



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS.

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA.

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA.

TEMA:

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO
ROBÓTICO UTILIZANDO VISION ARTIFICIAL PARA LOS
LABORATORIOS DE MECATRÓNICA DE LA UTN.

AUTOR: KLEBER ANDRÉS CALDERÓN MARTÍNEZ.

DIRECTOR: ING. XAVIER ROSERO.

IBARRA-ECUADOR.

2017.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	100366342-2	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	Kleber Andrés Calderón Martínez	
DIRECCIÓN:		Zumba 7-53 y Babahoyo	
EMAIL:		an3_c@hotmail.com	
TELÉFONO FIJO:		062957271	TELÉFONO MÓVIL: 0985448758

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO ROBOTICO UTILIZANDO VISION ARTIFICIAL PARA LOS LABORATORIOS DE MECATRONICA DE LA UTN
AUTOR (ES):	Kleber Andrés Calderón Martínez
FECHA:	Julio 2017
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	Pregrado
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Xavier Rosero

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Kleber Andrés Calderón Martínez, con cédula de identidad Nro. 100366342-2, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, julio 2017

EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a horizontal line at the bottom.

(Firma)

Nombre: Kleber Andrés Calderón Martínez



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Kleber Andrés Calderón Martínez, con cédula de identidad Nro.100366342-2, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO ROBOTICO UTILIZANDO VISION ARTIFICIAL PARA LOS LABORATORIOS DE MECATRONICA DE LA UTN, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, julio 2017

(Firma)

Nombre: Kleber Andrés Calderón Martínez

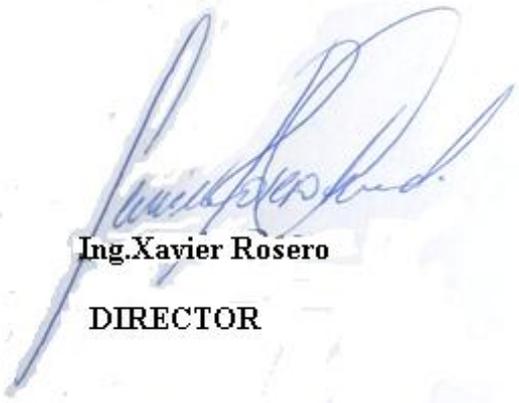
Cédula: 1003663422



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

En calidad de Director del Trabajo de Grado “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO ROBÓTICO UTILIZANDO VISION ARTIFICIAL PARA LOS LABORATORIOS DE MECATRÓNICA DE LA UTN”, presentado por el Sr. Kleber Andrés Calderón Martínez, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.



Ing. Xavier Rosero

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Yo, Kleber Andrés Calderón Martínez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y certifico la veracidad de las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kleber Andrés Calderón Martínez', is written over a horizontal line.

Kleber Andrés Calderón Martínez
100366342-2
Ibarra, julio 2017

AGRADECIMIENTO

Primeramente quiero agradecer a la universidad Técnica del Norte, quien me ha brindado la oportunidad de formarme profesionalmente

También me gustaría agradecer a mi asesor de tesis Ing. Xavier Rosero, sus conocimientos, paciencia y motivación han sido fundamentales para mi formación como investigador

Andrés C.

DEDICATORIA

Esto es dedicado a quienes dieron mucho interés en que pudiera cumplir mis sueños y me ayudaron aunque para eso tuvieron que arriesgarse un poco, esto se lo dedico a mis héroes de edad avanzada, a mis dulces abuelos que supieron aguantarme y reprenderme cuando era debido.

Además de consentirme siempre y cocinarme cada vez que quisiera, les dedico este logro en su nombre ya que sin ustedes tengo que estar muy consciente de que no lograría nada, les debo mucho a ustedes y no hay forma de pagarles todo lo que han hecho por mí, los amo.

Andrés C.

ÍNDICE GENERAL

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN.....	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO.....	v
CERTIFICACIÓN	vi
DECLARACIÓN	vii
AGRADECIMIENTO.....	viii
DEDICATORIA.....	ix
FIGURAS.....	xii
TABLAS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
Capítulo I.....	1
1.1. Análisis inicial	1
1.2. Problemática	1
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Justificación	2
Capítulo II	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.2. Generalidades	3
2.3. Morfología del robot.....	4
2.4. Tipos de articulaciones	5
2.5. Elementos efectores terminales	5
2.5.1. Pinzas (gripper).....	5
2.5.2. Herramientas.....	6
2.6. Resolución y repetitividad	6
2.6.1. Precisión de movimientos.....	6
2.7. Transmisiones y reductores	7
2.7.1. Transmisiones	7
2.7.2. Reductores	7
2.8. Actuadores	8
2.9. Sensores internos	8
2.10. Servomotores	8
2.11. Herramientas matemáticas para la localización espacial	8
2.11.1. Representación de la posición	9
2.11.2. Sistema cartesiano de referencia.....	9

2.11.3.	Representación de la orientación	10
2.11.4.	Matrices de rotación	10
2.11.5.	Ángulos de Euler	14
2.11.6.	Matrices de transformación homogénea.....	17
2.11.7.	Coordenadas y matrices homogéneas.....	17
2.12.	Modelo cinemático de los manipuladores.....	18
2.13.	El problema cinemático directo	18
2.13.1.	Parámetros Denavit-Hartenberg (D-H).....	19
2.13.2.	Algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H) para la obtención del modelo cinemático directo	21
2.14.	Resolución del problema cinemático inverso	22
2.14.1.	Múltiples soluciones	23
2.14.2.	Métodos de solución.....	23
2.14.3.	Método geométrico.....	24
2.14.4.	Método matrices homogéneas	24
2.14.5.	Desacoplamiento cinemático.....	25
3.1.	Software para simulación	26
Capítulo III: Cinemática del manipulador.....		29
3.2.	Requerimientos y requisitos	29
3.3.	Cinemática del manipulador.....	30
3.4.	Cinemática directa	33
3.5.	Cinemática inversa.....	37
Capítulo IV: Simulación cinemática del robot.....		41
4.1.	Diagrama de bloques de funcionamiento	47
Capítulo V: Pruebas de funcionamiento.....		53
5.1.	Pruebas de funcionamiento.....	53
5.2.	Resultados.....	57
Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones		59
6.1.	Conclusiones.....	59
6.2.	Recomendaciones	59
Bibliografía.....		60
Anexos :		¡Error! Marcador no definido.

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

FIGURA 1: TIPOS DE PINZAS	6
FIGURA 2: REPRESENTACIÓN DE UN VECTOR	9
FIGURA 3: ORIENTACIÓN DE UN SISTEMA OUV RESPECTO A OTRO OXY EN UN PLANO	11
FIGURA 4: SISTEMA DE REFERENCIA OXYZ Y SOLIDARIO AL OBJETO OUVW.....	13
FIGURA 5: ROTACIÓN DEL SISTEMA OUVW CON RESPECTO A LOS EJES OY Y OZ.....	13
FIGURA 6: ÁNGULOS DE EULER	15
FIGURA 7: ÁNGULOS DE EULER ZYZ.....	16
FIGURA 8: ÁNGULOS DE EULER: ROLL, PITCH, YAW	17
FIGURA 9: PARTES DE UNA ARTICULACIÓN.....	19
FIGURA 10: ROBOT PLANAR DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.	20
FIGURA 11: CUATRO SOLUCIONES ROBOT PUMA 560.....	23
FIGURA 12: SOLUCIÓN MÚLTIPLE.....	24
FIGURA 13: ÁNGULOS DE ORIENTACIÓN HERRAMIENTA	26
FIGURA 14: VENTANA DE TRABAJO MATLAB	28
FIGURA 15: MEDIDAS DEL BRAZO ROBÓTICO.....	29
FIGURA 16: PARÁMETROS DH 1 – DH2.....	30
FIGURA 17: PARÁMETROS DH3	30
FIGURA 18: PARÁMETRO DH4	31
FIGURA 19: PARÁMETROS DH5 – DH9.....	32
FIGURA 20: PARÁMETROS DH10 – DH13.....	33
FIGURA 21: VISTA SUPERIOR DEL ROBOT	38
FIGURA 22: VISTA LATERAL DEL ROBOT SOLUCIÓN CODO ABAJO	38
FIGURA 23: VISTA LATERAL DEL ROBO SOLUCIÓN CODO ARRIBA.....	39
FIGURA 24: DIAGRAMA BRAZO 2 ARTICULACIONES	41
FIGURA 25: MATRIZ PARÁMETROS 2GDL.....	42
FIGURA 26: GRAFICO BRAZO DE 2GDL	43
FIGURA 27: GRÁFICO ROBOT 5GDL	45
FIGURA 28: SOFTWARE DE CÁLCULO CINEMÁTICO BRAZO 5GDL	47
FIGURA 29: INGRESO DE PARÁMETROS D-H.....	47
FIGURA 30: PROCESAMIENTO DE VALORES MATRIZ HOMOGÉNEA.....	47
FIGURA 31: CINEMÁTICA ROBOT	48
FIGURA 32: DIAGRAMA DE FLUJO #1.....	49
FIGURA 33: DIAGRAMA DE FLUJO # 2.....	50
FIGURA 34: DIAGRAMA DE FLUJO # 3.....	51
FIGURA 35: PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO N° 1	53
FIGURA 36: PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CINEMÁTICA DIRECTA	54
FIGURA 37: PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CINEMÁTICA INVERSA	54
FIGURA 38: FUNCIONAMIENTO BOTONES FALTANTES.....	55
FIGURA 39: DIAGRAMA DE FLUJO GUI.....	56

TABLAS

TABLA 1: PARÁMETROS D-H.....	34
TABLA 2: PARÁMETROS D-H 2GDL	41
TABLA 3: VALORES CÁLCULO CINEMÁTICA DIRECTA	57
TABLA 4: RESULTADOS CINEMÁTICA DIRECTA	57
TABLA 5: VALORES CÁLCULO CINEMÁTICA INVERSA	58
TABLA 6: RESULTADOS CINEMÁTICA INVERSA	58

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO ROBÓTICO UTILIZANDO VISION ARTIFICIAL PARA LOS LABORATORIOS DE MECATRONICA DE LA UTN

Autor: Andrés Calderón

Director: Ing. Xavier Rosero

RESUMEN

El presente trabajo está destinado al estudio de la robótica, al desarrollo cinemático y simulación del movimiento de un brazo robótico de 5GDL.

La información que se ha estructurado se encuentra en capítulos, comprenden desde conceptos generales y datos técnicos que fueron identificados como los más relevantes para el desarrollo del proyecto.

El modelado cinemático permite comprobar el movimiento del robot, establecer los parámetros necesarios para el cálculo tanto inverso como directo de un brazo robótico.

Con la ayuda del software Matlab, se ha logrado la simulación de la cinemática del brazo robótico, con sus respectivos gráficos y cálculos matemáticos, el mismo que será soporte en el estudio de la asignatura de Robótica.

**DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR A ROBOTIC ARM USING
ARTIFICIAL VISION FOR MECHATRONICS LABORATORIES OF THE UTN**

Author: Andrés Calderón

Director: Ing. Xavier Rosero

ABSTRACT

The present work is devoted to the study of robotics, to the kinematic development and simulation of the movement of a robotic arm of 5GDL.

The information that has been structured is in chapters, comprised of general concepts and technical data that were identified as the most relevant for the development of the project.

The kinematic modeling allows verifying the movement of the robot, to establish the parameters necessary for the calculation both inverse and direct of a robotic arm

With the help of Matlab software, the kinematics of the robotic arm has been simulated, with their respective graphs and mathematical calculations, which will be supported in the study of Robotics.

Capítulo I

1.1.Análisis inicial

El proyecto consiste en el diseño cinemático y simulación de un brazo robótico de 5 GDL, donde se aplicarán los distintos tipos de cinemática para realizar el posicionamiento adecuado del efector final. La programación se realizará en el software Matlab, licenciado para la Universidad, al ser una herramienta poderosa en el momento de realizar los cálculos pertinentes y gráficas del movimiento del brazo robótico.

Al ser la cinemática una parte importante en el proceso de generación del movimiento del brazo robótico, se utilizará la cinemática directa y la cinemática inversa como procesos a simular.

1.2.Problemática

Los estudiantes de la carrera de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte durante el proceso de enseñanza aprendizaje, buscan complementar los conocimientos con la teoría y la práctica.

Actualmente los laboratorios de Mecatrónica de la FICA no cuentan con un programa para simulación de un brazo robótico que permita a los estudiantes realizar prácticas de robótica, dificultándose así la transferencia del conocimiento.

Con la realización de este proyecto se facilitará y se capacitará a los estudiantes de Mecatrónica, para que puedan realizar las diferentes aplicaciones inherentes a su especialidad.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Optimizar la enseñanza aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte, mediante la realización de un código de simulación de un brazo robótico.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Consultar fuentes bibliográficas referentes al problema a resolver.
- Determinar los requerimientos y requisitos del sistema a diseñar.
- Diseñar el mecanismo propuesto y calcular su cinemática.
- Realizar el software de simulación.
- Realizar pruebas y analizar resultados.

1.4.Justificación

El presente trabajo busca la implementación de un proceso didáctico que beneficie a los estudiantes de la materia de robótica, los cuales podrán aplicar los conocimientos adquiridos en las aulas de clase y verificar sus resultados.

El trabajo está orientado a la aplicación de los cálculos cinemáticos, que permiten simular los tipos de movimientos que puede tener un brazo robótico.

Aun no existe un modelo parecido para el desarrollo y simulación de un brazo robótico, que se adapte a las necesidades teórico-prácticas.

Capítulo II

2.1. Antecedentes

A lo largo de toda la historia, el hombre se ha sentido encantado por máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y movimientos de los seres vivos. [1]

Uno de los escritores que impulso la palabra robot, fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov. En octubre de 1945 publicó en la revista Galaxy Science Fiction una historia en la que por primera vez enunció sus tres leyes de la robótica: [2]

1. Un robot nunca debe actuar en contra de un ser humano, ni siquiera permitir que un ser humano se vea expuesto a cualquier tipo de riesgo.
2. Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los humanos, excepto cuando estas entren en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, siempre y cuando esta no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

El uso del robot industrial, que se identificó como dispositivo único en la década de 1960, junto con los sistemas CAD y CAM caracterizan las tendencias más recientes en la automatización de procesos. [1]

2.2. Generalidades

El término de la robótica permite incluir una gran cantidad de áreas de conocimiento tales como física, matemáticas, computación, electrónica, visión e inteligencia artificial, diseño mecánico, entre otras. Por otro lado, aun cuando la robótica es un área eminentemente experimental todos sus resultados están sustentados con un estricto rigor científico.

En general la Mecatrónica es la integración de los sistemas mecánicos con la electrónica, por lo tanto el tipo de sistemas mecánicos que estudia y analiza la Mecatrónica es más

general, de hecho son sistemas que realizan una determinada función mientras que los robots se caracterizan por ser sistemas mecánicos funcionales.

Tras los primeros autómatas, casi todos de aspecto humano los creadores más directos de los robots fueron los tele manipuladores desarrollados con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador. El primer manipulador consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro situado en una zona segura era movido directamente por el operador, mientras que el esclavo situado en contacto con los elementos radioactivos, y unido mecánicamente al maestro manipulaba el objeto. El operador, además de poder observar a través de un grueso cristal el resultado de sus acciones sentía a través del dispositivo maestro las fuerzas que el esclavo ejercía sobre el entorno. [3]

La evolución de los tele manipuladores a lo largo de los años no ha sido tan espectacular como la de los robots.

La sustitución del operador por un programa de ordenador que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot. [4]

2.3.Morfología del robot

Un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales.

Desde el punto de vista morfológico, se clasifica a los robots industriales según dos parámetros.

- Según su número de grados de libertad

Estos pueden ser de 3, 4, 5 o más grados de libertad

- Según el tipo de estructura mecánica

Mecánicamente un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten el movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. [5]

2.4. Tipos de articulaciones

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro o de una combinación de ambos. De este modo son posibles seis tipos de articulaciones diferentes.

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior se denomina grados de libertad (GDL). [6]

2.5. Elementos efectores terminales

Para las aplicaciones industriales, las capacidades del robot básico deben aumentarse por medio de dispositivos adicionales. Podríamos denominar a estos dispositivos como los periféricos del robot. En robótica, el término de actuador final se utiliza para describir la mano o herramienta que está unida a la muñeca.

Los actuadores pueden dividirse en dos categorías [7]

- Pinzas (gripper)
- Herramienta

2.5.1. Pinzas (gripper)

Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener objetos, se denominan pinzas, la figura 1 muestra los distintos tipos de pinzas que son utilizados en la robótica.

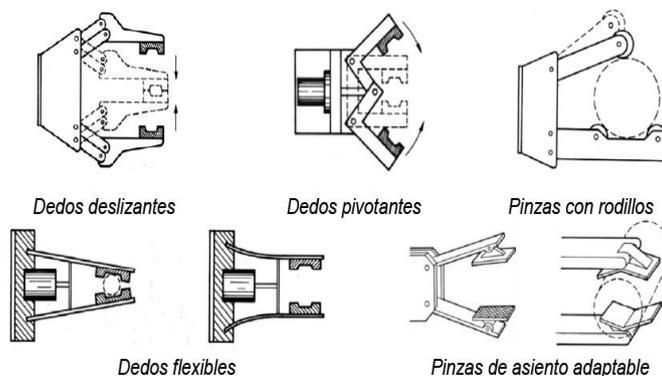


Figura 1: Tipos de pinzas

Fuente: [7]

Una regla general es que la pinza debe sujetar a la pieza de trabajo por su centro de gravedad; esto ocasiona que se anulen los momentos que se pudieran generar por el peso de la pieza de trabajo. [7]

2.5.2. Herramientas

En muchas ocasiones el robot ha de realizar operaciones que no consistan en manipular objetos, sino que implica el uso de una herramienta.

2.6. Resolución y repetitividad

2.6.1. Precisión de movimientos

La precisión de movimientos en un robot industrial depende de tres factores: la resolución espacial, la exactitud y la repetitividad.

La resolución espacial depende del control del sistema porque este, precisamente, es el medio para controlar todos los incrementos individuales de una articulación. Su valor está limitado por la resolución de captadores de posición y convertidores A/D Y D/A, por el número de bits con los que se realizan las operaciones aritméticas en la CPU y por los elementos motrices, si son discretos.

La exactitud mantiene una relación directa con la resolución espacial, es decir, con la capacidad de control del robot de dividir en incrementos muy pequeños el volumen de trabajo.

Otro factor que afecta a la exactitud es el peso de la carga, las cargas más pesadas reducen la exactitud. El peso de la carga también afecta a la velocidad de los movimientos del brazo y la resistencia mecánica.

La repetitividad es el radio de la esfera que abarca los puntos alcanzados por el robot tras suficientes movimientos, al ordenarle ir al mismo punto de destino programado, con condiciones de carga, temperatura, etc., iguales.

2.7. Transmisiones y reductores

Junto con las transmisiones a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.[8]

2.7.1. Transmisiones

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Por estos motivos se procura que los actuadores, por lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. [8]

2.7.2. Reductores

Puesto que los robots trabajan en ciclos cortos que implican continuos arranques y paradas, es de gran importancia que el reductor sea capaz de soportar pares elevados puntuales. También se busca que el juego angular sea lo menor posible. Este se define como el ángulo

que gira el eje de salida cuando se cambia su sentido de giro sin que llegue a girar el eje de entrada. [8]

2.8. Actuadores

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. [9]

2.9. Sensores internos

Para conseguir que un robot realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será preciso que tenga un conocimiento de su propio estado como entorno. La información relacionada con su estado la consigue con los denominados sensores internos, mientras que a la que se refiere al estado de su entorno, se adquiere con los sensores externos.[10]

2.10. Servomotores

Un servomotor está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. Los servomotores se utilizan frecuentemente en sistemas de radio control y en robótica, pero su uso no está limitado a estos.

La corriente que requiere depende del tamaño del servomotor. Normalmente el fabricante indica cual es la corriente que consume. Eso no significa mucho si todos los servomotores van a estar moviéndose todo el tiempo. La corriente depende principalmente del par, y puede exceder un amperio si el servomotor está enclavado. [12]

2.11. Herramientas matemáticas para la localización espacial

La manipulación de piezas llevada a cabo por un robot implica el movimiento espacial de su extremo. Asimismo para que el robot pueda recoger una pieza, es necesario conocer la posición y orientación de esta con respecto a la base del robot. Se aprecia entonces la necesidad de contar con una serie de herramientas matemáticas que permitan especificar la

posición y orientación en el espacio de las piezas, herramientas y en general de cualquier objeto.

2.11.1. Representación de la posición

Para localizar un cuerpo rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita la localización espacial de sus puntos. En un plano el posicionamiento tiene dos grados de libertad, y por tanto la posición de un punto vendrá definida por dos componentes independientes. En el caso de un espacio tridimensional será necesario emplear tres componentes.

La forma más intuitiva y utilizada de especificar la posición de un punto son coordenadas cartesianas. [13]

2.11.2. Sistema cartesiano de referencia

Normalmente los sistemas de referencia se definen mediante ejes perpendiculares entre sí con un origen definido. Estos se denominan sistemas cartesianos, la figura 2 representa un vector en sus coordenadas rectangulares y polares.

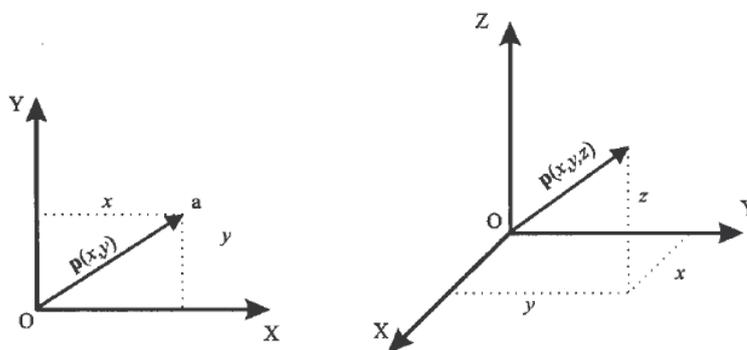


Figura 2: Representación de un vector

En el caso de trabajar en el plano (2 dimensiones) el sistema de referencia OXY correspondiente queda definido por dos vectores coordenados OX y OY perpendiculares entre sí con un punto de intersección común O. [13]

Si se trabaja en el espacio (3 dimensiones), el sistema cartesiano OXYZ está compuesto una terna orto normal de vectores coordenados OX, OY y OZ.

2.11.3. Representación de la orientación

En el caso de un robot, no es suficiente con especificar cuál debe ser la posición de su extremo, sino que en general es también necesario indicar su orientación.

Una orientación en el espacio tridimensional viene definida por tres grados de libertad o tres componentes linealmente independientes. Para poder describir de forma sencilla la orientación de un objeto respecto a un sistema de referencia, es habitual asignar solidariamente al objeto un nuevo sistema, y después estudiar la relación espacial existente entre los dos sistemas.

2.11.4. Matrices de rotación

Las matrices de rotación son el método más extendido para la descripción de orientaciones, debido principalmente a la comodidad que proporciona el uso del algebra matricial.

Supóngase que se tiene en el plano dos sistemas de referencia OXY y OUV con un mismo origen O, siendo el sistema OXY el de referencia fijo y el sistema OUV el móvil solidario al objeto (Figura 3a) los vectores unitarios de los ejes coordenados del sistema OXY son i_x y j_y , mientras que los sistemas OUV son i_u y j_v . [13]

Un vector del plano se puede representar en ambos sistemas como:

$$p_{xy} = [p_x, p_y]^T = p_x \cdot i_x + p_y \cdot j_y \text{ Ecuación 2.11}$$

$$p_{uv} = [p_u, p_v]^T = p_u \cdot i_u + p_v \cdot j_v \text{ Ecuación 2.11.}$$

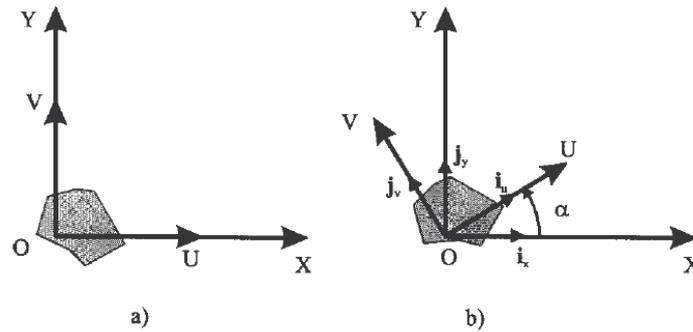


Figura 3: Orientación de un sistema OUV respecto a otro OXY en un plano

Fuente: [13]

Realizando una serie de transformaciones se puede llegar a la siguiente equivalencia:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.113}$$

Dónde:

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v \\ j_y i_u & j_y j_v \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.4}$$

Es la llamada matriz de rotación ecuación 2.4, que define la orientación del sistema OUV con respecto al sistema OXY, y que sirve para transformar las coordenadas de un vector en un sistema a las del otro. También recibe el nombre de matriz de cosenos directores. Es fácil de comprobar que se trata de una matriz ortonormal, tal que $R^{-1} = R^T$.

En el caso de las dos dimensiones, la orientación viene definida por un único parámetro independiente.

Si se considera la posición relativa del sistema OUV girando en un ángulo α sobre OXY (Figura 3b), tras realizar los correspondientes productos escalares, la matriz R será de la forma:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\text{sen}\alpha \\ \text{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.5}$$

Para el caso en que $\alpha=0$, en el que los ejes coordenados de ambos sistemas coincidan, la matriz R corresponderá a la matriz unitaria.

En un espacio tridimensional, el razonamiento a seguir es similar. Supóngase los sistemas OXYZ y OUVW, coincidentes en el origen, siendo OXYZ el sistema de referencia fijo, y el OUVW el solidario al objeto cuya orientación se desea definir. Los vectores unitarios del sistema OXYZ serán i_x, j_y, k_z mientras que los de OUVW serán i_u, j_v, k_w . Un vector en el espacio podrá ser referido a cualquiera de los sistemas de la siguiente manera:

$$p_{uvw} = [p_u, p_v, p_w]^T = p_u \cdot i_u + p_v \cdot j_v + p_w \cdot k_w \text{ Ecuación 2.6}$$

$$p_{xyz} = [p_x, p_y, p_z]^T = p_x \cdot i_x + p_y \cdot j_y + p_z \cdot k_z \text{ Ecuación 2.7}$$

Y al igual que en las dos dimensiones, se puede obtener la siguiente equivalencia:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix} \text{ Ecuación 2.8}$$

Dónde:

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} \text{ Ecuación 2.9}$$

Es la matriz de rotación que define la orientación del sistema OUVW con respecto al sistema OXYZ.

Al igual que en dos dimensiones, también recibe el nombre de matriz de cosenos directores y se trata de una matriz ortonormal, tal que la inversa de la matriz R es igual a su transpuesta.

La principal utilidad de esta matriz de rotación corresponde a la representación de la orientación de sistemas girados únicamente sobre uno de los ejes principales de referencia.

En la figura 9-b, la orientación del sistema OUVW, con el eje OU coincide con el eje OX, vendrá representada mediante la matriz:

$$R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\operatorname{sen}\alpha \\ 0 & \operatorname{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.10}$$

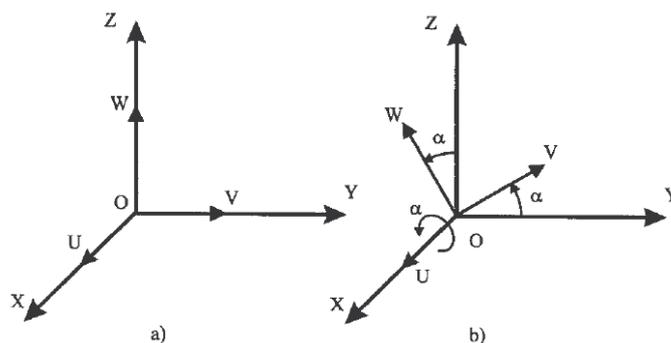


Figura 4: Sistema de referencia OXYZ y solidario al objeto OUVW

Fuente: [13]

En la figura 4, la orientación del sistema OUVW, con el eje OV coincide con el eje OY, vendrá representada por la siguiente matriz.

$$R(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \operatorname{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\operatorname{sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.11}$$

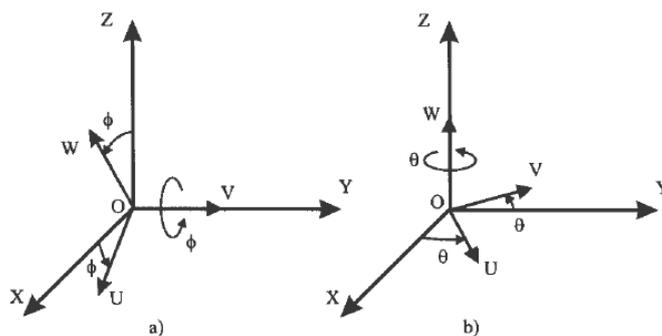


Figura 5: Rotación del sistema OUVW con respecto a los ejes OY y OZ

Fuente: [13]

En la figura 5-b la orientación del sistema OUVW, con el eje OW coincide con el eje OZ, vendrá representada mediante la matriz.

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta & 0 \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.13}$$

Estas tres matrices se denominan matrices básicas de rotación de un sistema espacial de tres dimensiones ecuación 2.13.

Las matrices de rotación pueden componerse para expresar la aplicación continua de varias rotaciones. Así si el sistema OUVW se le aplica una rotación de ángulo α sobre OX, seguida de una rotación de ángulo φ sobre OY y de una rotación de ángulo θ sobre OZ, la rotación global puede expresarse como:

$$T = R(z, \theta)R(y, \varphi)R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta & 0 \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \operatorname{sen}\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\operatorname{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\operatorname{sen}\alpha \\ 0 & \operatorname{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Es importante considerar el orden en que se realizan las rotaciones, pues el producto de las matrices no es conmutativo. [13]

2.11.5. Ángulos de Euler

Para la representación de orientación en un espacio tridimensional mediante una matriz de rotación es necesario definir nueve elementos.

Todo sistema OUVW solidario al cuerpo cuya orientación se quiere describir, puede definirse con respecto al sistema OXYZ mediante tres ángulos: φ , θ , ψ denominados ángulos de Euler. Girando sucesivamente el sistema OXYZ sobre unos ejes determinados de un triedro ortonormal los valores de φ , θ , ψ , se obtendrá el sistema OUVW. Existen diversas posibilidades, siendo tres las más usuales las que se muestran a continuación.

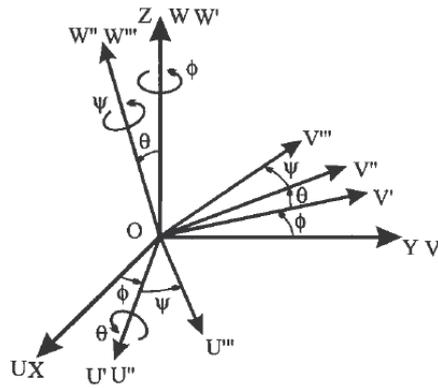


Figura 6: Ángulos de Euler

Fuente: [13]

Ángulos de Euler ZXZ

Es una de las representaciones más habituales entre las que realizan los giros sobre ejes previamente girados. Se le suele asociar con los movimientos básicos de un giroscopio. Si se parte de los sistemas OXYZ OUVW, inicialmente coincidentes, se puede colocar al sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los siguientes pasos:

1. Girar el sistema OUVW un ángulo ϕ con respecto al eje OZ, convirtiéndose así en el $OU'V'W'$
2. Girar el sistema $OU'V'W'$ en un ángulo θ con respecto al eje OU' , convirtiéndose así en $OU''V''W''$
3. Girar el sistema $OU''V''W''$ un ángulo ψ con respecto al eje OW'' convirtiéndose finalmente en $OU'''V'''W'''$.

Es importante que estas operaciones se realicen en la secuencia especificada, pues las operaciones de giros consecutivos sobre ejes no son conmutativas.

Ángulos de Euler ZYZ

Es otra de las representaciones más habituales entre las que realizan los giros sobre ejes previamente girados. Solo se diferencia del anterior en la elección del eje sobre el que se

realiza el segundo giro. Si se parte de los sistemas OXYZ y OUVW, inicialmente coincidentes, se puede colocar el sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los siguientes pasos.

- Girar el sistema OUVW un ángulo ϕ con respecto al eje OZ, convirtiéndose así en el $OU'V'W'$
- Girar el sistema $OU'V'W'$ en un ángulo θ con respecto al eje OV' , convirtiéndose así en $OU''V''W''$
- Girar el sistema $OU''V''W''$ un ángulo ψ con respecto al eje OW'' convirtiéndose finalmente en $OU'''V'''W'''$.

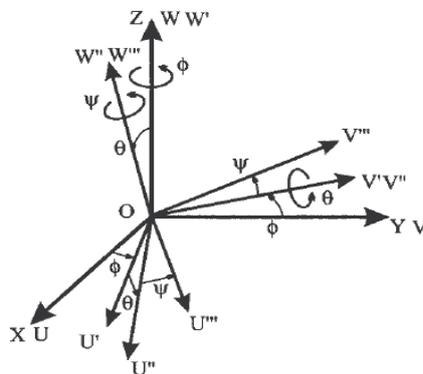


Figura 7: Ángulos de Euler ZYZ

Fuente: [13]

Se trata de la representación utilizada generalmente en aeronáutica. Es también la más habitual de entre las que se aplican a los giros sobre los ejes del sistema fijo. Si se parte de los sistemas OXYZ y OUVW, se puede colocar el sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los pasos indicados a continuación (figura7):

- Girar el sistema OUVW un ángulo ψ con respecto al eje OX, es el denominado YAW.
- Girar el sistema OUVW un ángulo θ con respecto al eje OY, es el denominado PITCH.
- Girar el sistema OUVW un ángulo ϕ con respecto al eje Oz, es el denominado ROLL.

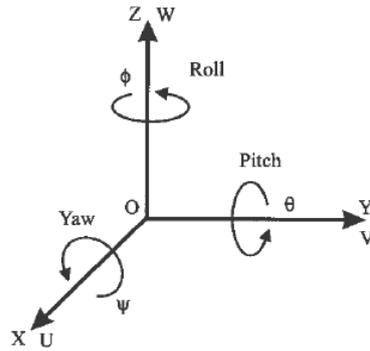


Figura 8: Ángulos de Euler: roll, pitch, yaw

Fuente: [13]

2.11.6. Matrices de transformación homogénea

Ninguno de los métodos anteriores permite por si solo una representación conjunta de la posición y la orientación. Para solventar este problema se introdujeron las denominadas coordenadas homogéneas. [13]

2.11.7. Coordenadas y matrices homogéneas

La representación mediante coordenadas homogéneas de la localización de sólidos en un espacio n dimensional se realiza a través de coordenadas de un espacio (n+1) dimensional. Es decir, un espacio n dimensional se encuentra representado en coordenadas homogéneas por (n+1) dimensiones, de tal forma que un vector $p(x,y,z)$ vendrá representado por $p(wx, wy, wz, w)$, donde w tiene un valor arbitrario y representa un factor de escala. De forma general, un vector $p = ai + bj + ck$, donde i, j, k son los vectores unitarios de los ejes OX, OY, OZ del sistema de referencia $OXYZ$, se representa en coordenadas homogéneas mediante el vector columna:

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.15}$$

A partir de la definición de las coordenadas homogéneas surge inmediatamente el concepto de matriz de transformación homogénea. Se define como matriz homogénea T a una matriz de dimensiones 4×4 que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro, como se observa en la ecuación 2.16.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.16}$$

Se puede considerar que una matriz homogénea se haya compuesta por cuatro submatrices de distinto tamaño: una submatriz $R_{3 \times 3}$ que corresponde a una matriz de rotación; una submatriz $p_{3 \times 1}$ que corresponde al vector traslación; una submatriz $f_{1 \times 3}$ que representa una transformación de perspectiva, y una submatriz $w_{1 \times 1}$ que representa un escalado global. En robótica generalmente solo interesara conocer el vector de $R_{3 \times 3}$ y de $p_{3 \times 1}$, considerándose las componentes de $f_{1 \times 3}$ nulas y la de $w_{1 \times 1}$ la unidad. [13]

2.12. Modelo cinemático de los manipuladores

La cinemática del robot estudia el movimiento con respecto a un sistema de referencia. Existen dos problemas a resolver en la cinemática del robot, el primero se conoce como el problema cinemático directo y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, el segundo se denomina problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe tomar el robot, conocidas la posición y orientación del elemento extremo. [14]

2.13. El problema cinemático directo

Un robot se puede considerar como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí por lo tanto se puede establecer un sistema de referencias fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. El problema cinemático directo consiste en encontrar

una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación del extremo del robot con respecto del sistema fijo situado en la base del mismo.

2.13.1. Parámetros Denavit-Hartenberg (D-H)

En general un robot de n grados de libertad está formado por n eslabones unidos por n articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él, y utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot.

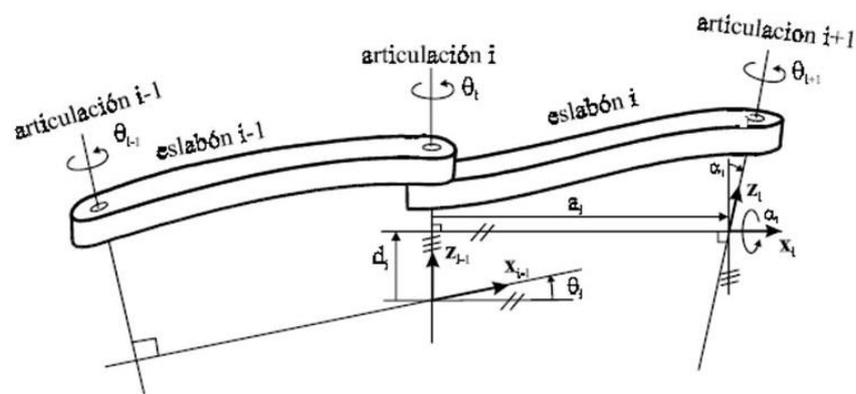


Figura 9: Partes de una articulación

Fuente: [14]

Normalmente, la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se denominan matriz ${}^{i-1}A_i$. Así pues, 0A_1 describe la posición y orientación de sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base, ${}^1\check{A}_2$ describe la posición y orientación del segundo eslabón respecto al primero, etc. Del mismo modo, se denomina 0A_k a las matrices resultantes del producto de las matrices ${}^{i-1}A_i$, se puede representar de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot. Así por ejemplo,

la posición y orientación del sistema solidario con el segundo eslabón del robot con respecto al sistema de coordenadas de la base se puede expresar mediante la matriz 0A_2 [14]

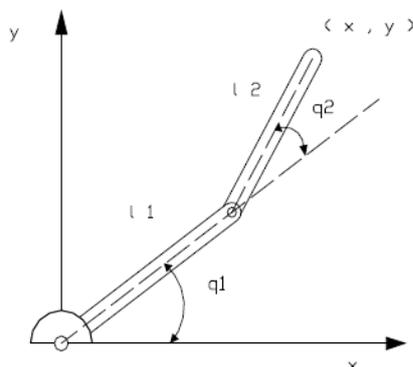


Figura 10: Robot planar de 2 grados de libertad.

Fuente: [14]

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

Ecuación 2.17

La ecuación 2.17 es la ecuación 2.14 desarrollada

Donde θ_i , a_i , d_i , α_i son los parámetros D-H del eslabón i .

De este modo, basta con identificar los parámetros θ_i , a_i , d_i , α_i para obtener las matrices A y relacionar así todo y cada uno de los eslabones del robot.

Para que la matriz ${}^{i-1}A_i$ relacione los sistemas S_i y S_{i-1} es necesario que los sistemas se hayan escogido de acuerdo a unas normas determinadas. Estas, junto con la definición de los 4 parámetros de Denavit-Hartenberg, conforman el algoritmo para la resolución del problema cinemático directo. [14]

2.13.2. Algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H) para la obtención del modelo cinemático directo

1. Numerara los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numera como eslabón 0 a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando por 1 y acabando en n.
3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para i de 0 a $n-1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.
5. Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .
6. Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i+1$.
7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .
9. Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .
10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.
12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincida con $\{S_i\}$.
13. Obtener α_i como el ángulo que habría que girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

14. Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$.
15. Obtener la matriz de transformación que relacione el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$.
16. La matriz T define la orientación y posición del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares. [15]

2.14. Resolución del problema cinemático inverso

El objeto de del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

No existe un algoritmo general que pueda emplearse para resolver un sistema de ecuaciones no lineales.

El problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que debe adoptar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Al contrario que el problema cinemático directo, el cálculo de la cinemática inversa no es sencillo ya que consiste en la resolución de una serie de ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot.

Al resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada, es decir, encontrar una relación matemática explícita de la forma: $q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ donde $k=1 \dots n$ y representa los grados de libertad.

Para poder conseguir esta relación suele ser habitual emplear métodos geométricos, que consisten en la utilización de las relaciones trigonométricas y la resolución de los triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot. La mayoría de los robots suelen tener cadenas cinemáticas relativamente sencillas, y los tres primeros GDL, que posicionan al robot en el espacio, suelen tener una estructura planar. Además los últimos tres grados de libertad

suelen usarse para la orientación de la herramienta, lo cual permite la resolución desacoplada de la posición del extremo del robot y de la orientación de la herramienta. Como alternativa para resolver el mismo problema se puede recurrir a manipular directamente las ecuaciones correspondientes al problema cinemático directo. [7]

2.14.1. Múltiples soluciones

El problema más común que resulta al resolver ecuaciones de cinemática es el de múltiples soluciones, el hecho de que haya muchas soluciones puede ocasionar problemas, ya que el sistema tiene que ser capaz de elegir una. Los criterios sobre los que debe basarse una decisión varían, pero una elección razonable sería la solución más cercana.

El número de soluciones depende del número de articulaciones en el manipulador, por ejemplo el robot PUMA 560 mostrado en la figura 11 puede llegar a un punto con ocho soluciones distintas. [16]

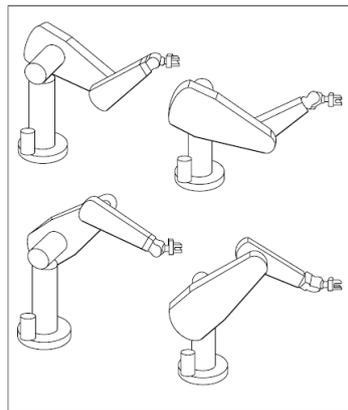


Figura 11: Cuatro soluciones robot PUMA 560

Fuente:[16]

2.14.2. Métodos de solución

Existen dos clases amplias para dar solución a manipuladores: soluciones de forma cerrada (analíticas) y soluciones numéricas. Debido a su naturaleza iterativa las soluciones numéricas

son mucho más lentas que las soluciones de forma cerrada, por este motivo se centrara la atención a la resolución a métodos de forma cerrada.

Dentro las soluciones de forma cerrada se distingue dos métodos para obtener la solución: algebraico y geométrico. [16]

2.14.3. Método geométrico

Este procedimiento es adecuado para robots de pocos grados de libertad, o para el caso que se considere solo los primeros grados de libertad.

El proceso se basa en encontrar un número suficiente de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot. [17]

También existen métodos de solución múltiple:

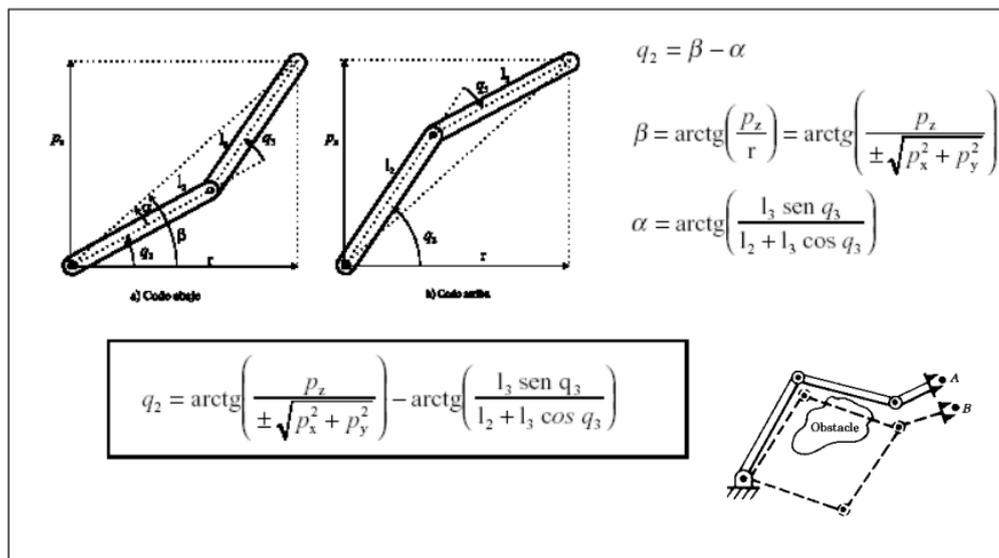


Figura 12: Solución múltiple

Fuente:[17]

2.14.4. Método matrices homogéneas

En principio es posible tratar de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de su modelo directo. Es decir suponiendo conocidas las relaciones que

expresa el valor de la posición y orientación del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, obtener por manipulación de aquellas las relaciones inversas.

El primer paso para resolver el problema cinemático inverso es obtener la matriz T que relaciona el sistema de referencia asociado a la base con el sistema de referencia asociado a su extremo.

Luego se muestra la asignación de sistemas de referencia según los criterios DH, con el robot situado en su posición inicial.

A partir de esto es inmediato obtener las matrices A y T .

Obtenida la matriz T en función de las coordenadas articulares (q_1, q_2, q_3) y supuesta una localización de destino para el extremo del robot definida por los vectores n, o, a y p , se podría intentar manipular directamente las 12 ecuaciones resultantes de T a fin de despejar q_1, q_2, q_3 en función de n, o, a y p .

2.14.5. Desacoplamiento cinemático

A veces no es suficiente con posicionar al extremo del robot en un punto del espacio, sino que es preciso conseguir que la herramienta se oriente de una manera determinada, para ello los robots cuentan con otros tres grados de libertad adicionales, situados al final de la cadena cinemática y cuyos ejes se cortan en un punto que se denomina muñeca del robot.

El problema del desacoplo cinemático saca partido de este hecho, separando ambos problemas: posición y orientación.

A partir de los datos de orientación y de los ya calculados (q_1, q_2, q_3) se obtiene los valores del resto de las variables articulares. [17]

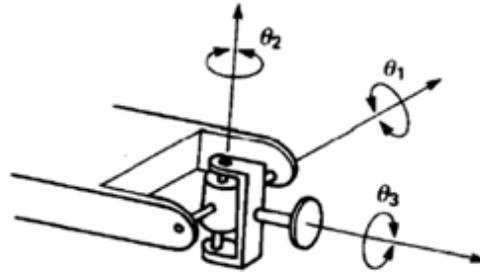


Figura 13: Ángulos de orientación herramienta

Se puede resolver de forma explícita los 3GDL que definen la orientación de la garra.

Fuente: [17]

Para resolver este problema se puede resumir en los siguientes pasos:

Paso1: encontrar q_1, q_2, q_3 de tal manera que la muñeca de centro o_c tiene coordenadas dadas por:

$$o_c^0 = o - d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 2.18}$$

Paso 2: usando las variables determinadas en el paso 1, evaluar R^3 .

Paso3: buscar un conjunto de ángulos de Euler correspondiente a la matriz de rotación. [17]

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1} R = (R_3^0)^T R \text{Ecuación 2.19}$$

3.1. Software para simulación

El software que se usa es la herramienta Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre sus prestaciones básicas están las siguientes: manipulación de matrices, representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaz

de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Matlab es un software de computación para ingeniería, un poderoso lenguaje de programación, una posibilidad de realizar y manipular gráficos con facilidad, además de reunir conocimiento acumulado en estas áreas de manera estructurada y útil.

Esta herramienta se centra en el cómputo y no en las matemáticas, así que las expresiones y la manipulación simbólica no son su fuerte. Las soluciones son numéricas e inexactas asociadas a los métodos de redondeo, esto puede verse de dos maneras, como un problema al evidenciar el riesgo de errores ocultos en los resultados y como una ventaja, ya que permite el cálculo numérico con un conjunto de números diferentes al de los números reales.

Comparado con otros lenguajes de programación numéricos como C++ o FORTRAN, Matlab es mucho más fácil de usar y está integrado con una biblioteca formada de una gran cantidad de información, módulos, programas, subrutinas, relacionadas con el cómputo numérico. [19]

3.1.1. Inicio de Matlab

Al iniciar Matlab aparece el escritorio, Multipaneled desktop, con diversas áreas de trabajo, que se pueden modificar al gusto de cada usuario, acción que no es necesaria en un principio.

La figura 14 muestra el área de trabajo donde se escriben los comandos, y aparecen las respuestas numéricas.

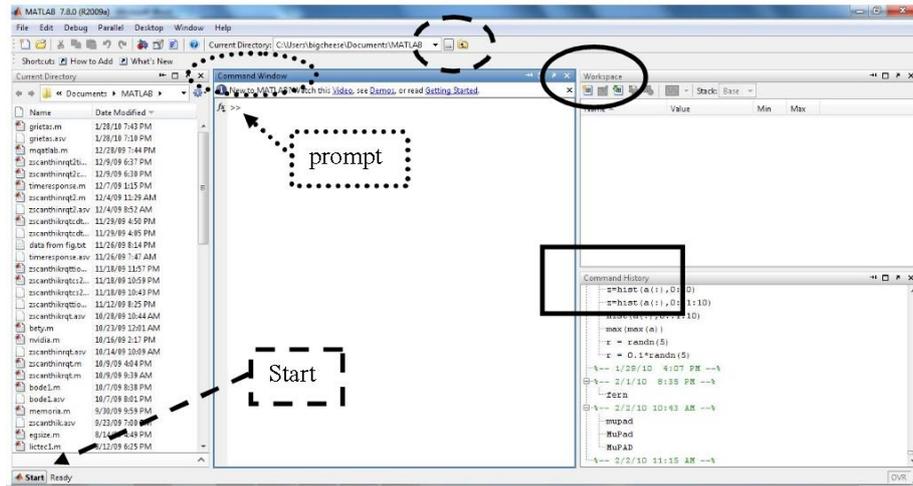


Figura 14: Ventana de trabajo Matlab

Capítulo III: Cinemática del manipulador

3.2.Requerimientos y requisitos

El brazo robótico que se simulará es un brazo antropomórfico de 5gdl, el cual se determinará mediante cinemática los distintos movimientos que puede realizar.

El modelo consiste en un brazo antropomórfico. El modelo consta de una base con giro angular, dos articulaciones angulares una articulación en el elemento terminal y la articulación rotacional de la pinza.

Un diseño robusto puede ser construido con aluminio, por su ligereza y fácil manejo; esto se lo debe realizar en un taller de soldadura con extensa maquinaria.

Para el movimiento de las articulaciones se emplea generalmente servomotores de modelismo. El uso de rodamiento en la base del brazo y en articulación, puede ayudar a mejorar el movimiento de los mismos.

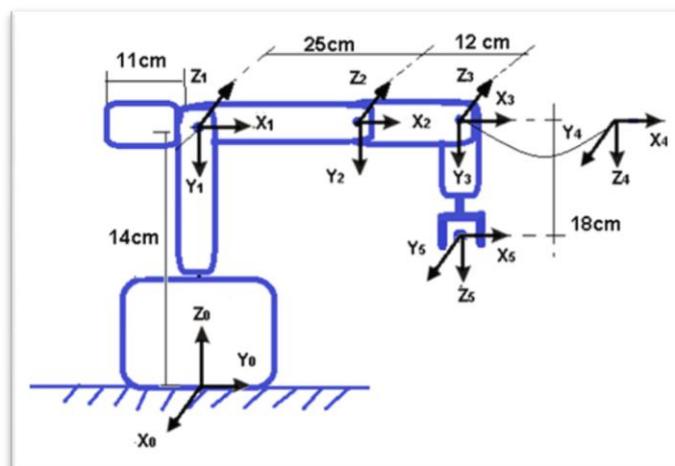


Figura 15: Medidas del brazo robótico

Fuente: Autor

3.3. Cinemática del manipulador

En este capítulo se centrará en el estudio de las relaciones matemáticas que permiten describir el movimiento del manipulador, limitándose esencialmente al estudio de las posiciones y trayectorias.

Parámetros D-H.

DH1: Numerar los eslabones comenzando con uno el primer eslabón y terminando en n el último, se enumera con cero la base fija del robot.

DH2: Numerar cada articulación comenzando por 1 correspondiente al primer grado de libertad y terminando en n, mostrado en la figura 23.

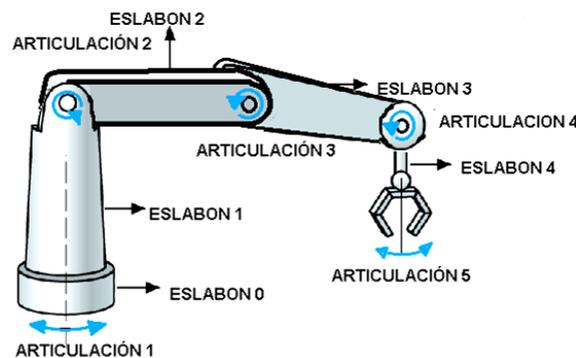


Figura 16: Parámetros DH 1 – DH2

Fuente: Autor

DH 3: Localizar el eje de cada articulación si esta es rotativa; el eje será su propio eje de giro.

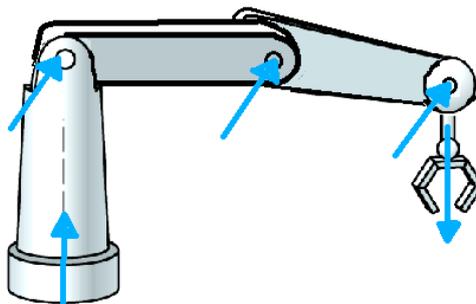


Figura 17: Parámetros DH3

Fuente: Autor

DH 4: Para i de 0 a $n-1$, situar el eje Z_i , sobre el eje de la articulación $i+1$.

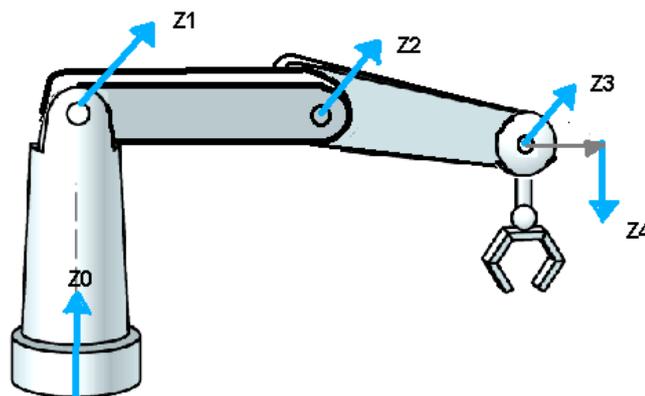


Figura 18: Parámetro DH4

Fuente: Autor

DH 5: Situar el origen del sistema de la base S_0 en cualquier punto del eje Z_0 , los ejes X_0 y Y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 .

DH 6: Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i+1$.

DH 7: Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

DH 8: Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .

DH 9: Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .

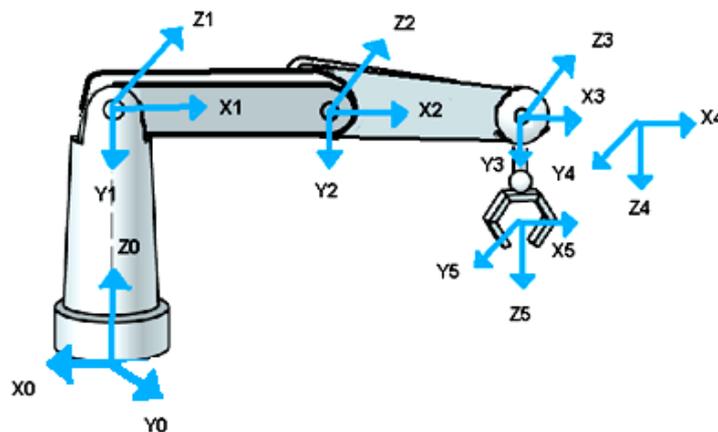


Figura 19: Parámetros DH5 – DH9

Fuente: Autor

DH 10: Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.

DH 11: Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.

DH 12: Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiera con $\{S_i\}$.

DH 13: Obtener α_i como el ángulo que habría que girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

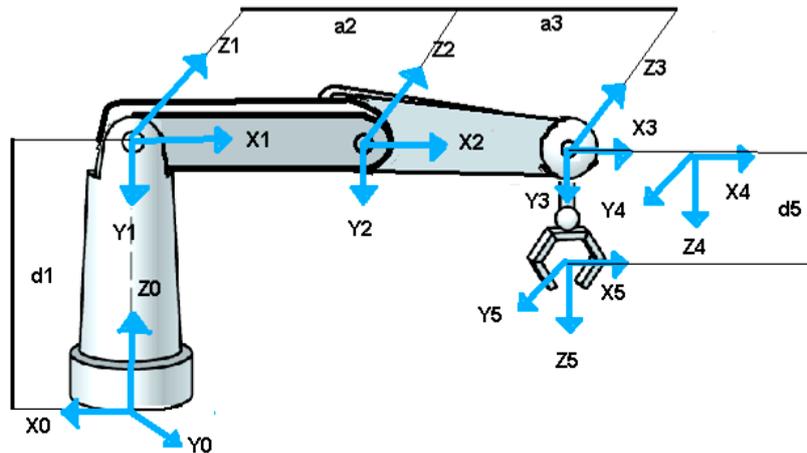


Figura 20: Parámetros DH10 – DH13

Fuente: Autor

El número de grados de libertad de un brazo robótico viene dado por el número de articulaciones que lo compone, puesto que en este caso se ha empleado articulaciones de tipo rotacional, las cuales tienen un grado de libertad.

Así que el brazo robótico está dotado de 5 grados de libertad (GDL).

3.4. Cinemática directa

Debido a que, desde el punto de vista mecánico un robot es una cadena de eslabones que solo puede desarrollar movimiento a través de una articulación. El estudio de la cinemática se centra en describir la posición y la orientación de cada eslabón respecto del eslabón anterior o del siguiente, según indique la convección utilizada.

Para el cálculo de la matriz de transformación de la cinemática directa del robot se asignaron los siguientes ejes a cada articulación los cuales se determinaron siguiendo los parámetros D-H.

Tabla 1: Parámetros D-H

Articulación	Θ	D	a	A
1	θ_1	d1	0	90
2	θ_2	0	a2	0
3	θ_3	0	a3	0
4	θ_4	0	0	90
5	θ_5	d5	0	0

Fuente: Autor

Dónde: d1= 14cm; a2= 25cm.; a3= 12cm.; d5= 18cm.

Para encontrar los distintos datos de cada articulación se trabajó así:

Se eligió un sistema de coordenadas fijo (X_0, Y_0, Z_0) asociado a la base del robot.

Se localizará el eje de cada articulación Z_i . Si la articulación es rotativa, el eje será el propio eje de giro, si es prismática, el eje lleva la dirección del deslizamiento.

Situar los ejes X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si estos son paralelos, se elige sobre la línea normal que corta a ambos ejes. El eje Y_i debe complementar un triedro dextrógiro.

Parámetro α_i : ángulo que forman los ejes X_{i-1} y X_i girando sobre el eje Z_{i-1} positivamente.

El signo lo determina la regla de la mano derecha.

Parámetro a_i : distancia entre los ejes Z_{i-1} y Z_i a lo largo de la dirección positiva de X_i . El signo lo define X_i .

Parámetro θ_i : ángulo entre el eje Z_{i-1} y Z_i , sobre la dirección positiva de X_i . El signo lo determina la regla de la mano derecha.

Parámetro d_i : distancia a lo largo del eje Z_{i-1} desde el origen del sistema S_{i-1} hasta la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i .

Se aplicó la ecuación 2.17 para determinar las matrices de transformación homogénea:

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

Denavit y Hartenberg propusieron un método para obtener las matrices de transformación homogénea A_{i-1}^i de forma fácil y rápida. El método propuesto se reduce entonces a calcular ciertos parámetros, comúnmente conocidos como parámetros D-H, y reemplazarlos en la matriz anterior.

Nótese que por cuestión de espacio, en robótica es común utilizar una notación abreviada que consiste en indicar los argumentos como subíndices. Por ejemplo: s=seno y c=coseno.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & s\theta_2 & 0 & a_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & s\theta_3 & 0 & a_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & a_3 s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & -s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & s\theta_5 & 0 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices anteriores únicamente fueron reemplazadas sus valores en la matriz de transformación homogénea, con los datos obtenidos en la tabla 1.

Para obtener la matriz transformación hay que multiplicar todas las ecuaciones anteriores obteniendo así la matriz que se muestra a continuación.

$${}^0A_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$n_x = c_1 c_5 [c_4 c_{2-3} + s_4 s_{2+3}] + s_1 s_5 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$n_y = c_5 [c_4 c_{2-3} + s_1 s_4 s_{2+3}] - c_1 c_5 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$n_z = c_5 [c_4 s_{2+3} + s_4 c_{2-3}] \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$o_x = c_1 s_5 [c_4 c_{2-3} + s_4 s_{2+3}] + s_1 c_5 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$o_y = s_5 [c_4 c_{2-3} + s_1 s_4 s_{2+3}] - c_1 c_5 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$o_z = s_5 [c_4 s_{2+3} + s_4 c_{2-3}] \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$a_x = -c_1 [s_4 c_{2-3} + c_4 s_{2+3}] \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$a_y = -s_4 c_{2-3} + s_1 c_4 s_{2+3} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$a_z = -s_4 s_{2+3} + c_4 c_{2-3} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$P_x = d_5 c_1 [c_4 s_{2+3} - s_4 c_{2-3}] + c_1 [a_3 c_1 c_2 + a_3 s_3 s_2 + a_2 c_2] \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$P_y = d_5 [s_1 c_4 s_{2+3} - s_4 c_{2-3}] + s_1 [a_3 c_3 c_2 + a_3 s_1 s_2 + a_2 c_2 s_1] \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$P_z = d_5 [c_4 c_{2-3} - s_4 s_{2+3}] + a_3 s_{2+3} + a_2 s_2 + d_1 \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Utilizando la equivalencia de ángulos dobles se simplifico.

$$s_{2+3} = s_2 c_3 + s_3 c_2 \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$c_{2-3} = c_3 c_2 + s_3 s_2 \quad \text{Ecuación 3.15}$$

3.5. Cinemática inversa

Para resolver el problema cinemático inverso se va a utilizar el método geométrico, en el cual se hace uso de herramientas geométricas y trigonometría.

La información necesaria de la configuración de la herramienta es al menos las coordenadas del punto a donde debe llegar la herramienta.

Dado el vector configuración de la herramienta.

$$w = [p_x \ p_y \ p_z \ \gamma]^T$$

El problema consiste en encontrar las variables.

$$q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$$

Los métodos geométricos permiten obtener normalmente los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar al robot omitiendo las variables de orientación.

El ángulo θ_1 puede ser obtenido usando la ecuación 3.16.

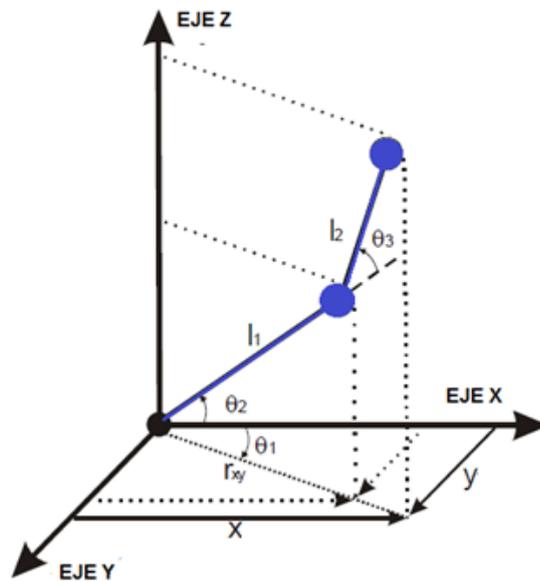


Figura 21: Vista superior del robot

Fuente: Autor

$$\theta_1 = \text{atan2}(Y, X) \text{ Ecuación 3.16}$$

La distancia h resulta de la aplicación del teorema de Pitágoras.

$$h = \sqrt{r_{xy}^2 + Z^2} \text{ Ecuación 3.17}$$

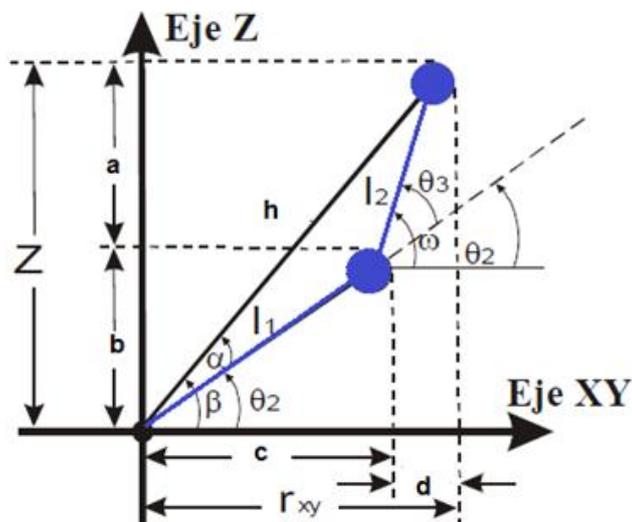


Figura 22: Vista lateral del robot solución codo abajo

Fuente: Autor

$$r_{xy} = \frac{X}{\cos \theta_1} \text{Ecuación 3.18}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{r_{xy}} \right) \text{Ecuación 3.19}$$

Estas ecuaciones se obtienen usando el teorema de cosenos en el triángulo.

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{l_1^2 + h^2 - l_2^2}{2l_1 h} \right] \text{Ecuación 3.20}$$

El ángulo del hombro está dado por:

$$\theta_2 = \beta - \alpha \text{Ecuación 3.21}$$

El ángulo del codo θ_3 , se obtiene así:

$$b = l_1 \sin \theta_2 \text{Ecuación 3.22}$$

$$c = l_1 \cos \theta_2 \text{Ecuación 3.23}$$

$$d = r_{xy} - c \text{Ecuación 3.24}$$

$$a = Z - b \text{Ecuación 3.25}$$

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{a}{d} \right) \text{Ecuación 3.26}$$

$$\theta_3 = \omega - \theta_2 \text{Ecuación 3.27}$$

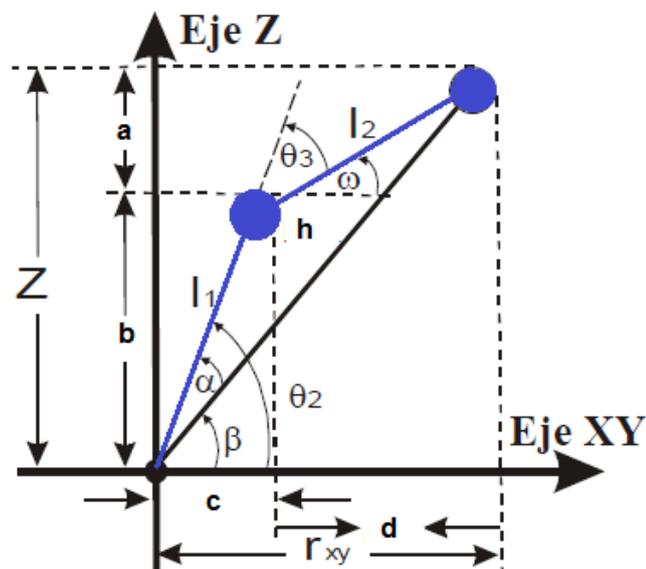


Figura 23: Vista lateral del robo solución codo arriba

Fuente: Autor

Los valores para la solución codo arriba los valores β , α , son los mismos que la solución codo abajo.

$$\theta_2 = \beta + \alpha \text{Ecuación 3.28}$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \omega \text{Ecuación 3.29}$$

Capítulo IV: Simulación cinemática del robot

La simulación se la realizo en Matlab, a continuación se detalla con un ejemplo sencillo el funcionamiento de los comandos aplicados, para la representación gráfica del robot.

Se representara un robot de dos grados de libertad con los siguientes valores:

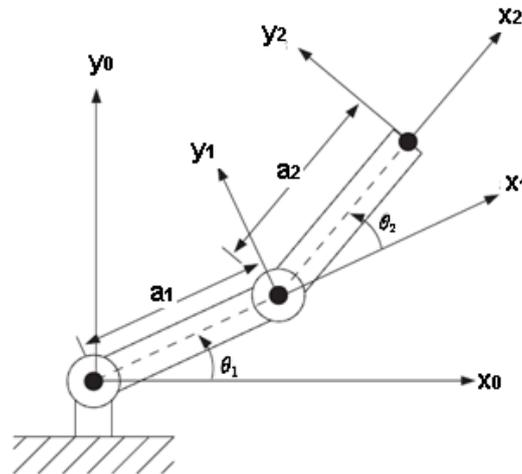


Figura 24: Diagrama brazo 2 articulaciones

Fuente: [20]

Se utiliza el programa desarrollado en Matlab llamado Link.m, código que define los eslabones del robot, los eslabones se definen de la siguiente manera [alpha a theta d sigma] donde sigma define si es una articulación rotacional si es 0 y si es diferente de cero, se trata de una primateca, todos estos datos son los parámetros Denavit-Hartenberg:

Tabla 2: Parámetros D-H 2GDL

Articulación	Theta	d	A	α
1	Θ_1	0	1	0
2	Θ_2	0	1	0

Fuente: Autor

Utilizando el comando Link.m tenemos lo siguiente:

```
L1 = Link('d', 0, 'a', 1, 'alpha', 0)
```

```
L1 = theta=q, d= 0, a= 1, alpha= 0, offset= 0 (R,stdDH)
```

Se obtiene el resultado del vector de la primera articulación, de la misma manera se utiliza la segunda articulación:

```
L2 = Link('d', 0, 'a', 1, 'alpha', 0);
```

Con estos dos valores de L1 y L2 se ha obtenido los parámetros D-H.

Luego con el comando de Matlab SerialLink.m ayuda a unir los vectores que forman el robot para convertirlo en una matriz de la siguiente manera:

```
>> rob = Robot([L1 L2])

rob =

noname (2 axis, RR, stdDH, slowRNE)

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |      theta |      d |      a |      alpha |      offset |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |      q1 |      0 |      1 |      0 |      0 |
| 2 |      q2 |      0 |      1 |      0 |      0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

grav =      0 base = 1 0 0 0 tool = 1 0 0 0
          0      0 1 0 0          0 1 0 0
        9.81      0 0 1 0          0 0 1 0
              0 0 0 1          0 0 0 1
```

Figura 25: Matriz parámetros 2GDL

Fuente: Autor

Podemos observar que el robot está formado por dos articulaciones rotacionales RR, también se observa que la gravedad está actuando en la dirección z, la variables q1 y q2 también se muestran, ya que son los ángulos que varían del robot.

A continuación se utilizara el comando `fkine.m` (forwardkinematics) que sirve para encontrar la cinemática directa del robot, para el caso en que los ángulos $q_1=q_2=0$;

```
>> rob.fkine([0 0])
```

```
ans =
```

```

     1     0     0     2
     0     1     0     0
     0     0     1     0
     0     0     0     1

```

El método devuelve la transformada homogénea que representa la pose del robot para esos valores de los ángulos. Se puede variar la posición del robot variando los dos ángulos.

Con el comando `plot.m` nos permite dibujar la ubicación del robot en este caso sería en la posición de los ángulos igual a cero.

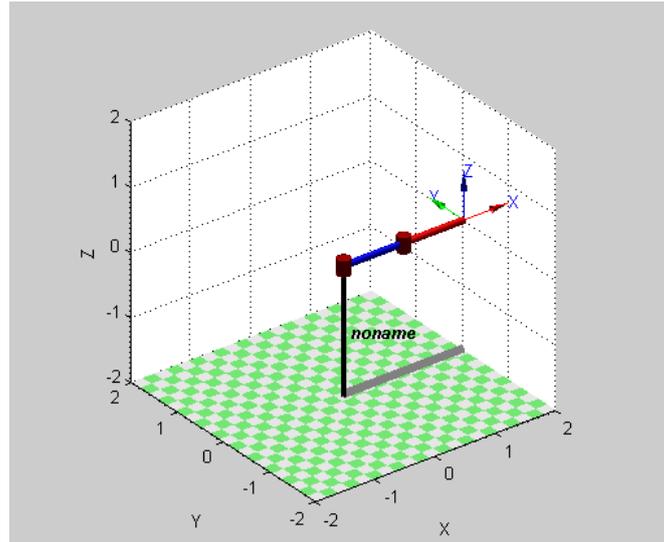


Figura 26: Grafico brazo de 2GDL

Fuente: Autor

Para realizar la cinemática inversa necesitamos conocer la posición en la que se quiere ubicar el efector final, para esto ubicamos los puntos en x, y, z deseados así:

```
T=transl(0.4, 0.5, 0.6);
```

Para encontrar la posición de los ángulos se usa el comando ikine (inversekinematics) y un vector mascara que representa las tres orientaciones rx, ry, rz, px, py, pz del efector final.

```
rob.ikine(T, [0 0], [1 1 0 0 0 0])
```

Tenemos el siguiente resultado:

```
ans = -0.3488  2.4898
```

Representa los ángulos que deben asignarse para que el efector final alcance las coordenadas insertadas.

Para el robot de 5GDL se realizó utilizando los comandos ya nombrados.

```
L1 = Link('d', 14, 'a', 0, 'alpha', 90);
```

```
L2 = Link('d', 0, 'a', 25, 'alpha', 0);
```

```
L3 = Link('d', 0, 'a', 12, 'alpha', 0);
```

```
L4 = Link('d', 0, 'a', 0, 'alpha', 90);
```

```
L5 = Link('d', 18, 'a', 0, 'alpha', 0);
```

Obteniendo los vectores para cada eslabona así:

```
theta=q, d= 14, a= 0, alpha= 90, offset= 0 (R,stdDH)
```

```
theta=q, d= 0, a= 25, alpha= 0, offset= 0 (R,stdDH)
```

```
theta=q, d= 0, a= 12, alpha= 0, offset= 0 (R,stdDH)
```

```
theta=q, d= 0, a= 0, alpha= 90, offset= 0 (R,stdDH)
```

```
theta=q, d= 18, a= 0, alpha= 0, offset= 0 (R,stdDH)
```

```
rob = SerialLink([L1 L2 L3 L4 L5], 'name', 'andresbot');
```

Utiliza el comando SerialLink para unir los eslabones en una matriz, además se ha colocado un nombre distintivo al brazo robótico 'andresbot'.

```

rob =

andresbot (5 axis, RRRRR, stdDH, slowRNE)

+---+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |   offset |
+---+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |    q1 |    14 |     0 |   1.571 |     0 |
| 2 |    q2 |     0 |    25 |     0 |     0 |
| 3 |    q3 |     0 |    12 |     0 |     0 |
| 4 |    q4 |     0 |     0 |   1.571 |     0 |
| 5 |    q5 |    18 |     0 |     0 |     0 |
+---+-----+-----+-----+-----+-----+

grav =   0   base = 1 0 0 0   tool = 1 0 0 0
         0         0 1 0 0         0 1 0 0
        9.81       0 0 1 0         0 0 1 0
                0 0 0 1         0 0 0 1

```

Con los datos ingresados en la matriz de parámetros D-H se procede a graficar los eslabones que conforman el brazo robótico de la siguiente manera:

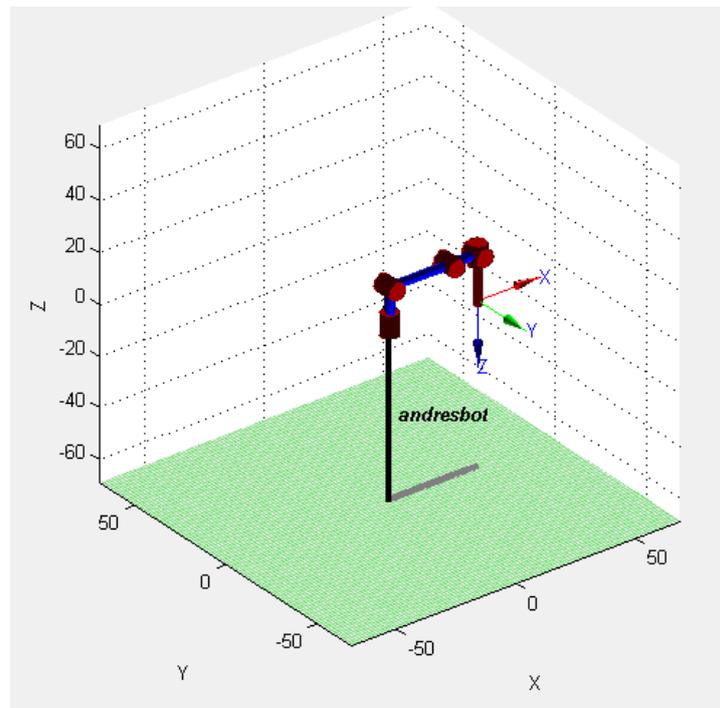


Figura 27: Gráfico robot 5GDL

Fuente: Autor

Utiliza los cálculos encontrados con la matriz de transformación homogénea para poder determinar la posición final del efector asignando valores de posición angular a las articulaciones, por ejemplo si los valores (3, 37, 72, 29, 45) respectivamente a cada articulación los valores de la matriz serán los siguientes:

$$\begin{bmatrix} -0.4769 & 0.584 & 0.6618 & 27.7629 \\ -0.7470 & -0.6635 & 0.0416 & 1.7467 \\ 0.4632 & -0.4745 & 0.7485 & 53.9720 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para la cinemática inversa utilizamos las respectivas ecuaciones las cuales nos ayudan a posicionar el brazo robótico, luego multiplicamos por el vector de rotación para obtener la posición final del brazo robótico por ejemplo para las coordenadas (25, 0, 15) y la orientación (0, 45, 0) se obtiene los siguientes valores para posicionamiento de los valores de cada articulación.

0.0000 -1.1993 2.5005 1.0550 2.9885

El programa abarca los parámetros necesarios para representar gráficamente y la posición respectiva que debe tomar un brazo robótico de 5GDL, la cinemática del brazo robótico ayuda a la correcta ubicación del brazo, los datos son ingresados por el usuario.

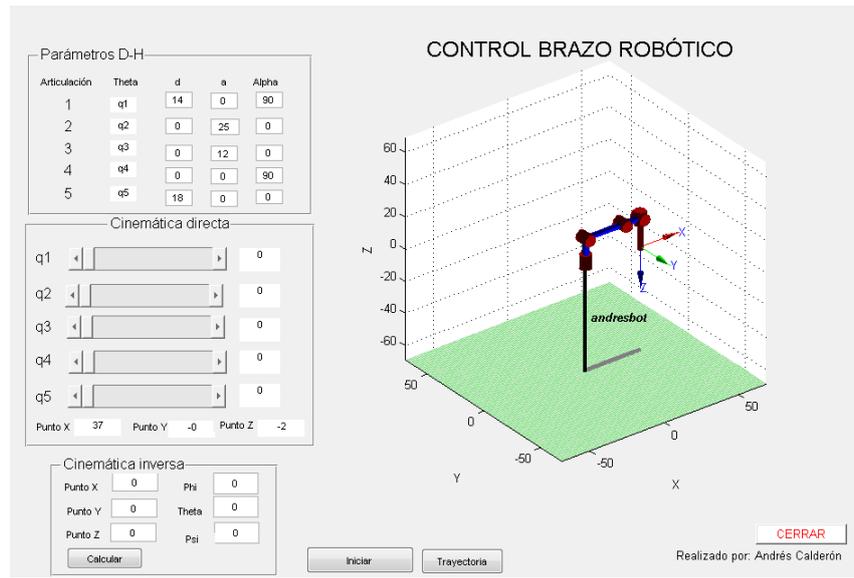


Figura 28: Software de cálculo cinemático brazo 5GDL

Fuente: Autor

4.1. Diagrama de bloques de funcionamiento



Figura 29: Ingreso de parámetros D-H

Fuente: Autor

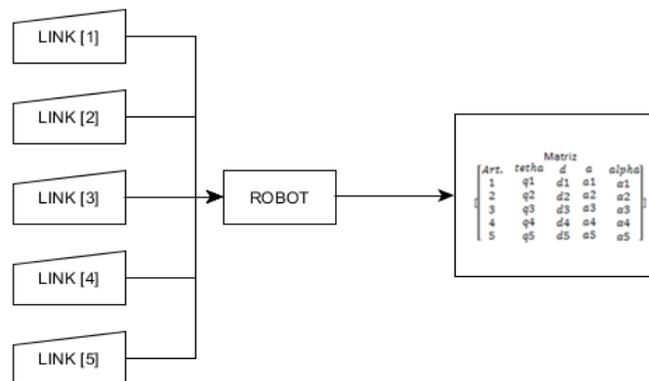


Figura 30: Procesamiento de valores Matriz homogénea

Fuente: Autor

En la figura 29 se observa cómo se ingresa los valores de los parámetros D-H generando un vector. En la figura 30 expresa la formación de la matriz homogénea con los vectores formados con los parámetros D-H.

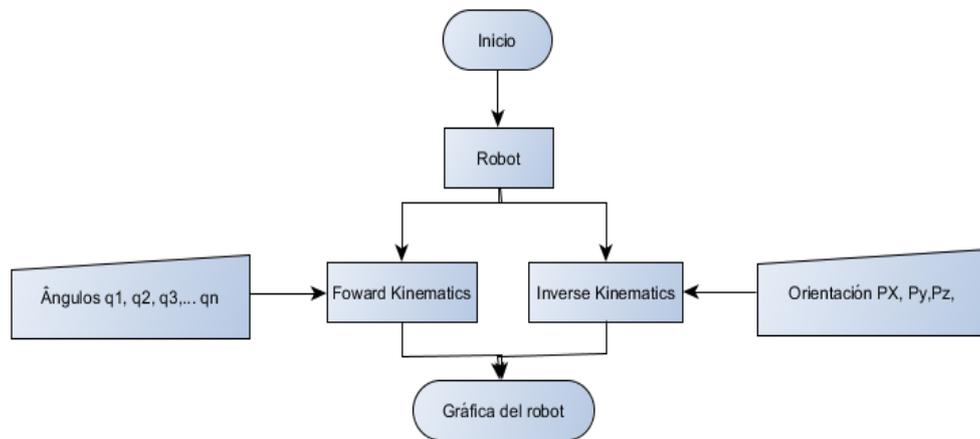


Figura 31: Cinemática robot

Fuente: Autor

Los datos que se ingresan para que el robot pueda posicionarse adecuadamente dependen de la cinemática a utilizar, lo que se puede evidenciar en la figura 31.

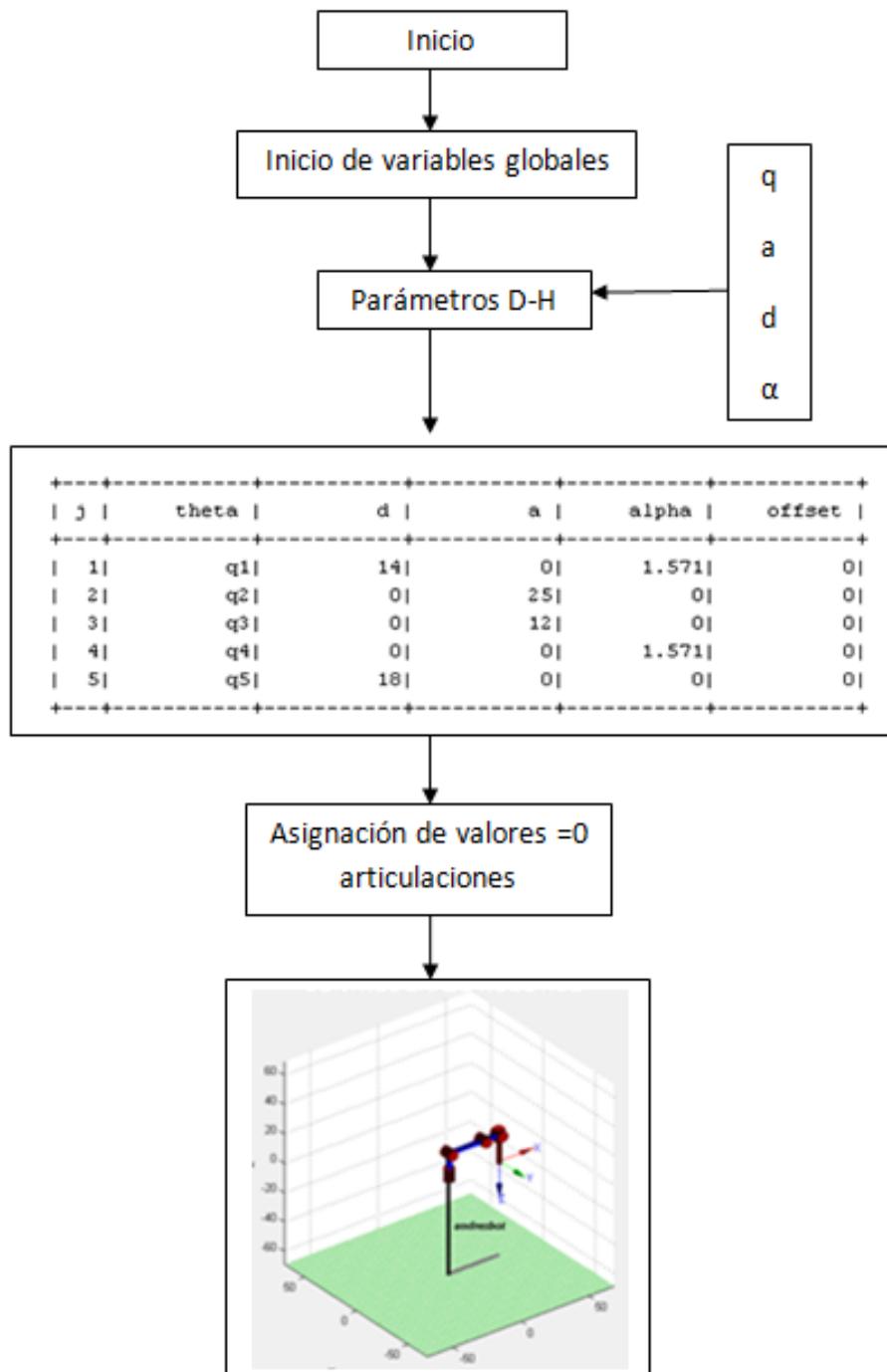


Figura 32: Diagrama de flujo #1

Fuente: Autor

El diagrama de flujo mostrado en la figura 32 demuestra la gráfica del brazo robótico, el cual depende de los parámetros D-H ingresados, además toma una posición inicial donde sus ángulos son igual a cero.

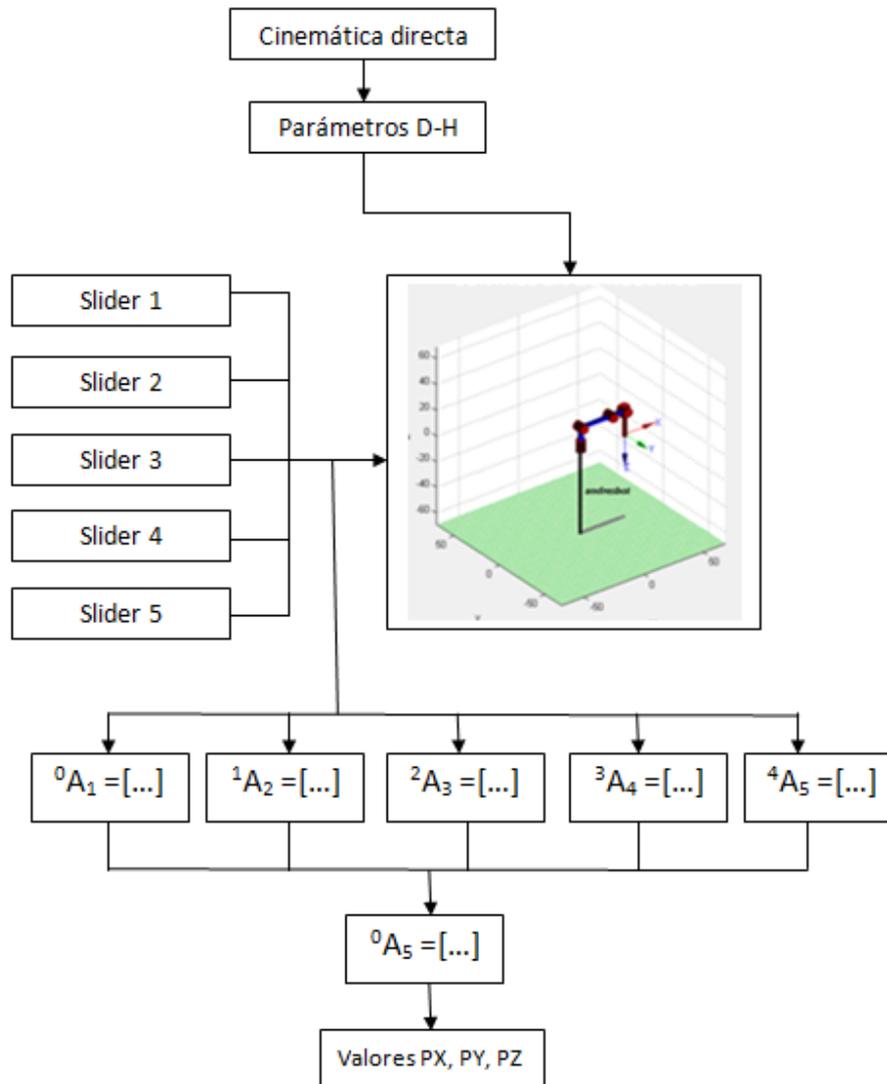


Figura 33: Diagrama de flujo # 2

Fuente: Autor

El desarrollo de la cinemática inversa depende de los ángulos de cada articulación. Con la ayuda de la matriz homogénea se obtiene la matriz de transformación que relaciona la base con el extremo del robot; obteniendo así la posición del extremo del robot. Esto se resume en la figura 33.

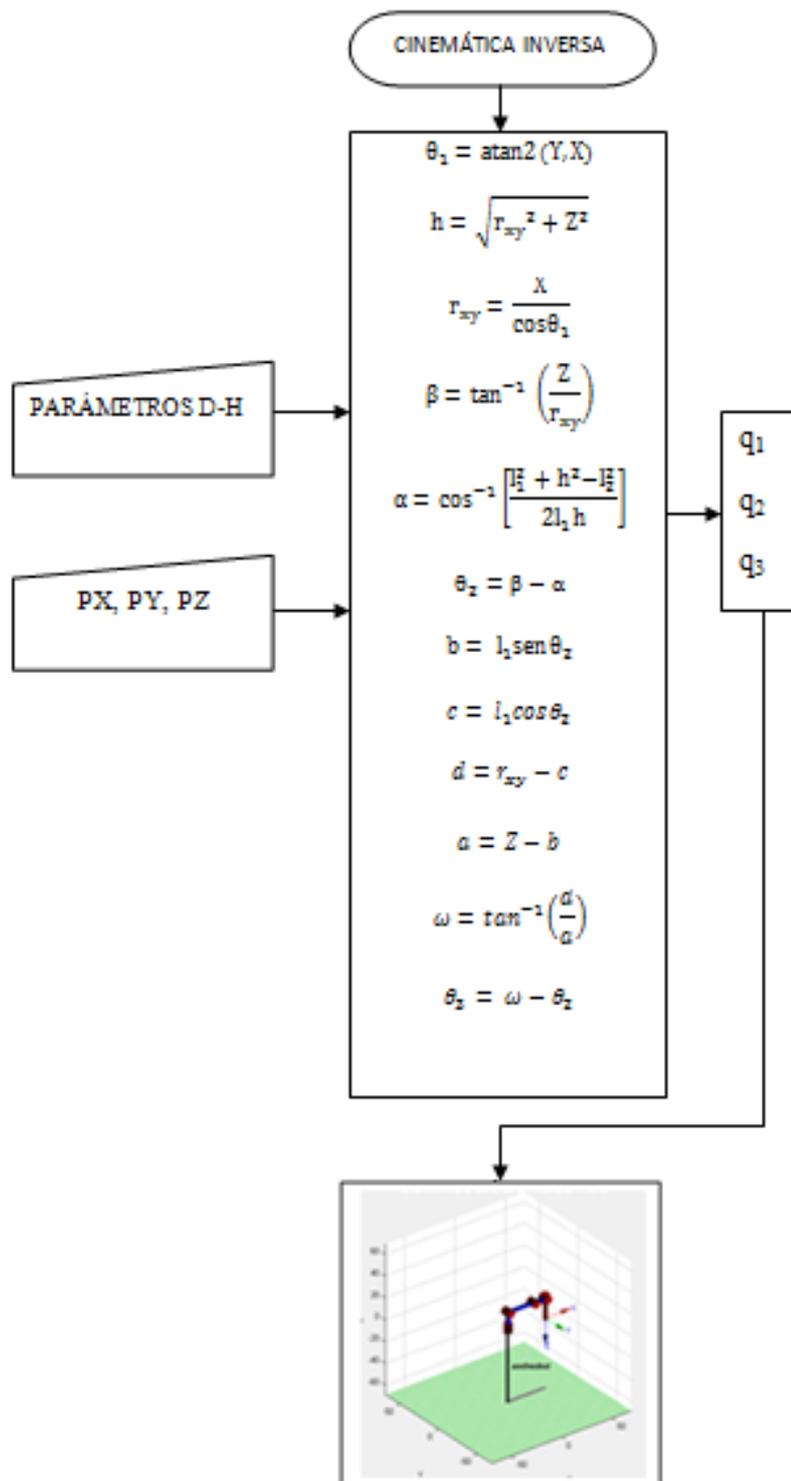


Figura 34: Diagrama de flujo # 3

Fuente: Autor

La resolución de la cinemática inversa se desarrolló por métodos geométricos. Se puede observar las ecuaciones necesarias para el cálculo en la figura 34, este método se lo utiliza para determinar la posición del extremo del robot.

Capítulo V: Pruebas de funcionamiento

5.1. Pruebas de funcionamiento

El software busca la comprobación del análisis numérico con una gráfica en 2-D que representa la posición que debe tomar el robot. En la figura 35 muestra la pantalla de inicio del programa donde indica los parámetros necesarios que se debe ingresar para proceder a realizar la gráfica del brazo robótico.

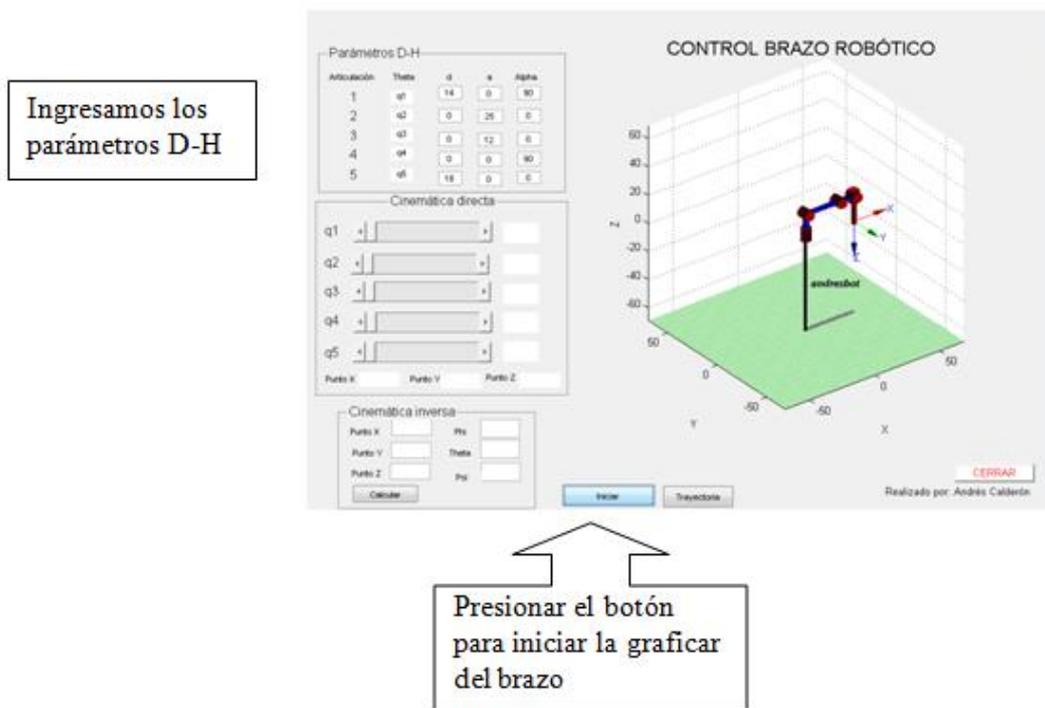


Figura 35: Prueba de funcionamiento N° 1

Fuente: Autor

Para el movimiento del brazo robótico se tiene una serie de barras que controlan el valor que debe tomar los ángulos de las respectivas articulaciones, quienes están comprendidos entre 0 a 180 grados, además con la ayuda de los cálculos de la cinemática directa observamos la posición en X, Y, Z que toma el efector final del brazo robótico. Todo esto se evidencia en la figura 36.

Ingresar los valores que tomarán las articulaciones

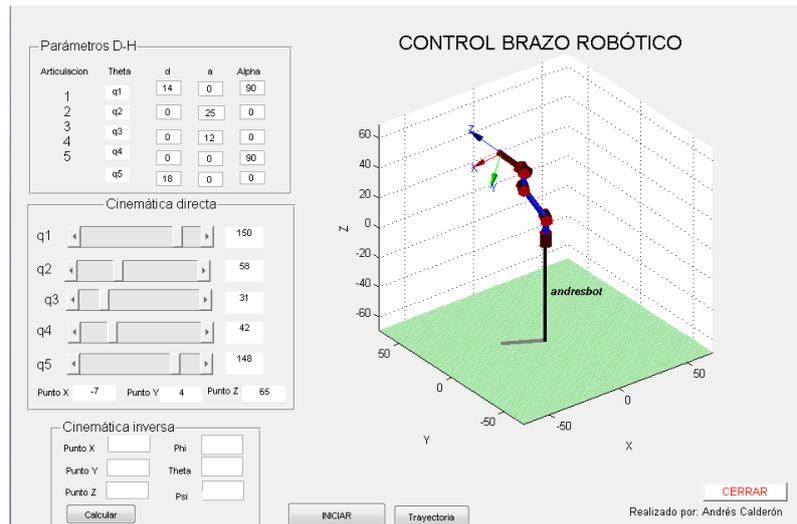


Figura 36: Prueba de funcionamiento cinemática directa

Fuente: Autor

Ingreso de posición en X, Y, Z

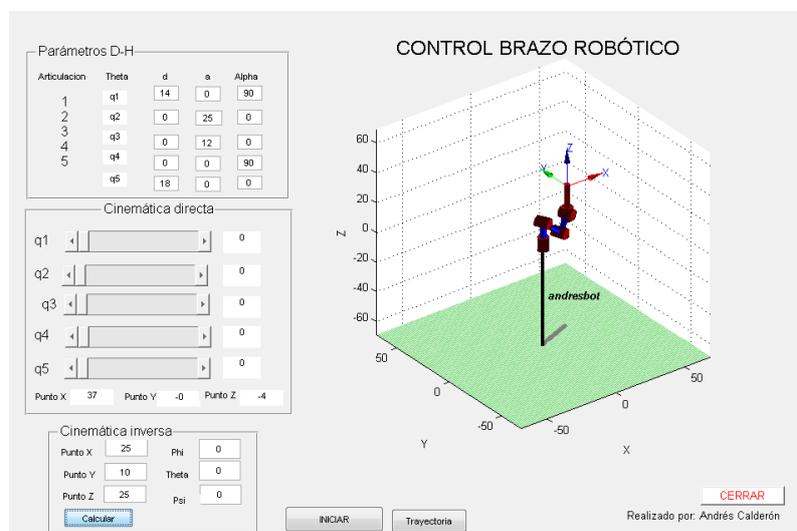


Figura 37: Prueba de funcionamiento cinemática inversa

Fuente: Autor

La figura 37 indica el funcionamiento de la cinemática inversa donde se ingresan los valores de posición X, Y, Z para que el brazo robótico determine el ángulo de las articulaciones, logrando posicionar al efector del extremo del robot en las coordenadas deseadas.

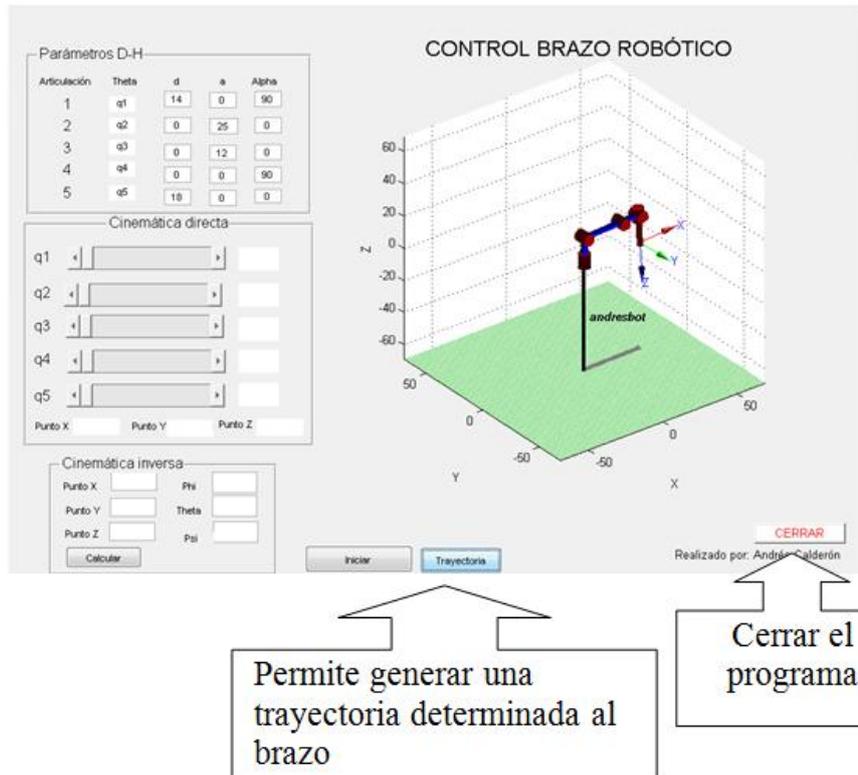


Figura 38: Funcionamiento botones faltantes

Fuente: Autor.

La interfaz cuenta con una aplicación de la cinemática, donde el brazo robótico parte de su posición inicial y se mueve por una trayectoria predeterminada hasta llegar otra vez a su punto de partida. Esto se observa en la figura 38.

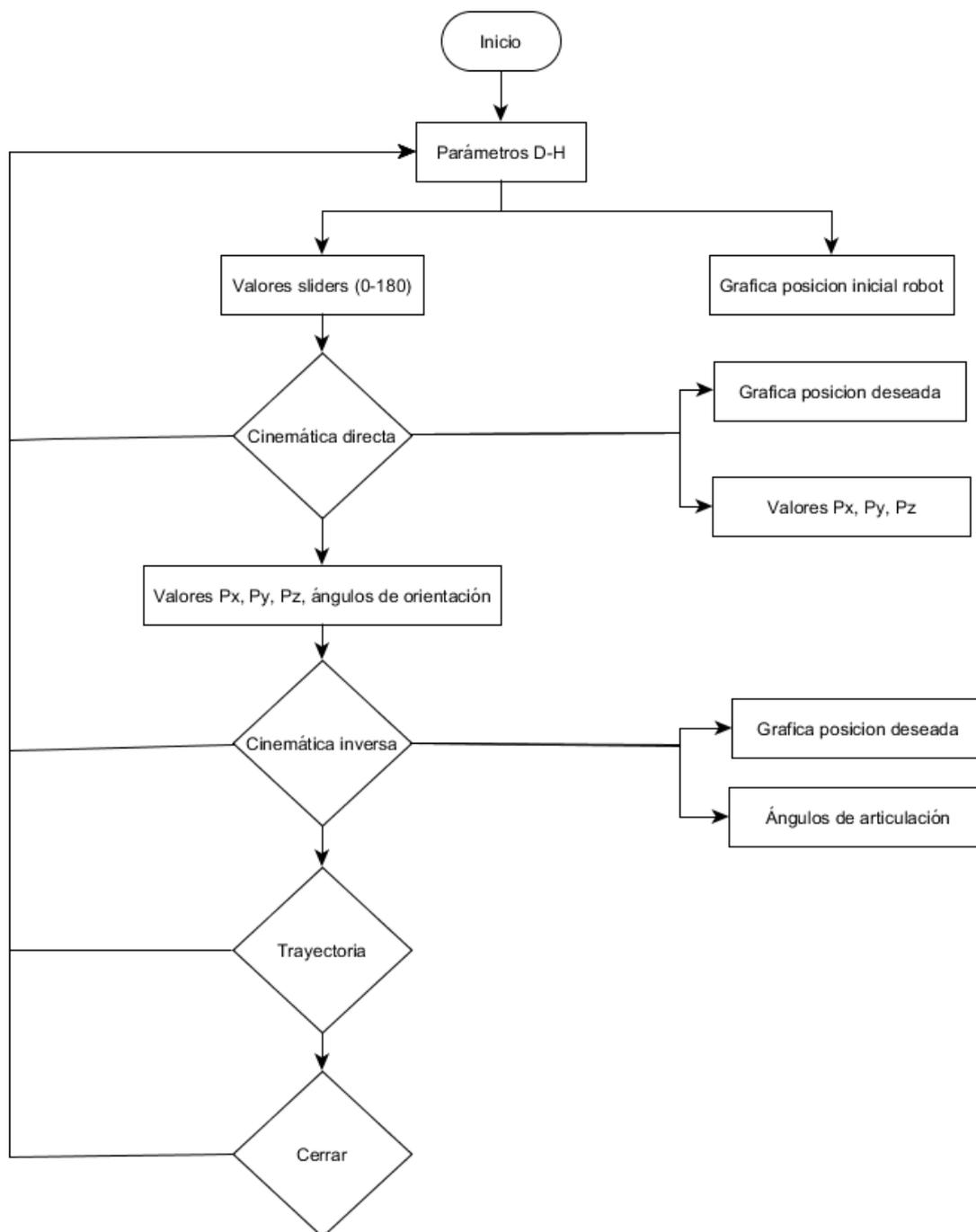


Figura 39: Diagrama de flujo GUI

Fuente: Autor

El diagrama de flujo expresado en la figura 39 representa las decisiones que toma el programa dependiendo de los datos ingresados para graficar al brazo robótico.

5.2. Resultados

Como se pudo evidenciar en el capítulo de la cinemática del robot se obtiene las ecuaciones necesarias para obtener los valores adecuados que debe tomar el brazo robótico para posicionarse, mientras que en el capítulo de simulación se observa la gráfica que toma el robot de acuerdo a los parámetros realizados.

Se empleará los siguientes datos para la comparación del método numérico con el método de simulación.

Tabla 3: Valores cálculo cinemática directa

Parámetro	Valor	Ecuación
d1	14 cm	(3), (4) y (5)
a2	25 cm	
a3	12 cm	
d5	18 cm	
q1	150°	
q2	58°	
q3	31°	
q4	42°	
q5	146°	

Reemplazamos los valores para obtener los puntos a los que llegará el robot.

Tabla 4: Resultados cinemática directa

Valores obtenidos matemáticamente	Valores obtenidos simulación
Px=-8.506	Px= -7
Py= 4.521	Py= 4
Pz= 67.08	Pz= 65

Los valores obtenidos en la tabla 2 se asemejan a los datos obtenidos en la simulación. La variación existente se debe a la utilización de todos los decimales al momento del cálculo.

El modelo cinemático inverso posiciona al robot de acuerdo a la posición deseada; los valores que afectan en gran parte el movimiento del robot son los 3 ángulos que se calculan con las siguientes ecuaciones para una solución codo abajo.

Tabla 5: Valores cálculo cinemática inversa

Parámetro	Valor	Ecuación
d1	14 cm	(11)-(12)
a2	25 cm	(13)-(14)
a3	12 cm	(15)-(16)
d5	18 cm	(17)-(18)
X	25 cm	(7)-(9)
Y	10 cm	(7)
Z	25 cm	(8)-(10)

Obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 6: Resultados cinemática inversa

Valores obtenidos matemáticamente	Valores obtenidos simulación
$\theta_1 = 0.424$	$\theta_1 = 0.5$
$\theta_2 = 16.412$	$\theta_2 = 18$
$\theta_3 = 16.265$	$\theta_3 = 18$

Los ángulos de orientación de la pinza robótica son igual a cero. La posición que toma el robot con los ángulos mostrados se evidencia en la figura 37. Al igual que en la cinemática directa los valores varían por la utilización de todos los decimales.

Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El software de simulación de un brazo robótico ayuda a la comprobación de los parámetros D-H, para poder obtener una simulación correcta del robot.
- La aplicación de las cinemáticas de un brazo robótico nos ayuda a comparar los resultados encontrados en el área de cálculo con una simulación del movimiento del brazo robótico.
- El software permite mostrar una trayectoria que puede tomar el brazo robótico para alcanzar la posición deseada.
- Se puede mejorar la interfaz a futuro, para la mejora en la transmisión del conocimiento.

6.2. Recomendaciones

- Se debe identificar correctamente los parámetros D-H para poder relacionar cada uno de los eslabones del robot.
- Los datos de ubicación del efector final del robot tienen que estar acorde a las dimensiones del brazo robótico, para no obtener resultados erróneos.
- Se recomienda el estudio de la materia de robótica, para poder entender los resultados obtenidos por la simulación del brazo robótico.
- Si necesita realizar algún cambio al programa se debe entender el funcionamiento del mismo, para no alterar las partes importantes.

Bibliografía

Libros:

- [1] Buenas tareas, 2012,
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Fundamentos-De-Robotica/3510311.html>.
 [Online]. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Fundamentos-De-Robotica/3510311.html>
- [2] Gonzalo Zabala, *Robotica.*, 2000.
- [3] Fernando Reyes, *Robotica: Control de manipuladores*. Barcelona: MARCOMBO, S.A., 2011.
- [4] Anibal Ollero, *Robotica, manipuladores y robots moviles*. España, 2001.
- [5] Groover Mikell,., 1989, p. 23.
- [6] Sebastian Dormido Bencomo, *Robotica: Control, detección, visión e inteligencia*. México: McGraw Hill, 1993.
- [7] Laurent Sass. (2010) Introduccion a la Robótica.
 [Online]. http://profesores.usfq.edu.ec/laurents/IME440/IME440_RobotManip.pdf
- [8] F., J. Mercader Ferrando,., 1993, pp. 100-106.
- [9] L. Montano, J. Tardós, and C. Sagúez,., 1988, pp. 251-261.
- [10] R. Pallas, *Transductores y acondicionadores de señal*. Barcelona, 1989.
- [11] (2008) El servomotor en radiocontrol.
 [Online]. <http://rc.lapipadelindio.com/general/servos-radiocontrol-modelismo>
- [12] Todorobot. (2012) Todorobot.
 [Online]. <http://www.todorobot.com.ar/documentos/servomotor.pdf>
- [13] R. P. Paul, *Homogeneous Transformation, en Robot Manipulators*. Massachussets: The MIT Press, 1981.
- [14] Pedro Sanz, "Introduccion a la robotica inteligente," pp. 17-28, 2006.
- [15] Omar Sanchez, *Cinematica de los Manipuladores.*, 2007.
- [16] John Craig, *Robótica*. México: PEARSON EDUCATION, 2006.
- [17] Kryscia Ramírez, *Cinémática inversa del robot*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [18] RC-Groups. (2000) rcgroups.
 [Online]. <http://www.rcgroups.com/forums/attachment.php?p=14355188>
- [19] Rafael Quinteros, *MATLAB para principiantes*,
 Primera edición ed., Anahit Ortiz, Ed. México, México: Jit Press, S.A. de C.V., 2012.
- [20] Peter Corke, *Robotics, Vision and control*. Australia: Advisory Board, 2011.
- [21] Victor Gonzalez. (2010) Robotica Industrial. [Online].
http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm
- [22] Isaac Asimov, *Visiones de robot.*, 2012.
- [23] M. Brady, *Robotics and Artificial Intelligence*. Massachusetts: Journal, 1985.
- [24] K Schlusel, "Robotics and artificial intelligence across the Atlantic and Pacific,"
IEEE Trans. Ind. Electron, pp. 244-251, 1983.
- [25] Javier Perez, "Diseño propio y construccion de un brazo robotico de 5GDL,"
Revista de Ingenieria Electrica, Electrónica y Computación, pp. 9-15, 2008.
- [26] Rafael Madrigal, *Robots industriales manipuladores*. España: Ediciones UPC, 2002.
- [27] Antonio Barrietos Cruz, *Fundamentos de robotica.*: McGrawHill 2da ed., 2007.

- [28] Javier Vargas and Ramirez Iliana, *Fisica Mecanica. Conceptos básicos*. Medellin: Fondo Editorial ITM, 2008.
- [29] Eddie Sobrado, *Tesis: SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO Y MANIPULACION DE OBJETOS UTILIZANDO UN BRAZO ROBOT*. Lima, Perú: Autor, 2003.
- [30] Jesús Otero, Sagid Rodriguez, and Gutierrez José, *Tesis: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO MECÁNICO DE TRES GRADOS DE LIBERTAD*. Pereira: Autor, 2008.
- [31] Salomon Abdala and Raul Ñeco, *Tesis: CARACTERIZACIÓN DE UN ROBOT MONOARTICULADO*. Cuernavaca, 2003.
- [32] Jesús Otero, Sagid Rodríguez, and Gutiérrez José, *Tesis: "Diseño y construccion de un brazo mecánico con tres grados de libertad"*. Pereira, 2008.

ANEXOS