así mismo el método de defusificación es mediante centroide.

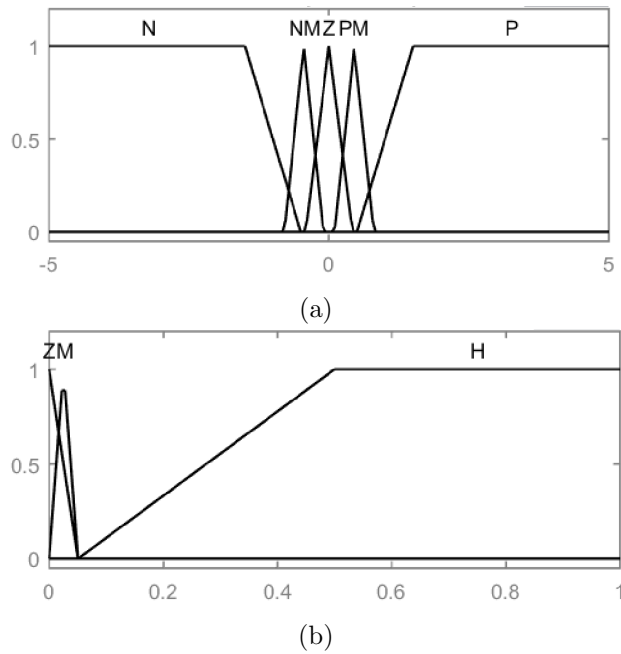


Figura 4.16: (a) Funciones de membresía de la entrada del controlador. (b) Funciones de membresía de la salida del controlador.

Tabla 4.3: Reglas difusas del controlador para K_i .

ENTRADA e	SALIDA K_i
PM	M
P	Z
N	Z
NM	M
Z	H

4.3.3. Control difuso para la ganancia K_d

La Figura 4.17 describe el controlador difuso para el ajuste de ganancia K_d .

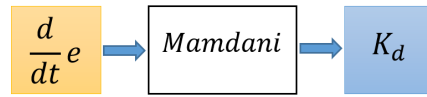


Figura 4.17: Descripción del controlador difuso para la ganancia K_d .

La Figura 4.18 presenta las funciones de membresía del controlador. La Tabla 4.4 presenta las reglas difusas presentes en el controlador difuso tipo Mamdani. Así mismo el método de defusificación es mediante centroide.

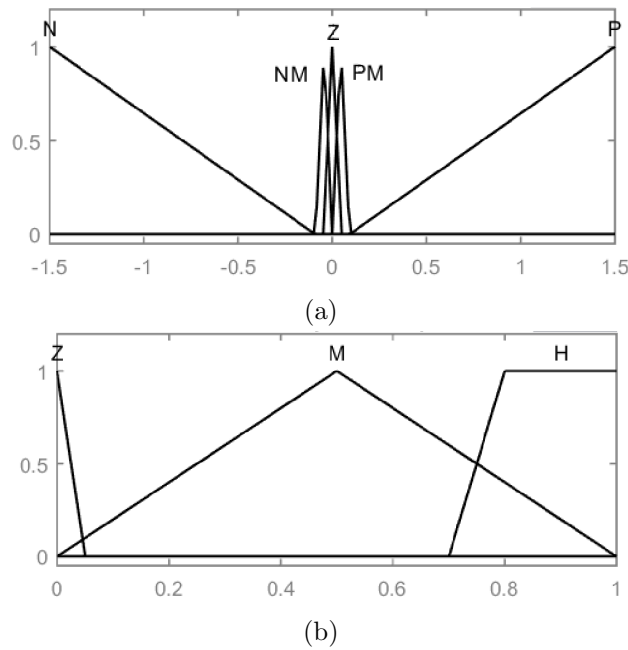


Figura 4.18: (a) Funciones de membresía de la entrada del controlador. (b) Funciones de membresía de la salida del controlador.

Tabla 4.4: Reglas difusas del controlador para K_d .

ENTRADA e	SALIDA K_i
PM	M
P	H
N	H
NM	M
Z	Z

4.4. Publicaciones

La siguiente seccion presenta los trabajos desarrollados en relacion al trabajo de tesis.

4.4.1. Diseño, modelo cinemático y simulación de un robot neumático de 4 DOF

El artículo: Diseño, modelo cinemático y simulación de un robot neumático de 4 DOF, presente en el Congreso Internacional en Sistemas Mecatrónicos (CISMe) 2018, está publicado en la revista Pistas Educativas Vol. 40, Núm. 130 (2018).

4.5. Trabajos futuros

Parte del trabajo futuro a desarrollar en este proyecto consiste en involucrar la dinámica de los actuadores neumáticos involucrados en el movimiento articular del robot. Se puede observar que la dinámica incluida por la estructura rígida del robot en no lineal, sin embargo es necesario asumir las no linealidades presentes en el aire a la dinámica del movimiento del robot nos puede dar una perspectiva mayor del comportamiento en posición articular del robot.

Tal como se puede observar en la figura 4.7 la respuesta articular del robot suele utilizar un tiempo mayor a un segundo para reducir su error de posición articular, sin embargo, esto se debe a gran parte a las propiedades mecánicas del robot como son sus masas, momentos de inercias y de la gravedad, por lo tanto, las implementaciones de algoritmos de control inteligente aplicados al modelo dinámico del robot podrían reducir el tiempo de asentamiento para cada variable articular del robot.

El análisis del desplazamiento relativo del pistón contra la respuesta del ángulo generado para el mecanismo de 4 barras, parte de la metodología del análisis de este mecanismo consiste en incrementar el espacio de trabajo del robot, sin embargo, se pudo observar que aumentar los límites de trabajo del mecanismo de 4 barras suele dar un comportamiento menos proporcional, es decir para para el movimiento de un grado de posición articular es necesario un desplazamiento relativo del pistón, lo cual puede verse reflejado en un mayor error de posición articular.

Conclusiones

La morfología final del robot neumático, además el análisis de posición del manipulador flexible en el cual se encuentra la relación de desplazamiento relativo del pistón y el ángulo generado por el manipulador, se pudo observar que mediante la manipulación de sus parámetros se puede obtener un mayor límite de trabajo en el ángulo generado por el manipulador de 4 barras los cual se verán visibles en la morfología del robot , de tal manera que el espacio de trabajo generado para el robot manipulador será mayor.

El comportamiento del mecanismo de 4 barras presente en la morfología del robot, presenta un comportamiento no lineal, el cual se puede confirmar al ampliar sus límites de trabajo, la respuesta obtenida suele tener un incremento relativamente grande respecto a un pequeño desplazamiento en el pistón, lo cual podría implicar una problemática en el control de posición articular del robot para el grado de libertad 2 y 3.

La generación de trayectoria aplicada a la morfología del robot se encuentra presente en la aplicación del modelo cinemático de posición directa e inversa asumiendo trayectoria deseada, sin embargo una posible solución a la generación de trayectoria, es mediante la método numérico presente en la integración de Euler implementada al modelo cinemático de velocidad donde se pudo observar un mayor tiempo de computo en diferencia a utilizar únicamente el modelo cinemático de posición directa e inversa.

SimMechanics presenta una solución a entornos de simulación virtual de sistemas mecánicos, además la metodología implementada para la obtención del entorno virtual de simulación parte directamente del diseño mecánico CAD, gracias a ello podemos obtener las propiedades mecánicas del robot directamente del diseño. De tal manera que gracias a la herramienta pueden ser incluidas las singularidades presentes en la morfología del robot.

El método de Euler LaGrange para la obtención del modelo dinámico del robot presenta una solución más compleja y de mayor procedimiento frente a otros métodos como lo es el método Newton Euler, sin embargo, la solución presente en variables de estados para el sistema permite modelar propiedades dinámicas tales como la gravedad. Así mismo mediante pruebas de control como el PID pudo observarse una respuesta parcialmente lenta con respecto al tiempo de asentamiento del sistema, lo cual va relacionada directamente con la variable de control del sistema, el torque. De tal

manera que los sistemas robóticos presentan sistemas de alta potencia mecánica donde actuadores de otro tipo como los neumáticos pueden ser una opción.

La implementación del control PID-Difuso ofrece una respuesta de menor sobrepaso, menor tiempo de asentamiento y reduce el tiempo de subida en el control de posición articular frente a la respuesta obtenida por el controlador PID. Sin embargo el torque articular es mayor y existe un incremento a nivel de operaciones computacionales.

Bibliografía

- Abdelwahab, S. A. 2017. Modeling and simulation of lower limb dynamics using simmechanics for potential applications in bilateral prosthesis control Modeling and simulation of lower limb dynamics using simmechanics for potential applications in bilateral prosthesis control. *Merit Res. J. Med. Med. Sci.*
- Cazarez-Castro, P. J. P. y N. R. 2016. Aplicaciones de la inteligencia computacional en el control de robots neumáticos. *Komput. Sapiens*. I:16.
- Chang, M. K. 2010. An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators. *Control Eng. Pract.* 18:13–22. doi:10.1016/j.conengprac.2009.08.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.08.005>
- Eileen Cardoso, Adel Fernández, Sergio A. Marrero-Osorio, P. F. G. 2017. Modelos cinemático y dinámico de un robot de cuatro grados de libertad. *Ing. Electrónica, Automática y Comun.* 38.
- Fco, F., K. M. Trabajo, D. Industrial, and J. Doctoral. 2005. Modelado de un robot manipulador.
- García-López, M. C., E.Gorrostieta-Hurtado, E. Vargas-Soto, J. M. Ramos-Arreguín, A. Sotomayor-Olmedo, and J. C. M. Morales. 2012. Kinematic analysis for trajectory generation in one leg of a hexapod robot. *Procedia Technol.* 3:342–350. doi:10.1016/j.protcy.2012.03.037. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2012.03.037>
- Gaspar-Badillo, J.-E., J.-M. Ramos-Arreguin, G. Macias-Bobadilla, D. Talavera-Velazquez, E.-A. Rivas-Araiza, and H.-B. Victor-Alexis. 2017. Four DOF pneumatic robot design and hardware interface. In: 2017 XIII International Engineering Congress (CONIIN). IEEE. p. 1–7. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7968190/>
- Hošovský, A., J. Novák-Marcinčin, J. Piteř, J. Boržíková, and K. Židek. 2012. Model-based evolution of a fast hybrid fuzzy adaptive controller for a pneumatic muscle actuator. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 9:1–11. doi:10.5772/50347.
- Jin Qian, Jian Huang, and Songhyok Ri. 2015. Adaptive fuzzy sliding mode control for pneumatic muscle actuator. In: 2015 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE. p. 431–436. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7382539/>

- Kathpal, A., and A. Singla. 2017. SimMechanics™ based modeling, simulation and real-time control of Rotary Inverted Pendulum. In: 2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). IEEE. p. 166–172. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7855975/>
- López, F. J., S. Vergara, M. A. Vargas, A. Palomino, D. Pinto, and D. Vilariño. 2017. “Diseño y modelo dinámico de robot esférico de 3 -DOF para cuello robótico de robot humanoide .” MEMORIAS DEL XXIII Congr. Int. Anu. LA SOMIM 20 al 22 SEPTIEMBRE 2017 CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO Tema. 186–193. Available from: <http://upcommons.upc.edu//handle/2117/143105Cnhttp://upcommons.upc.edu/handle/2117/14310>
- Martins, F. N., R. Carelli, T. F. Bastos, and S. Juan. 2008. Un Controlador Dinámico Adaptable de Seguimiento para Robots Móviles tipo Uniciclo. 1–6.
- Ning, S., and G. M. Bone. 2002. High steady-state accuracy pneumatic servo positioning system with PVA/PV control and friction compensation. Proceedings-IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 3:2824–2829. doi:10.1109/ROBOT.2002.1013660.
- Peidro, A., A. Gil, J. M. Marin, and O. Reinoso. 2015. Inverse Kinematic Analysis of a Redundant Hybrid Climbing Robot. Int. J. Adv. Robot. Syst. 12:163. doi:10.5772/61748. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.5772/61748>
- Petrescu, F. I. T., and R. V. V. Petrescu. 2016. DIRECT AND INVERSE KINEMATICS TO THE ANTHROPOMORPHIC ROBOTS. Engevista. 18:109. doi:10.22409/engevista.v18i1.729. Available from: <http://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9057>
- Punnoose Valayil, T., V. Selladurai, and N. Rajam Ramaswamy. 2018. Kinematic Modeling of a Serial Robot Using Denavit-Hartenberg Method in Matlab. 14:2437–2445. Available from: www.tagajournal.com
- Ramos-Arreguin, J.-M. R.-A. G.-G. C.-M.-C. P.-O. G.-H.-A. A.-F.-A. 2010. Fuzzy Logic Hardware Implementation for Pneumatic Control of One DOF Pneumatic Robot. Mex. Int. Conf. Artif. Intell. 500–511.
- Ramos-Arreguin, J. M., J. C. P. Ortega, E. Gorrostieta, and J. Romero-Troncoso. 2008. Artificial intelligence applied into pneumatic flexible manipulator. 7th Mex. Int. Conf. Artif. Intell. - Proc. Spec. Sess. MICAI 2008. 339–345. doi:10.1109/MICAI.2008.76.
- Ramos, J. M., E. Gorrostieta, E. Vargas, and J. C. Pedraza. 2006. New Polynomial Model of Pneumatic Cylinder Model. Rev. Int. Inf. Tecnológica. 17(3).
- Sanchez-Solar, S.-D., E.-A. Rivas-Araiza, E. Gorrostieta-Hurtado, and J.-M. Ramos-Arreguin. 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). IEEE. p. 1–8. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7891825/>
- Tothova, M., and A. Hosovsky. 2013. Dynamic simulation model of pneumatic actuator with artificial muscle. SAMI 2013 - IEEE 11th Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics, Proc. 47–51. doi:10.1109/SAMI.2013.6480994.

- Valdiero, A. C., C. S. Ritter, C. F. Rios, and M. Rafikov. 2011. Nonlinear Mathematical Modeling in Pneumatic Servo Position Applications. *Math. Probl. Eng.* 2011:1–16. doi:10.1155/2011/472903. Available from: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2011/472903/>
- Velásquez, S., and R. Velásquez. 2014. MODELADO Y SIMULACION DE SISTEMAS CAOTICOS A TRAVES DE PENDULOS ACOPLADOS USANDO SIMMECHANICS DE SIMULINK MODELING AND SIMULATION OF CHAOTIC SYSTEM THROUGH COUPLED PENDULUMS USING SIMMECHANICS SIMULINK. *Rev. Interdiscip. Estud. en Ciencias Básicas e Ing.*
- Antonio Creus Solé, 2007, NEUMÁTICA E HIDRÁULICA: MARCOMBO, S.A. 2007.
- Subir Kumar Saha, 2008, INTRODUCCION A LA ROBOTICA: Mc Graw Hill, S. A. 2008.

