

**DISEÑO DE UN MÓDULO PARA LA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE
DENAVID-HARTENBERG DE UN BRAZO ANTROPOMÓRFICO APLICADO AL
ÁREA DE AUTOMATIZACIÓN.**

**JUAN MIGUEL GARATEJO VÁSQUEZ
VÍCTOR MANUEL RAUDALES MACÍAS**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director de tesis

Wilmar Martínez Urrutia

Ingeniero electrónico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTA D.C

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Wilmar Martínez Urrutia
Firma del director

Nombre
Firma presidente jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C. Agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

(Dr.) Mario Posada García-Peña

Consejero institucional

(Dr.) Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

(Dra.) Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

(Dr.) Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

(Dr.) José Luis Macías Rodríguez

Decano de la facultad

(Dr.) Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

(Dra.) María Angélica Acosta Pérez

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres Nubia y Roberto, a mi prometida Valentina y a mi hija Annie y a todas las personas que me han apoyado en todo este proceso académico los cuales han sido un gran apoyo para mí por su presencia y palabras de aliento en los momentos difíciles.

Juan Miguel Garatejo Vásquez.

Este trabajo se lo dedico a mi madre Carolina, a mi padre Manuel, a mis hermanas Diana y Andrea, mi abuelita Lucila, a mi abuelo Manuel, a mi compañero de tesis, de vida y hermano Juan Miguel y agradezco a todos mis familiares y amigos por darme palabras de aliento cuando las necesité, de apoyarme cuando sentía que iba a desfallecer y por darme la mano cuando no encontraba el rumbo. De igual forma, a todas aquellas personas que conocí en esta etapa tan especial y que me han guiado, aconsejado, ayudado y orientado a cumplir una meta tan especial como lo es ser un profesional.

Víctor Manuel Raudales Macías.

AGRADECIMIENTOS

Les agradezco a mis padres por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, por apoyarme durante todo este tiempo, por estar conmigo en los momentos adversos, por siempre darme su palabra de aliento y siempre depositar su fe en mí. De igual manera, agradezco al ingeniero Wilmar Martínez que continuamente mostró su interés en este proceso, por acompañarnos y guiarnos para cumplir esta aspiración. Finalmente, agradezco a todos los docentes que han contribuido a mi formación como profesional.

Juan Miguel Garatejo Vásquez.

Primeramente, le agradezco a Dios, a mis padres por darme el privilegio de estudiar esta carrera, por todo el esfuerzo que han hecho para que me encuentre hoy acá y por todas las enseñanzas que me han convertido en el hombre que soy. A mis hermanas por sus consejos, ánimos, y compañía en los momentos en que más lo necesité. Ustedes son la razón por la cual busco siempre el mejorar, para que se enorgullezcan de mí. A mi abuela por la motivación que siempre me dio cuando sentí que no podía lograrlo, por la fuerza que siempre me brindó para no decaer y por darme incluso, lo que no tuvo. A mi abuelo por acompañarme en todo momento, en cualquier lugar y darme esta bonita pasión por lo que hago. A mi hermano Juan, por ayudarme cuando no entendía las cosas, por acompañarme en este nuevo tramo, por guiarme cuando lo necesité y por permanecer en mi vida. A nuestro director, Wilmar Urrutia, por su compañía incondicional, su buena disposición en todo momento y por el conocimiento brindado a lo largo de mi carrera y su guía en este maravilloso proyecto. Finalmente, agradezco a toda mi familia, amigos, compañeros por brindarme su apoyo y comprensión en esta nueva etapa que culmina.

Víctor Manuel Raudales Macías.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1Antecedentes	2
<i>1.1.1 Historia de los brazos robóticos</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2 Importancia de la robótica en la pedagogía</i>	<i>7</i>
1.3 Planteamiento del problema	10
1.4 Justificación	13
1.5 Delimitación	15
1.6 Diseño metodológico	16
<i>1.6.1 Búsqueda de información de brazos robóticos</i>	<i>16</i>
<i>1.6.2 Parámetros básicos</i>	<i>17</i>
<i>1.6.3 Alternativas de diseño</i>	<i>17</i>
<i>1.6.4 Búsqueda de información de brazos antropomórficos</i>	<i>17</i>
<i>1.6.5 Diseño conceptual</i>	<i>17</i>
<i>1.6.6 Diseño en detalle del brazo robótico</i>	<i>17</i>
<i>1.6.7 Revisión de los sistemas de control implementados en la universidad</i>	<i>18</i>
<i>1.6.8 Adaptación de los sistemas estudiados para el control del brazo robótico</i>	<i>18</i>
<i>1.6.9 Desarrollo de los manuales de mantenimiento, operación y guía de laboratorio</i>	<i>18</i>
1.7 Objetivo general	18
<i>1.7.1 Objetivos específicos</i>	<i>18</i>
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Conceptos básicos	19
<i>2.1.1. Brazo robótico</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2. Grados de libertad</i>	<i>19</i>
<i>2.1.3. Cinemática</i>	<i>19</i>
2.2 Clasificación de los brazos robóticos	20
<i>2.2.1 De acuerdo a sus grados de libertad</i>	<i>20</i>
2.3 Cinemática posicional del brazo robótico	21
<i>2.3.1 Cinemática directa</i>	<i>22</i>
<i>2.3.2 Cinemática inversa</i>	<i>22</i>
2.4 Herramientas matemáticas para la localización espacial	22
<i>2.4.1 Matrices de rotación</i>	<i>22</i>
<i>2.4.2 Ángulos de Euler</i>	<i>22</i>

2.4.3 <i>Matrices de transformación homogénea</i>	23
2.5 Algoritmo de Denavit-Hartenberg	24
2.5.1 <i>Paso a paso para el Algoritmo de Denavit-Hartenberg</i>	25
2.6 Morfología del brazo robótico	26
3. DISEÑO	34
3.1 Alternativas de diseño	35
3.2 Brazo robótico antropomórfico	37
3.3 Diseño conceptual	38
3.3.1 <i>Parámetros preliminares de diseño</i>	39
3.4 Diseño detallado del brazo robótico	40
3.4.1 <i>Diseño de la base</i>	43
3.4.2 <i>Diseño del hombro</i>	44
3.4.3 <i>Diseño del eslabón hombro-codo.</i>	45
3.4.4 <i>Diseño del eslabón muñeca-codo.</i>	46
3.4.5 <i>Diseño de unión muñeca-electroimán</i>	47
3.4.6 <i>Análisis en condición estática</i>	48
3.4.7 <i>Selección de los motores</i>	65
3.4.8 <i>Análisis velocidades y aceleraciones</i>	69
3.4.9 <i>Matrices jacobianas</i>	78
3.4.10 <i>Interfaz de control</i>	79
3.4.11 <i>Prueba del servomotor</i>	97
3.4.12 <i>Volumen espacial de trabajo.</i>	102
3.5 Simulador y emulador	104
3.5.1 <i>Interfaz del simulador</i>	104
3.6 Prototipado	106
4.RESULTADOS	110
4.1 Validación del algoritmo de Denavit-Hartenberg en el módulo didáctico	111
4.1.1 <i>Demostración geométrica</i>	111
5.MANUAL DE MANTENIMIENTO, OPERACIÓN Y GUIA DE LABORATORIO	131
5.1 Manual de operación	131
5.1.1 <i>Verificación antes de la operación</i>	131
5.1.2 <i>Operación en la interfaz</i>	132
5.2 Manual de mantenimiento	144
5.2.1 <i>Inspecciones a realizar</i>	147

5.2.2 <i>Tablas de fallas</i>	148
5.2.3 <i>Repuestos</i>	150
6. ESTUDIO FINANCIERO	151
6.1 Costos de ingeniería de diseño	151
6.2 Costos de materiales	152
6.3 Costos de fabricación	152
7. CONCLUSIONES	156
BIBLIOGRAFÍA	157

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Diseños Leonardo da Vinci	2
Figura 2. Detalle del Robot Drummer	3
Figura 3. Jugador de ajedrez de Wolfgang von Kempelen	4
Figura 4. Brazo robótico de William Pollard.	5
Figura 5. Brazo robótico Unimate	6
Figura 6. Brazo robótico Stanford	7
Figura 7. UNAL brazo robótico.	9
Figura 8. Diseño de un brazo robótico para utilizar en un laboratorio de automatización.	10
Figura 9. Planteamiento del problema.	11
Figura 10. The two major customers struggled in 2019 “IFR Press Conference”	12
Figura 11. Gráfica de distribución global de proveedores de robots de servicio	14
Figura 12. Diseño metodológico.	16
Figura 13. Tipos de brazos robóticos	21
Figura 14. Diagrama entre cinemática directa e inversa	21
Figura 15. Ángulos de Euler: roll, pitch y yaw	23
Figura 16. Matriz de transformación homogénea	23
Figura 17. Matriz de transformación homogénea resultante	24
Figura 18. Parámetros D-H para un eslabón giratorio.	25
Figura 19. Distintos tipos de articulaciones para robots.	27
Figura 20. Pinza neumática de dedos paralelos.	32
Figura 21. Zona de trabajo brazo robótico	34
Figura 22. Imagen de robot antropomórfico	38
Figura 23. Imagen del brazo robótico KUKA	41
Figura 24. Imagen del robot antropomórfico.	42
Figura 25. Imagen de la base del robot	44

Figura 26. Imagen del hombro del robot	45
Figura 27. Imagen del eslabón hombro-codo	46
Figura 28. Imagen del eslabón muñeca-codo	47
Figura 29. Imagen de unión muñeca-electroimán	48
Figura 30. DCL objeto a cargar.	49
Figura 31. DCL electroimán	50
Figura 32. DCL unión electroimán-muñeca	51
Figura 33. DCL eslabón muñeca-codo	52
Figura 34. DCL eslabón hombro-codo	53
Figura 35. Gráfica de fuerza cortante eslabón muñeca-codo	54
Figura 36. Gráfica de momento flector eslabón muñeca-codo	55
Figura 37. Funciones de singularidad	56
Figura 38. Condición funciones de singularidad.	56
Figura 39. Condición funciones de singularidad.	56
Figura 38. Momento de inercia.	59
Figura 39. Sección transversal eslabón muñeca-codo	59
Figura 40. Gráfica de fuerza cortante eslabón hombro-codo	61
Figura 41. Gráfica de momento flector eslabón hombro-codo	62
Figura 42. Sección transversal eslabón codo-hombro	64
Figura 43. Servomotor MG995	65
Figura 44. Servomotor MG996R	66
Figura 45. Servomotor MG996R	67
Figura 46. Posición #1	70
Figura 47. Posición #2	73
Figura 48. Posición #3	76
Figura 49. Expresión de matriz jacobiana	79
Figura 50. Interfaz gráfica	80

Figura 51. Interfaz gráfica botón cinemática directa	81
Figura 52. Interfaz gráfica botón cinemática inversa	81
Figura 53. Interfaz gráfica posiciones del efector final	82
Figura 54. Interfaz gráfica ángulos de las articulaciones	82
Figura 55. Interfaz gráfica control de velocidad	83
Figura 56. Interfaz gráfica archivo “Interfaz.fig”	84
Figura 57. Programación “Interfaz.m”	85
Figura 58. Programación función “btn_directa”	86
Figura 59. Programación función “Slider1”	87
Figura 60. Programación función “btn_inversa”	88
Figura 61. Programación función “figure1_Closerequest”	89
Figura 62. Programación función “Secuencias”	89
Figura 63. Interfaz gráfica secuencias	90
Figura 64. Interfaz gráfica secuencias selección de modo	90
Figura 65. Interfaz gráfica secuencias número de movimientos	91
Figura 66. Interfaz gráfica secuencias número de movimientos	91
Figura 67. Interfaz gráfica secuencias animación	92
Figura 68. Interfaz gráfica secuencias.fig animación	93
Figura 69. Programación función “correr”	94
Figura 70. Programación función “correr_p”	96
Figura 71. Diagrama de flujo interfaz gráfico	97
Figura 72. Arduino UNO	98
Figura 73. Servomotor MG995	98
Figura 74. Conexión Arduino-Matlab.	99
Figura 75. Montaje Arduino-Servomotor en Tinkercad	99
Figura 76. Montaje Arduino-Servomotor	100
Figura 77. Programación prueba del servomotor	100

Figura 78. Montaje Arduino-Servomotor con fuente externa en Tinkercad	101
Figura 79. Montaje Arduino-Servomotor con fuente externa	102
Figura 80. Volumen espacial.	103
Figura 81. Error de rango.	103
Figura 82. Interfaz gráfica simulador	105
Figura 83. Interfaz gráfica simulador “Secuencias”	105
Figura 84. Exportación modelos 3D a. STL	106
Figura 85. Archivos. STL en Ultimaker Cura	107
Figura 86. Variables de la impresión 3D en Ultimaker Cura.	108
Figura 87. Programa Chitubox para impresión 3D.	108
Figura 88. Coordenadas en el simulador	110
Figura 89. Configuración brazo robótico	112
Figura 90. Ángulos de rotación en el brazo robótico	113
Figura 91. Convenciones de configuración de brazo antropomórfico.	114
Figura 92. Eslabones 2 y 3 en el plano r, z	116
Figura 93. Verificación en Matlab del método geométrico 1 Posición	118
Figura 94. 2 posición de estudio	120
Figura 95. 3 posición de estudio	122
Figura 96. 4 posición de estudio	124
Figura 97. 5 posición de estudio	127
Figura 98. Comparación posición.	130
Figura 99. Conexión para los servomotores	132
Figura 100. Interfaz gráfica secciones	133
Figura 101. Interfaz gráfica	134
Figura 102. Introducir los valores articulares q_1, q_2, q_3.	135
Figura 103. Modificación de la velocidad directa.	136
Figura 104. Interfaz con la simulación directa	136

Figura 105. Introducir los valores efector final X, Y, Z.	137
Figura 106. Modificación de la velocidad.	138
Figura 107. Interfaz con la simulación inversa	138
Figura 108. Botón de “Pasar a secuencias”	139
Figura 109. Sección secuencias selección de modo.	139
Figura 110. Sección secuencias número de movimientos	140
Figura 111. Sección secuencias movimientos	140
Figura 112. Interfaz gráfica secuencias animación	141
Figura 114. Medición de ángulos.	143
Figura 115. Medición de ángulos.	143
Figura 116. Brazo robótico antropomórfico / angular / articular	144
Figura 117. Estructura mecánica brazo robótico antropomórfico	145
Figura 118. Servomotor (Actuador)	145
Figura 119. Electroimán (Elemento terminal)	146
Figura 120. Brazo robótico lynxmotion AL5DF-KT-32U.	154

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Sistema de transmisión para robots	28
Tabla 2. Características de los distintos tipos de actuadores	29
Tabla 3. Tipos de sensores internos de robots	30
Tabla 4. Sistemas de sujeción para robots.	31
Tabla 5. Herramientas terminales para robots	33
Tabla 6. Diseño conceptual	39
Tabla 7. Parámetros básicos de diseño	39
Tabla 9. Parámetros algoritmo D-H	40
Tabla 10. Inspecciones a realizar	147
Tabla 11. Tabla de fallas	148
Tabla 12. Tabla de repuestos	150
Tabla 13. Costos de ingeniería de diseño.	151
Tabla 14. Costos de materiales.	152
Tabla 15. Costos de materiales.	152
Tabla 16. Costos de materiales.	153
Tabla 17. Costos total brazo.	153

RESUMEN

Este proyecto se realizó con el fin de diseñar un brazo robótico con fines didácticos, cuya principal función es el soporte para las metodologías de enseñanza impartidos por los docentes en los laboratorios. El implementar el uso de una herramienta muy implementada en las industrias actualmente, significa un acercamiento positivo y enriquecedor para los estudiantes, debido a que el simular un ambiente de trabajo con dispositivos que hoy en día toman mucha más fuerza, resulta ser un gran complemento con los conocimientos impartidos por los docentes.

En la actualidad, la industria 4.0 se ve inmersa en cada vez más empresas de diferentes sectores, al generar grandes contribuciones en la mejora de la calidad y la rapidez con que se efectúan los procesos. Esto se logra al llevar a cabo la estrategia de automatizar las etapas de elaboración de los productos con ayuda de equipos mecatrónicos, dentro de los cuales vamos a resaltar los brazos robóticos. Los brazos robóticos debido a su similitud con las extremidades superiores humanas, resultan ser bastante versátiles y funcionales con un amplio rango de actividades, ejecutándose de la mejor forma.

Al ser este el panorama actual y futuro de las empresas, es necesario adecuar y actualizar la metodología con que los conocimientos se imparten en las aulas a lo que demanda la industria; esto con el fin de capacitar de forma adecuada a los futuros profesionales que se incorporarán a estos espacios de trabajo.

En este trabajo se hizo la selección de un brazo robótico tipo antropomórfico, debido a que presenta una mayor cantidad de similitudes con nuestra referencia humana, siendo esta una alternativa con un amplio campo de trabajo. Además, requiere de un estudio más completo con respecto a los análisis de posición, velocidad, aceleración, fuerza, que demanda el diseño de la herramienta.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó previamente una conceptualización de los términos mínimos que se requieren saber para el desarrollo de este proyecto; se prosigue con establecer los parámetros básicos que se necesitan para la siguiente etapa que es el diseño, donde se realizan los estudios de las propiedades nombradas anteriormente y el desarrollo de la interfaz de comunicación humano-máquina. Por otro lado, se tienen los manuales de operación, mantenimiento y guías de laboratorio que cumplen la función de un uso óptimo de la herramienta y se concluye con un breve análisis financiero acerca de los costos que conlleva la realización de este proyecto.

Palabras clave: Robótica, antropomórfico, automatización, industria 4.0 ,Denavit-Hartenberg.

1.INTRODUCCIÓN

Hoy en día la industria 4.0 ha tomado cada vez más fuerza debido a la optimización que genera en las empresas la automatización de los procesos realizados en estas; obteniendo mejoras en la calidad de los productos, bajas en los tiempos necesarios y disminución en los costos que conlleva la fabricación de cualquier producto. Este cambio se ha hecho cada vez más común en las empresas de cualquier sector, debido a los puntos positivos que este genera en recursos monetarios y en el crecimiento de diferentes aspectos empresariales.

El campo de la automatización es uno de los muchos donde un ingeniero mecánico se puede desempeñar debido a los conocimientos obtenidos y de los cuales a medida que el tiempo pasa, abarca diversos sectores debido al gran impacto que genera. Este campo se enfoca en darle autonomía a los distintos protagonistas de los procesos, siendo estos, robots con tareas preestablecidas y con la facilidad de configurar las mismas, dependiendo de las necesidades de la empresa.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario para los futuros ingenieros, que estos conocimientos sean compartidos desde tempranas etapas de la carrera, debido a su relevancia en las presentes y futuras industrias. Por lo mismo, la interacción con equipos muy comunes en esta industria, como el brazo robótico, resulta de gran ayuda para incentivar la investigación y el interés de los estudiantes; lo cual ayuda a consolidar de una forma más sólida los conocimientos necesarios para ejercer la ingeniería en campos relacionados con esta disciplina.

En este trabajo se busca relacionar estudios mecánicos como lo son análisis estáticos, de velocidad y aceleración, de materiales, etc. ... con conceptos básicos de robótica como lo es el algoritmo de Denavit-Hartenberg, el cual ayuda al estudio de las posiciones del robot; esto se realiza con el fin de sentar bases en las cuales se pueda realizar un estudio más elaborado en la universidad de América, para llegar a generar el avance que se necesita en los campos que hoy en día demandan las industrias. De este trabajo se obtendrá un módulo didáctico el cual está compuesto por un brazo robótico antropomórfico diseñado con base en modelos genéricos y una interfaz de control humano-máquina para la cercanía a la cual se desea llegar con este proyecto, el cual se enfocará en el campo de automatización industrial y el cual ayudará para validar el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Historia de los brazos robóticos

A lo largo de la historia, el ser humano ha tenido un gran interés por las máquinas, mecanismos, dispositivos y aparatos que puedan llegar a suplir una necesidad o reemplazar una actividad realizada por el ser humano, según Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: **automatos**. De esta palabra deriva el actual autómatas [1], gracias a este gran interés se puede observar como el área de la robótica ha evolucionado llegando a muchos campos, como los son la medicina, la industria manufactura e incluso robots para actividades domésticas.

Descripción de los prototipos de brazos robóticos más relevantes.

- **El robot de Da Vinci** : Leonardo Da Vinci diseñó su primer robot en diciembre 1478, el cual es un mecanismo de potencia que cuenta con tracción delantera, una dirección de piñón y cremallera (figura 1), en 1495 diseñó el primero de varios robots humanoides, según la investigación del instituto y museo de historia en Florencia su robot podría abrir y cerrar su mandíbula, sentarse, agitar los brazos y mover la cabeza, este robot contaba con dos sistemas independientes, las extremidades inferiores que contaban con 3 grados de libertad: piernas con tobillos, rodillas y cadera; las extremidades superiores tenían cuatro grados de libertad: brazos con hombros, codos, muñecas y manos articulados (figura 2).[23] [24]

Figura 1.

Diseños Leonardo da Vinci



Nota: Carro animado con tracción delantera, dirección de piñón y cremallera de Leonardo da Vinci, fotos cortesía de Biblioteca Ambrosiana en Milán. Moran, M. E., (May 1,2007). Tomado de: "Evolution of robotic arms." *J Robotic Surg.* Available: <https://search.datacite.org/works/10.1007/s11701-006-0002-x>.

Figura 2.

Detalle del Robot Drummer (del Codex Atlanticus 55r [notas de Da Vinci]) creado por Gabriele Niccolai, de Florencia, Italia.

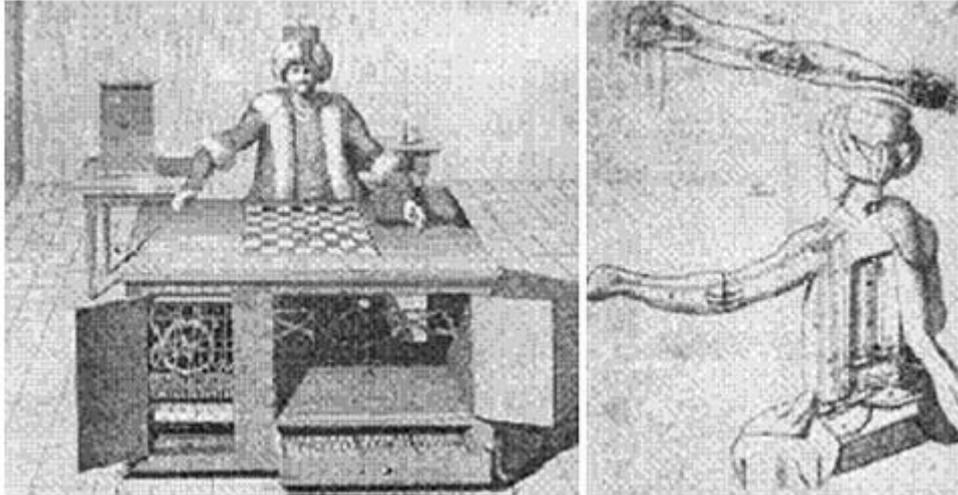


Nota: Detalle del Robot Drummer (del Codex Atlanticus 55r [notas de Da Vinci]) creado por Gabriele Niccolai, de Florencia, Italia. Tomado de: Key to legendary mechanical lion found in code for Leonardo Da Vinci's robot. Available:<https://www.news.com.au/technology/da-vicinis-robot/news-story/a72faa349b70221263e4ede498d738a8#.olz0t>.

- **Jugador de ajedrez:** En 1769 Wolfgang Von Kempelen construyó “El Turco” el cual era un jugador de ajedrez tallado en madera con vestimenta de turco, poseía un sistema de engranajes, el cual le permitía mover el brazo izquierdo y ejecutar movimientos en el tablero, este sistema era controlado por otra persona, el brazo se podía mover de arriba a abajo, la muñeca podía rotar y los dedos podían abrir y cerrar para sujetar la ficha de ajedrez. (ver figura 3). [14]

Figura 3.

Jugador de ajedrez de Wolfgang von Kempelen

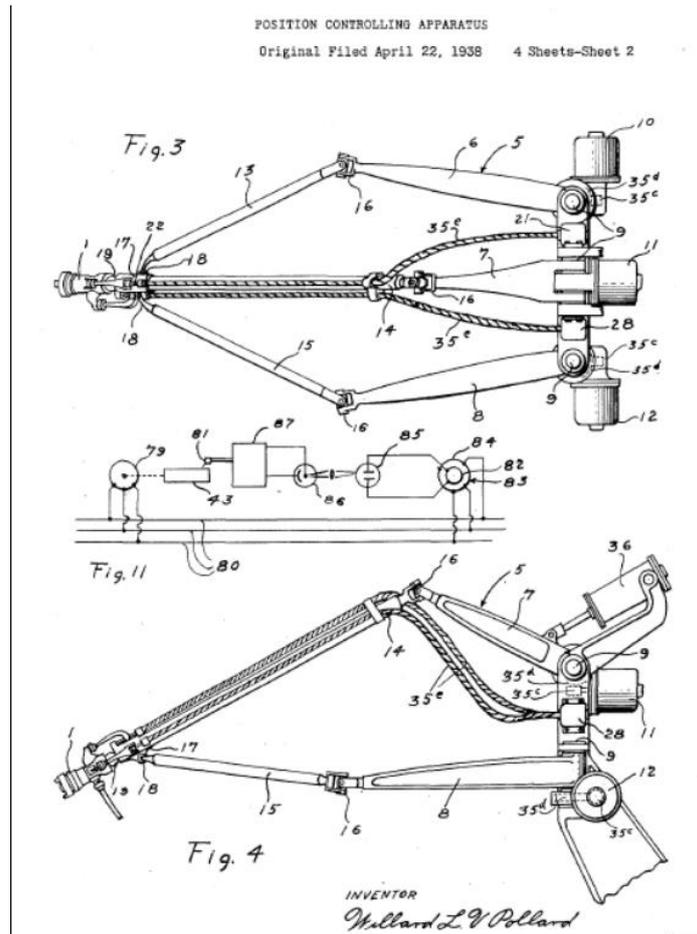


Nota: Jugador de ajedrez con mecanismos ilustrados del brazo izquierdo. Tomado de: Moran, M. E., (May 1,2007)."Evolution of robotic arms." *J Robotic Surg.* Available: <https://search.datacite.org/works/10.1007/s11701-006-0002-x>.

- **Brazo robótico Pollard:** En 1938 con el gran desarrollo tecnológico William Pollard patentó un brazo robótico para pintar con spray que contaba cinco grados de libertad y un sistema de control eléctrico, este brazo nunca fue construido, pero su gran detalle en el diseño fue un gran pionero para desarrollar este tipo de tecnología. (ver figura 4). [14]

Figura 4.

Brazo robótico de William Pollard.



Nota: Diseño en detalle del brazo robótico de William Pollard. Tomado de: Moran, M. E., (May 1,2007)."Evolution of robotic arms." *J Robotic Surg.* Available: <https://search.datacite.org/works/10.1007/s11701-006-0002-x>.

- **Brazo robótico Unimate:** En 1962 el brazo robótico inventado por George Devol y comercializado por Joseph Engelberger, fue el primer brazo robótico industrial el cual se instaló en la planta General Motors en Tennstedt Nueva Jersey, fue utilizado para la automatización en un proceso de fundición, el cual fue un éxito, después de este gran éxito se vendieron más de 8500 unidades, esto dio paso a la primera compañía de robótica llamada Unimation. (ver figura 5). [14]

Figura 5.

Brazo robótico Unimate

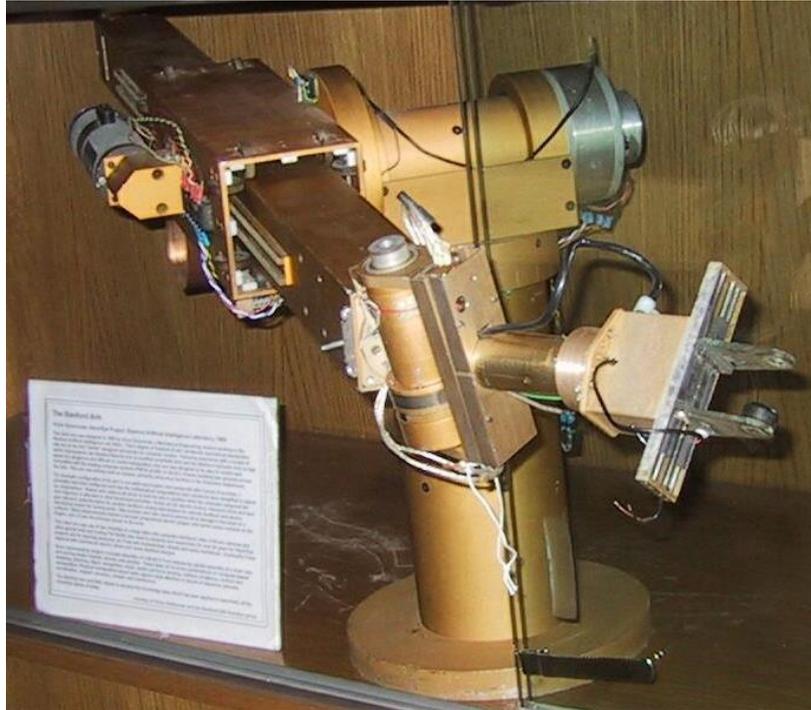


Nota: Brazo robótico Unimate(derecha), dibujo en perspectiva del brazo robótico Unimate(izquierda). Tomado de: Moran, M. E., (May 1,2007)."Evolution of robotic arms." *J Robotic Surg.* Available: <https://search.datacite.org/works/10.1007/s11701-006-0002-x>.

- **Brazo robótico Stanford:** A partir del desarrollo de esta tecnología se procedió a investigar a profundidad este campo llegando así a investigaciones, como lo fue en el instituto de investigación de Stanford, donde Victor Scheinman trabajo en un brazo articulado el cual podía moverse en 6 ejes, cumpliendo con tareas más complejas. (ver figura 6). [14]

Figura 6.

Brazo robótico Stanford



Nota: Brazo robótico Stanford exhibido. Tomado de: Moran, M. E., (May 1,2007)."Evolution of robotic arms." *J Robotic Surg.* Available:

<https://search.datacite.org/works/10.1007/s11701-006-0002-x>.

1.1.2 Importancia de la robótica en la pedagogía

Debido a que el mundo está pasando por una revolución tecnológica donde podemos observar que cada día se incrementa la implementación de la robótica en la industria, en especial el uso de los brazos robóticos, la industria 4.0 que hoy en día está en busca de una mayor optimización a los procesos desarrollados a nivel industrial, enfoca sus avances en hacer uso de herramientas robotizadas con el fin de mejorar la calidad de los procesos realizados y los productos obtenidos en las empresas. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario enfocar la capacitación de los estudiantes en las competencias necesarias para desempeñarse en un campo laboral donde la máquina poco a poco va obteniendo independencia para ejecutar sus labores. [16] [4]

La robótica hoy en día es una alternativa muy buena para su implementación en las aulas, debido a que el uso mejora aspectos como la resolución de problemas, el ejercicio de la

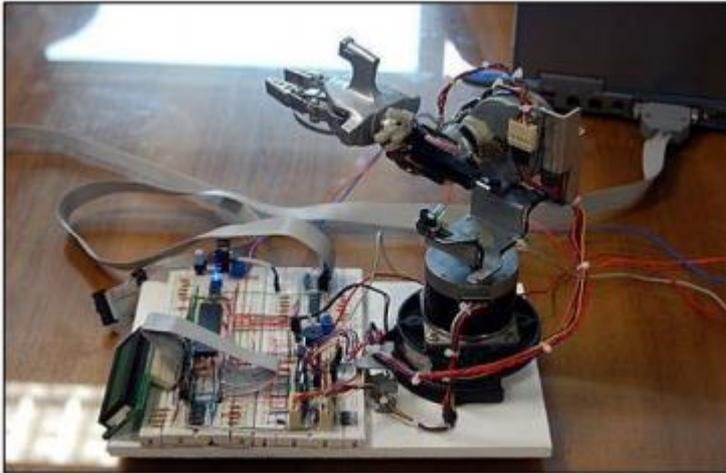
imaginación y de igual forma, genera una atracción y curiosidad por los temas que se van desarrollando. Este último aspecto resulta ser de mucha relevancia debido a que en las aulas la pérdida de la atención durante las clases es algo muy común por aspectos como cansancio, lo disperso que se pueda encontrar en el momento y uno muy crítico como la falta de interés por la misma. El hacer más atractiva una clase con lo didáctico que se puede volver para los estudiantes, es una clave para la adecuada recepción de lo entregado por el docente por parte del estudiante.

Dado a que el uso de la robótica requiere conocimientos en matemáticas, física, electrónica, mecánica informática, resulta ser una ayuda considerable para ejercitar varios conceptos que en una carrera de ingeniería son necesarios para la solución de diversas situaciones y complementa con la capacitación necesaria para el uso de este tipo de herramientas en la industria y ejercitar el manejo intuitivo del mismo en alguna situación inesperada donde se requiera de un manejo diferente. [16] [4]

En algunas universidades del país, la implementación de estas herramientas se ha visto inmersa en el método de educación de los alumnos. Hay que recalcar que, son proyectos hechos por los mismos estudiantes, lo cual representa el interés de los mismos por este tipo de investigación y tecnología. Entre algunos ejemplos se tiene un brazo robótico realizado por estudiantes de primer semestre de la UN en Medellín. (ver figura 7)

Figura 7.

UNAL brazo robótico.

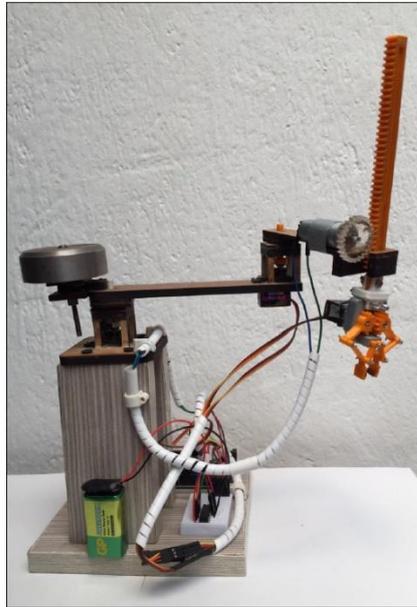


Nota: Brazo realizado en la UNAL de Colombia. Tomado de: Brazo robótico, producto del ingenio de estudiantes UNAL. Available: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/brazo-robotico-producto-del-ingenio-de-estudiantes-un.html>.

Por otro lado, se tiene un brazo realizado en un proyecto de grado para optar por el título de ingeniero mecánico desarrollado en la universidad de América. (ver figura 8)

Figura 8.

Diseño de un brazo robótico para utilizar en un laboratorio de automatización.



Nota: Brazo realizado en la universidad de América.

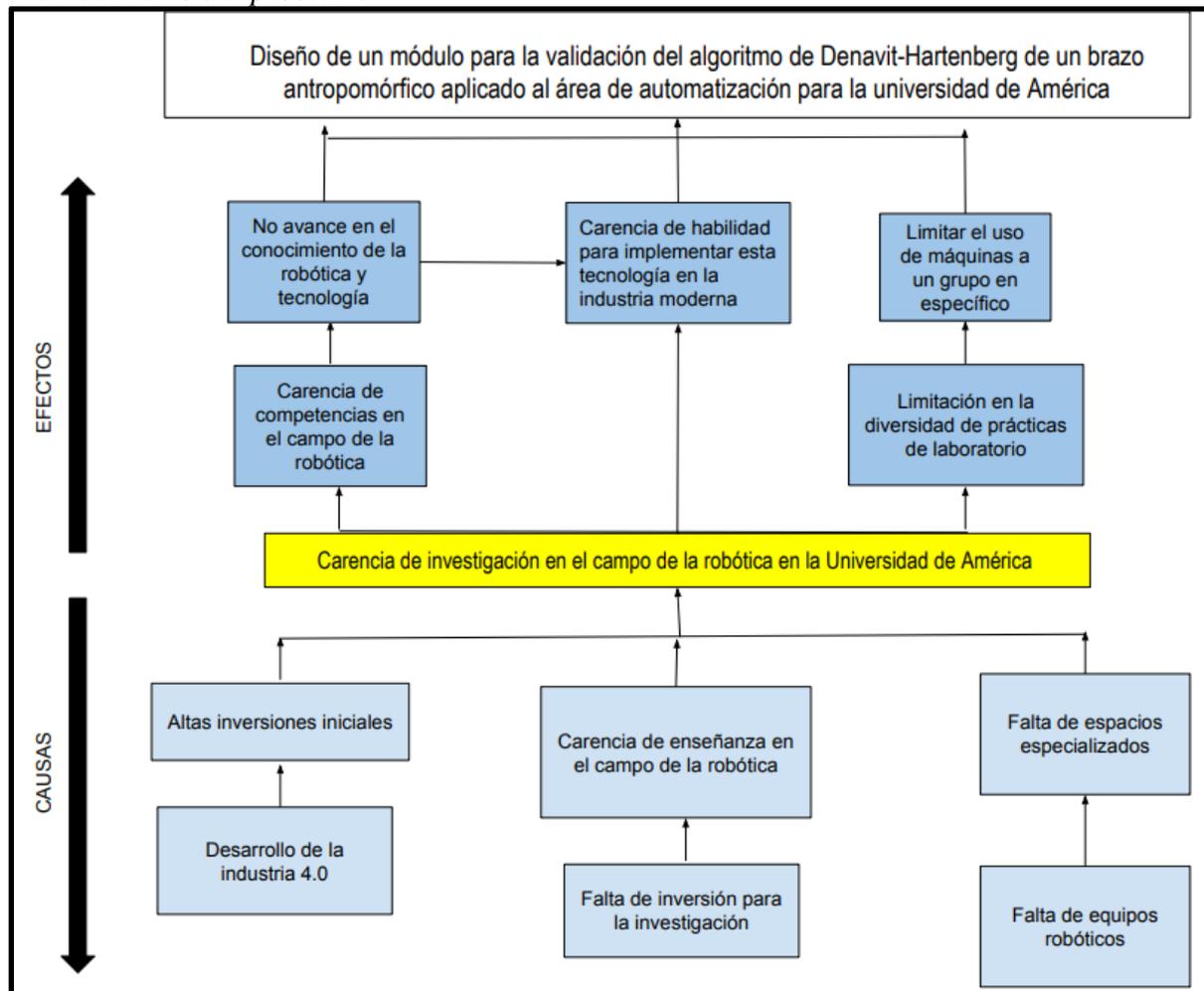
El desarrollo de proyectos de esta índole resulta ser una gran forma de entrar en el campo de la robótica de una manera adecuada debido a que en la práctica se hace uso de todo lo aprendido en el transcurso de la carrera y de igual forma, se generan bases para estudios futuros en las instituciones.

1.3 Planteamiento del problema

Los brazos robóticos han resultado en uno de los avances tecnológicos más significativos en la actualidad, debido a que la similitud con una de las partes humanas más importantes y útiles para la realización de diversas actividades, junto con las mejoras adquiridas mediante investigaciones en diversos campos de estudio que mejoraron algunas de las capacidades de esta máquina como el manejo de elementos con distintas formas y pesos, el traslado de los mismos a diferentes distancias, entre otros; resultan en una herramienta eficaz, útil y con la competencia de optimizar muchos procesos, generando así la necesidad de un mayor acercamiento a este tipo de tecnologías por parte de los estudiantes, para el mejoramiento de las competencias adquiridas en el transcurso de sus estudios, incentivar la innovación de las ya existentes y lograr desarrollar nuevas invenciones en este campo. (ver figura 9).

Figura 9.

Planteamiento del problema.



Nota: Diagrama de planteamiento del problema.

Teniendo en cuenta lo dicho acerca de la necesidad de implementar dichas herramientas, se pudo notar que actualmente en la universidad de América no se cuenta con este tipo de alternativas para el apoyo de la enseñanza, la cual resulta ser muy útil para realizar prácticas de laboratorio enfocadas en procesos industriales, generando así un acercamiento enriquecedor para los estudiantes.

Para ejecutar prácticas enfocadas en la automatización, siendo esta uno de los pilares fundamentales para la industria 4.0, se hace uso de un banco para prácticas que consta de elementos neumáticos como cilindros, válvulas, finales de carrera, presostatos, entre otros; PLCs y software para la configuración de estos y diversos elementos que son de ayuda para este tipo de acercamientos que se obtienen de realizar ejercicios en los laboratorios especializados de la universidad. Este tipo de elementos ayudan a consolidar los conocimientos

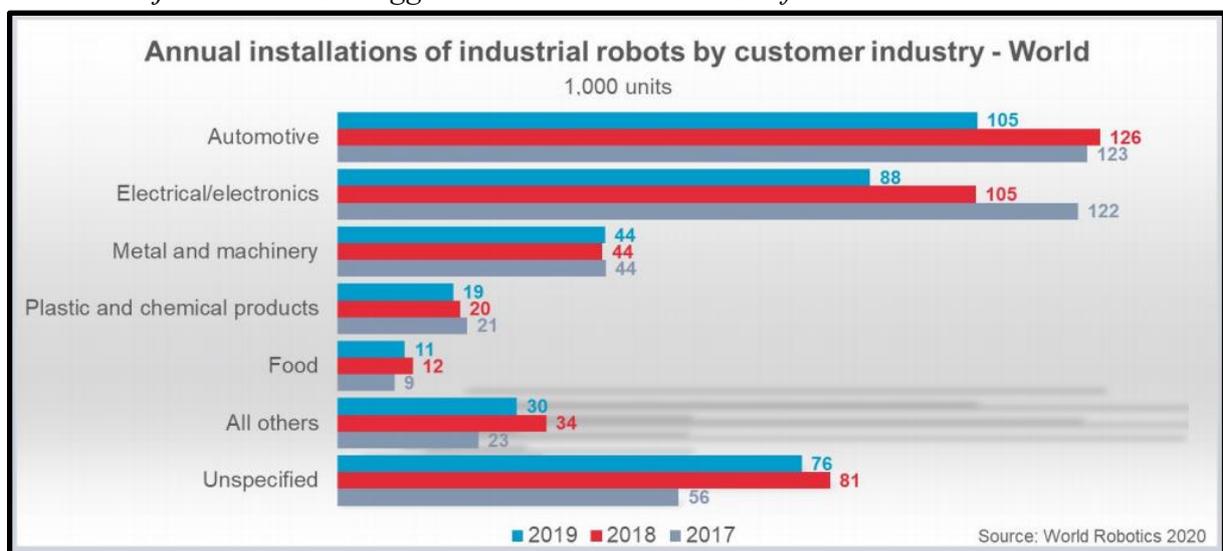
necesarios para desempeñar de forma inmejorable las tareas de hoy en día en la industria; esto debido a la falta de actualización de los instrumentos usados actualmente en la institución teniendo en cuenta la evolución del campo.

Lo dicho anteriormente resulta tanto un problema como una oportunidad de mejora, esto debido a que el mejorar las condiciones actuales de la universidad ayudaría con el progreso en las estrategias de cómo se prepara a un profesional para la industria 4.0

A continuación, según la IFR (International Federations of robotics) [16] evidencia que a nivel mundial se tienen cifras considerables acerca de la implementación de tecnología robotizada para la automatización de procesos industriales necesarios para la elaboración de todo tipo de productos. (ver figura 10).

Figura 10.

The two major customers struggled in 2019 “IFR Press Conference”



Nota: Instalación anual de robots industriales año 2020. Tomado de: IFR Press Conference, “World Robotics Report 2020”, [En línea], Disponible en: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>

Como se ve en la imagen anterior, los principales campos de implementación de este tipo de artefactos tienen relación con las zonas de trabajo más frecuente de un ingeniero mecánico. En esta, encontramos como principales sectores de instalación anual de robots industriales a la automotriz, eléctrico/electrónico y metalmecánica [16]. Esto sustenta la gran necesidad de

generar estudios e investigaciones en este tipo de tecnologías siendo uno de los mayores avances para la mejora y optimización de todo tipo de actividades.

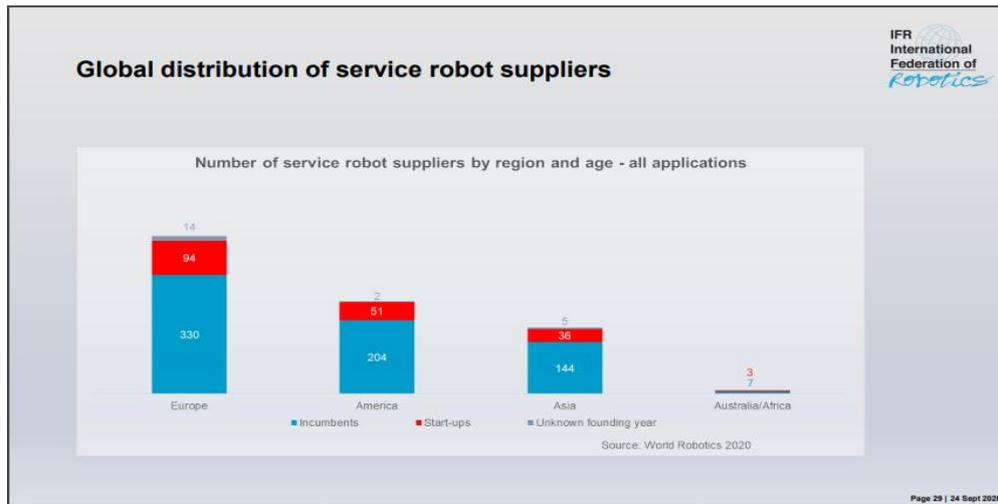
Teniendo en cuenta lo anterior se formuló la siguiente pregunta ¿Es posible diseñar un módulo didáctico que pueda validar el algoritmo de Denavit-Hartenberg y se pueda aplicar al área de automatización?

1.4 Justificación

Debido al gran auge de tecnología relacionada con la automatización y la robótica, y el incremento en la implementación de esta, en especial el uso de los brazos robóticos, se llegó a la necesidad de aportar algo a la sociedad, específicamente a los estudiantes de ingeniería mecánica de la universidad de América, donde se busca el complementar y mejorar las herramientas usadas para la enseñanza en los diversos laboratorios instalados en la institución. La industria 4.0 que hoy en día está en busca de una mayor optimización a los procesos desarrollados a nivel industrial, enfoca sus avances en hacer uso de herramientas robotizadas con el fin de mejorar la calidad de los procesos realizados y de los productos obtenidos en las empresas. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario enfocar la capacitación de los estudiantes en las competencias necesarias para desempeñarse en un campo laboral donde la máquina poco a poco va obteniendo independencia para ejecutar sus labores. (ver figura 11).
[16]

Figura 11.

Gráfica de distribución global de proveedores de robots de servicio



Nota: Distribución global de proveedores de robots de servicio por continentes. Tomado de: IFR Press Conference, “World Robotics Report 2020”, [En línea], Disponible en: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>

La práctica con diversos programas enfocados en la programación y el control de diversas herramientas para la realización de una tarea específica, como la elaboración de estos mismos instrumentos, representan una gran mejoría para los conocimientos adquiridos debido a que a medida que pasa el tiempo este campo se fortalece y por esta razón es necesario el mejorar las fuentes y los métodos de enseñanza debido a la importancia de este sector. Además, siendo más específicos, este tipo de proyectos refuerzan los conocimientos adquiridos en cada una de las etapas en el programa de ingeniería mecánica ofrecido en la Universidad de América, en campos como la electrónica y la automatización, siendo estas disciplinas fundamentales para el objetivo que se logra cumplir en esta nueva revolución industrial.

Para la universidad resultaría muy positivo la construcción de este módulo no solo por lo referido a la mejora en los equipos necesarios para las prácticas en las disciplinas designadas como fundamentales para la ingeniería mecánica en el campo de la robótica, también para la implementación de los futuros laboratorios de una de las próximas carreras añadidas al portafolio que ofrece la universidad y para la cual resulta un gran aporte para la misma; la cual es ingeniería mecatrónica. Para esta nueva carrera resulta ser muy necesario esta clase de equipos, los cuales son un apoyo incondicional para el desarrollo de cada una de las asignaturas contenidas en el pensum. Por otro lado, sirve como estímulo para los universitarios; esto con

el fin de inculcar la investigación en un campo que poco a poco se fortalece y en el cual un ingeniero mecánico se desempeña.

Otro aspecto de gran importancia a tener en cuenta para estos proyectos, es el impacto económico que genera. Comparando la adquisición de una herramienta de este tipo de un proveedor reconocido, en comparación a uno realizado por y para la universidad, resulta una alternativa bastante viable debido a que la inversión realizada para la primera opción resulta ser bastante elevada por ser un trabajo especializado; mientras que el realizarlo de forma autónoma resulta una inversión moderada.

Según lo mencionado anteriormente, se llega a la necesidad de implementar esta tecnología en la Fundación Universidad de América, donde su principal objetivo es que se realice una caracterización del modelo cinemático posicional con base en el algoritmo de Denavit-Hartenberg de un brazo tipo antropomórfico, y así mismo una aplicabilidad en el área de automatización realizando una rutina del brazo robótico antropomórfico, donde el estudiante llegue a interactuar directamente con el módulo gracias a una interfaz humano máquina, de esta manera llegando a simular una de las aplicaciones más implementadas en la industria real.

1.5 Delimitación

Para el proyecto se tiene en cuenta que se realizará en Colombia, Bogotá D.C, para la Fundación Universidad de América, en este proyecto se limitará al diseño del módulo didáctico, donde cabe resaltar que el módulo contiene el sistema de control posicional, interfaz humano máquina y construcción de un prototipo de un brazo tipo antropomórfico de 4 grados de libertad usado para fines didácticos, según la capacidad económica.

Los aspectos que se trabajarán en este serán:

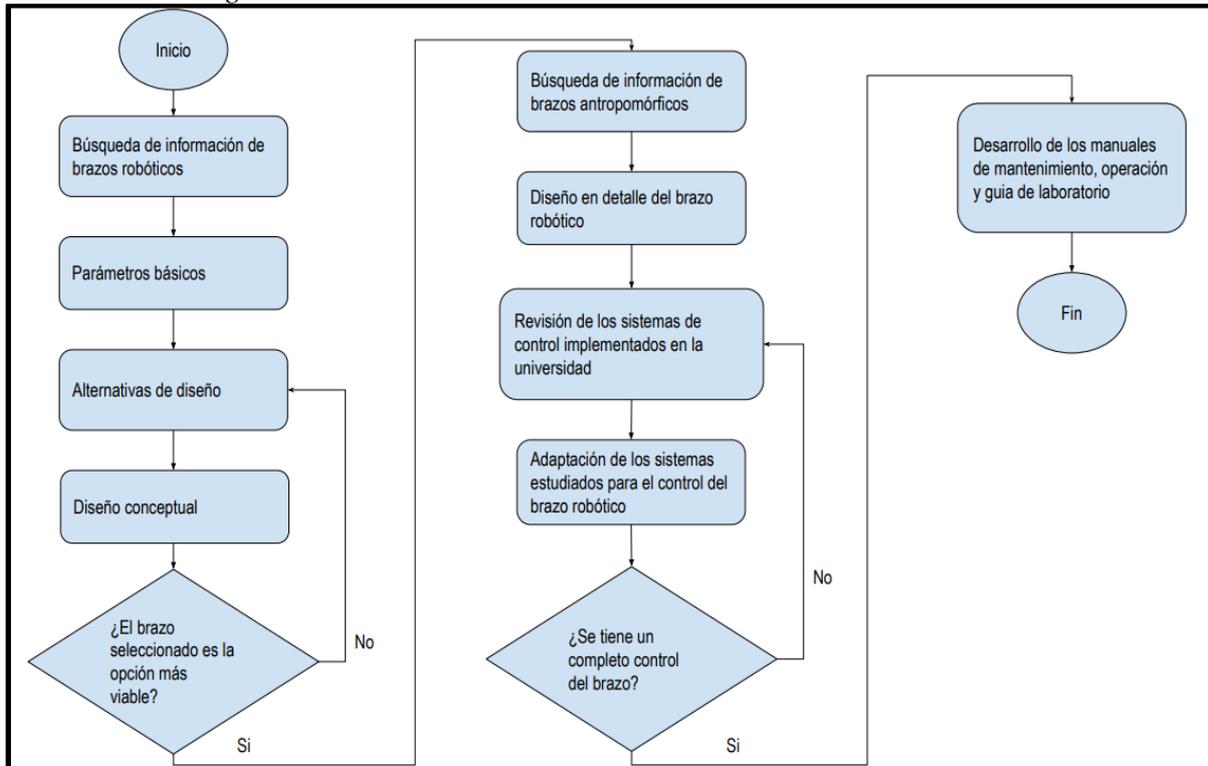
- Diseño del brazo robótico.
- Sistema de control.
- Interfaz de control del brazo robótico HMI (Human Machine Interface).
- Elaboración de manual de mantenimiento, operación y guía de laboratorio.
- Elaboración prototipo haciendo uso de recursos económicos propios y los componentes serán seleccionados dependiendo de nuestro presupuesto.

1.6 Diseño metodológico

Para el desarrollo del proyecto, se realizó un diagrama de flujo donde se describen de forma breve, las etapas por las cuales se pasará para el cumplimiento total del proyecto. (ver figura 12)

Figura 12.

Diseño metodológico.



Nota: Diagrama del diseño metodológico.

1.6.1 Búsqueda de información de brazos robóticos

Se realizará búsqueda de información básica acerca de los brazos robóticos en las bases de datos de la universidad, como en diversos libros especializados en el tema, para conocer aspectos básicos necesarios para aterrizar las condiciones de operación, los tipos de brazos existentes para la elección del brazo robótico requerido y los aspectos estructurales y de diseño pertinentes.

1.6.2 Parámetros básicos

Al desarrollar la guía de laboratorio de la práctica que se busca realizar en los espacios de laboratorio designados en la institución, se establecen los parámetros básicos para el desarrollo del diseño tanto estructural como el estudio cinemático inverso y directo, necesarios para la elaboración del prototipo.

1.6.3 Alternativas de diseño

Principalmente se establecerán 3 aspectos, los cuales servirán para la selección de las características del brazo robótico antropomórfico a implementar.

1.6.4 Búsqueda de información de brazos antropomórficos

Se realizará una nueva búsqueda en los libros usados anteriormente en la etapa de investigación para las generalidades de los brazos robóticos, haciendo énfasis en este tipo de brazo en especial por haber sido el seleccionado al inicio del proyecto. De igual forma, se hará uso de trabajos realizados anteriormente en el mismo campo para encontrar aspectos en los cuales se pueda trabajar y desarrollar un nuevo avance.

1.6.5 Diseño conceptual

Se presentan las especificaciones del brazo robótico, teniendo en cuenta la metodología de diseño, la funcionalidad, con respecto al requerimiento final.

1.6.6 Diseño en detalle del brazo robótico

Se realizará el diseño en detalle, llevando a cabo el cálculo respectivo de los componentes del brazo robótico

1.6.7 Revisión de los sistemas de control implementados en la universidad

Revisión de los softwares disponibles en la universidad para la implementación del sistema de control y el interfaz humano máquina.

1.6.8 Adaptación de los sistemas estudiados para el control del brazo robótico

Al tener claridad acerca de los diversos programas usados para el control de los procesos realizados en la universidad, se continuará a la selección del mejor para este proyecto y de igual manera, a su respectiva modificación.

1.6.9 Desarrollo de los manuales de mantenimiento, operación y guía de laboratorio

Finalmente, es necesario el realizar los diferentes documentos, los cuales servirán como una guía tanto para el adecuado manejo del equipo, como para los diversos análisis e intervenciones necesarias para la óptima operación de la máquina y finalmente, establecer la práctica o prácticas en las cuales se van a emplear el dispositivo para la consolidación de la teoría impartida por el docente.

1.7 Objetivo general

- Diseñar un módulo didáctico para la validación del algoritmo de Denavit-Hartenberg aplicado a un brazo antropomórfico para el área de automatización.

1.7.1 Objetivos específicos

- Identificar los parámetros básicos para el diseño de un brazo robótico con base en el algoritmo de Denavit-Hartenberg.
- Establecer el diseño conceptual y las alternativas de diseño.
- Diseñar módulo didáctico a partir de un brazo antropomórfico.
- Elaborar el manual de mantenimiento, operación y la guía de laboratorio para el área de automatización basada en el módulo.
- Realizar el estudio financiero del proyecto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos

2.1.1. Brazo robótico

Según Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R, Un robot está constituido por los siguientes elementos; estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales, donde la estructura mecánica está formada por eslabones unidos mediante articulaciones. [1]

2.1.2. Grados de libertad

Según Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior [1], Es importante mencionar este concepto, ya que según la configuración que se de en el robot, se puede llegar a los tipos de robot más comunes, en particular los brazos robóticos, donde se puede encontrar de diferentes tamaños y tipos.

2.1.3. Cinemática

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. [1]. Este estudio se enfoca en analizar las posiciones de los elementos del brazo enfocándose directamente en dos situaciones en especial las cuales son; cinemática directa y cinemática inversa.

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

2.2 Clasificación de los brazos robóticos

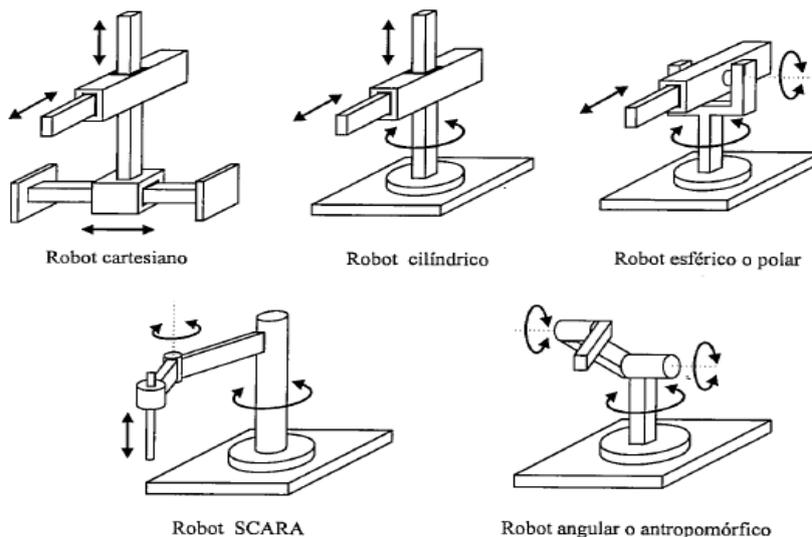
2.2.1 De acuerdo a sus grados de libertad

Se puede llegar a los tipos de robot más comunes, en particular los brazos robóticos, donde se puede encontrar de diferentes tamaños y tipos, los diferentes tipos de brazos robóticos son: (Ver figura 13)

- Robot cartesiano: Este tipo de robot posee movimientos lineales, los cuales corresponden a los ejes cartesianos X, Y, Z.
- Robot cilíndrico: Este tipo de robot posee un movimiento rotacional y dos movimientos lineales.
- Robot esférico o polar: Este tipo de robot posee dos movimientos rotacionales y un movimiento lineal.
- Robot SCARA: Este tipo de robot tiene dos movimientos rotacionales y un movimiento lineal, sus siglas significan (Selective Compliant Articulated Robot Arms).
- Robot angular o antropomórfico: Este tipo de brazo posee tres movimientos rotacionales, lo cual le da la capacidad de un área de trabajo espacial mucho más grande que los demás tipos de brazos robóticos.

Figura 13.

Tipos de brazos robóticos



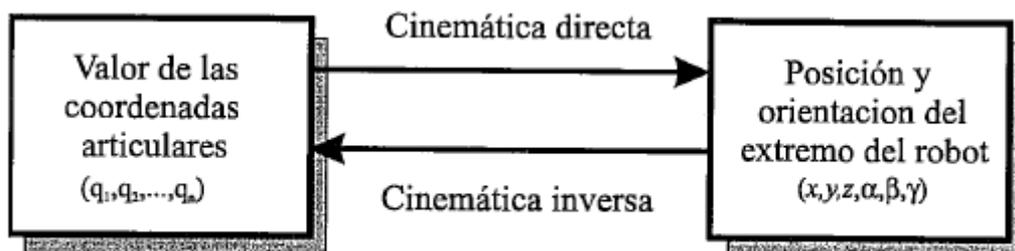
Nota: Configuraciones más frecuentes en robots industriales. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 18). Madrid: McGraw-Hill.

2.3 Cinemática posicional del brazo robótico

La cinemática se encarga de estudiar el movimiento de sistemas mecánicos, sin tener en cuenta las fuerzas que producen estos movimientos, en robótica la cinemática describe el movimiento espacial del brazo robótico, teniendo en cuenta la relación entre la posición y orientación del extremo del brazo robótico con los valores que toman sus coordenadas articulares. (Ver figura 14). [1] [10]

Figura 14.

Diagrama entre cinemática directa e inversa.



Nota: Diagrama con su respectiva relación entre la cinemática directa e inversa. Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

2.3.1 Cinemática directa

Consiste en hallar la posición y la orientación del extremo final del robot, con relación a un sistema coordinado de referencia, se debe conocer los parámetros geométricos de los elementos del robot (eslabones) y los valores de rotación o traslación de las articulaciones. [1]

2.3.2 Cinemática inversa

Opuesto a la cinemática directa la cinemática inversa consiste en determinar los valores que deben adoptar las articulaciones para lograr llegar a la posición deseada, en este problema de cinemática inversa se conoce los parámetros geométricos de los elementos del brazo robótico, así como la posición, orientación del extremo final del brazo robótico. [1]

2.4 Herramientas matemáticas para la localización espacial

La manipulación de objetos que es una función más asignada para los brazos robóticos lo cual implica que se tenga la necesidad de conocer el movimiento espacial de su extremo.

2.4.1 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 álgebra matricial. [1]

2.4.2 Ángulos de Euler

Es una de las representaciones más habituales entre las que realizan los giros sobre ejes girados.

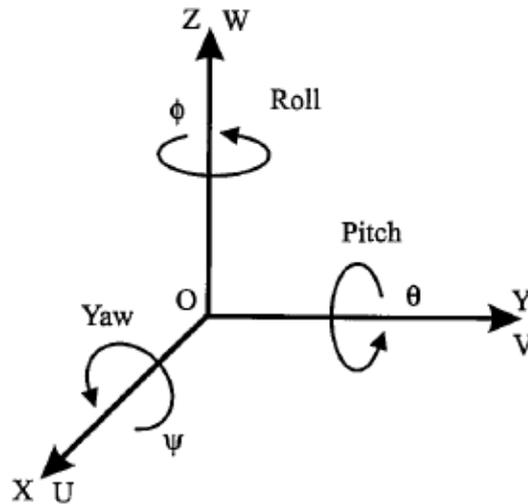
2.4.2.a Roll, pitch y yaw (alabeo, cabeceo y guiñada). Es la más común en donde se aplican a los giros sobre los ejes del sistema fijo, es utilizado generalmente en aeronáutica, si se tienen los sistemas OXYZ y OUVW, se puede colocar al sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los siguientes pasos. (Ver Figura 13) [1]

1. Girar el sistema OUVW un ángulo Ψ con respecto al eje OX. Es el denominado Yaw o guiñada
2. Girar el sistema OUVW un ángulo θ con respecto al eje OY. Es el denominado Pitch o cabeceo
3. Girar el sistema OUVW un ángulo Φ con respecto al eje OZ. Es el denominado o alabeo.

[1]

Figura 15.

Ángulos de Euler: roll, pitch y yaw



Nota: Representación de los ángulos de Euler sobre sus respectivos ejes. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

2.4.3 Matrices de transformación homogénea

La representación mediante las coordenadas homogéneas de localización, es representada a partir del concepto de matriz de transformación homogénea T de dimensión 4×4 donde representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro, se puede considerar que la matriz homogénea se compone de 4 submatrices, submatriz de rotación 3×3 , vector de traslación 3×1 , vector de perspectiva 1×3 y la submatriz de escalado 1×1 . (Ver figura 16).[1]

Figura 16.

Matriz de transformación homogénea

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & \mathbf{w}_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

Nota: Representación matriz de transformación homogénea con sus elementos. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

En la matriz homogénea se considera la perspectiva nula y el escalado unitario, la matriz homogénea T resulta de la siguiente forma. (Ver figura 17)

Figura 17.

Matriz de transformación homogénea resultante

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{P}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

Nota: Representación matriz de transformación homogénea con sus elementos. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

En resumen, la matriz homogénea se puede aplicar a

- Representar la posición y orientación de un sistema girado y trasladado con respecto a un sistema fijo de referencia.
- Transformar un vector expresado en coordenadas con respecto a un sistema cualquiera, a su expresión en coordenadas del sistema de referencia.
- Rotar y trasladar un vector con respecto a un sistema de referencia fijo. [1]

2.5 Algoritmo de Denavit-Hartenberg

Jaques Denavit y Richard S. Hartenberg propusieron un procedimiento para hallar una representación de la orientación y translación de robots, el cual consiste en establecer una tabla de parámetros en relación a los eslabones del brazo robótico, a continuación, se definirán estos parámetros [1]:

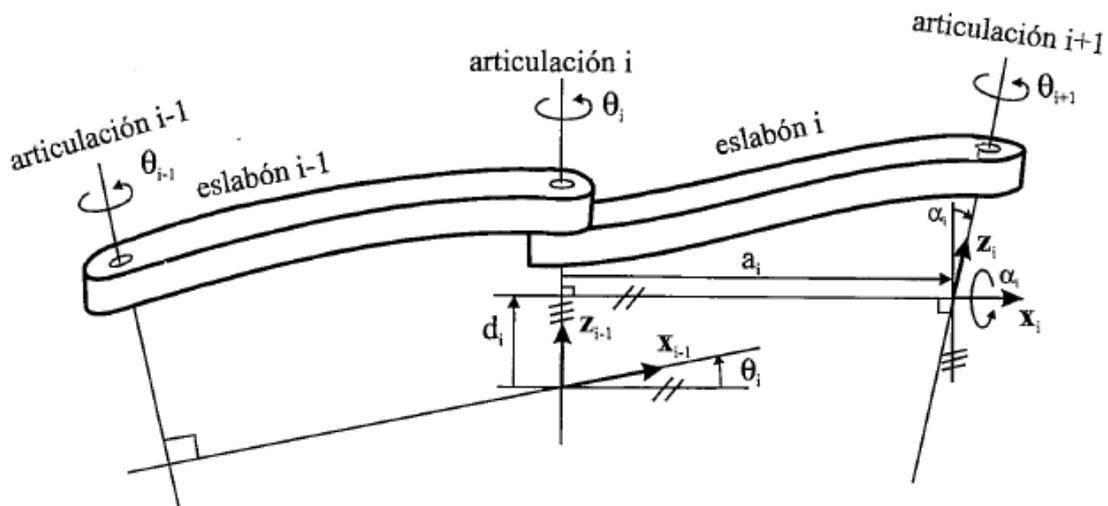
- θ_i : Es el desplazamiento rotacional de x_{i-1} a x_i medido alrededor del eje z_{i-1} . El signo positivo de θ_i es el sentido contrario a las manecillas del reloj.
- d_i : Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $i - 1$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.
- a_i : Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje

x_i hasta el origen del sistema i -ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

- α_i : Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} y el eje z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

Figura 18.

Parámetros D-H para un eslabón giratorio.



Nota: Convenciones en eslabón giratorio para los parámetros D-H. [1] Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 98). Madrid: McGraw-Hill.

2.5.1 Paso a paso para el Algoritmo de Denavit-Hartenberg

A continuación, se describirán los pasos obtenidos del libro de fundamentos de robótica: [1]

D-H 1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 o la base fija del robot.

D-H 2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n .

D-H 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.

D-H 4. Para i de 0 a $n-1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.

D-H 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 situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

D-H 6. Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón 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 $i+1$.

D-H 7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i+1} y z_i .

D-H 8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .

D-H 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 .

D-H 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.

D-H 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.

D-H 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 coincidiese con $\{S_i\}$.

D-H 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 $\{S_i\}$.

D-H 14. Obtener las matrices de transformación A_i definidas en [4.7].

D-H 15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el extremo del robot $T = A_1, A_2 \dots A_n$.

D-H 16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

2.6 Morfología del brazo robótico

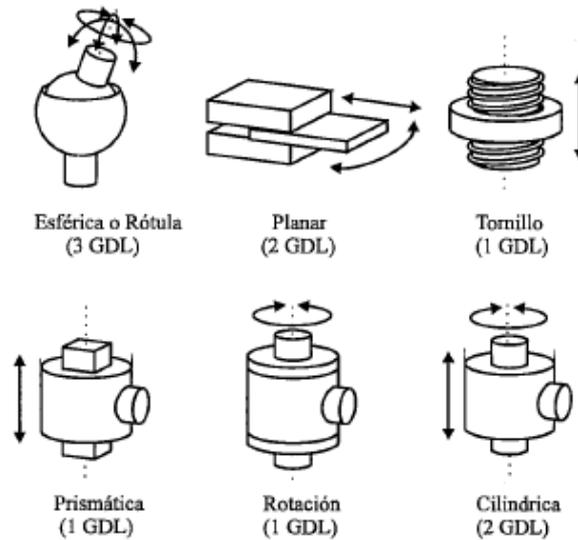
Según Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. [1], Un robot está constituido por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, actuadores, sistema de control y elementos terminales.

- Estructura mecánica: Los brazos robóticos están formados por elementos o eslabones los cuales están unidos mediante articulaciones, es por esto que este tipo de robots tiene un parecido con el cuerpo humano específicamente con el brazo humano, es por este motivo que también se utilizan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca. [1]

Es por esto importante conocer y hacer referencia a los diferentes tipos que se pueden llegar a usar, cabe destacar que el movimiento de las articulaciones puede ser diferente, encontrando así de tipo desplazamiento, de giro, o ambas, Según Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. [1] existen los siguientes tipos de articulaciones:

Figura 19.

Distintos tipos de articulaciones para robots.



Nota: Tipos de articulaciones con sus respectivos grados de libertad e ilustración de sus posibles movimientos. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 17). Madrid: McGraw-Hill.

- Transmisiones: Las transmisiones según Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. son los encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones, dentro de las transmisiones encontramos a los reductores, son los encargados de ajustar los parámetros de los actuadores como lo son la velocidad y el torque, podemos encontrar diferentes sistemas de transmisión para robots. (ver tabla 1) [1]

Tabla 1.*Sistema de transmisión para robots*

Entrada-salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal-Circular	Paral. Articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Nota: Descripción de los sistemas de transmisión para robots, con sus ventajas y desventajas e inconvenientes. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 20). Madrid: McGraw-Hill.

- Actuadores: Tienen como objetivo generar el movimiento en los elementos de brazo robótico, estos actuadores a su vez pueden utilizar diferentes tipos de energía, como por ejemplo energía neumática, hidráulica o eléctrica; para la selección de los actuadores se debe tener en cuenta ciertos parámetros como lo son la potencia, precisión, peso y volumen, etc.... [1]
- Actuadores neumáticos: Los actuadores neumáticos tienen como fuente de energía el aire, se pueden encontrar dos tipos de actuadores neumáticos:
 - ❖ Cilindros neumáticos: Trabajan mediante un movimiento de un émbolo dentro de un cilindro, esto se debe gracias a la presión aportada por el aire.
 - ❖ Motores neumáticos: Estos actuadores generan el movimiento de rotación de un eje debido a la presión del aire, se pueden encontrar motores de aletas rotativas y motores de pistones axiales

- Actuadores hidráulicos: Este tipo de actuadores tienen un funcionamiento similar a los neumáticos, con la diferencia que operan con aceites minerales en vez de aire.
- Actuadores eléctricos: Se caracterizan por su fácil control, sencillez y precisión, se puede encontrar tres tipos diferentes, los cuales son; motores de corriente continua, motores de corriente alterna y finalmente los motores paso a paso.

A modo de resumen se muestra la siguiente tabla (ver tabla 2):

Tabla 2.
Características de los distintos tipos de actuadores

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite mineral (5-100 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros Motor de paletas Motor de pistón	Cilindros Motor de paletas Motor de pistones axiales	Corriente continua Corriente alterna Motor paso a paso
Ventajas	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación potencia-peso Autolubricantes Alta capacidad de carga Estabilidad frente a cargas estáticas	Precisos Fiables Facil control Sencilla instalación Silenciosos
Desventajas	Dificultad de control continuo Instalacion-especial (Compresor, filtros) Ruidoso	Difícil mantenimiento Instalación especial (filtros, eliminación aire) Frecuentes fugas Caros	Potencia limitada

Nota: Tipos de actuadores con descripción de energía, opciones, ventajas y desventajas. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 35). Madrid: McGraw-Hill.

- Sistema control:

→ Sensores de presencia: Este tipo de sensores tiene la capacidad de detectar algún objeto presente en una zona determinada. La detección se puede realizar con o sin el contacto de este sobre el cuerpo presente.

Por otro lado, se hace uso de diferentes principios físicos para la construcción de diferentes sensores de este tipo, los cuales podemos ver en la siguiente tabla (ver tabla 3):

Tabla 3.
Tipos de sensores internos de robots

	Inductivo	
	Capacitivo	
Presencia	Efecto hall	
	Célula Reed	
	Óptico	
	Ultrasonido	
	Contacto	
Posición	Analogicos	Potenciómetros Resolver Síncro Inductosyn LVDT
Velocidad	Digitales	Encoders absolutos Encoders incrementales Regla óptica
	Tacogeneratriz	

Nota: Tipos de sensores internos de robots según sus aplicaciones como lo son de presencia, posición y velocidad. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 36). Madrid: McGraw-Hill.

Para los detectores que operan con el contacto del cuerpo, se trata de un interruptor, que puede encontrarse tanto en una posición cerrada o abierta según la necesidad, que actúa de forma mecánica mediante el uso de un vástago u otra herramienta. Por otro lado, los detectores contrarios a los anteriores, funcionan como un apoyo para los sensores de posición, para limitar el movimiento de las articulaciones.

- Elementos terminales: los elementos terminales o también llamados efectos finales son los que directamente tienen una interacción con el entorno en el que se encuentra el robot. Este tipo de instrumento se clasifica dependiendo del tipo de tarea a realizar. El primer grupo son los elementos de sujeción y estos a su vez se pueden clasificar dependiendo del sistema de sujeción empleado. En la tabla 3 se representan estas opciones, al igual que los usos más frecuentes (ver tabla 4). [1]

Tabla 4.
Sistemas de sujeción para robots.

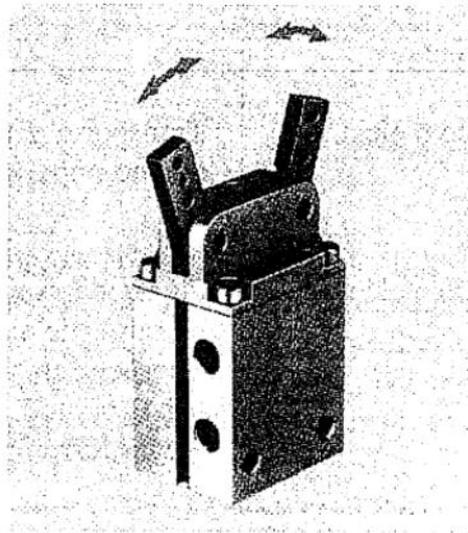
Tipos de sujeción	Accionamientos	Uso
Pinza de presión .desp. Angular .desp. Lineal	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importe presionar
Pinza de enganche	Neumático o eléctrico	Piezas de grandes dimensiones o sobre las que no se puede ejercer presión
Ventosas de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal, plástico, etc.)
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

Nota: Descripción de los sistemas de sujeción (Accionamiento y uso). Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 43). Madrid: McGraw-Hill.

Este tipo de elementos son usados para atrapar objetos y es muy común el conocerlos como pinzas. En esta clasificación tenemos los dispositivos de agarre mecánico (Figura 20) y los que hacen uso de otro tipo de dispositivo como ventosas, pinzas magnéticas, ganchos, etc.

Figura 20.

Pinza neumática de dedos paralelos.



Nota: Imagen de pinza neumática de dedos paralelos. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 44). Madrid: McGraw-Hill.

En muchas aplicaciones el robot no realiza una acción de sujetar, si no que hace uso de una herramienta para realizar una actividad diferente. En la tabla 4 se pueden observar algunos de los artefactos más utilizados para un robot (ver tabla 5).

Tabla 5.
Herramientas terminales para robots

Tipo de herramienta	Comentarios
Pinza soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar.
Soplete soldadura al arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde.
Cucharón para colada	Para trabajos de fundición.
Atornillador	Suelen incluir la alimentación de tornillos.
Fresa-lijja	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir, etc.
Pistola de pintura	Por pulverización de la pintura.
Cañón láser	Para corte de materiales, soldadura o inspección.
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales.

Nota: Herramientas terminales para robots con sus respectivos comentarios. Tomado de: Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 44). Madrid: McGraw-Hill.

3. DISEÑO

El diseño del brazo robótico consta de cuatro grados de libertad, teniendo en cuenta que 4 grados de libertad definen la posición final del elemento final, y el último grado de libertad es la rotación en el eje del elemento final, esto aporta mayor versatilidad y aplicabilidad en diversos campos.

Medidas:

Diámetro de la base: 120 mm

Longitud eslabón hombro-codo: 104.5mm

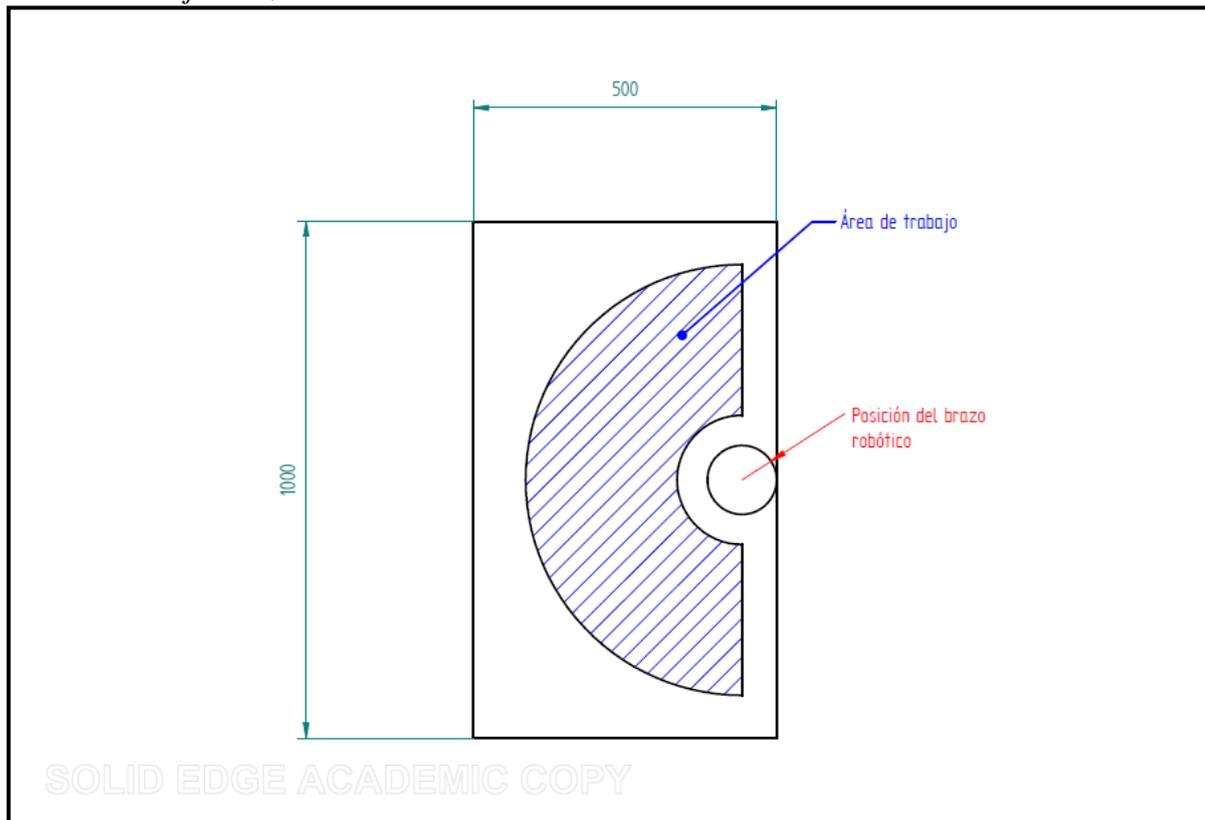
Longitud eslabón codo-muñeca: 130 mm

Zona de trabajo

En la siguiente imagen se establece la zona del trabajo, teniendo en cuenta los límites de movimiento con los que cuenta el brazo (ver figura 21).

Figura 21.

Zona de trabajo brazo robótico



Nota: Plano descriptivo de la zona espacial de trabajo del brazo robótico.

Las medidas del espacio tienen en cuenta la longitud total de los eslabones que componen el brazo sin contar la longitud del efector final.

3.1 Alternativas de diseño

Para la selección del modelo final del brazo antropomórfico requerido se tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Área de trabajo: Los aspectos seleccionados para el apartado del trabajo nombrado *parámetros preliminares de diseño*, se tiene en cuenta la disposición del laboratorio de automatización y neumática, conociendo que los espacios disponibles para la instalación son limitados.
- Operatividad de los grados de libertad de las articulaciones: Al establecer los grados de libertad con las que cuenta un brazo robótico antropomórfico y recordando que la aplicación del diseño, es el estudio de las posiciones a las cuales se puede llegar el brazo robótico, mediante el uso del algoritmo de Denavit-Hartenberg, se tiene que realizar una selección adecuada dentro de los diferentes actuadores que puede realizar el movimiento requerido para las articulaciones.

El grupo de los más aptos para emplearse son los actuadores eléctricos; entre los cuales se tiene:

- Motores de corriente continua (DC). Estos motores en la actualidad son los más implementados debido a que su control no resulta ser complejo.
- Motores de corriente alterna (AC): En comparación a los primeros, esta clase de motores no son muy implementados debido a que su manejo es mucho más complejo.
- Motores paso a paso: En el caso de los motores de este tipo, debido a que industrialmente los pares con los que trabajan son bastante pequeños, además de que no cuentan con suficiente precisión.
- Servomotores: Un **servomotor** es un actuador rotativo o motor que permite un control preciso en términos de posición angular, aceleración y velocidad, capacidades que un motor normal no tiene.

Para el caso de este proyecto, se hace uso de los servomotores alimentados con una fuente de corriente directa o continua; esto debido a que el uso de estos es bastante preciso y cumple con los rangos de operación con los cuales se desea operar el brazo. Teniendo en cuenta este último aspecto, se puede aprovechar de mejor manera el volumen espacial dentro del cual se desplaza el brazo robótico.

- Método de validación: Debido al énfasis del estudio, se hace la selección del método más adecuado teniendo en cuenta que el desarrollo del proyecto se dirigió al estudio de la cinemática posicional.

Dentro de estos métodos se tienen los siguientes:

- Método geométrico: “El procedimiento se basa en encontrar suficiente número de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos.” [1].

Con este método se busca encontrar los valores que toman las articulaciones, (los ángulos q_1 , q_2 y q_3), que toma el brazo cuando se conoce la posición final del efector. Para la aplicación de este, se hace uso de las coordenadas en las cuales se encuentra el elemento terminal, las longitudes de los eslabones que pertenecen a la cadena cinemática y finalmente se relacionan estos valores con relaciones geométricas obtenidas del análisis de cada uno de estos.

- Cuaternios: “Un cuaternio Q está constituido por cuatro componentes (q_0 , q_1 , q_2 , q_3) que representan las coordenadas del cuaternio en una base (e , i , j , k). Es frecuente denominar parte escalar del cuaternio a la componente en e : q_0 , y parte vectorial al resto de componentes.” [1]. La forma en que se representa un cuaternio es la siguiente:

Ecuación 1. Representación cuaternio.

$$Q = [q_0, q_1, q_2, q_3] = [s, \mathbf{v}]$$

Siendo S la parte escalar y V la vectorial.

Para hacer uso de los cuaternios como herramienta para el estudio de orientación, se realiza un movimiento angular θ sobre un vector K al cuaternio definido por:

Ecuación 2. Representación cuaternio para la representación de orientaciones.

$$Q = \mathbf{Rot}(\mathbf{k}, \theta) = \left(\cos \frac{\theta}{2}, \mathbf{k} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \right)$$

Entre estos dos métodos se hace uso del método geométrico debido a que es el más usado de los dos, por la exactitud con la que trabaja y por la facilidad para implementarlo. Por otro lado, los cuaternios son un método muy poco usado y debido a su complejidad se apoya de herramientas computacionales.

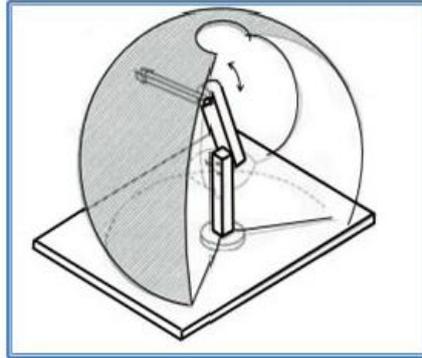
3.2 Brazo robótico antropomórfico

Los brazos antropomórficos también son conocidos como robots manipuladores de codo, robots angulares etc., por lo general la configuración de este tipo de brazos robóticos es de 3 articulaciones rotacionales los cuales son llamados 3G o RRR, donde el primer eje básicamente es perpendicular al piso, los otros perpendiculares al primero y paralelos entre sí, estos 3 se utilizan para posicionar en un determinado lugar del espacio [12]

Es importante mencionar que el volumen de trabajo (“es el espacio dentro del cual puede desplazarse el extremo de su muñeca” [12]), es similar a una esfera, con esto podemos lograr una gran área de trabajo (ver figura 22).

Figura 22.

Imagen de robot antropomórfico



Nota: Imagen volumen espacial de trabajo. Tomado de: Araujo Francisco, Ayala Luis and Bermeo Cristhian, "Robots antropomórficos." Available: <https://studylib.es/doc/6073995/robots-antropom%C3%B3rficos>.

3.3 Diseño conceptual

A continuación, se realiza una tabla donde se establece el paso a paso del desarrollo del proyecto, desde la definición de la fuerza que requiere el imán para la sujeción del objeto hasta llegar a la verificación mediante el funcionamiento de un prototipo.

Tabla 6.
Diseño conceptual

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Metodología de diseño	<ul style="list-style-type: none"> Definir el modelo del brazo seleccionado, las fuerzas que ejercerá la pinza sobre el objeto y las fuerzas del objeto mismo. Realizar el estudio de cada uno de los eslabones involucrados con el fin de analizar el comportamiento de los mismos con respecto a las fuerzas que actúan sobre él. Definir los servomotores aptos para el movimiento de los eslabones.
Funcionalidad del brazo	<ul style="list-style-type: none"> Con el uso del algoritmo de Denavit-Hartenberg se establecen las matrices para el estudio tanto de la cinemática directa, como la inversa, las cuales se enfocan en el movimiento del brazo robótico. Para el uso del brazo, se elaborará una interfaz de comunicación entre el brazo y el usuario, para así establecer las posiciones a las cuales se quiere llegar con el brazo. Se validará lo realizado con el algoritmo de las siguientes formas: <ol style="list-style-type: none"> Mediante el estudio geométrico del movimiento. Haciendo uso de un prototipo.
Requerimiento final	<ul style="list-style-type: none"> Se busca como finalidad que el prototipo del brazo logre cargar y desplazar un objeto desde una posición inicial a una final, con valores que el usuario establecerá en la interfaz diseñada.

Nota: Metodología de diseño.

3.3.1 Parámetros preliminares de diseño

A continuación, se definirán los parámetros con los cuales se diseñará el brazo robótico para el laboratorio de automatización (ver tabla 7).

El área de trabajo será de 1000 [mm] X 500 [mm], el brazo robótico podrá realizar un trayecto de 180 grados aproximadamente sobre su eje base, y podrá levantar una carga de 250 gramos

Tabla 7. Parámetros básicos de diseño

Parámetros básicos de diseño

Parámetro	Valor
Dimensiones del área de trabajo	100 cm X 50cm
Área de trabajo del brazo robótico	628,31cm ²
Grados de libertad	4 GDL
Capacidad	250 gramos
Grados trayectoria eje base	180°

Nota: Especificación de los parámetros para el diseño del brazo robótico

Referido a los valores arrojados entre las dimensiones del área de trabajo y el área de trabajo cabe resaltar que dentro de las dimensiones del área de trabajo se encuentra el brazo robótico (ver figura 21) y para los valores del área de trabajo se tiene en cuenta la trayectoria del robot.

Tabla 9. Parámetros algoritmo D-H
Parámetros para el uso del algoritmo D-H

Item	Longitud (cm)
Base-hombro	10
Hombro-codo	10,45
Codo-muñeca	13

Nota: Especificación de los parámetros para la configuración el algoritmo D-H

Estas dimensiones son establecidas teniendo en cuenta que será un dispositivo implementado en los laboratorios de la universidad, por ende, no debe ser muy grande debido a que su espacio es limitado y de igual manera, este tipo de herramientas suelen ser de un tamaño proporcional a las actividades realizadas. Dado a que su enfoque es didáctico, se opta por un tamaño pequeño para disponer de forma óptima del espacio disponible que consta de algunos espacios que se tienen en los bancos de prueba, al igual que en el espacio donde se ubica el docente. Cabe resaltar que, dado a la cantidad de estudiantes por grupo de laboratorio, es necesario implementar más de un brazo robótico.

3.4 Diseño detallado del brazo robótico

- **Requerimientos:**

Estos parámetros consisten en los establecidos anteriormente en la Tabla 7, donde se instauran los valores óptimos, necesarios y requeridos para la elaboración y el funcionamiento del brazo.

- **Elección estructura brazo robótico:**

Gracias a los diversos aspectos seleccionados anteriormente como base de estudio; como lo son la cantidad de grados de libertad y el grupo específico de clasificación, se logró limitar las posibilidades que se encuentran en el mercado con estas mismas especificaciones.

Principalmente, se tomó como referencia los brazos robóticos KUKA los cuales son bastante usados en la industria, donde su morfología se toma como referencia para el diseño del brazo robótico. Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo una búsqueda de brazos con similitudes a los

KUKA que se implementarán de forma didáctica (Ver figura 23). Finalmente, encontramos el siguiente:

Figura 23.

Imagen del brazo robótico KUKA



Nota: Imagen brazo robótico KUKA

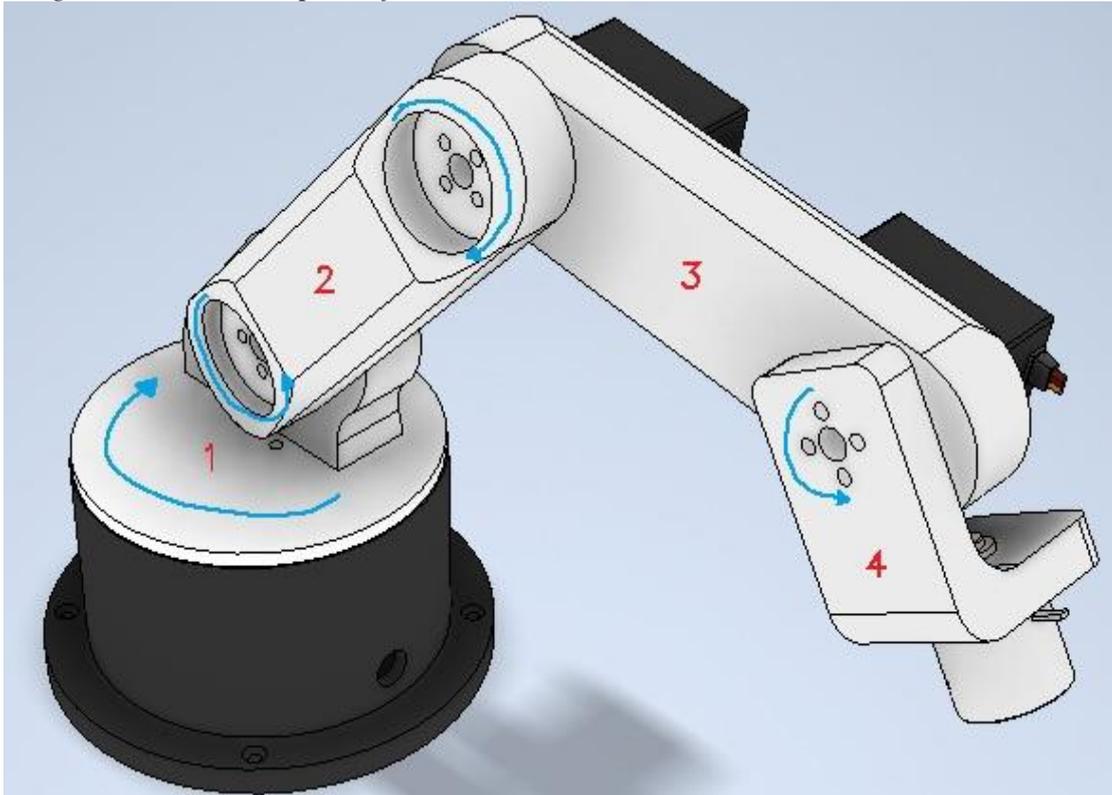
Al anterior modelo, se realizaron cambios en los eslabones que componen las secciones de muñeca-codo (3) y codo-hombro (2), debido a que se buscaba una optimización en cuestiones de peso y la geometría para un mejor desempeño de este.

Otro aspecto que se modificó fue el actuador con el que contaba el brazo; esto debido a la búsqueda de aspectos nuevos e innovadores en las configuraciones estándar de este tipo de equipos. De lo anterior, se generó un cambio de una pinza por un electroimán, el cual reduce, en gran medida, las cargas a las cuales estará sometido un punto crítico como es la base (1); el cual soporta toda la carga del brazo. De igual forma, los grados de libertad del brazo están notados con las flechas en las articulaciones.

Lo anterior, lo podemos notar en la figura 24

Figura 24.

Imagen del robot antropomórfico.



Nota: Imagen del robot antropomórfico. Elaborado en: *Student and Education Software / 1-Year License / Autodesk Education Community* (). Available: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

- **Ubicación servomotores:**

Debido a la configuración del brazo robótico (antropomórfico) se limitan las ubicaciones de los servomotores a los inicios y finales de los eslabones, debido a que en estos puntos se debe aplicar el movimiento rotacional que conlleva el brazo robótico antropomórfico.

- **Selección material:**

Debido a la aplicación del brazo y su enfoque didáctico, se opta por materiales ligeros y de un manejo poco complejo; por lo cual, se tiene como principales candidatos, los materiales usados para el proceso de impresión 3D; entre los cuales se seleccionó los plásticos debido a la facilidad en su manipulación y accesibilidad en el mercado.

Entre los candidatos más aptos de este tipo de material encontramos:

- ABS
- PLA
- Nailon
- PET/PETG

De los anteriores, debido a aspectos como su buena resistencia al impacto, durabilidad y buen trabajo a altas y bajas temperaturas, la dureza del mismo, su resistencia a la fatiga y a fisurarse por tensión, resistencia a la corrosión química, precios bajos y su facilidad para ser procesado y modelado, se hace la selección del ABS. Este material cuenta con un amplio campo de aplicación en la industria por las características previamente nombradas, haciendo de este una adecuada alternativa.

Algunos valores de las propiedades de este son los siguientes:

- Densidad: $1,03 \text{ g/cm}^3$
- Módulo de tensión 2,20 GPa
- Resistencia a la tensión 41,02 MPa

- **Modelamiento 3D componentes brazo:**

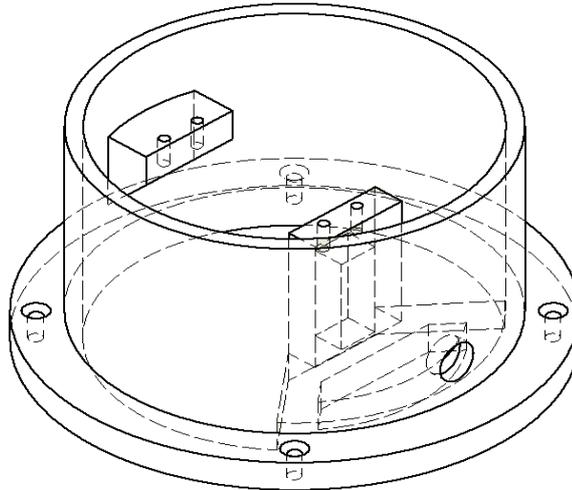
Se realiza el modelamiento 3D en el software Autodesk Inventor, principalmente en base a la estructura morfológica de los brazos robóticos KUKA.

3.4.1 Diseño de la base

Se optó por un diseño en forma cilíndrica, donde se consideró el tamaño del brazo robótico y así mismo las dimensiones para el servomotor. (ver figura 25)

Figura 25.

Imagen de la base del robot



Nota: Imagen de la base en vista isométrica.

Elaborada en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* ().

Available:

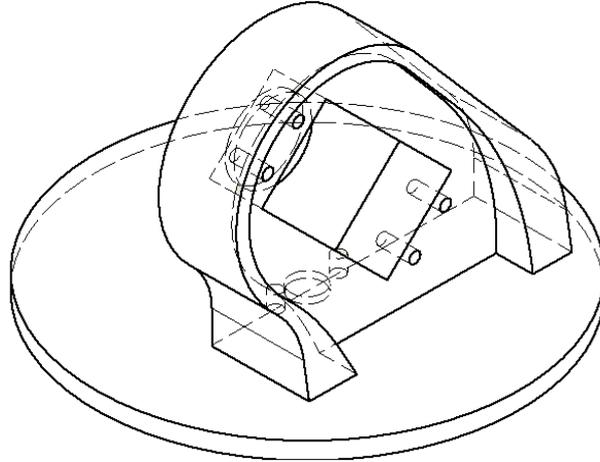
<https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

3.4.2 Diseño del hombro

Se optó por un diseño en forma cilíndrica, donde se consideró el tamaño del brazo robótico y así mismo las dimensiones para el servomotor, para acoplar al eslabón siguiente. Este diseño se realiza teniendo en cuenta la similitud con el hombro humano, tenido una sección para el giro, el cual corresponde a la base circular de conexión con la cual se conectará a la base y de igual forma, la protuberancia se diseña teniendo en cuenta la necesidad de la instalación del servomotor para el movimiento. (ver figura 26)

Figura 26.

Imagen del hombro del robot



Nota: Imagen del hombro en vista isométrica.

Elaborada

en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* ().

Available:

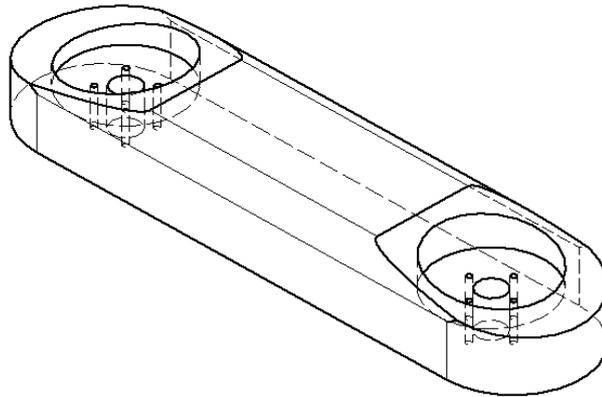
<https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

3.4.3 Diseño del eslabón hombro-codo.

Se optó por un diseño en forma de paralelepípedo, donde se consideró el tamaño del brazo robótico por la necesidad de conexión en ambos extremos y por la facilidad en que puede ejecutar movimientos, al igual que las diferentes modificaciones para aligerar la pieza. (ver figura 27)

Figura 27.

Imagen del eslabón hombro-codo



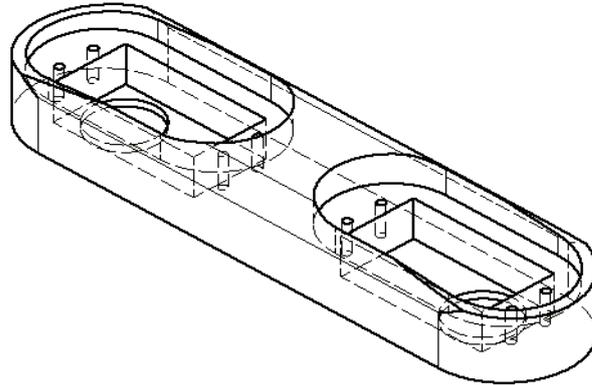
Nota: Imagen del eslabón hombro-codo en vista isométrica. Elaborada en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

3.4.4 Diseño del eslabón muñeca-codo.

Se optó por un diseño en forma de paralelepípedo, donde se consideró el tamaño del brazo robótico por la necesidad de conexión en ambos extremos y por la facilidad en que puede ejecutar movimientos, al igual que las diferentes modificaciones para aligerar la pieza. (ver figura 28)

Figura 28.

Imagen del eslabón muñeca-codo



Nota: Imagen del eslabón hombro-codo en vista

Isométrica. Elaborada en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available:

<https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

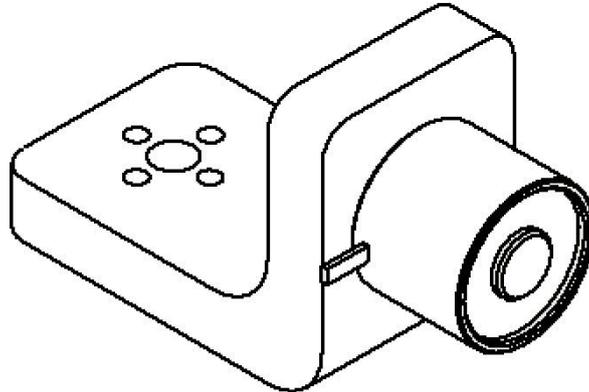
3.4.5 Diseño de unión muñeca-electroimán

Se optó por un diseño en forma de L, donde se consideraron varios aspectos como el tamaño del electroimán a cargar y buscando una figura sencilla y óptima.

Por otro lado, se hizo la selección del electroimán como efector final, debido a que satisface la fuerza necesaria para la atracción del objeto a posicionar y resulta ser más óptimo para el estudio. (ver figura 29)

Figura 29.

Imagen de unión muñeca-electroimán



Nota: Imagen de unión muñeca-electroimán en vista isométrica. Elaborada en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

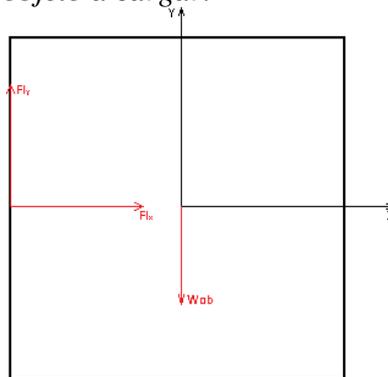
3.4.6 Análisis en condición estática

En esta etapa se realiza el análisis de las cargas a las cuales estarán sometidos los componentes del robot. Esto se realiza de forma sistemática comenzando por la carga que genera el cuerpo a trasladar y estudiando el comportamiento de esta fuerza inicial al transmitirse por cada uno de los componentes, teniendo en cuenta las reacciones que acompañan estas partes.

De igual forma, con este estudio se logra hallar los torques necesarios para generar el movimiento de cada uno de los elementos, obteniendo así los motores adecuados para cumplir con esta función.

3.4.6.a Análisis cuerpo sujetado

Figura 30.
DCL objeto a cargar.



Nota: Diagrama de cuerpo libre del objeto a cargar por el brazo robótico.

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_I - W_{ab} = 0$$

$$F_I = W_{ab}$$

$$W_{ab} = 250 \text{ gr} = 0.25 \text{ Kg}$$

$$W_{ab} = (0.25 \text{ Kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

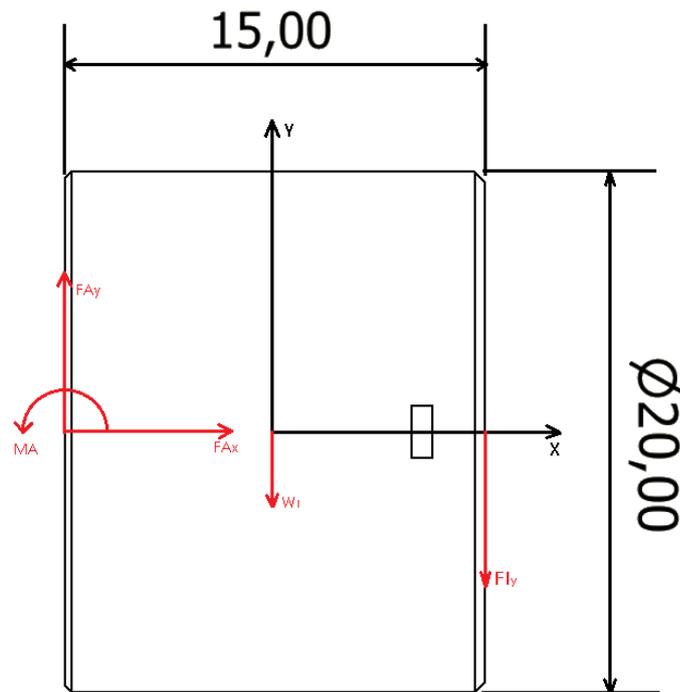
$$W_{ab} = 2.453 \text{ N}$$

$$F_I = 2.453 \text{ N}$$

3.4.6.b Análisis electroimán

Figura 31.

DCL electroimán



Nota: Diagrama de cuerpo libre del electroimán del brazo robótico.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{ax} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-W_I - F_I + F_{ay} = 0$$

$$w = (0.025Kg)(9.81m/s^2)$$

$$w = 0.245N$$

$$F_{ay} = W_I + F_I$$

$$F_{ay} = 0.245N + 2.453N$$

$$F_{ay} = 2.698N$$

$$\sum M_I = 0$$

$$(W_I)(1.5mm) - (F_{ay})(15mm) + M_a = 0$$

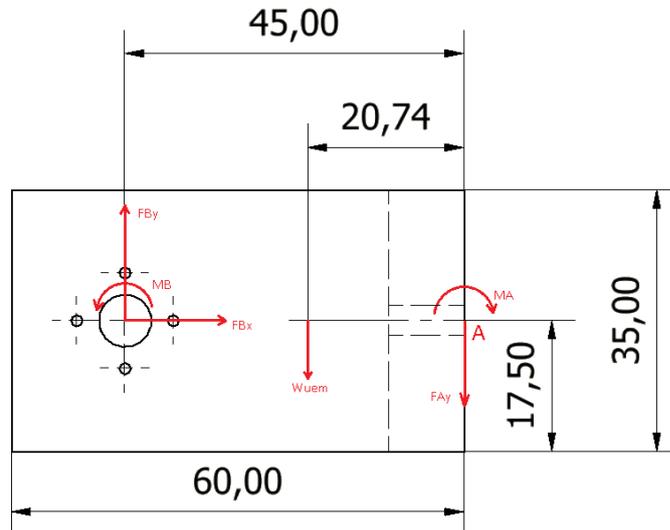
$$M_a = -(W_I)(7.5mm) + (F_{ay})(15mm)$$

$$M_a = 38.63Nmm$$

3.4.6.c Análisis unión electroimán-muñeca

Figura 32.

DCL unión electroimán-muñeca



Nota: Diagrama de cuerpo libre de unión electroimán-muñeca del brazo robótico.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{bx} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{by} - F_{ay} - W_{uem} = 0$$

$$F_{by} = W_{uem} + F_{ay}$$

$$W_{uem} = (0.035Kg)(9.81m/s^2)$$

$$W_{uem} = 0.3433N$$

$$F_{by} = 2.698N + 0.343N$$

$$F_{by} = 3.041N$$

$$\sum M_a = 0$$

$$(W_{uem})(20.743mm) - (F_{by})(45mm) + M_b = 0$$

$$M_b = -(W_{uem})(20.743mm) + (F_{by})(45mm)$$

$$M_b = (3.041N)(45mm) - (0.3433N)(20.743mm)$$

$$M_b = 129.723Nmm$$

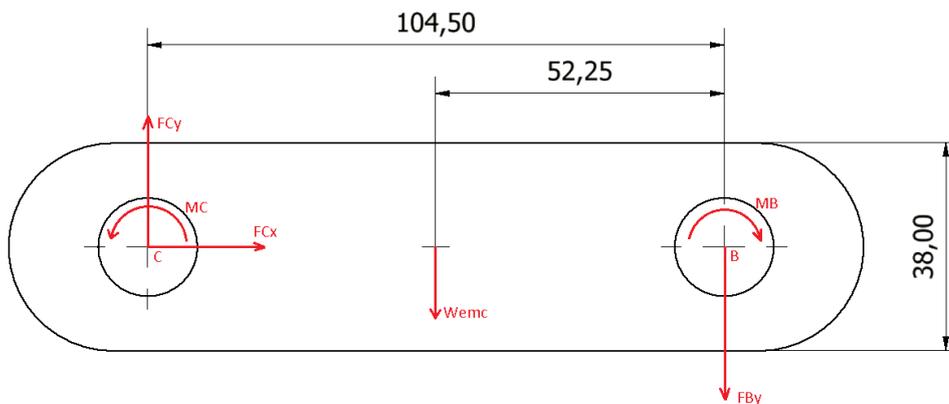
$$129.723Nmm * \frac{1Kgf}{9.81N} * \frac{1cm}{10mm}$$

$$M_b = 1.322Kgf * cm$$

3.4.6.d Análisis eslabón muñeca - codo

Figura 33.

DCL eslabón muñeca-codo



Nota: Diagrama de cuerpo libre del eslabón muñeca-codo del brazo robótico.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{cx} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{cy} - F_{by} - W_{emc} = 0$$

$$F_{cy} = W_{emc} + F_{by}$$

$$W_{uem} = (0.068Kg)(9.81m/s^2)$$

$$W_{uem} = 0.6671N$$

$$F_{cy} = 0.6671N + 3.041N$$

$$F_{cy} = 3.708N$$

$$\sum M_b = 0$$

$$(W_{emc})(52.25mm) - (F_{cy})(104.5mm) - M_c = 0$$

$$M_c = (W_{emc})(52.25mm) - (F_{cy})(104.5mm)$$

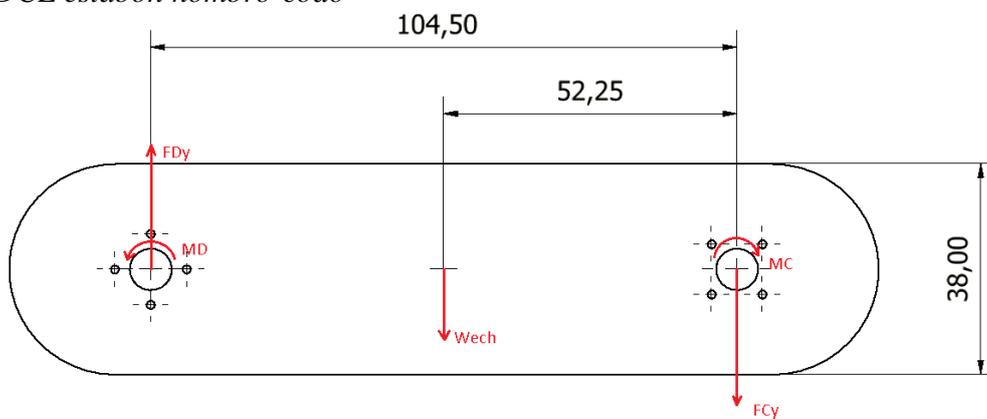
$$M_c = (0.6671N)(52.25mm) - (3.708N)(104.5mm)$$

$$M_c = -352.63Nmm \rightarrow 3.594Kgf * cm$$

3.4.6.e Análisis eslabón hombro-codo

Figura 34.

DCL eslabón hombro-codo



Nota: Diagrama de cuerpo libre del eslabón hombro-codo del brazo robótico.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{dx} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{dy} - F_{cy} - W_{ech} = 0$$

$$F_{dy} = W_{ech} + F_{cy}$$

$$W_{ech} = (0.101Kg)(9.81m/s^2)$$

$$W_{ech} = 0.991N$$

$$F_{dy} = 3.708N + 0.991N$$

$$F_{dy} = 4.699N$$

$$\sum M_c = 0$$

$$(W_{ech})(52.25mm) - (F_{dy})(104.5mm) - M_d = 0$$

$$M_d = (W_{ech})(52.25mm) - (F_{dy})(104.5mm)$$

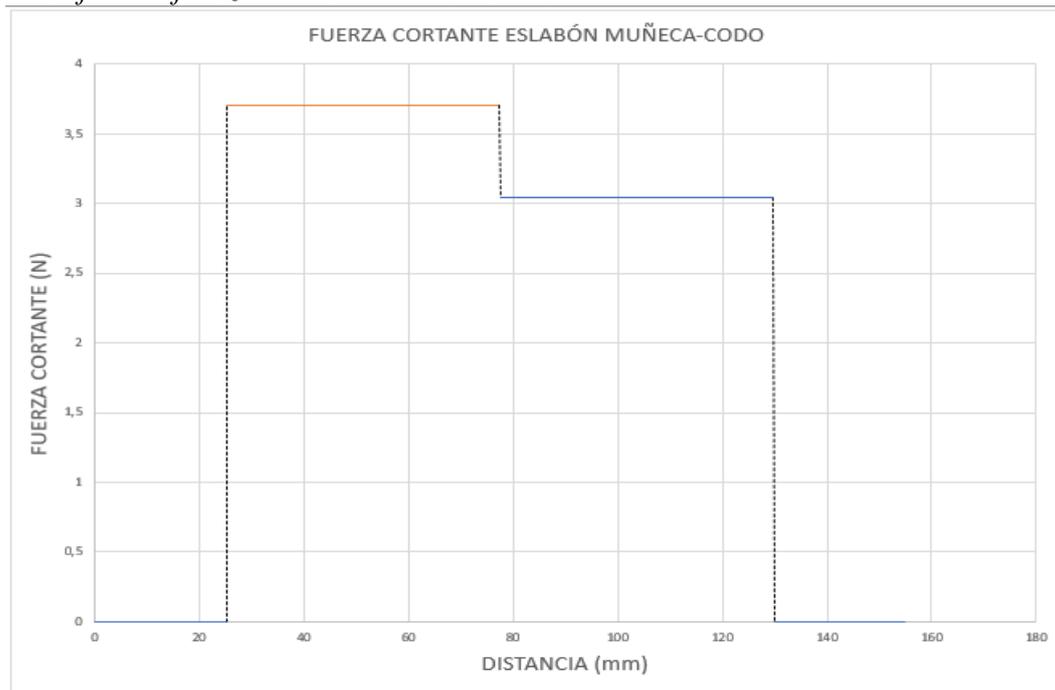
$$M_d = (0.991N)(52.25mm) - (4.699N)(104.5mm)$$

$$M_d = 439.265Nmm \rightarrow 4.477Kgf * cm$$

3.4.6.f Análisis tipo viga eslabón muñeca-codo. En la figura 35 se observa el comportamiento de las fuerzas sobre el eslabón de estudio en cada uno de los puntos de aplicación de la misma, siendo los apoyos del elemento y el punto del centro de masa. En la gráfica tenemos la fuerza cortante máxima en el punto a 25,25 mm que tiene un valor de 3.708N, siendo este el punto de apoyo cercano al objeto a trasladar.

Figura 35.

Gráfica de fuerza cortante eslabón muñeca-codo

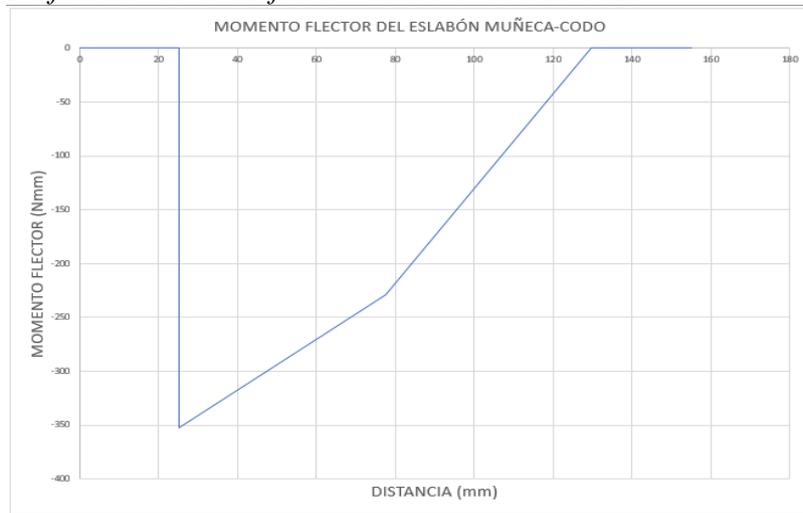


Nota: Gráfica eslabón muñeca-codo del brazo robótico

En la figura 36 se observa el comportamiento de los momentos sobre el eslabón de estudio en cada uno de los puntos de aplicación de la misma, siendo los apoyos del elemento y el punto del centro de masa. En la gráfica tenemos el momento flector máximo en el punto a 25,25 mm que tiene un valor de 352.63Nmm, siendo este el punto de apoyo cercano al objeto a trasladar.

Figura 36.

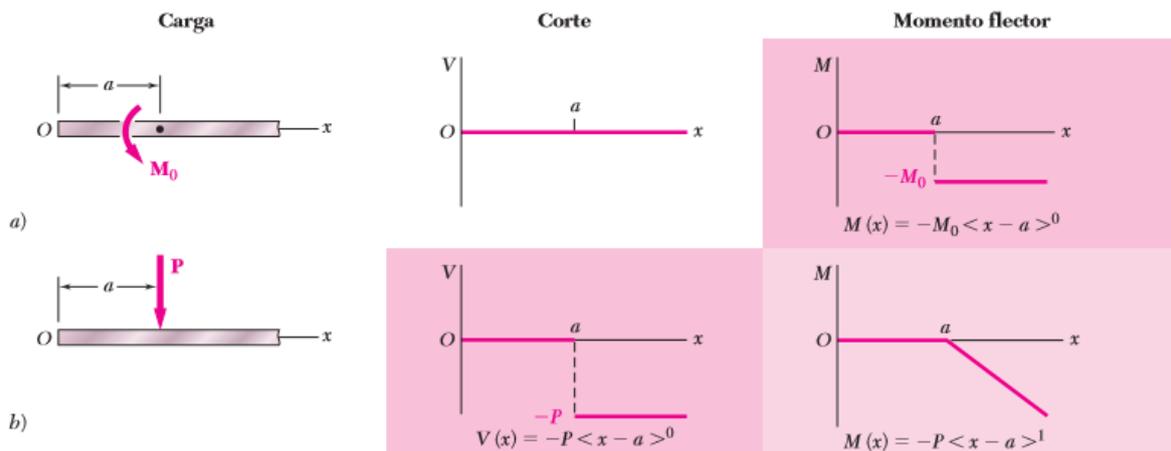
Gráfica de momento flector eslabón muñeca-codo



Nota: Gráfica eslabón muñeca-codo del brazo robótico

Para la elaboración de las gráficas de fuerza cortante y momento flector, se hace uso de las “Ecuaciones de singularidad”. Estas consisten en la mezcla de los valores de las cargas a las cuales está sometido el eslabón de estudio junto con su respectiva posición sobre él, donde según las condiciones siempre que la cantidad entre los corchetes sea positiva o cero, los corchetes deberán reemplazarse por paréntesis ordinarios; en cambio, si la cantidad es negativa, el corchete mismo es igual a cero. Para el desarrollo de estas, se tiene como referencia la figura 37, donde en la primera columna se encuentra la condición de carga, es este caso se tiene a) condición de momento aplicado en un punto de la viga, en la segunda columna se tiene la representación de la fuerza cortante en condición de dicha carga, finalmente en la tercera columna se tiene la representación del momento flector, así mismo su ecuación de singularidad debajo de la misma; b) condición de carga puntual aplicado en un punto de la viga, en la segunda columna se tiene la representación de la fuerza cortante en condición de dicha carga con su respectiva función de singularidad, finalmente en la tercera columna se tiene la representación del momento flector, así mismo su ecuación de singularidad debajo de la misma.

Figura 37.
Funciones de singularidad



Nota: Cargas básicas y sus correspondientes cortes y momentos flectores expresados en términos de funciones de singularidad. Tomado de: F. P. Beer *et al*, *Mecánica De Materiales*. McGraw-Hill México, DF-México, 2010.

Debido a que los eslabones de estudio están sometidos a cargas puntuales y momentos, se hará uso de las ecuaciones respectivas.

De igual manera, para la aplicación de estas, se deben considerar las siguientes condiciones:

Figura 38.

Condición funciones de singularidad.

$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} (x - a)^n & \text{cuando } x \geq a \\ 0 & \text{cuando } x < a \end{cases}$$

Nota: Condiciones para exponentes que tomen valores n . Tomado de: F. P. Beer *et al*, *Mecánica De Materiales*. McGraw-Hill México, DF-México, 2010.

Figura 39.

Condición funciones de singularidad.

$$\langle x - a \rangle^0 = \begin{cases} 1 & \text{cuando } x \geq a \\ 0 & \text{cuando } x < a \end{cases}$$

Nota: Condiciones para exponentes que tomen valores de 0. Tomado de: F. P. Beer *et al*, *Mecánica De Materiales*. McGraw-Hill México, DF-México, 2010.

Estas condiciones son empleadas para el desarrollo de las ecuaciones, debido que, al emplear un desarrollo matemático normal en estas, se tienen valores incorrectos o indeterminaciones debido a su estructura.

$$V(x) = F_{cy} \langle x - 0 \rangle^0 - W_{emc} \langle x - 52.25mm \rangle^0 - \langle x - 104.5mm \rangle^0$$

$$V(x) = 3.708 \langle x - 0 \rangle^0 - 0.6671N \langle x - 52.25mm \rangle^0 - 3,041N \langle x - 104.5mm \rangle^0$$

$$M(x) = -352.63Nmm \langle x - 0 \rangle^0 + 3.708Nx - 0.6671N \langle x - 52.25mm \rangle^1 - 3,041N \langle x - 104.5mm \rangle^1$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -352.63Nmm \langle x - 0 \rangle^0 + 3.708Nx - 0.6671N \langle x - 52.25mm \rangle^1 - 3.041N \langle x - 104.5mm \rangle^1$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -352.63Nmm \langle x - 0 \rangle^1 + 1.854Nx^2 - 0.3335N \langle x - 52.25mm \rangle^2 - 1.5205N \langle x - 104.5mm \rangle^2 + C1$$

$$EIY = -176.315Nmm \langle x - 0 \rangle^2 + 0.618Nx^3 - 0.11116N \langle x - 52.25mm \rangle^3 - 0.5068N \langle x - 104.5mm \rangle^3 + C1x + C2$$

$$x = 0 \quad Y \quad y = 0$$

$$EI(0) = C2 ; C2 = 0$$

$$x = 129.75mm \quad Y \quad y = 0$$

$$EI(0) = C1 ; C1 = 11827.94Nmm^2$$

Al conocer los valores de las constantes de integración, se puede hallar el valor de la deflexión máxima que puede soportar el eslabón de estudio. Este valor será calculado a continuación:

$$Y = \frac{-176.315Nmm \langle x - 0 \rangle^2 + 0.618Nx^3 - 0.11116N \langle x - 52.25mm \rangle^3 - 0.5068N \langle x - 104.5mm \rangle^3 + 11827.94Nmm^2x}{EI}$$

Teniendo en cuenta que:

$$E = 2.240GPa \rightarrow 2240 \frac{N}{mm^2}$$

$$I = 96026 \text{ mm}^4$$

$x = 104.5 \text{ mm}$ (siendo esta la posición de análisis por tomarse como una viga en cantilever)

Donde el valor de inercia se obtiene del cálculo en secciones posteriores del trabajo.

Al tener los valores requeridos para el cálculo, se obtiene que la deflexión máxima presentada es la siguiente:

$$Y = 6,13 \times 10^{-11} \text{ mm}$$

3.4.6.g Módulo de sección muñeca-codo. Al conocer el valor del momento máximo presentado en el eslabón muñeca-codo, se continúa con la validación del módulo de sección; esto con el fin de verificar que la sección definida trabajaría de forma óptima con respecto a la requerida.

Para lo anterior se realiza la comparación de las dos secciones previamente nombradas, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$S_{requerida} = \frac{M_{max}}{\sigma_{admisible}} \rightarrow \sigma_{admisible} = 0.60\sigma_y$$

$$S_{disponible} = \frac{I}{C} \rightarrow I = \frac{1}{12}bh^3$$

El parámetro del $\sigma_{admisible}$ es tomado del “Manual de diseño para la construcción con acero”, donde según el código de diseño ASD tenemos lo siguiente:

Ecuación 3.

Ecuación esfuerzo permisible

$$F_t = 0.60F_y$$

Por otro lado, para el cálculo del $S_{disponible}$ se realiza un análisis aproximado del perfil del eslabón, tomándolo como una sección totalmente rectangular; por lo cual lo analizaremos de la siguiente manera (ver figura 38):

Figura 38.
Momento de inercia.

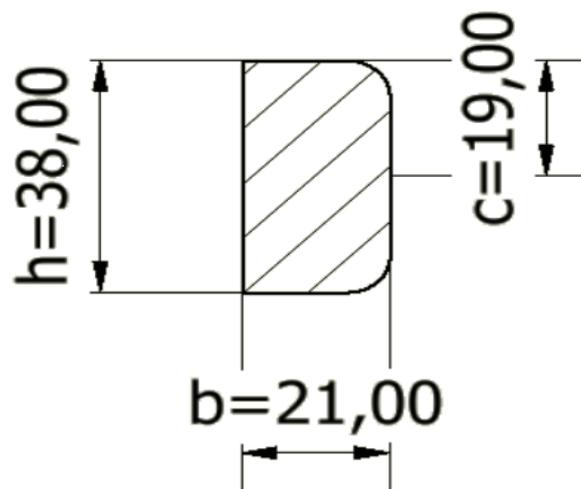
Rectángulo		$\bar{I}_{x'} = \frac{1}{12}bh^3$ $\bar{I}_{y'} = \frac{1}{12}b^3h$ $I_x = \frac{1}{3}bh^3$ $I_y = \frac{1}{3}b^3h$ $J_C = \frac{1}{12}bh(b^2 + h^2)$
------------	--	---

Nota: Ecuaciones para el cálculo de la inercia para una geometría rectangular. Tomado de: R. C. Hibbeler, *Mecánica Vectorial Para Ingenieros: Estática*. 2004.

Cómo se puede observar, se hace uso del momento de inercia respecto al eje X, debido a que la mayor cantidad de material se encuentra orientado en el eje Y, por su disposición, y por lo mismo esta debe trabajar de forma perpendicular con el eje respectivo.

Esta disposición del eslabón, se puede observar en la figura 39:

Figura 39.
Sección transversal eslabón muñeca-codo



Nota: Sección transversal del eslabón muñeca-codo.

De esta, obtenemos los respectivos valores de b, h y c; los cuales se usarán en el cálculo del módulo de sección disponible.

Ya conociendo cada uno de los valores necesarios, se prosigue a realizar los respectivos cálculos.

$$I = \frac{1}{12} (21\text{mm})(38\text{mm})^3$$

$$I = 96026\text{mm}^4$$

$$c = 19\text{mm}$$

$$S_{disponible} = \frac{96026\text{mm}^4}{19\text{mm}} \rightarrow S_{disponible} = 5054\text{mm}^3$$

$$\sigma_{admisible} = 0.60(20\text{MPa})$$

$$\sigma_{admisible} = 13.2\text{MPa}$$

$$M_{max} = 352.63\text{Nmm} \rightarrow 0.35263\text{Nm}$$

$$S_{requerida} = \frac{0.35263\text{Nm}}{13.2 \times 10^6\text{Pa}} \rightarrow S_{requerida} = 2.67 \times 10^{-8}\text{m}^3$$

$$S_{requerida} = 2.67 \times 10^{-8}\text{m}^3 \rightarrow 26.7\text{mm}^3$$

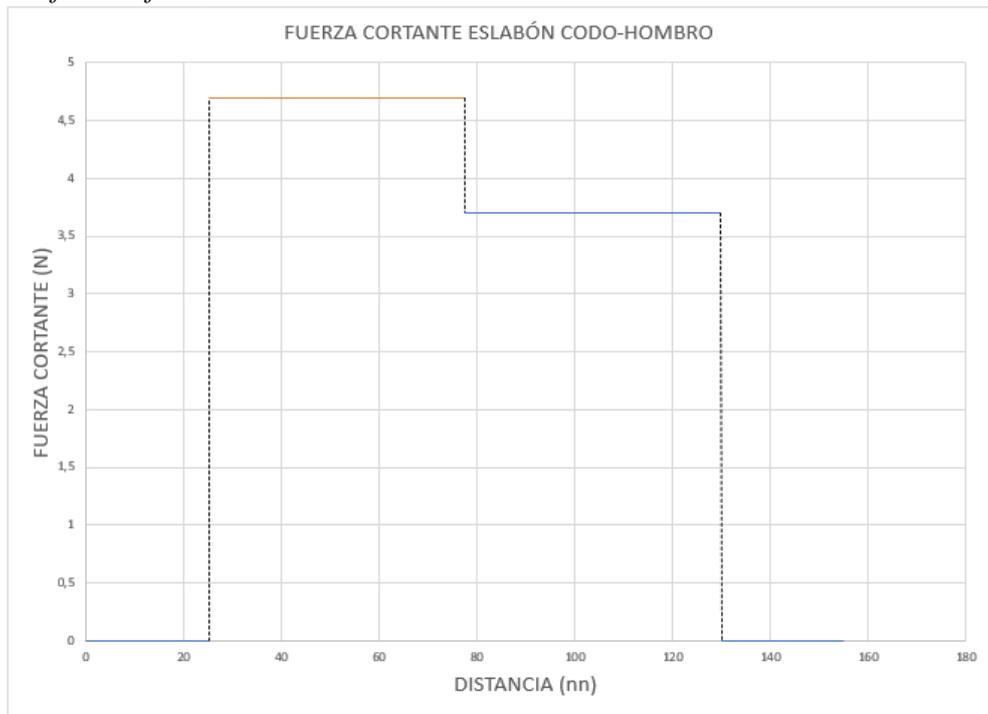
Realizando un análisis a los resultados obtenidos, se puede concluir que la geometría seleccionada, al igual que el material implementado, cumple de forma adecuada para su uso en el diseño del eslabón muñeca codo; visto en la siguiente comparación:

$$S_{disponible} \gg S_{requerida}$$

3.4.6.h Análisis tipo viga eslabón hombro-codo. En la figura 40 se observa el comportamiento de las fuerzas sobre el eslabón de estudio en cada uno de los puntos de aplicación de la misma, siendo los apoyos del elemento y el punto del centro de masa. En la gráfica tenemos la fuerza cortante máxima en el punto a 25,25 mm que tiene un valor de 4.699N, siendo este el punto de apoyo cercano al objeto a trasladar.

Figura 40.

Gráfica de fuerza cortante eslabón hombro-codo

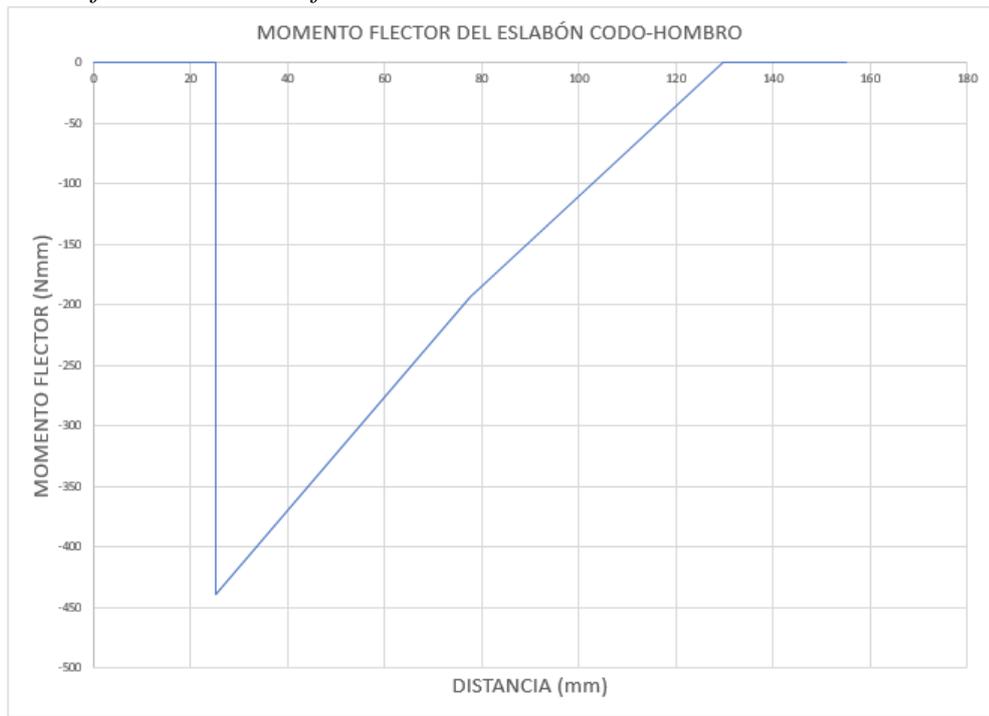


Nota: Gráfica eslabón hombro-codo del brazo robótico

En la figura 41 se observa el comportamiento de los momentos sobre el eslabón de estudio en cada uno de los puntos de aplicación de la misma, siendo los apoyos del elemento y el punto del centro de masa. En la gráfica tenemos el momento flector máximo en el punto a 25,25 mm que tiene un valor de 439.265Nmm, siendo este el punto de apoyo cercano al objeto a trasladar.

Figura 41.

Gráfica de momento flector eslabón hombro-codo



Nota: Gráfica eslabón hombro-codo del brazo robótico

$$V(x) = F_{dy} \langle x - 0 \rangle^0 - W_{ech} \langle x - 52.25mm \rangle^0 - F_{cy} \langle x - 104.5 \rangle^0$$

$$V(x) = 4.699N - 0.991N \langle x - 52.25mm \rangle^0 - 3.708N \langle x - 104.5mm \rangle^0$$

$$M(x) = -439.265Nmm \langle x - 0 \rangle^0 + 4.699N(x) - 0.991N \langle x - 52.25mm \rangle^1 - 3.708N \langle x - 104.5mm \rangle^1$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -439.265Nmm \langle x - 0 \rangle^0 + 4.699N(x) - 0.991N \langle x - 52.25mm \rangle^1 - 3.708N \langle x - 104.5mm \rangle^1$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -439.265Nmmx + 2.3495Nx^2 - 0.4955N \langle x - 52.25mm \rangle^2 - 1.854N \langle x - 104.5mm \rangle^2 + C1$$

$$EIY = -219.6325Nmmx^2 + 0.7831Nx^3 - 0.1651N \langle x - 52.25mm \rangle^3 - 0.618N \langle x - 104.5mm \rangle^3 + C1x + C2$$

$$x = 0 \quad Y \quad y = 0$$

$$EI(0) = C2 ; C2 = 0$$

$$x = 129.75mm \quad Y \quad y = 0$$

$$EI(0) = C1 ; C1 = 31277.88Nmm^2$$

Al conocer los valores de las constantes de integración, se puede hallar el valor de la deflexión máxima que puede soportar el eslabón de estudio. Este valor será calculado a continuación:

$$Y = \frac{-219.6325Nmmx^2 + 0.7831Nx^3 - 0.1651N < x - 52.25mm >^3 - 0.618N < x - 104.5mm >^3 + 31277.88Nmm^2x}{EI}$$

Teniendo en cuenta que:

$$E = 2.240GPa \rightarrow 2240 \frac{N}{mm^2}$$

$$I = 96026 \text{ mm}^4$$

$x = 104.5mm$ (siendo esta la posición de análisis por tomarse como una viga en cantiléver)

Donde el valor de inercia se obtiene del cálculo en secciones posteriores del trabajo.

Al tener los valores requeridos para el cálculo, se obtiene que la deflexión máxima presentada es la siguiente:

$$Y = 8.09 \times 10^{-3} mm$$

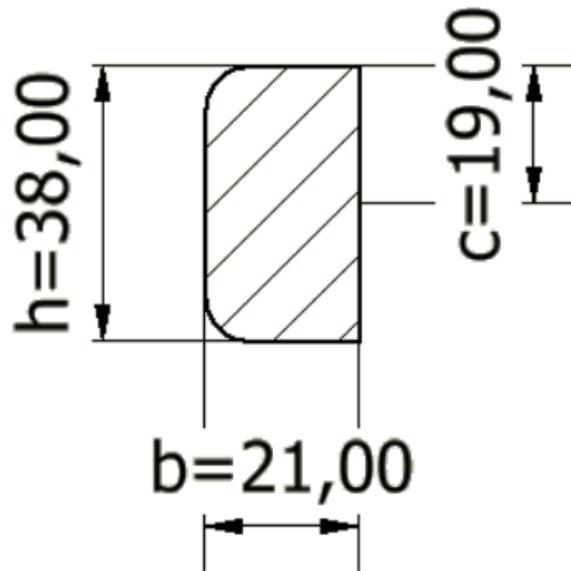
3.4.6.i Módulo de sección hombro-codo. En este espacio, se realizará el análisis anteriormente implementado con el eslabón muñeca-codo, para así poder validar el funcionamiento adecuado del siguiente componente, el cual trabaja como el eslabón codo-hombro. (ver figura 42)

$$S_{requerida} = \frac{M_{max}}{\sigma_{admisible}} \rightarrow \sigma_{admisible} = 0.66\sigma_y$$

$$S_{disponible} = \frac{I}{C} \rightarrow I = \frac{1}{12}bh^3$$

Figura 42.

Sección transversal eslabón codo-hombro



Nota: Sección transversal del eslabón codo-hombro.

$$I = \frac{1}{12} (21\text{mm})(38\text{mm})^3$$

$$I = 96026\text{mm}^4$$

$$c = 19\text{mm}$$

$$S_{disponible} = \frac{96026\text{mm}^4}{19\text{mm}} \rightarrow S_{disponible} = 5054\text{mm}^3$$

$$\sigma_{admisible} = 0.66(20\text{MPa})$$

$$\sigma_{admisible} = 13.2\text{MPa}$$

$$M_{max} = 439.265\text{Nmm} \rightarrow 0.439265\text{Nm}$$

$$S_{requerida} = \frac{0.439265\text{Nm}}{13.2 \times 10^6\text{Pa}} \rightarrow S_{requerida} = 3.33 \times 10^{-8}\text{m}^3$$

$$S_{requerida} = 3.33 \times 10^{-8}\text{m}^3 \rightarrow 33.3\text{mm}^3$$

Finalmente se concluye que al igual que la sección anterior, este eslabón trabajaría de forma óptima con el material y la geometría seleccionada.

Cómo en el estudio anterior, esto se corrobora con la siguiente comparación:

$$S_{disponible} \gg S_{requerida}$$

3.4.7 Selección de los motores

En la industria real encontramos motores paso a paso, servomotores y motor reductores, a partir del análisis estático, donde se tiene en cuenta el comportamiento de las fuerzas y así mismo los torques aproximados necesarios para ejercer el movimiento de los eslabones del brazo robótico. Teniendo en consideración que no se está teniendo en cuenta los pesos de los motores y para dar una mayor seguridad al diseño se utiliza factor de seguridad de 2.

Unión muñeca-electroimán

$$T = 129.723Nmm * 2$$
$$T = 259.446Nmm * \frac{1Kgf}{9.81N} * \frac{1cm}{10mm}$$
$$T = 2.6447Kgf\ cm$$

Dando como resultado el torque necesario para la selección del motor de la muñeca que se encarga de levantar el electroimán y el objeto que a manipular, en consecuencia, de que se dispone del servomotor MG995 se toma como opción para esta posición, en la figura 43 se puede observar sus especificaciones.

Figura 43.

Servomotor MG995



Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 8.5 kgf·cm (4.8 V), 10 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.2 s/60° (4.8 V), 0.16 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Dead band width: 5 μs
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

Nota: Especificaciones del servomotor MG995. Tomado de: TowerPro, "MG995," https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG995_Tower-Pro.Pdf

Eslabón codo-muñeca

$$T = 352.63Nmm * 2$$
$$T = 705.26Nmm * \frac{1 N}{9.81Kgf} * \frac{1 cm}{10 mm}$$
$$T = 7.189 Kgf cm$$

Dando como resultado el torque necesario para la selección del motor del codo que se encarga de levantar el eslabón y el conjunto de electroimán- objeto, en consecuencia, se selecciona el servomotor MG996R, en la figura 44 se puede observar sus especificaciones.

Figura 44.

Servomotor MG996R



Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 9.4 kgf·cm (4.8 V), 11 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.17 s/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Running Current 500 mA – 900 mA (6V)
- Stall Current 2.5 A (6V)
- Dead band width: 5 μs
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

Nota: Especificaciones del servomotor MG996R. Tomado de: TowerPro, "MG996R," https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG995_Tower-Pro.Pdf

Eslabón hombro-codo

$$T = 439.265Nmm * 2$$
$$T = 878.53Nmm * \frac{1 N}{9.81Kgf} * \frac{1 cm}{10 mm}$$
$$T = 8.955 Kgf cm$$

Dando como resultado el torque necesario para la selección del motor del hombro que se encarga de levantar el eslabón hombro-codo, codo muñeca y el conjunto de electroimán- objeto, en consecuencia, se selecciona el servomotor MG996R, en la figura 45 se puede observar sus especificaciones.

Figura 45.

Servomotor MG996R



Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 9.4 kgf·cm (4.8 V), 11 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.17 s/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Running Current 500 mA – 900 mA (6V)
- Stall Current 2.5 A (6V)
- Dead band width: 5 μs
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

Nota: Especificaciones del servomotor MG996R. Tomado de: TowerPro, "MG996R," https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG995_Tower-Pro.Pdf

Cálculo del torque necesario para el servomotor de la base:

Para el cálculo de rotación del giro de la muñeca se analiza al elemento final más el objeto a levantar.

Cálculo del torque de un objeto rotando sobre un eje sólido.

$$T = I * \alpha$$

donde

$$I = \text{Inercia}$$

$$\alpha = \text{Aceleración angular}$$

Para el cálculo de la aceleración, se tiene la siguiente ecuación:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

donde

$$\omega = \text{Velocidad angular (velocidad máxima de rotación)}$$

$$\omega_0 = \text{Velocidad angular inicial.}$$

$\alpha = \text{Aceleración angular}$

$t = \text{Tiempo}$

Para el cálculo de la aceleración angular se hizo una selección de velocidad angular de 1 RPM siendo este, el valor deseado para el movimiento del brazo.

$$\omega = 1 \text{ RPM} \rightarrow 0.104 \text{ rad/seg}$$

$$a = \frac{w - w_0}{t}$$

$$a = \frac{0.104 \text{ rev/seg}}{1 \text{ seg}} \rightarrow a = 0.104 \text{ rad/seg}^2$$

Ecuación 4.

Momento de inercia.

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

donde

$$M = \Sigma m$$

$$M = 0.479 \text{ Kg}$$

$$R = 147.032 \text{ mm}$$

$$I = (0.479 \text{ Kg})(147.032 \text{ mm})^2$$

$$I = 10355.21 \text{ Kgmm}^2$$

$$T = (10355.21 \text{ Kgmm}^2)(0.104 \text{ rad/seg}^2)$$

$$T = 1076.941 \text{ Nmm} * \frac{1 \text{ N}}{9.81 \text{ Kgf}} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}}$$

$$T = 10.977 \text{ Kg cm}$$

Dando como resultado el torque necesario para la selección del motor de la base que se encarga de rotar los eslabones hombre-codo, codo muñeca y el conjunto de electroimán- objeto, en consecuencia, se selecciona el servomotor MG996R, en la figura 43 se puede observar sus especificaciones, donde el torque(6V) satisface.

Para la conexión entre los eslabones y los servomotores seleccionados, se hace uso de un acople el cual se puede ver en el anexo B, donde se puede observar tanto sus dimensiones como la de los tornillos a utilizar.

3.4.8 Análisis velocidades y aceleraciones

El siguiente análisis se realiza para estudiar el comportamiento de las velocidades y aceleraciones teniendo en cuenta los torques requeridos por el brazo.

Principalmente se tiene las medidas de los eslabones para el cálculo de los valores requeridos:

Protuberancia base: 36.276mm

Hombro-codo: 104.5mm

Codo-muñeca: 104.5mm

Soporte electroimán: 65.008mm

A continuación, se realiza el cálculo de la velocidad y aceleración angulares que se requieren para el estudio. Esto se realiza teniendo en cuenta los valores de los torques hallados mediante el estudio estático de los eslabones que componen el brazo.

Lo anterior se realiza para cada una de las articulaciones debido a que se necesitan estos valores de entrada para los análisis.

- Torque hombro

$$T = 878.53 \text{ Nmm}$$

$$T = I * \alpha$$

$$I = 13439.17 \text{ Kgmm}^2$$

$$\alpha = \frac{T}{I}$$

$$\alpha = \frac{878.53 \text{ Nmm}}{13439.17 \text{ Kgmm}^2} \rightarrow \alpha = 0.065 \text{ rad/seg}^2$$

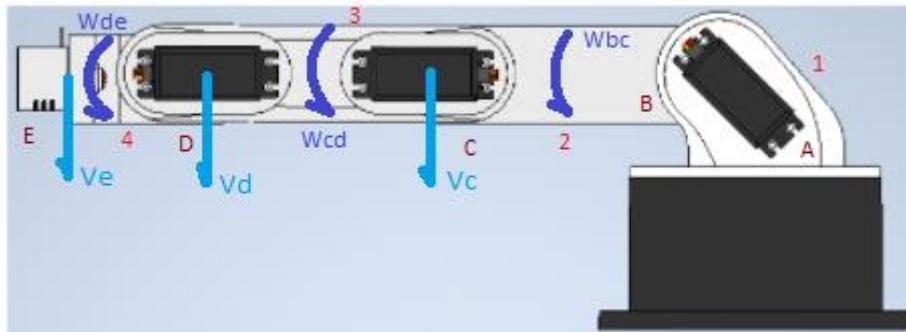
$$\omega = \omega_0 + \alpha t \rightarrow \omega_0 = 0$$

$$\omega = (0.065 \text{ rad/seg}^2)(1 \text{ seg})$$

$$\omega = 0.065 \text{ rad/seg}$$

Figura 46.

Posición #1



Nota: Posición crítica de análisis.

Velocidades

$$V_c^{\rightarrow} = V_b^{\rightarrow} + W_{bc}^{\rightarrow} \times r_{c/b}^{\rightarrow} \rightarrow V_b^{\rightarrow} = 0$$

$$V_c^{\rightarrow} = (0.065 \text{ rad/seg } k) \times (-104.5 \text{ mm } i)$$

$$V_c^{\rightarrow} = -6.7925 \text{ mm/seg } j$$

$$V_d^{\rightarrow} = V_c^{\rightarrow} + W_{cd}^{\rightarrow} \times r_{d/c}^{\rightarrow}$$

$$V_d^{\rightarrow} = (-6.7925 \text{ mm/seg } j) + (W_{cd}^{\rightarrow}) \times (-104.5 \text{ mm } i)$$

$$V_d^{\rightarrow} = -6.7925 \text{ mm/seg } j - 104.5 \text{ mm } j W_{cd}^{\rightarrow}$$

- Torque codo

$$T = 705.26 \text{ Nmm}$$

$$T = I * \alpha$$

$$I = \frac{1}{2} (0.25 \text{ Kg}) (184.5 \text{ mm})^2 + \frac{1}{2} (0.025 \text{ Kg}) (157 \text{ mm})^2 + \frac{1}{2} (0.035 \text{ Kg}) (128.78 \text{ mm})^2$$

$$+ \frac{1}{2} (0.068 \text{ Kg}) (52.25 \text{ mm})^2$$

$$I = 4946.19 \text{ Kgmm}^2$$

$$\alpha = \frac{T}{I}$$

$$\alpha = \frac{705.26 \text{ Nmm}}{4946.19 \text{ Kgmm}^2} \rightarrow \alpha = 0.1425 \text{ rad/seg}^2$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \rightarrow \omega_0 = 0$$

$$\omega = (0.1425 \text{ rad/seg}^2)(1 \text{ seg})$$

$$\omega = 0.1425 \text{ rad/seg}$$

$$V_d^{\rightarrow} = -6.7925 \text{ mm/seg } j - 104.5 \text{ mm } j(0.1425 \text{ rad/seg})$$

$$V_d^{\rightarrow} = -21.68 \text{ mm/seg } j$$

$$V_e^{\rightarrow} = V_d^{\rightarrow} + W_{de}^{\rightarrow} \times r_{e/d}^{\rightarrow}$$

$$V_e^{\rightarrow} = (-21.68 \text{ mm/seg } j) + (W_{de}^{\rightarrow} k)(-65.008 \text{ mm } i)$$

$$V_e^{\rightarrow} = -21.68 \text{ mm/seg } j - 65.998 j W_{de}^{\rightarrow}$$

- Torque muñeca

$$T = 259.446 \text{ Nmm}$$

$$T = I * \alpha$$

$$I = \frac{1}{2}(0.25 \text{ Kg})(80 \text{ mm})^2 + \frac{1}{2}(0.025 \text{ Kg})(52.25 \text{ mm})^2 + \frac{1}{2}(0.035 \text{ Kg})(24.26 \text{ mm})^2$$

$$I = 844.7527 \text{ Kgmm}^2$$

$$\alpha = \frac{T}{I}$$

$$\alpha = \frac{259.446 \text{ Nmm}}{844.7527 \text{ Kgmm}^2} \rightarrow \alpha = 0.3071 \text{ rad/seg}^2$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \rightarrow \omega_0 = 0$$

$$\omega = (0.3071 \text{ rad/seg}^2)(1 \text{ seg})$$

$$\omega = 0.3071 \text{ rad/seg}$$

$$V_e^{\rightarrow} = -21.68 \text{ mm/seg } j - 65.008 \text{ mm } j(0.3071 \text{ rad/seg})$$

$$V_e^{\rightarrow} = -41.64 \text{ mm/seg } j$$

Aceleraciones

$$a_c^{\rightarrow} = a_b^{\rightarrow} + \alpha_{bc}^{\rightarrow} \times r_{c/b}^{\rightarrow} - W_{bc}^2 * r_{c/b}^{\rightarrow} \rightarrow a_b^{\rightarrow} = 0$$

$$a_c^{\rightarrow} = (0.065 \text{ mm/seg}^2 k) \times (-104.5 \text{ mm } i) - (0.065 \text{ mm/seg})^2 (-104.5 \text{ mm } i)$$

$$a_c^{\rightarrow} = -6.7925 \text{ mm/seg}^2 j + 0.4415 \text{ mm/seg}^2 i$$

$$a_d^{\rightarrow} = a_c^{\rightarrow} + \alpha_{cd}^{\rightarrow} \times r_{d/c}^{\rightarrow} - W_{cd}^2 * r_{d/c}^{\rightarrow}$$

$$\begin{aligned}
a_d^{\vec{}} &= (-6.7925\text{mm}/\text{seg}^2 j + 0.4415\text{mm}/\text{seg}^2 i) \\
&\quad + (0.1425\text{mm}/\text{seg}^2 k) \times (-104.5\text{mm } i) \\
&\quad - (0.1425\text{mm}/\text{seg})^2 (-104.5\text{mm } i) \\
a_d^{\vec{}} &= -6.7925\text{mm}/\text{seg}^2 j + 0.4415\text{mm}/\text{seg}^2 i - 14.89\text{mm}/\text{seg}^2 j + 2.1222\text{mm}/\text{seg}^2 i \\
a_d^{\vec{}} &= -21.6825\text{mm}/\text{seg}^2 j + 2.5635\text{mm}/\text{seg}^2 i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_e^{\vec{}} &= a_d^{\vec{}} + \alpha_{de}^{\vec{}} \times r_{e/d}^{\vec{}} - W_{de}^2 * r_{e/d}^{\vec{}} \\
a_e^{\vec{}} &= (-21.6825\text{mm}/\text{seg}^2 j + 2.5635\text{mm}/\text{seg}^2 i) \\
&\quad + (0.3071\text{mm}/\text{seg}^2 k) \times (-65.008\text{mm } i) \\
&\quad - (0.3071\text{mm}/\text{seg})^2 (-65.008\text{mm } i) \\
a_e^{\vec{}} &= -21.6825\text{mm}/\text{seg}^2 j + 2.5635\text{mm}/\text{seg}^2 i - 19.96\text{mm}/\text{seg}^2 j \\
&\quad + 6.1309\text{mm}/\text{seg}^2 i \\
a_e^{\vec{}} &= -41.6425\text{mm}/\text{seg}^2 j + 8.6944\text{mm}/\text{seg}^2 i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_c^{\vec{}} &= -6.7925\text{mm}/\text{seg}^2 j + 0.4415\text{mm}/\text{seg}^2 i \\
a_c &= \sqrt{(0.4415\text{mm}/\text{seg}^2)^2 + (-6.7925\text{mm}/\text{seg}^2)^2} \\
a_c &= 6.8069\text{mm}/\text{seg}^2 \\
\tan(\tau) &= \frac{6.7925\text{mm}/\text{seg}^2}{0.4415\text{mm}/\text{seg}^2} \rightarrow \tau = 86.28^\circ \\
\phi &= 360^\circ - 86.28^\circ ; \phi = 273.72^\circ
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_d^{\vec{}} &= -21.6825\text{mm}/\text{seg}^2 j + 2.5635\text{mm}/\text{seg}^2 i \\
a_d &= \sqrt{(2.5635\text{mm}/\text{seg}^2)^2 + (-21.6825\text{mm}/\text{seg}^2)^2} \\
a_d &= 21.8335\text{mm}/\text{seg}^2 \\
\tan(\tau) &= \frac{21.6825\text{mm}/\text{seg}^2}{2.5635\text{mm}/\text{seg}^2} \rightarrow \tau = 83.25^\circ \\
\phi &= 360^\circ - 83.25^\circ ; \phi = 276.75^\circ
\end{aligned}$$

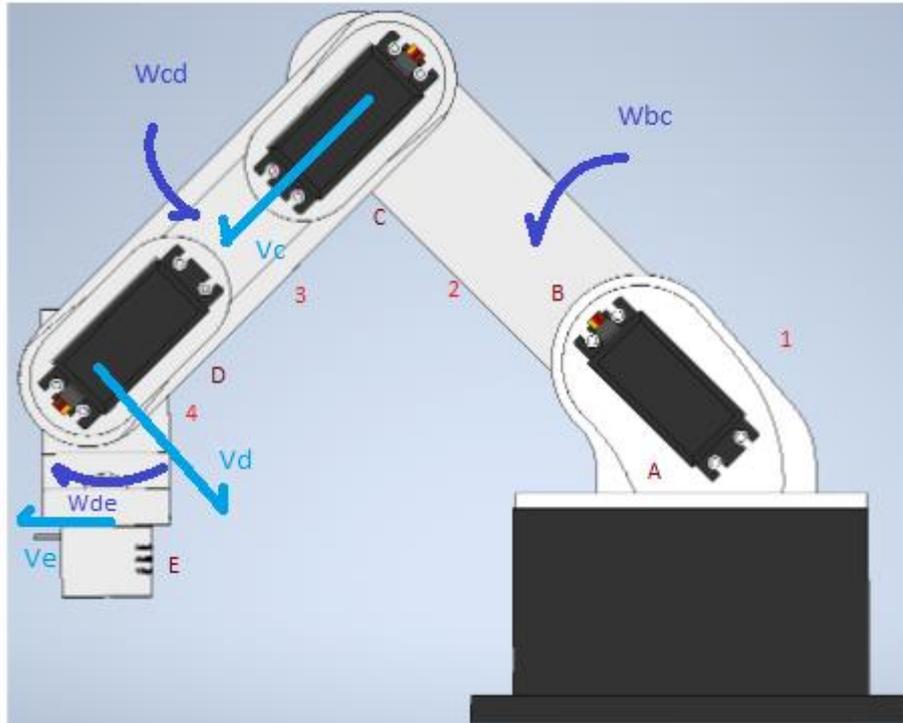
$$\begin{aligned}
a_e^{\vec{}} &= -41.6425\text{mm}/\text{seg}^2 j + 8.6944\text{mm}/\text{seg}^2 i \\
a_e &= \sqrt{(8.6944\text{mm}/\text{seg}^2)^2 + (-41.6425\text{mm}/\text{seg}^2)^2} \\
a_e &= 42.5404\text{mm}/\text{seg}^2 \\
\tan(\tau) &= \frac{41.6425\text{mm}/\text{seg}^2}{8.6944\text{mm}/\text{seg}^2} \rightarrow \tau = 78.20^\circ
\end{aligned}$$

$$\phi = 360^\circ - 78.20^\circ ; \phi = 281.8^\circ$$

Para la siguiente figura, se considera una posición distinta donde tenemos variaciones en los ángulos de las articulaciones del hombro (45°) y del codo (90°).

Figura 47.

Posición #2



Nota: Posición de reposo del brazo.

Velocidades

$$V_c^{\rightarrow} = V_b^{\rightarrow} + W_{bc}^{\rightarrow} \times r_{c/b}^{\rightarrow} \rightarrow V_b^{\rightarrow} = 0$$

$$\text{Cos} \alpha = \frac{A_{dy}}{H_{ip}} \rightarrow \text{Cos} \alpha * (H_{ip}) = A_{dy}$$

$$\text{Cos} * (45^\circ) * (104.5\text{mm}) = A_{dy} \rightarrow A_{dy} = 73.89\text{mm}$$

$$\text{Tan} \alpha = \frac{O_{pu}}{A_{dy}} \rightarrow \text{Tan} \alpha * (A_{dy}) = O_{pu}$$

$$\text{Tan} * (45^\circ) * (73.89\text{mm}) = O_{pu} \rightarrow O_{pu} = 73.89\text{mm}$$

$$V_c^{\rightarrow} = (0.065\text{rev/seg } k) \times (-73.89\text{mm } i + 73.89\text{mm } j)$$

$$V_c^{\rightarrow} = -4.80\text{mm/seg } j - 4.80\text{mm/seg } i$$

$$V_d^{\rightarrow} = V_c^{\rightarrow} + W_{cd}^{\rightarrow} \times r_{d/c}^{\rightarrow}$$

$$\text{Cos}\alpha = \frac{\text{Ady}}{\text{Hip}} \rightarrow \text{Cos}\alpha * (\text{Hip}) = \text{Ady}$$

$$\text{Cos} * (45^\circ) * (104.5\text{mm}) = \text{Ady} \rightarrow \text{Ady} = 73.89\text{mm}$$

$$\text{Tan}\alpha = \frac{\text{Opu}}{\text{Ady}} \rightarrow \text{Tan}\alpha * (\text{Ady}) = \text{Opu}$$

$$\text{Tan} * (45^\circ) * (73.89\text{mm}) = \text{Opu} \rightarrow \text{Opu} = 73.89\text{mm}$$

$$V_d^{\rightarrow} = (-4.80\text{mm}/\text{seg } j - 4.80\text{mm}/\text{seg } i) + (0.1425\text{rev}/\text{seg } k) \times (-73.89\text{mm } i - 73.89\text{mm } j)$$

$$V_d^{\rightarrow} = -4.80\text{mm}/\text{seg } j - 4.80\text{mm}/\text{seg } i - 10.53\text{mm}/\text{seg } j + 10.53\text{mm}/\text{seg } i$$

$$V_d^{\rightarrow} = 5.73\text{mm}/\text{seg } i - 15.33\text{mm}/\text{seg } j$$

$$V_e^{\rightarrow} = V_d^{\rightarrow} + W_{de}^{\rightarrow} \times r_{e/d}^{\rightarrow}$$

$$V_e^{\rightarrow} = (5.73\text{mm}/\text{seg } i - 15.33\text{mm}/\text{seg } j) + (0.3071\text{rev}/\text{seg } k) \times (-65.008\text{mm } i)$$

$$V_e^{\rightarrow} = 5.73\text{mm}/\text{seg } i - 15.33\text{mm}/\text{seg } j - 19.96\text{mm}/\text{seg } i$$

$$V_e^{\rightarrow} = -14.23\text{mm}/\text{seg } i - 15.33\text{mm}/\text{seg } j$$

Aceleraciones

$$a_c^{\rightarrow} = a_b^{\rightarrow} + \alpha_{bc}^{\rightarrow} \times r_{c/b}^{\rightarrow} - W_{bc}^2 * r_{c/b}^{\rightarrow} \rightarrow a_b^{\rightarrow} = 0$$

$$a_c^{\rightarrow} = (0.065\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } k) \times (-73.89\text{mm } i + 73.89\text{mm } j)$$

$$- (0.065\text{mm}/\text{seg})^2 (-73.89\text{mm } i + 73.89\text{mm } j)$$

$$a_c^{\rightarrow} = -4.80\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j - 4.80\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i + 0.3121\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i - 0.3121\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j$$

$$a_c^{\rightarrow} = -4.4879\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i - 5.1121\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j$$

$$a_d^{\rightarrow} = a_c^{\rightarrow} + \alpha_{cd}^{\rightarrow} \times r_{d/c}^{\rightarrow} - W_{cd}^2 * r_{d/c}^{\rightarrow}$$

$$a_d^{\rightarrow} = (-4.4879\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i - 5.1121\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j)$$

$$+ (0.1425\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } k) \times (-73.89\text{mm } i - 73.89\text{mm } j)$$

$$- (0.1425\text{mm}/\text{seg})^2 (-73.89\text{mm } i - 73.89\text{mm } j)$$

$$a_d^{\rightarrow} = -4.4879\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i - 5.1121\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j - 10.53\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j + 10.53\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i$$

$$1.50\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i + 1.50\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j$$

$$a_d^{\rightarrow} = 7.5421\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } i - 14.1421\text{mm}/\text{seg}^2 \text{ } j$$

$$\begin{aligned}
a_e^{\vec{}} &= a_d^{\vec{}} + \alpha_{de}^{\vec{}} \times r_{e/d}^{\vec{}} - W_{de}^2 * r_{e/d}^{\vec{}} \\
a_e^{\vec{}} &= (7.5421\text{mm/seg}^2 i - 14.1421\text{mm/seg}^2 j) \\
&\quad + (-0.3071\text{mm/seg}^2 k) \times (-65.008\text{mm } j) \\
&\quad - (-0.3071\text{mm/seg})^2 (-65.008\text{mm } j) \\
a_e^{\vec{}} &= 7.5421\text{mm/seg}^2 i - 14.1421\text{mm/seg}^2 j - 19.96\text{mm/seg}^2 i - 6.1309\text{mm/seg}^2 j \\
a_e^{\vec{}} &= -12.41\text{mm/seg}^2 i - 20.27\text{mm/seg}^2 j
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_c^{\vec{}} &= -4.4879\text{mm/seg}^2 i - 5.1121\text{mm/seg}^2 j \\
a_c &= \sqrt{(-4.4879\text{mm/seg}^2)^2 + (-5.1121\text{mm/seg}^2)^2} \\
a_c &= 6.8025\text{mm/seg}^2 \\
Tan(\tau) &= \frac{5.1121\text{mm/seg}^2}{4.4879\text{mm/seg}^2} \rightarrow \tau = 48.72^\circ \\
\phi &= 180^\circ + 48.72^\circ ; \phi = 228.72^\circ
\end{aligned}$$

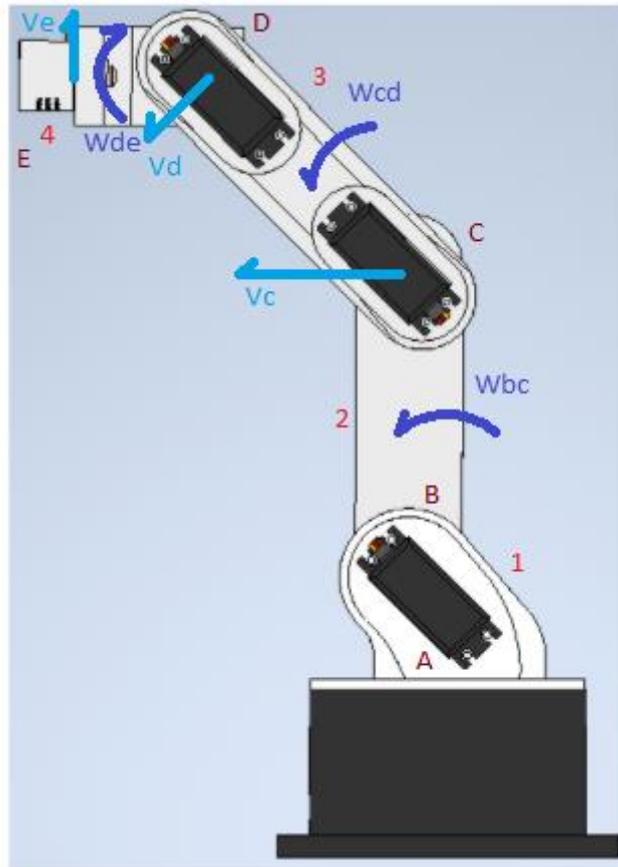
$$\begin{aligned}
a_d^{\vec{}} &= 7.5421\text{mm/seg}^2 i - 14.1421\text{mm/seg}^2 j \\
a_d &= \sqrt{(7.5421\text{mm/seg}^2)^2 + (-14.1421\text{mm/seg}^2)^2} \\
a_d &= 16.02\text{mm/seg}^2 \\
Tan(\tau) &= \frac{14.1421\text{mm/seg}^2}{7.5421\text{mm/seg}^2} \rightarrow \tau = 61.92^\circ \\
\phi &= 360^\circ - 61.92^\circ ; \phi = 298.08^\circ
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_e^{\vec{}} &= -12.41\text{mm/seg}^2 i - 20.27\text{mm/seg}^2 j \\
a_e &= \sqrt{(-12.41\text{mm/seg}^2)^2 + (-20.27\text{mm/seg}^2)^2} \\
a_e &= 23.76\text{mm/seg}^2 \\
Tan(\tau) &= \frac{20.27\text{mm/seg}^2}{12.41\text{mm/seg}^2} \rightarrow \tau = 58.52^\circ \\
\phi &= 180^\circ - 58.52^\circ ; \phi = 238.52^\circ
\end{aligned}$$

Como en el caso anterior, para un análisis detallado se varia nuevamente los ángulos de las articulaciones donde tenemos para el hombro un ángulo de 90° y para el codo uno de 45°.

Figura 48.

Posición #3



Nota: Posición aleatoria del brazo.

Velocidades

$$V_c^{\rightarrow} = V_b^{\rightarrow} + W_{bc}^{\rightarrow} \times r_{c/b}^{\rightarrow} \rightarrow V_b^{\rightarrow} = 0$$

$$V_c^{\rightarrow} = (0.065 \text{ rev/seg } k) \times (104.5 \text{ mm } j)$$

$$V_c^{\rightarrow} = -6.7925 \text{ mm/seg } i$$

$$V_d^{\rightarrow} = V_c^{\rightarrow} + W_{cd}^{\rightarrow} \times r_{d/c}^{\rightarrow}$$

$$V_d^{\rightarrow} = (-6.7925 \text{ mm/seg } i) + (0.1425 \text{ rev/seg } k) \times (-73.89 \text{ mm } i + 73.89 \text{ mm } j)$$

$$V_d^{\rightarrow} = -6.7925 \text{ mm/seg } i - 10.53 \text{ mm/seg } j - 10.53 \text{ mm/seg } i$$

$$V_d^{\rightarrow} = -17.32 \text{ mm/seg } i - 10.53 \text{ mm/seg } j$$

$$V_e^{\rightarrow} = V_d^{\rightarrow} + W_{de}^{\rightarrow} \times r_{e/d}^{\rightarrow}$$

$$V_e^{\rightarrow} = (-17.32\text{mm/seg } i - 10.53\text{mm/seg } j) + (-0.3071\text{rev/seg } k) \times (-65.008\text{mm } i)$$

$$V_e^{\rightarrow} = -17.32\text{mm/seg } i - 10.53\text{mm/seg } j + 19.96\text{mm/seg } j$$

$$V_e^{\rightarrow} = -17.32\text{mm/seg } i + 9.43\text{mm/seg } j$$

Aceleraciones

$$a_c^{\rightarrow} = a_b^{\rightarrow} + \alpha_{bc}^{\rightarrow} \times r_{c/b}^{\rightarrow} - W_{bc}^2 * r_{c/b}^{\rightarrow} \rightarrow a_b^{\rightarrow} = 0$$

$$a_c^{\rightarrow} = (0.065\text{mm/seg}^2 \text{ } k) \times (104.5\text{mm } j) - (0.065\text{mm/seg})^2 (104.5\text{mm } j)$$

$$a_c^{\rightarrow} = -6.79\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 0.44\text{mm/seg}^2 \text{ } j$$

$$a_d^{\rightarrow} = a_c^{\rightarrow} + \alpha_{cd}^{\rightarrow} \times r_{d/c}^{\rightarrow} - W_{cd}^2 * r_{d/c}^{\rightarrow}$$

$$a_d^{\rightarrow} = (-6.79\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 0.44\text{mm/seg}^2 \text{ } j) + (0.1425\text{mm/seg}^2 \text{ } k) \times (-73.89\text{mm } i + 73.89\text{mm } j)$$

$$- (0.1425\text{mm/seg})^2 (-73.89\text{mm } i + 73.89\text{mm } j)$$

$$a_d^{\rightarrow} = -6.79\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 0.44\text{mm/seg}^2 \text{ } j - 10.53\text{mm/seg}^2 \text{ } j - 10.53\text{mm/seg}^2 \text{ } i$$

$$1.50\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 1.50\text{mm/seg}^2 \text{ } j$$

$$a_d^{\rightarrow} = -15.82\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 12.47\text{mm/seg}^2 \text{ } j$$

$$a_e^{\rightarrow} = a_d^{\rightarrow} + \alpha_{de}^{\rightarrow} \times r_{e/d}^{\rightarrow} - W_{de}^2 * r_{e/d}^{\rightarrow}$$

$$a_e^{\rightarrow} = (-15.82\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 12.47\text{mm/seg}^2 \text{ } j)$$

$$+ (-0.3071\text{mm/seg}^2 \text{ } k) \times (-65.008\text{mm } j)$$

$$- (-0.3071\text{mm/seg})^2 (-65.008\text{mm } j)$$

$$a_e^{\rightarrow} = -15.82\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 12.47\text{mm/seg}^2 \text{ } j + 19.96\text{mm/seg}^2 \text{ } j + 6.1309\text{mm/seg}^2 \text{ } j$$

$$a_e^{\rightarrow} = -9.69\text{mm/seg}^2 \text{ } i + 7.49\text{mm/seg}^2 \text{ } j$$

$$a_c^{\rightarrow} = -6.79\text{mm/seg}^2 \text{ } i - 0.44\text{mm/seg}^2 \text{ } j$$

$$a_c = \sqrt{(-6.79\text{mm/seg}^2)^2 + (-0.44\text{mm/seg}^2)^2}$$

$$a_c = 6.8042\text{mm/seg}^2$$

$$\text{Tan}(\tau) = \frac{0.44\text{mm/seg}^2}{6.79\text{mm/seg}^2} \rightarrow \tau = 3.70^\circ$$

$$\phi = 180^\circ + 3.70^\circ ; \phi = 183.70^\circ$$

$$\begin{aligned}
\vec{a}_d &= -15.82\text{mm}/\text{seg}^2 i - 12.47\text{mm}/\text{seg}^2 j \\
a_d &= \sqrt{(-15.82\text{mm}/\text{seg}^2)^2 + (-12.47\text{mm}/\text{seg}^2)^2} \\
a_c &= 20.1438\text{mm}/\text{seg}^2 \\
\tan(\tau) &= \frac{12.47\text{mm}/\text{seg}^2}{15.82\text{mm}/\text{seg}^2} \rightarrow \tau = 38.24^\circ \\
\phi &= 180^\circ + 38.24^\circ ; \phi = 218.24^\circ
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{a}_e &= -9.69\text{mm}/\text{seg}^2 i + 7.49\text{mm}/\text{seg}^2 j \\
a_e &= \sqrt{(-9.69\text{mm}/\text{seg}^2)^2 + (7.49\text{mm}/\text{seg}^2)^2} \\
a_e &= 12.24\text{mm}/\text{seg}^2 \\
\tan(\tau) &= \frac{7.49\text{mm}/\text{seg}^2}{9.69\text{mm}/\text{seg}^2} \rightarrow \tau = 37.70^\circ \\
\phi &= 180^\circ - 37.70^\circ ; \phi = 142.3^\circ
\end{aligned}$$

3.4.9 Matrices jacobianas

Para el análisis de velocidades y aceleraciones se puede aplicar un método matricial, que corresponde a las matrices jacobianas, la cual arroja la relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las del extremo del robot, este método se deriva de la matriz homogénea, donde tenemos las matrices; matriz jacobiana directa y matriz jacobiana inversa, la jacobiana directa permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de conocer las velocidades articulares y las jacobiana inversa permite conocer las velocidades articulares necesarias para obtener unas velocidades determinadas en el extremo del robot, expresión para matriz jacobiana. (Ver figura 49)

Figura 49.

Expresión de matriz jacobiana

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_y}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

Nota: Definición de la matriz jacobiana según, Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007) "Fundamentos de robótica" Madrid: McGraw-Hill.

3.4.10 Interfaz de control

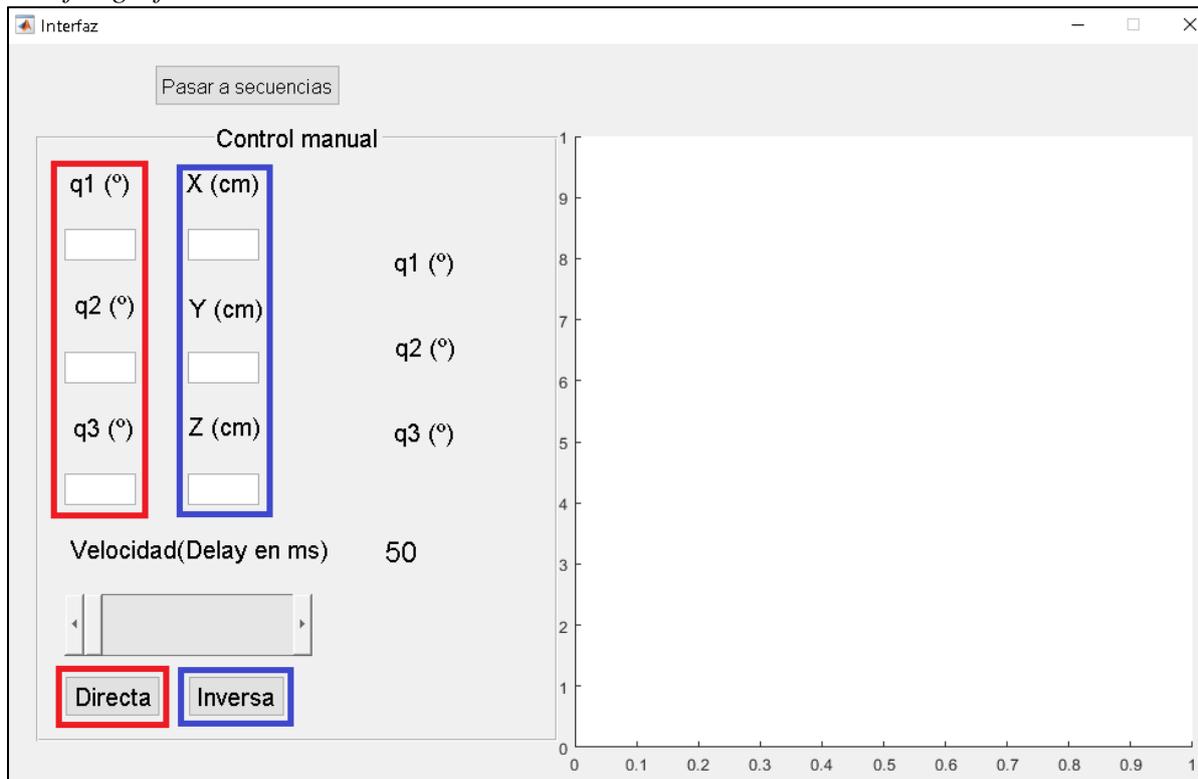
Se realizó un interfaz de control humano-máquina, donde consta principalmente de 2 partes, las cuales son:

- Control manual: Control por posición usando los dos tipos de cinemáticas, tanto directa como inversa.
- Control por secuencias: Control usando los dos tipos de cinemáticas, tanto directa como inversa con posibilidad de realizar movimientos de un punto a otro.

3.4.10.a Interfaz gráfica de control manual. Esta interfaz se realizó con el fin de controlar el brazo robótico ingresando los valores definidos por el usuario, tanto aplicando la cinemática directa como la inversa, así mismo controlando la velocidad de los motores del brazo robótico. (ver figura 50)

Figura 50.

Interfaz gráfica



Nota: Interfaz gráfica mostrando las zonas donde aplicar la cinemática directa (Color rojo) e inversa (Color azul).

En esta interfaz gráfica se puede realizar los dos tipos de cinemática, donde se puede encontrar los respectivos cuadros de texto para ingresar el valor que se requiera, en la parte de abajo se encuentran los botones, tanto para aplicar la cinemática directa como la inversa, un deslizador para el control de velocidad para los servomotores y finalmente un interfaz adicional de secuencias.

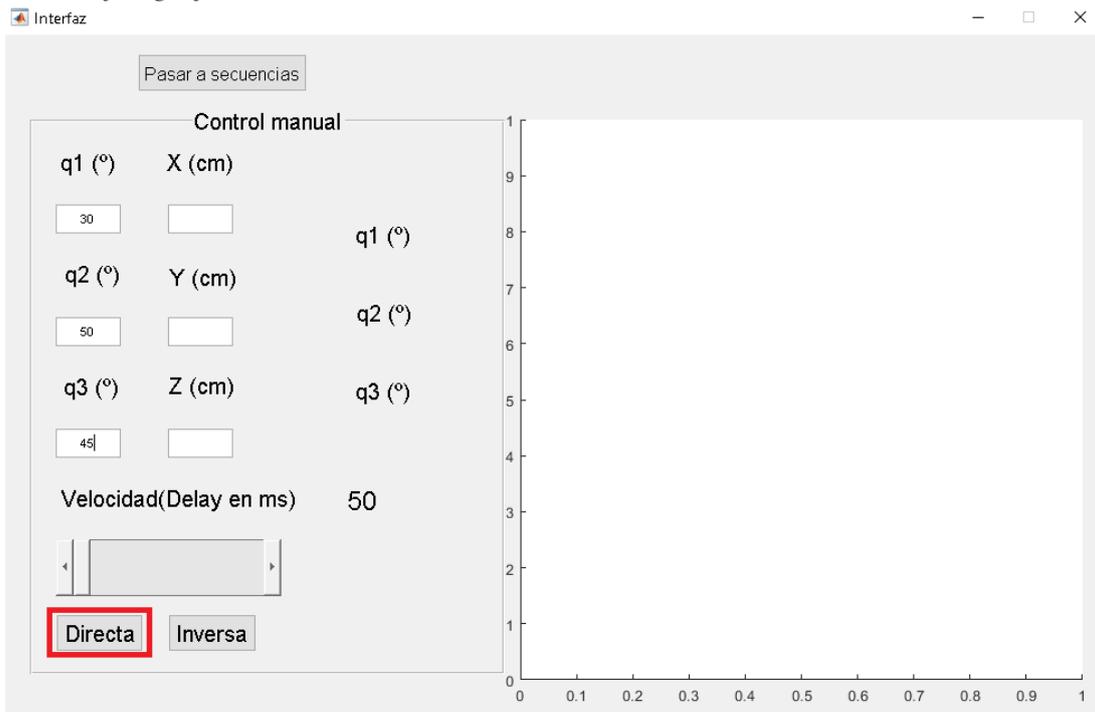
A modo de ilustración se tienen las figuras 51, 52, 53 y 54, donde se muestra cómo utilizar la interfaz.

Primero se procede a dar los valores de entrada, en el ejemplo de la figura 51, los parámetros ingresados son los ángulos de las respectivas articulaciones.

Luego se procede a presionar el botón “Directa” que se encuentra en un recuadro rojo en la figura 51, así mismo se puede realizar con la cinemática inversa como se muestra en la figura 52.

Figura 51.

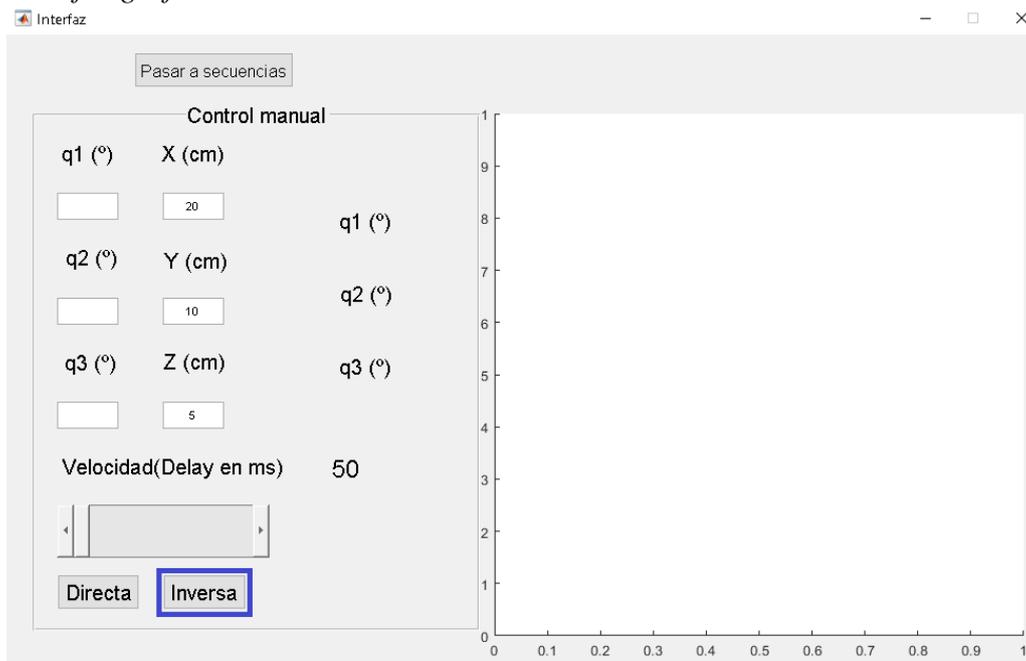
Interfaz gráfica botón cinemática directa



Nota: Interfaz gráfica mostrando el botón de cinemática directa.

Figura 52.

Interfaz gráfica botón cinemática inversa



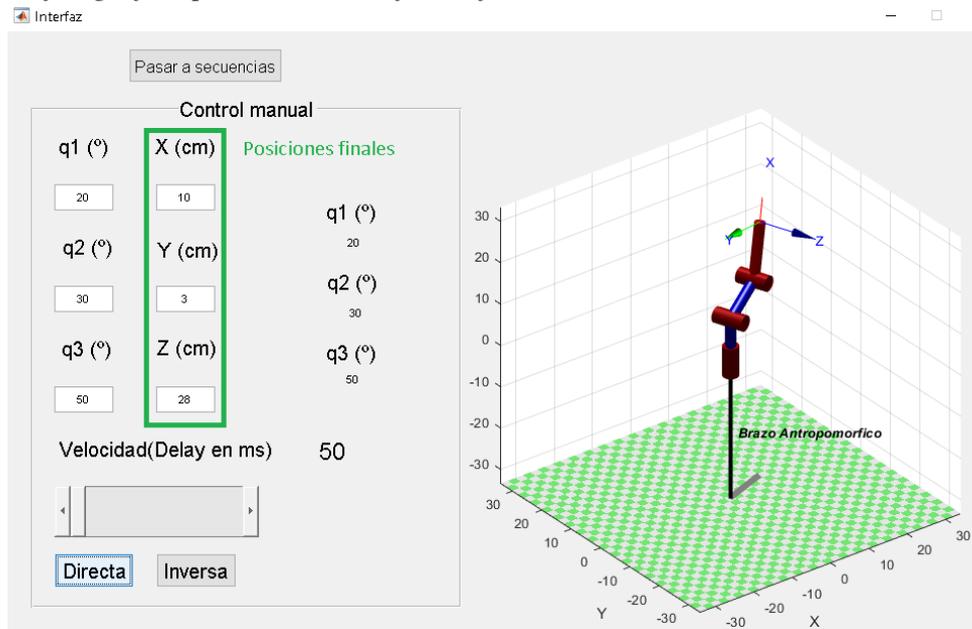
Nota: Interfaz gráfica mostrando el botón de cinemática inversa.

Después de esto se puede observar, que se muestra la simulación del robot y también realiza el cálculo de la posición del efector final que lo podemos observar en los cuadros de texto de la cinemática inversa. (ver figura 53), de la misma manera para la cinemática inversa se calcula

los respectivos ángulos de las articulaciones (ver figura 54)

Figura 53.

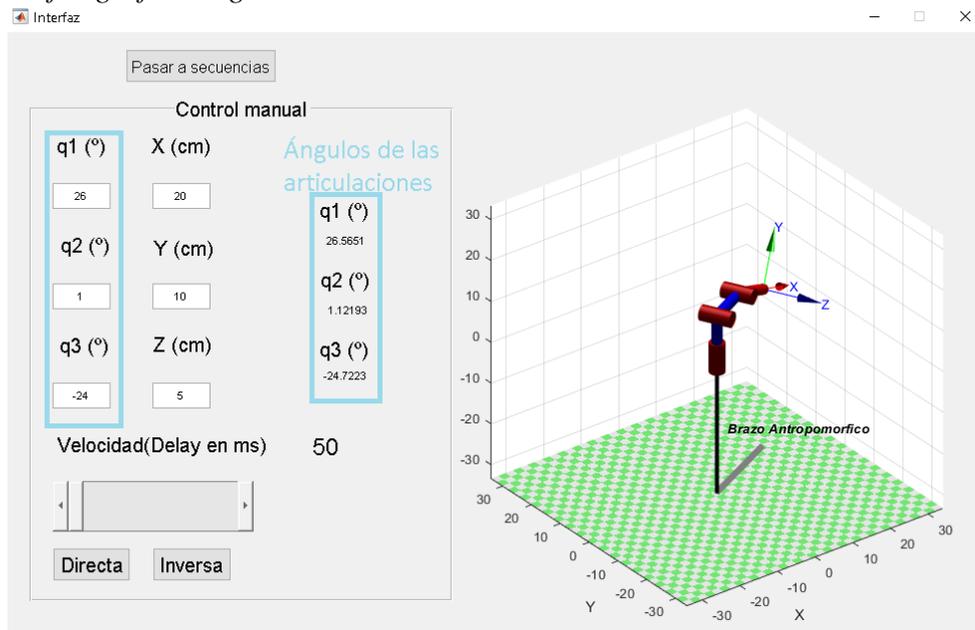
Interfaz gráfica posiciones del efector final



Nota: Interfaz gráfica mostrando los valores posicionales del efector final en sus respectivos ejes coordenados (X, Y, Z).

Figura 54.

Interfaz gráfica ángulos de las articulaciones

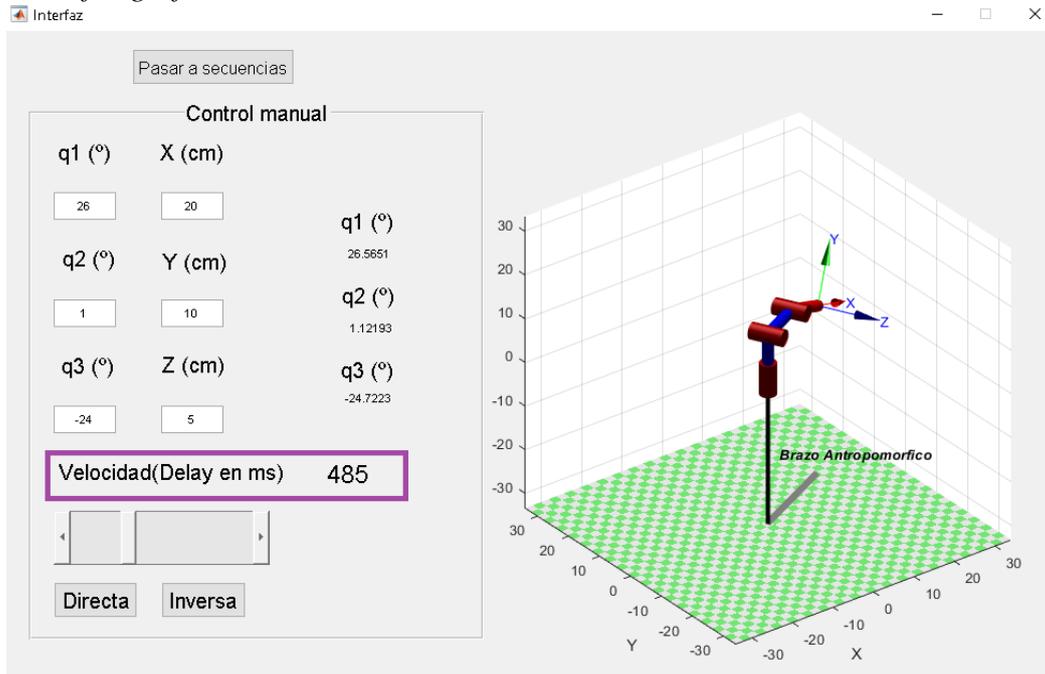


Nota: Interfaz gráfica mostrando los ángulos articulares (q1, q2, q3).

También se puede controlar la velocidad de los motores modificando la slider, el cual muestra al lado derecho su Delay en ms. (ver figura 55)

Figura 55.

Interfaz gráfica control de velocidad



Nota: Interfaz gráfica mostrando el control de velocidad de los motores.

3.4.10.b Programación interfaz gráfica control manual. La interfaz desarrollada a través de la herramienta de Matlab GUIDE, es uno de los puntos clave que se desarrollan en este proyecto, la interfaz gráfica, está compuesta por dos archivos, un archivo con el nombre de “Interfaz.m” y el archivo “Interfaz.fig”, estos dos archivos van relacionados el uno con el otro.

Archivo “Interfaz.fig”

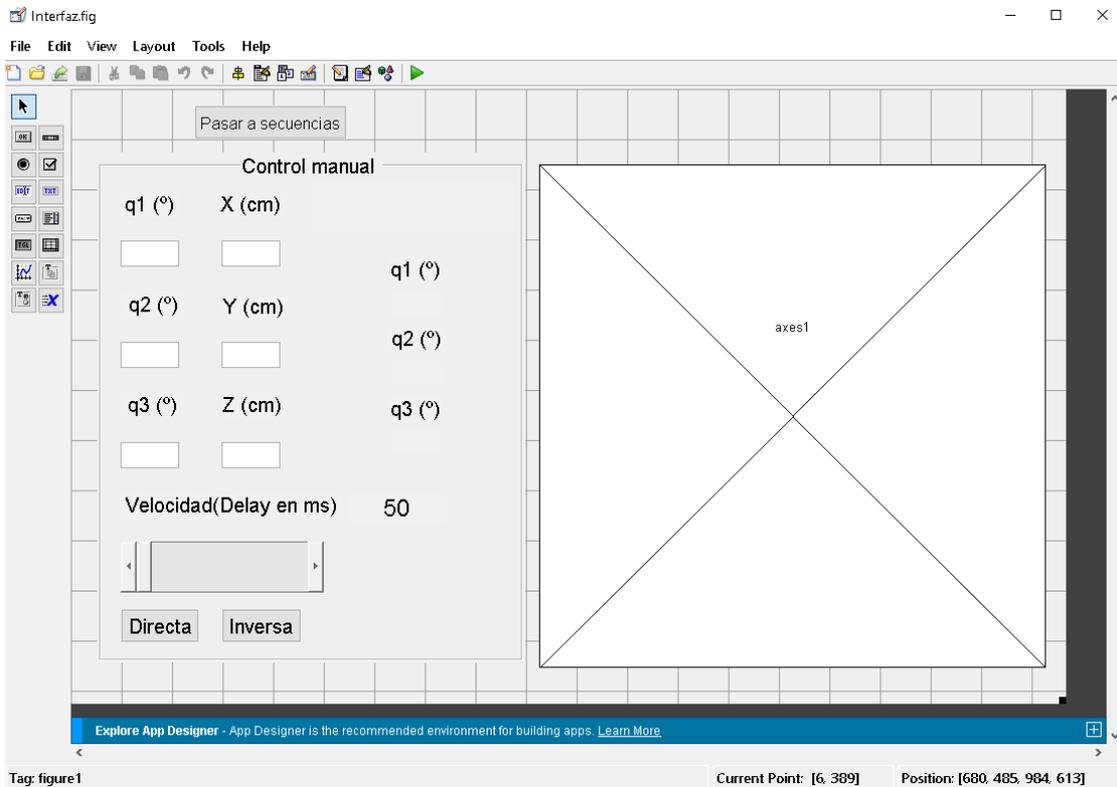
Este archivo constituye los elementos visuales que tiene el interfaz (ver figura 56), en este archivo se puede encontrar diferentes elementos visuales algunos de ellos son:

- Push button: botón pulsador (ejemplo Botones de “Directa”, “Inversa”, figura 56)
- Slider: Deslizador (Ejemplo el control de velocidad, ver figura 56)
- Edit text: Texto editable (Ejemplo donde se introducen los valores articulares, ver figura 56)
- Static text: Texto estático (Ejemplo donde se muestran las variables como $q1(^{\circ})$ etc..., ver figura 56)
- Pop-up menú: Menú desplegable.

- Axes: Gráficas, este se utiliza para la representación del brazo robótico en el espacio (X, Y, Z)
- Panel: Panel, se usa para agrupar elementos (Ejemplo “Control manual”, ver figura 56)

Figura 56.

Interfaz gráfica archivo “Interfaz.fig”



Nota: Interfaz gráfica donde se muestra el ambiente editable de “Interfaz.fig”

Archivo “Interfaz.m”

Este archivo es el que soporta la programación de la interfaz gráfica, en donde se puede encontrar que cada uno de los elementos contenidos en el archivo “Interfaz.fig” tienen su apartado específico para su programación, a continuación, se explica detalladamente la programación del interfaz gráfico.

Como se puede ver en la figura 57 cada una de las funciones que son creadas por el software a medida que se van implementando elementos (Push button, edit text, etc....) en el archivo “Interfaz.fig”, desde estas dichas funciones es donde se comienza con el código de programación.

Figura 57.

Programación “Interfaz.m”

```
Interfaz.m x +
1  +function varargout = Interfaz(varargin) ...
44  % End initialization code - DO NOT EDIT
45
46  % --- Executes just before Interfaz is made visible.
47  +function Interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin) ...
94
95  % --- Outputs from this function are returned to the command line.
96  +function varargout = Interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles) ...
104
105  function q_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
106  +% hObject    handle to q_1 (see GCBO) %...%
111
112  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
113  +function q_1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
122
123  function q_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
124  +% hObject    handle to q_2 (see GCBO) %...%
129
130  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
131  +function q_2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
140
141  function q_3_Callback(hObject, eventdata, handles)
142  +% hObject    handle to q_3 (see GCBO) %...%
147
148  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
149  +function q_3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
158
159  % --- Executes on button press in btn_directa.
160  +function btn_directa_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
224
225  function Pos_X_Callback(hObject, eventdata, handles)
226  +% hObject    handle to Pos_X (see GCBO) %...%
231
232  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
233  +function Pos_X_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
242
243  function Pos_Y_Callback(hObject, eventdata, handles)
244  +% hObject    handle to Pos_Y (see GCBO) %...%
249
250  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
251  +function Pos_Y_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
260
261  function Pos_Z_Callback(hObject, eventdata, handles)
262  +% hObject    handle to Pos_Z (see GCBO) %...%
267
268  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
269  +function Pos_Z_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
278
279  % --- Executes on button press in btn_inversa.
280  +function btn_inversa_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
340
341  % --- Executes on slider movement.
342  +function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
355
356  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
357  +function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
366
367  % --- Executes when user attempts to close figure1.
368  +function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles) ...
382
383  % --- Executes during object creation, after setting all properties.
384  function q1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
385  +% hObject    handle to q1 (see GCBO) %...%
388
389  % --- Executes on button press in Secuencias.
390  +function Secuencias_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
396
```

Nota: Archivo “Interfaz.m” donde se muestran las diferentes funciones del programa.

A continuación, se explican detalladamente las funciones usadas.

Función btn_directa

Esta función se ejecuta cuando se pulsa el botón “Directa” y es la aplicación del método de cinemática directa, mostrando la representación de la posición del brazo robótico, generando el movimiento de los servomotores y finalmente mostrando las posiciones X, Y, Z del efector final, en la figura 58 se puede observar la programación con su descripción en modo comentario al lado derecho del código.

Figura 58.

Programación función “btn_directa”

```
function btn_directa_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to btn_directa (see GCBO) %...%
clc;%Comando para borrar la el command window (Donde se muestra el valor de las variables)

Th_1=str2double(handles.q_1.String)*pi/180;%Asignación de valores introducidos por el usuario
Th_2=str2double(handles.q_2.String)*pi/180;
Th_3=str2double(handles.q_3.String)*pi/180;

q1=str2double(handles.q_1.String);%Asignación de valores a static text a la izquierda
q2=str2double(handles.q_2.String);
q3=str2double(handles.q_3.String);

handles.q1.String=q1;%llamado de la propiedad String del static text
handles.q2.String=q2;
handles.q3.String=q3;

vaq1=str2double(get(handles.q_1,'String'));
vaq2=str2double(get(handles.q_2,'String'));
vaq3=str2double(get(handles.q_3,'String'));

if isnan(vaq1) || isnan(vaq2) || isnan(vaq3) %condicional para validar los datos ingresados
    errordlg('Error algún dato inválido o vacío','Error')
else %ejecutar tu código
    %Parámetros DH
    L1=10; L2=10.45; L3=13;%Medidas en cm
    %Creación de eslabones del brazo robótico
    %L=Link([Th d(z) a(x) alph]) Manera de poner los parámetros DH
    L(1)=Link ([0 L1 0 pi/2]);
    L(2)=Link ([0 0 L2 0]);
    L(3)=Link ([0 0 L3 0]);
    Robot=SerialLink(L);%representacion del robot de tipo brazo de enlace en serie(articulador)
    Robot.name='Brazo Antropomorfico';%nombre del brazo robótico
    Robot;%Muestra los parámetros DH en tabla según los definidos anteriormente
    Robot.plot([Th_1 Th_2 Th_3]);%Muestra el robot con los ángulos ingresados
    T=Robot.fkine([Th_1 Th_2 Th_3]);%Muestra la matriz homogenea
    MHD=T.T;%Transformación a Matriz
    handles.Pos_X.String=fix(MHD(1,4)) %Extracción de datos de la MHD(Matriz homogenea) y Asignación a Posiciones
    handles.Pos_Y.String=fix(MHD(2,4));
    handles.Pos_Z.String=fix(MHD(3,4));
    handles.Aviso.String='';%Aviso vacío

    a=arduino();% Define variable arduino (conexión arduino)
    s=servo(a,'D9');%Define variable de 1 servomotor y conexión con su respectivo pin

    angle=q1;%asignar valor a variable angle
    delay=str2double(handles.velocidad.String)/1000;%llama valor de Slider "velocidad" (Control de velocidad del motor)

    for i=0:2:180:angle/180 %Ciclo for-end para movimiento del servomotor
        writePosition(s, i); %asignar la posición al servomotor
        current_pos=readPosition(s);%leer la posición del servomotor (ángulo/180) fracción
        current_pos=double(current_pos*180);%conversión de posición a grados
        fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos); %Imprimir en pantalla la posición actual del motor
        pause(delay);%pausa para comenzar el siguiente ciclo ()
    end
end
```

Nota: Código de la función “btn_directa” del programa.

Función Slider1

Esta función se ejecuta en el momento de variar el deslizador o slider, este tiene la tarea de variar la velocidad de los motores generando un delay o retardo en el ciclo for-end que genera en movimiento de los motores, esta función en principio lee el valor del slider y posteriormente se lo aplica al texto estático “velocidad” y es convertido en ms para la representación en el interfaz, así mismo esta función es aplicada dentro de las funciones btn_directa y btn_inversa. (ver figura 59)

Figura 59.

Programación función “Slider1”

```
    % --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to slider1 (see GCBO) %...%

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

valor=get(hObject,'Value'),0; %Obtener el de la posición en el Slider
handles.velocidad.String=round(valor*1000);
```

Nota: Código de la función “Slider1” del programa.

Función btn_inversa

Esta función se ejecuta cuando se pulsa el botón “Inversa” y es la aplicación del método de cinemática inversa, mostrando la representación de la posición del brazo robótico, generando el movimiento de los servomotores y finalmente mostrando los grados articulares q_1 , q_2 , q_3 , en la figura 60 se puede observar la programación con su descripción en modo comentario al lado derecho del código, gracias al Toolbox de Peter Corke se puede usar la función “Robot.ikine”, la cual utiliza un método iterativo para encontrar la solución de los ángulos articulares a partir de la posición final del eslabón codo-muñeca.

Figura 60.

Programación función “btn_inversa”

```
% --- Executes on button press in btn_inversa.
function btn_inversa_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to btn_inversa (see GCBO) %...%

PX=str2double(handles.Pos_X.String);%Asignación de valores ingresados por el usuario
PY=str2double(handles.Pos_Y.String);
PZ=str2double(handles.Pos_Z.String);
vax=str2double(get(handles.Pos_X,'String'));
vay=str2double(get(handles.Pos_Y,'String'));
vaz=str2double(get(handles.Pos_Z,'String'));

if isnan(vax) || isnan(vay) || isnan(vaz) %condicional para validar los datos ingresados
    errordlg('Error algún dato inválido o vacío','Error')
else %ejecutar el código
    %Parámetros DH
    L1=10; L2=10.45; L3=13;%Medidas en cm
    %Creación de eslabones
    %L=Link([Th d(z) a(x) alph]) Manera de poner los parámetros DH
    L(1)=Link ([0 L1 0 pi/2]);
    L(2)=Link ([0 0 L2 0]);
    L(3)=Link ([0 0 L3 0]);
    Robot=SerialLink(L);%representacion del robot de tipo brazo de enlace en serie(articular)
    Robot.name=' Brazo Antropomorfico';%nombre del brazo robótico
    Robot;% Muestra los parámetros DH en tabla según los definidos anteriormente

    MHI=[1 0 0 PX;
        0 1 0 PY;
        0 0 1 PZ;
        0 0 0 1] %Matriz Homogenea
    J=Robot.ikine(MHI,'q0',[0 0 0],'mask',[1 1 1 0 0 0]);%Aplicación de cinematica inversa
    mv=isempty(J);%Verificación de posición (Volumen espacial de trabajo)
    if mv==1; %Verificación de posición (Volumen espacial de trabajo)
        handles.Aviso.String='Fuera del volumen de trabajo';
    else
        handles.Aviso.String='';
    end;

    MHI=[1 0 0 PX;
        0 1 0 PY;
        0 0 1 PZ;
        0 0 0 1] %Matriz Homogenea
    J=Robot.ikine(MHI,'q0',[0 0 0],'mask',[1 1 1 0 0 0]);%Aplicación de cinematica inversa
    mv=isempty(J);%Verificación de posición (Volumen espacial de trabajo)
    if mv==1; %Verificación de posición (Volumen espacial de trabajo)
        handles.Aviso.String='Fuera del volumen de trabajo';
    else
        handles.Aviso.String='';
    end;
    Q=[J(1) J(2) J(3)];% Vector de grados articulares
    handles.q_1.String=fix(Q(1)*180/pi); %asignación de propiedad String de los edit y static text
    handles.q_2.String=fix(Q(2)*180/pi);
    handles.q_3.String=fix(Q(3)*180/pi);
    handles.q1.String=Q(1)*180/pi;
    handles.q2.String=Q(2)*180/pi;
    handles.q3.String=Q(3)*180/pi;
    q1i=fix(Q(1)*180/pi);
    q2i=fix(Q(2)*180/pi);
    q3i=fix(Q(3)*180/pi);

    Robot.plot(Q);%Muestra el robot con la posición de efector final ingresado

    a=arduino();%Conexión con arduino
    s=servo(a,'D9');%Define variable de 1 servomotor y conexión con su respectivo pin

    angle=q1i;%asignar valor a variable angle
    delay=str2double(handles.velocidad.String)/1000;%llama valor de Slider "velocidad" (Control de velocidad del motor)

    for angle=0:2/180:angle/180%Ciclo for-end para movimiento del servomotor
        writePosition(s, angle);%asignar la posición al servomotor
        current_pos=readPosition(s);%leer la posición del servomotor (angulo/180) fracción
        current_pos=double(current_pos*180);%Imprimir en pantalla la posición actual del motor
        fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos);
        pause(delay)%pausa para comenzar el siguiente ciclo ()
    end
end
end
```

Nota: Código de la función “btn_inversa” del programa.

Función figure1_Closerequest

Esta función se ejecuta al momento que el usuario decida cerrar el interfaz, en el cual sale un cuadro de diálogo que pregunta si desea cerrar la interfaz. (ver figura 61)

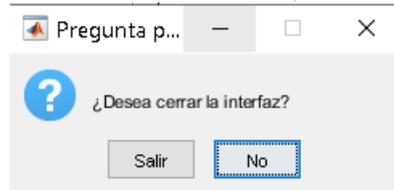
Figura 61.

Programación función “figure1_Closerequest”

```
% --- Executes when user attempts to close figure1.
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to figure1 (see GCBO) %...%

Seleccion=questdlg('¿Desea cerrar la interfaz?', 'Pregunta personalizada', 'Salir', 'No', 'No');
if strcmp(Seleccion, 'No')
    return
else
    clc; delete(hObject);
end

% Hint: delete(hObject) closes the figure
delete(hObject);
```



Nota: Código de la función “figure1_Closerequest” del programa.

Función Secuencias

Esta función tiene la tarea de ejecutar la otra interfaz llamada “Secuencias” al momento de presionar el botón “Secuencias”. (ver figura 62)

Figura 62.

Programación función “Secuencias”

```
% --- Executes on button press in Secuencias.
function Secuencias_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Secuencias (see GCBO) %...%

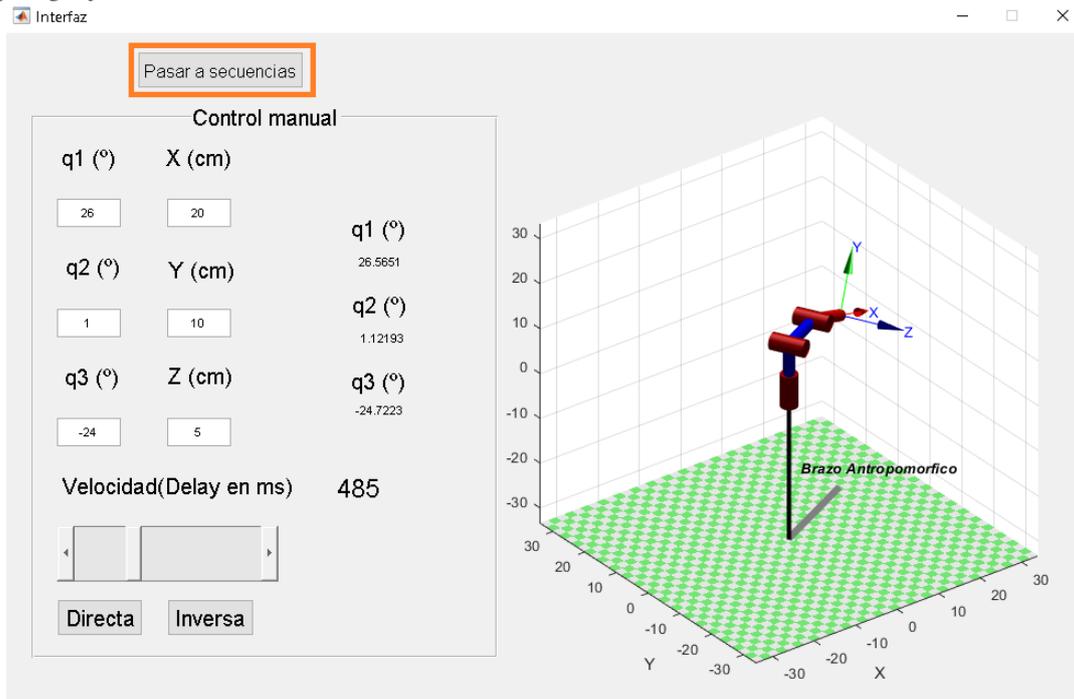
Secuencia
```

Nota: Código de la función “Secuencias” del programa.

3.4.10.c Interfaz gráfica secuencias. Esta interfaz se realizó con el fin de programar el brazo robótico con movimientos secuenciales, ya que es una de las tareas más comunes dentro de la industria real, es importante mencionar que el brazo robótico parte de la posición inicial siendo esta con ángulos articulares todos con valores de cero, así mismo dentro de esta interfaz se puede evidenciar la animación de los movimientos del brazo robótico, donde va a los puntos o pasos ingresados por el usuario. (ver figura 63)

Figura 63.

Interfaz gráfica secuencias



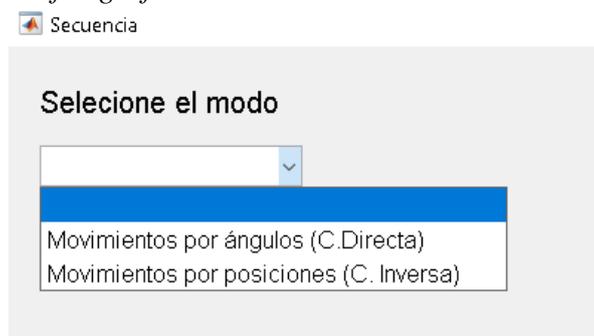
Nota: Interfaz gráfica mostrando el botón para iniciar la interfaz gráfica de secuencias.

Interfaz gráfica de secuencias

Inicialmente, se tiene un menú para seleccionar el modo de usar, ya sea cinemática directa o inversa. (ver figura 64)

Figura 64.

Interfaz gráfica secuencias selección de modo



Nota: Interfaz gráfica mostrando los modos a seleccionar por el usuario.

Posteriormente a la selección del modo aparece lo siguiente. (ver figura 65)

Figura 65.

Interfaz gráfica secuencias número de movimientos

The screenshot shows a window titled 'Secuencia'. Below the title bar, there is a section titled 'Selección de modo'. It contains a dropdown menu with the text 'Movimientos por ángulos (C.Directa)'. Below the dropdown, there is a label 'Número de movimientos (2 a 4 pasos)' followed by an empty text input field and a 'Siguiete' button.

Nota: Interfaz gráfica secuencias y el número de movimientos a escoger por el usuario.

Figura 66.

Interfaz gráfica secuencias número de movimientos

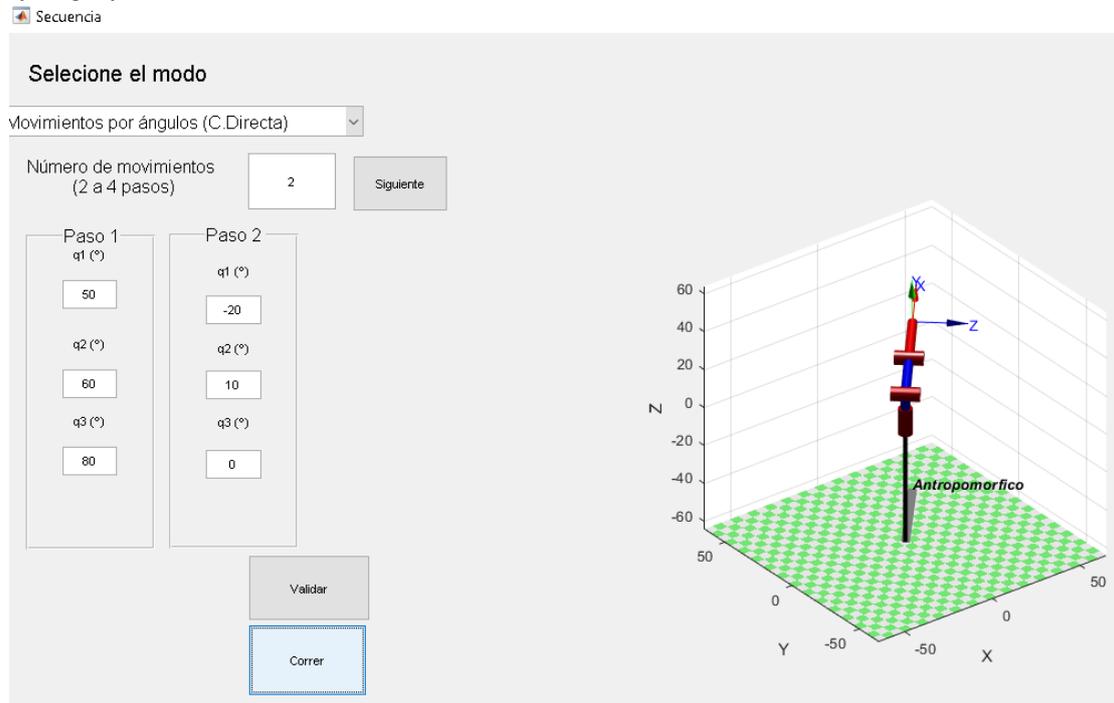
The figure consists of three screenshots of the 'Selección de modo' interface. Each screenshot shows a window titled 'Secuencia' with a dropdown menu set to 'Movimientos por ángulos (C.Directa)'.
1. The first screenshot shows 'Número de movimientos (2 a 4 pasos)' set to '2'. It features two columns: 'Paso 1' and 'Paso 2'. Each column has three input fields labeled 'q1 (*)', 'q2 (*)', and 'q3 (*)'. A 'Validar' button is at the bottom.
2. The second screenshot shows the number of movements set to '3'. It features three columns: 'Paso 1', 'Paso 2', and 'Paso 3'. Each column has three input fields labeled 'q1 (*)', 'q2 (*)', and 'q3 (*)'. A 'Validar' button is at the bottom.
3. The third screenshot shows the number of movements set to '4'. It features four columns: 'Paso 1', 'Paso 2', 'Paso 3', and 'Paso 4'. Each column has three input fields labeled 'q1 (*)', 'q2 (*)', and 'q3 (*)'. A 'Validar' button is at the bottom.

Nota: Interfaz gráfica secuencias y pasos según el usuario parte superior izquierda 2 pasos, parte superior derecha 3 pasos y parte inferior centro 4 pasos.

Así mismo sucede con el otro modo movimiento por posiciones (C. Inversa). Después de validar la información con el botón “Validar” se procede con el botón “Correr”, y de esta manera el comienza con la animación de los respectivos movimientos (ver figura 67).

Figura 67.

Interfaz gráfica secuencias animación



Nota: Interfaz gráfica secuencias de animación con sus respectivos movimientos.

3.4.10.d Programación interfaz gráfica secuencias. La interfaz desarrollada a través de la herramienta de Matlab GUIDE, es uno de los puntos clave que se desarrollan en este proyecto, la interfaz gráfica, está compuesta por dos archivos, un archivo con el nombre de “Secuencias.m” y el archivo “Secuencias.fig”, estos dos archivos van relacionados el uno con el otro.

Archivo “Secuencias.fig”

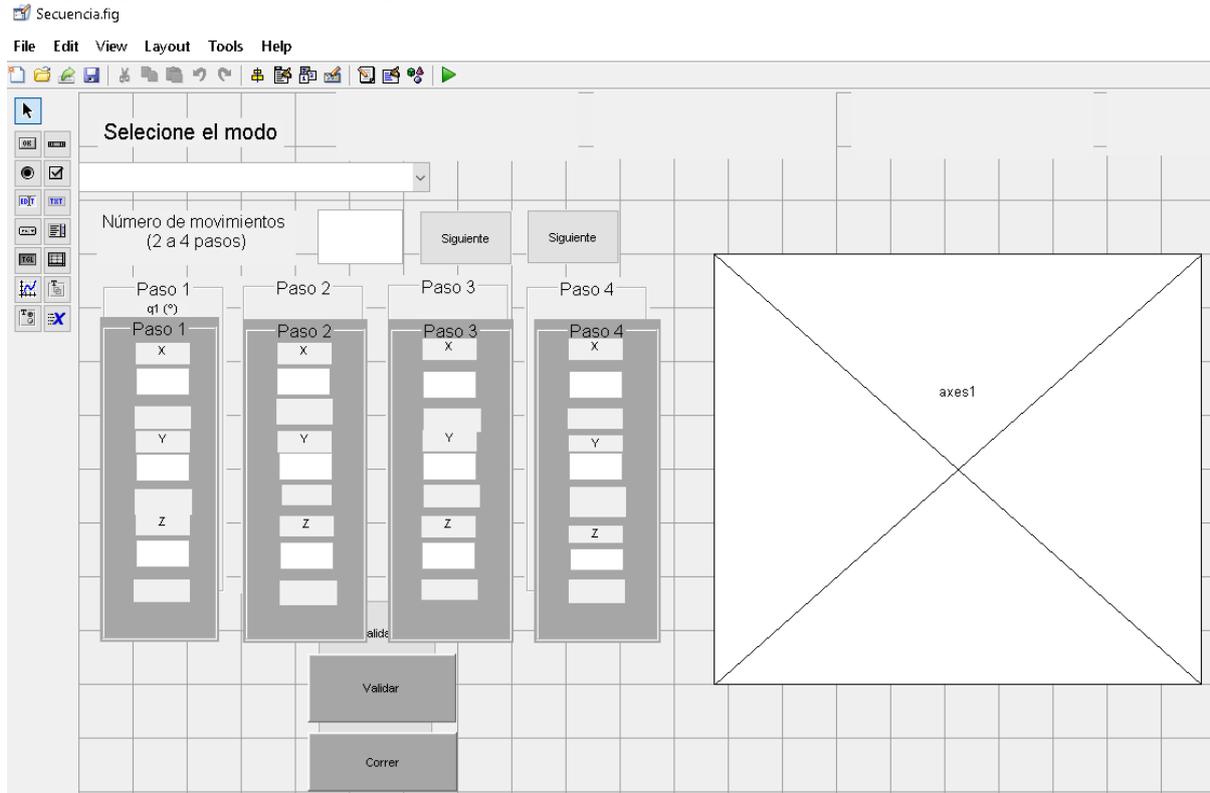
Este archivo constituye los elementos visuales que tiene el interfaz (ver figura 68), en este archivo se puede encontrar diferentes elementos visuales algunos de ellos son:

- Push button: botón pulsador (ejemplo Botones de “Validar”, “Correr”, figura 68)
- Edit text: Texto editable (Ejemplo donde se introducen los valores articulares, ver figura 68)

- Static text: Texto estático (Ejemplo donde se muestran las variables como X, Y y Z etc..., ver figura 68)
- Pop-up menú: Menú desplegable. (Ejemplo selección del modo)
- Axes: Gráficas, este se utiliza para la representación del brazo robótico en el espacio (X, Y, Z)

Figura 68.

Interfaz gráfica secuencias.fig animación



Nota: Interfaz gráfica donde se muestra el ambiente editable de “Secuencias.fig”

Archivo “Secuencias.m”

Este archivo es el que soporta la programación de la interfaz gráfica, en donde se puede encontrar que cada uno de los elementos contenidos en el archivo “Secuencias.fig” tienen su apartado específico para su programación, debido a que el código de programación de esta interfaz “Secuencias” es demasiado extenso (más de 2000 líneas de código de programación), solo se muestra las funciones más relevantes para el proyecto.

Función correr

Esta función se ejecuta cuando se pulsa el botón “Correr” y es la aplicación del método de cinemática directa, para 2 posiciones, el brazo robótico empieza en la posición $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$, después se dirige a la primera posición ingresada por el usuario, posteriormente a la segunda y última posición, esto lo hace tanto el brazo robótico como la simulación en la interfaz “Secuencias”, en la figura 66 se muestra el código para 2 pasos, el que es igual en forma, la única diferencia es que tiene adicionalmente la programación para los pasos 3 y 4, según se seleccione, los ciclos for-end son los responsables de generar los movimientos articulares.

Figura 69.

Programación función “correr”

```
859 % --- Executes on button press in correr.
860 function correr_Callback(hObject, eventdata, handles)
861 % hObject handle to correr (see GCBO) %...%
864 set(handles.axes1,'Visible','on');%habilitar axes1
865 %Parámetros DH
866 L1=10; L2=10.45; L3=13;%Medidas en cm
867 %Creación de eslabones
868 %L=Link([Th d(z) a(x) alph]) Manera de poner los parámetros DH
869 L(1)=Link ([0 L1 0 pi/2]);
870 L(2)=Link ([0 0 L2 0]);
871 L(3)=Link ([0 0 L3 0]);
872 Robot=SerialLink(L);%representacion del robot de tipo brazo de enlace en serie(articular
873 Robot.name='Antropomorfo';%nombre del brazo robótico
874 Robot %Muestra los parámetros DH en tabla según los definidos anteriormente
875
876 q1_1=str2double(get(handles.q1_1,'String'))*pi/180;
877 q2_1=str2double(get(handles.q2_1,'String'))*pi/180;
878 q3_1=str2double(get(handles.q3_1,'String'))*pi/180; %panel 1
879
880 q1_2=str2double(get(handles.q1_2,'String'))*pi/180;
881 q2_2=str2double(get(handles.q2_2,'String'))*pi/180;
882 q3_2=str2double(get(handles.q3_2,'String'))*pi/180;%panel 2
883
884 q1_3=str2double(get(handles.q1_3,'String'))*pi/180;
885 q2_3=str2double(get(handles.q2_3,'String'))*pi/180;
886 q3_3=str2double(get(handles.q3_3,'String'))*pi/180;%panel 3
887
888 q1_4=str2double(get(handles.q1_4,'String'))*pi/180;
889 q2_4=str2double(get(handles.q2_4,'String'))*pi/180;
890 q3_4=str2double(get(handles.q3_4,'String'))*pi/180;%panel 4
891
892 a=str2double(get(handles.nmov,'String'));%Obtener dato String de numero de pasos
893
894 ard=arduino(); %Conexión arduino
895 s=servo(ard,'D9'); %Conexión servomotor
896
897 if a==2 %Codigo cuando se seleccionan 2 pasos
898     if q1_1<=0 %Movimiento de posición inicial primera articulación
899         for i=0:-0.05:q1_1
900             Robot.plot([i 0 0]);
901         end
902         for s1=0:-1/180:rad2deg(q1_1)/180
903             writePosition(s, s1);
904             current_pos=readPosition(s);
905             current_pos=double(current_pos*180);
906             fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos);
907             pause(0.05);
908         end
909     else
910         for i=0:0.05:q1_1 %Movimiento de posición inicial primera articulación
911             Robot.plot([i 0 0]);
912         end
```

```

913     for s1=0:1/180:rad2deg(q1_1)/180
914         writePosition(s, s1);
915         current_pos=readPosition(s);
916         current_pos=double(current_pos*180);
917         fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos);
918         pause(0.05);
919     end
920 end
921 if q2_1<=0 %Movimiento de posición inicial segunda articulación
922     for j=0:-0.05:q2_1
923         Robot.plot([i j 0]);
924     end
925 else
926     for j=0:0.05:q2_1 %Movimiento de posición inicial segunda articulación
927         Robot.plot([i j 0]);
928     end
929 end
930 if q3_1<=0 %Movimiento de posición inicial tercera articulación
931     for k=0:-0.05:q3_1
932         Robot.plot([i j k]);
933     end
934 else
935     for k=0:0.05:q3_1 %Movimiento de posición inicial tercera articulación
936         Robot.plot([i j k]);
937     end
938 end

```

Nota: Código de la función “correr” del programa “Secuencias.m”

Función correr_p

Esta función se ejecuta cuando se pulsa el botón “Correr” y es la aplicación del método de cinemática inversa, para 2 posiciones, el brazo robótico empieza en la posición $X=23$; $Y=0$; $Z=10$, después se dirige a la primera posición ingresada por el usuario, posteriormente a la segunda y última posición, esto lo hace tanto el brazo robótico como la simulación en la interfaz “Secuencias”, en la figura 67 se muestra el código para 2 pasos, el que es igual en forma, la única diferencia es que tiene adicionalmente la programación para los pasos 3 y 4, según se seleccione, las funciones Robot.ikine calcula los ángulos de las articulaciones[13], los ciclos for-end son los responsables de generar los movimientos articulares. (ver figura 70)

Figura 70.

Programación función “correr_p”

```

1372 % --- Executes on button press in correr_p.
1373 function correr_p_Callback(hObject,eventdata,handles)
1374 % hObject handle to correr_p (see GCBO)
1377
1378 set(handles.axes1,'Visible','on');%habilitar axes1
1379
1380 Px1=str2double(handles.x1.String);
1381 Py1=str2double(handles.y1.String);
1382 Pz1=str2double(handles.z1.String);
1383
1384 Px2=str2double(handles.x2.String);
1385 Py2=str2double(handles.y2.String);
1386 Pz2=str2double(handles.z2.String);
1387
1388 Px3=str2double(handles.x3.String);
1389 Py3=str2double(handles.y3.String);
1390 Pz3=str2double(handles.z3.String);
1391
1392 Px4=str2double(handles.x4.String);
1393 Py4=str2double(handles.y4.String);
1394 Pz4=str2double(handles.z4.String);
1395 %Parámetros DH
1396 L1=10; L2=10.45; L3=13;%Medidas en cm
1397 %Creación de eslabones
1398 %L=Link([Th d(z) a(X) alph]) Manera de poner los parámetros DH
1399 L(1)=Link ([0 L1 0 pi/2]);
1400 L(2)=Link ([0 0 L2 0]);
1401 L(3)=Link ([0 0 L3 0]);
1402 Robot=SerialLink(L);%representacion del robot de tipo brazo de enlace en serie(articulac)
1403 Robot.name='Antropomorfo';%Nombre del brazo robótico
1404 %Robot %Muestra los parámetros DH en tabla según los definidos anteriormente
1405
1406 ard=arduino();%Conexión arduino
1407 s=servo(ard,'D9');%Conexión servomotor
1408 a=str2double(get(handles.mmov,'String'));
1409 if a==2
1410     MH1=[1 0 0 Px1;
1411          0 1 0 Py1;
1412          0 0 1 Pz1;
1413          0 0 0 1];
1414     J1=Robot.ikine(MH1,'qD',[0 0 0],'mask',[1 1 1 0 0 0]);
1415
1416     mv1=isempty(J1);
1417     if mv1==1;
1418         handles.Aviso1.String='Fuera del volumen de trabajo posición 1';
1419         set(handles.Aviso1,'Visible','on');
1420     else
1421         handles.Aviso1.String='';
1422         set(handles.Aviso1,'Visible','off');
1423     end;
1424
1425     Q1=[J1(1) J1(2) J1(3)]*180/pi % angulos 1 posición
1426
1427     MH12=[1 0 0 Px2;
1428           0 1 0 Py2;
1429           0 0 1 Pz2;
1430           0 0 0 1];
1431     J2=Robot.ikine(MH12,'qD',[0 0 0],'mask',[1 1 1 0 0 0]);
1432
1433     mv2=isempty(J2);
1434     if mv2==1;
1435         handles.Aviso2.String='Fuera del volumen de trabajo posición 2';
1436         set(handles.Aviso2,'Visible','on');
1437     else
1438         handles.Aviso2.String='';
1439         set(handles.Aviso2,'Visible','off');
1440     end;
1441
1442     Q2=[J2(1) J2(2) J2(3)]*180/pi % angulos 1 posición
1457
1458     if J1(1)<=0
1459         for i=0:-0.05:J1(1)
1460             Robot.plot([i 0 0]);
1461         end
1462         for s1=0:-1/180:Q1(1)/180
1463             writePosition(s, s1);
1464             current_pos=readPosition(s);
1465             current_pos=double(current_pos*180);
1466             fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos);
1467             pause(0.05);
1468         end
1469     else
1470         for i=0:0.05:J1(1)
1471             Robot.plot([i 0 0]);
1472         end
1473         for s1=0:1/180:Q1(1)/180
1474             writePosition(s, s1);
1475             current_pos=readPosition(s);
1476             current_pos=double(current_pos*180);
1477             fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos);
1478             pause(0.05);
1479         end
1480     end
1481     if J1(2)<=0
1482         for j=0:-0.05:J1(2)
1483             Robot.plot([1 j 0]);
1484         end
1485     else
1486         for j=0:0.05:J1(2)
1487             Robot.plot([1 j 0]);
1488         end
1489     end
1490     if J1(3)<=0
1491         for k=0:-0.05:J1(3)
1492             Robot.plot([1 j k]);
1493         end
1494     else
1495         for k=0:0.05:J1(3)
1496             Robot.plot([1 j k]);
1497         end
1498     end

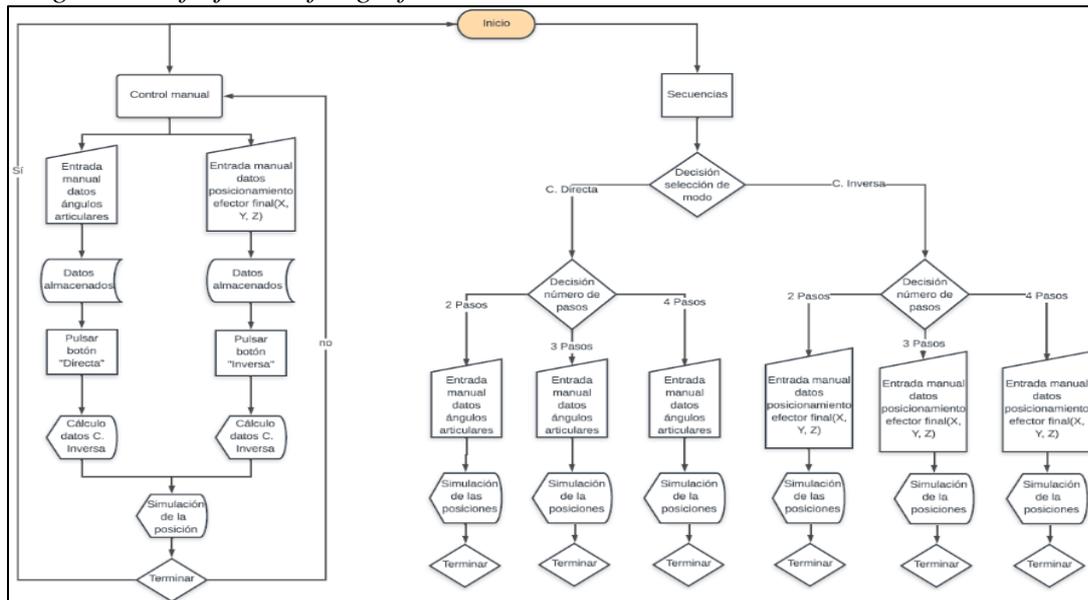
```

Nota: Código de la función “correr” del programa “Secuencias.m”

Diagrama de flujo interfaz gráfica

Figura 71.

Diagrama de flujo interfaz gráfico



Nota: Diagrama de flujo interfaz gráfica, control manual y secuencias. Para mejor visibilidad del diagrama, consultar anexo c.

3.4.11 Prueba del servomotor

A partir de todo el análisis cinemático, se procede a realizar el estudio del manejo de los servomotores, que son un pilar fundamental en el movimiento del brazo robótico, es por esto que se realizan unas pruebas de dichos servomotores y de esta forma implementar la programación dentro del interfaz, donde así mismo se le da el respectivo control de movimiento al brazo robótico.

Debido a lo mencionado anteriormente se realizó primeramente la implementación de un montaje con Arduino, utilizando un Arduino UNO y un servomotor MG995.

Figura 72.

Arduino UNO



Nota: Imagen de un Arduino UNO. Tomado de: *Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store* (). Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.

Figura 73.

Servomotor MG995



Nota: Servomotor MG995. Tomado de: TowerPro, "MG995,"

https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG995_Tower-Pro.Pdf

Inicialmente se realizó el montaje de la figura 75 y figura 76, debido a que fue programado en Matlab se recurrió a unir Arduino con Matlab para esto se procedió a instalar el paquete de soporte de Matlab en Arduino. (Ver figura 74)

Figura 74.

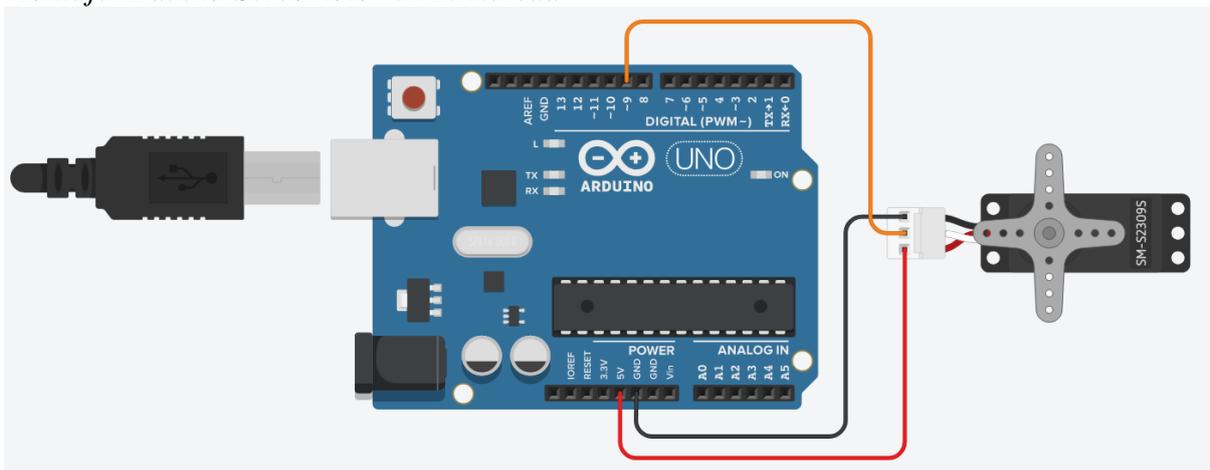
Conexión Arduino-Matlab.



Nota: Con el paquete de soporte de MATLAB para Arduino, el dispositivo Arduino se conecta a un equipo que ejecuta MATLAB. Tomado de: *MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink()*. Available: <https://la.mathworks.com/>.

Figura 75.

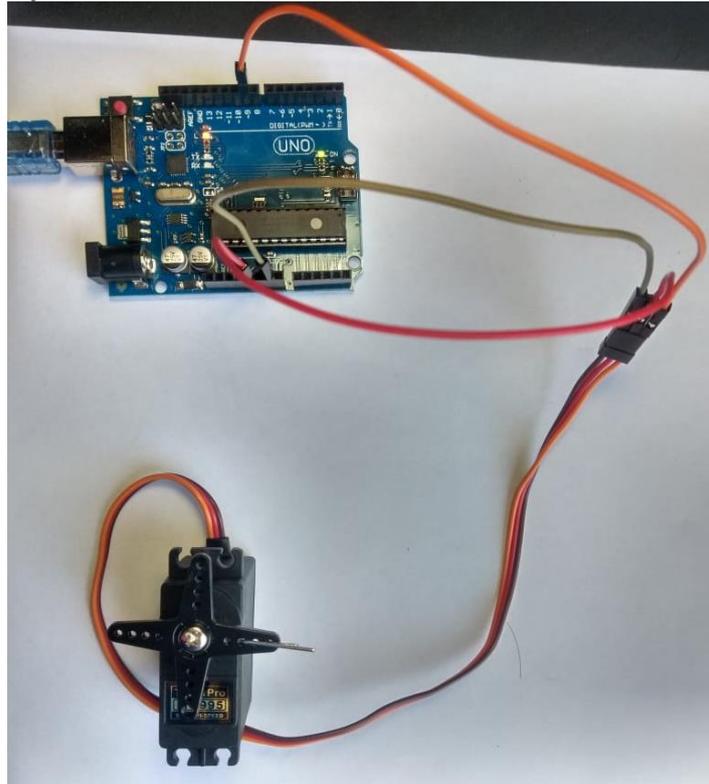
Montaje Arduino-Servomotor en Tinkercad



Nota: Montaje Arduino-Servomotor, elaborado en: *Tinkercad | Create 3D digital designs with online CAD ()*. Available: <https://www.tinkercad.com/>.

Figura 76.

Montaje Arduino-Servomotor



Nota: Montaje Arduino-Servomotor

Después de realizar el montaje se procedió a realizar la programación. Ver figura 77, donde se puede ir variando la posición con la variable angle, y con el ciclo for-end, se puede variar los pasos en este caso el servomotor se mueve de 10 grados en 10 grados, así mismo controlando la velocidad del servomotor.

Figura 77.

Programación prueba del servomotor

```
1 - clear all;
2 - a=arduino();
3 - s=servo(a, 'D9')
4 - angle=0/180
5 - for angle=0:10/180:angle
6 -     writePosition(s, angle);
7 -     current_pos=readPosition(s);
8 -     current_pos=fix(current_pos*180);
9 -     fprintf('Posición actual del motor %d Grados\n', current_pos);
10 -    pause(0.5)
11 - end
12
13 - clear all
```

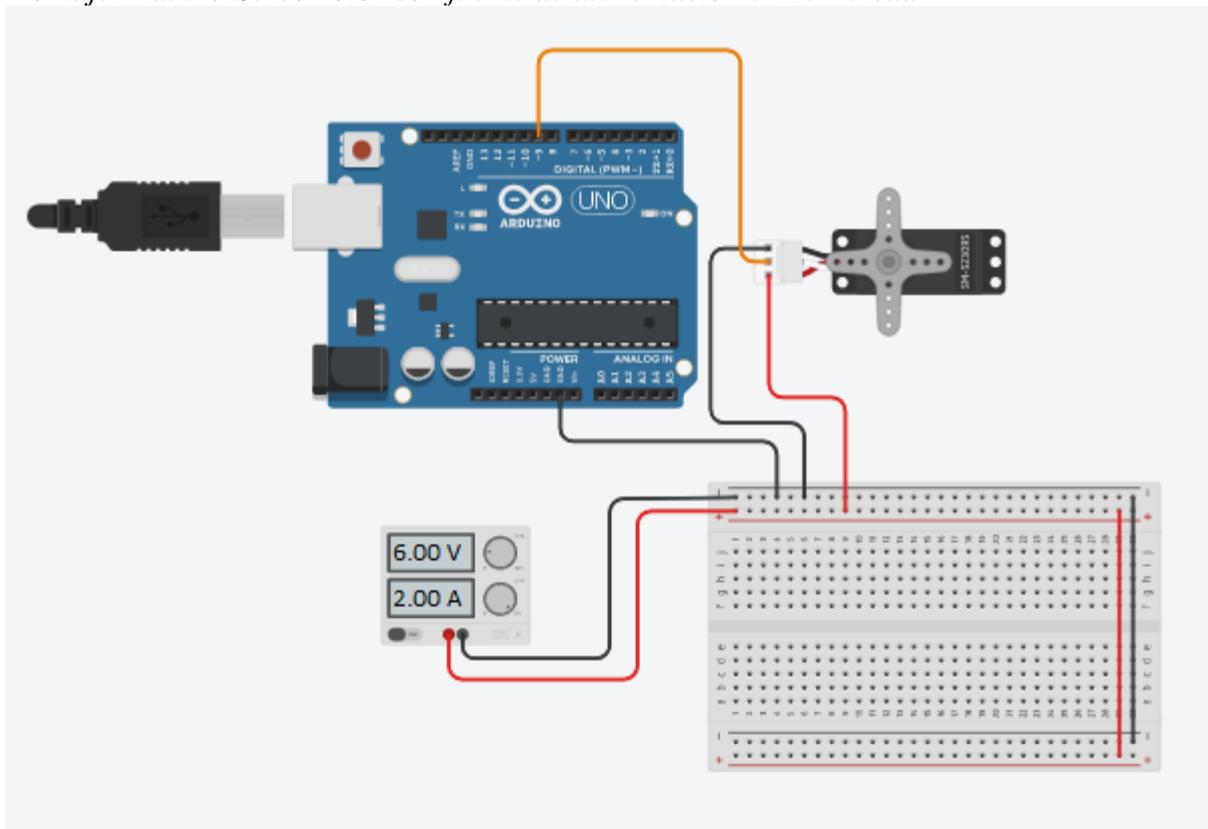
Nota: Programación prueba del servomotor.

Posterior a realizar la prueba del servomotor se puede concluir que en movimientos más rápidos del servomotor el Arduino (5 voltios) no supe el voltaje necesario para mover el servomotor, encontrando así, el problema que el Arduino se apagaba a mitad del movimiento del servomotor, debido a esto se procedió a realizar un montaje con una fuente de alimentación externa al Arduino, primeramente, se realizó un montaje con una fuente de alimentación de 6 voltios y 2 amperios ver figura 78 y 79, teniendo como fuente el voltaje de 6 voltios, a partir de este montaje se puede evidenciar que el movimiento del servomotor es más limpio y funciona de manera más eficiente, sin encontrar los problemas antes mencionados.

Debido a la implementación del montaje (ver figura 78 montaje con fuente externa) con fuente externa, no se tiene la necesidad de utilizar una tarjeta controladora de servomotores, ya que el Arduino solo se encarga de enviar las señales de pulso, mas no de alimentar eléctricamente los servomotores, por esta razón el Arduino no está en riesgo de algún tipo de daño eléctrico por parte de los motores

Figura 78.

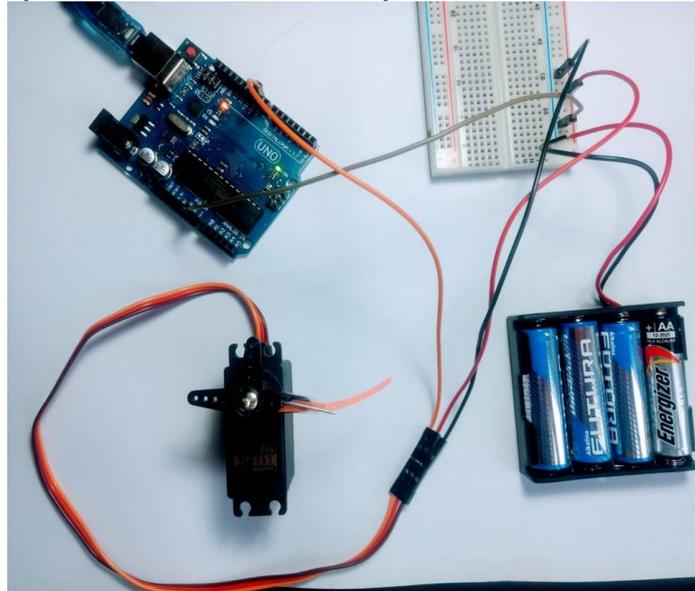
Montaje Arduino-Servomotor con fuente de alimentación en Tinkercad



Nota: Montaje Arduino-Servomotor con fuente de alimentación, elaborado en: *Tinkercad / Create 3D digital designs with online CAD* (). Available: <https://www.tinkercad.com/>.

Figura 79.

Montaje Arduino-Servomotor con fuente externa



Nota: Montaje Arduino-Servomotor con fuente externa

3.4.11.a Precisión del servomotor. Se realizó pruebas de precisión para servomotor MG995 donde se puede evidenciar que tiene alto grado de imprecisión en el rango de 0-10°, a partir de los rangos 10-180° tiene una precisión sobresaliente

3.4.12 Volumen espacial de trabajo.

Debido a la configuración geométrica y el rango de uso de los actuadores, el brazo robótico tiene zonas inalcanzables, los rangos de los servomotores son

Servomotor base: -90° a 90°

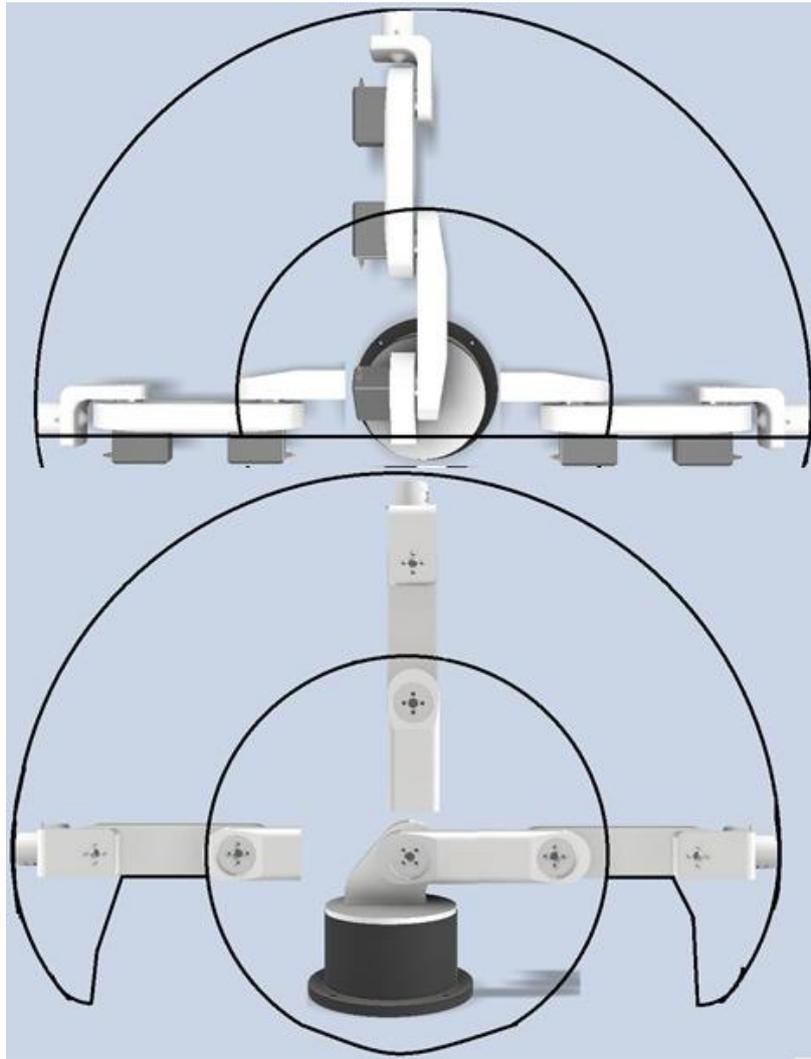
Servomotor hombro: 0° a 90°

Servomotor codo: -90° a 90°

Servomotor muñeca: -90° a 90°

Figura 80.

Volumen espacial.



Nota: Volumen espacial del brazo robótico antropomórfico.

Al digitar valores que se encuentren fuera de los rangos previamente establecidos, el programa arroja una ventana donde muestra que un mensaje de error.

Figura 81.

Error de rango.



Nota: Ventana que arroja los valores que no se encuentren en el rango.

Nota: Para la verificación de que el objeto se encuentra sujetado por el electroimán, se hace uso de un sensor inductivo o sensor proximidad **Lj12a3-4-z/bx 6v-36v Npn**; esto con el fin de detectar que el objeto se encuentra sujeto para su reubicación.

3.5 Simulador y emulador

Este proyecto cuenta con estas dos características, por esto es importante mencionarlas a continuación:

- **Simulador:** Un simulador pretende reproducir el comportamiento de los equipos de la máquina que se pretende simular, en este caso el comportamiento de un brazo robótico antropomórfico. [20] [21]
- **Emulador:** Es un software que permite ejecutar programas en una plataforma (sea una arquitectura de hardware o un sistema operativo). A diferencia de un simulador, que solo trata de reproducir el comportamiento del programa, un emulador trata de modelar de forma precisa el dispositivo de manera que este funcione como si estuviera siendo usado en el aparato original, en este caso el emulador intenta ejecutar un programa, el cual a su vez tiene un componente de hardware (Prototipo). [20] [21]

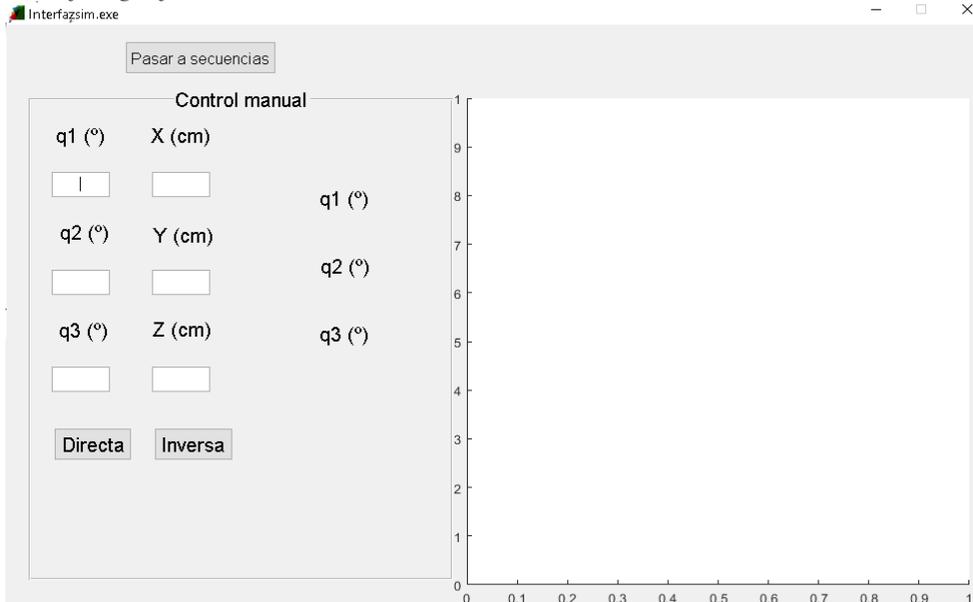
3.5.1 Interfaz del simulador

La principal función de este simulador es que pueda evidenciar el programa sin la necesidad de tener el software instalado (Matlab), brindado más versatilidad para ejecutar el simulador en cualquier dispositivo, para llegar a este fin se procedió a pasar el programa realizado a un archivo .exe el cual es una aplicación basada en el sistema operativo de Windows.

Para esto se utilizó el complemento Application Compiler [17], en comparación con la interfaz gráfica esta no tiene control de los servomotores. (ver figura 82)

Figura 82.

Interfaz gráfica simulador

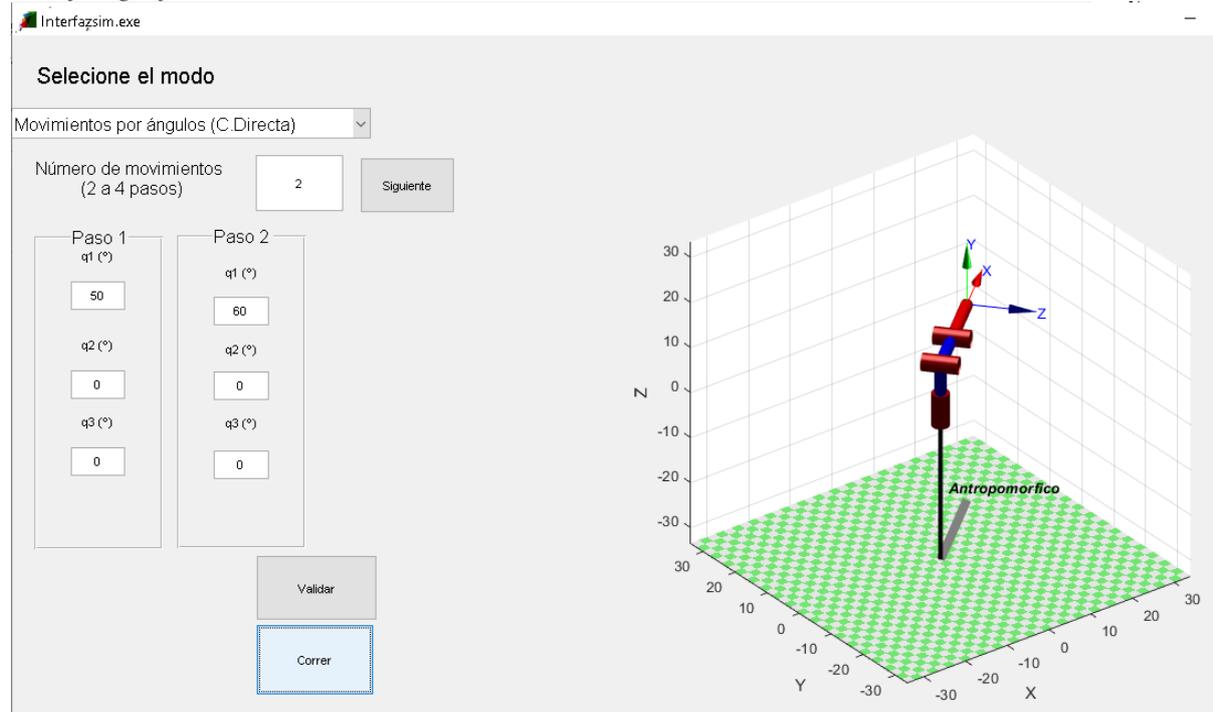


Nota: Imagen interfaz gráfica simulador

En el Anexo a, se puede encontrar el link para la carpeta de la aplicación, en donde se debe instalar mediante la carpeta for_redistribucion y el .exe que se encuentra en su interior.

Figura 83.

Interfaz gráfica simulador "Secuencias"



Nota: Imagen interfaz gráfica simulador "Secuencias"

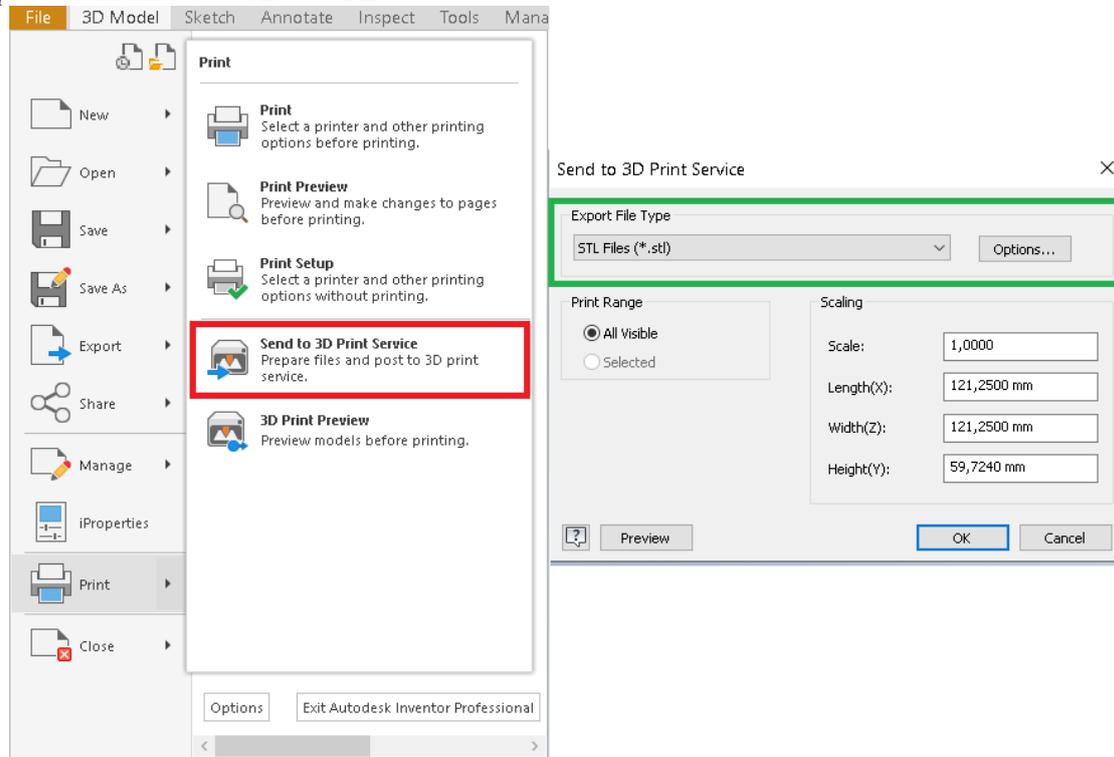
3.6 Prototipado

En este apartado se describe el proceso con los cuales se fabrican las piezas del prototipo.

Como primera medida se exporta los modelos 3D elaborados en inventor a un formato. STL (Ver figura 84)

Figura 84.

Exportación modelos 3D a. STL

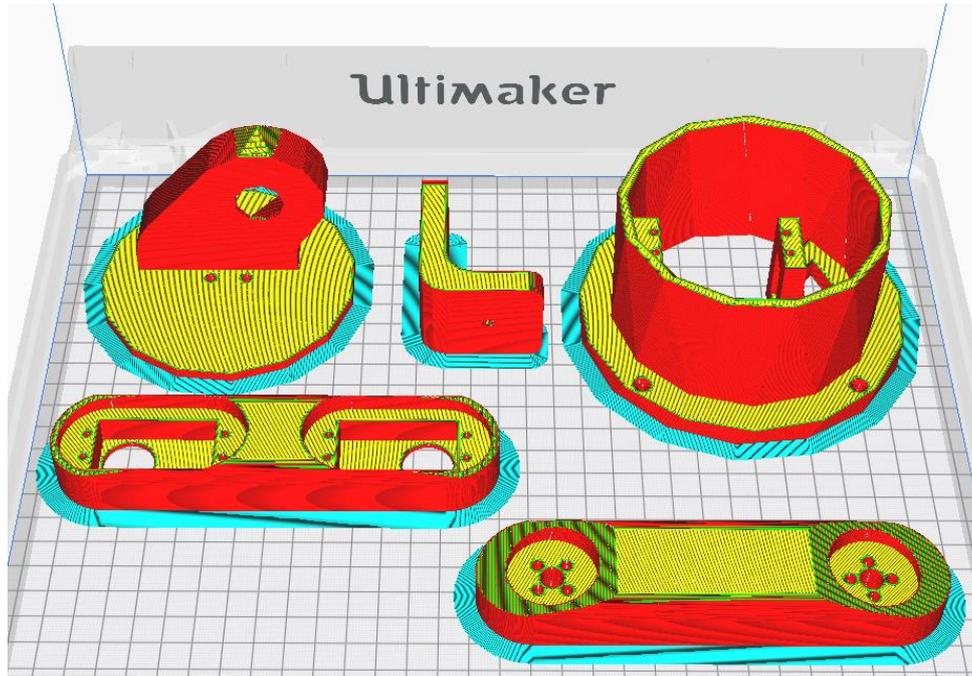


Nota: Imagen en software Autodesk Inventor, exportación de modelos 3D a. STL. Elaborado en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available: <https://www.autodesk.com/education/edusoftware/overview?sorting=featured&page=1>.

Posterior a esto abrir los archivos en el software libre Ultimaker Cura [26] (Ver figura 84), dentro de este software se puede configurar variables de la impresión 3D como lo es el relleno o el paso de cada capa en este caso se toma un relleno de 50% y un paso de 0.15mm, así como el material en este caso es ABS. (Ver figura 85)

Figura 85.

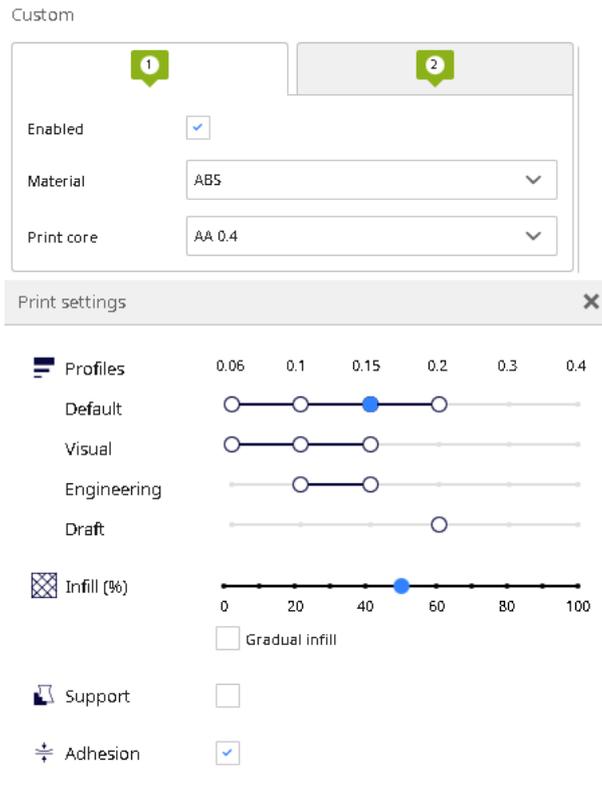
Archivos. STL en Ultimaker Cura



Nota: Imagen en software Autodesk Inventor, exportación de modelos 3D a. STL.
Elaborado en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

Figura 86.

Variables de la impresión 3D en Ultimaker Cura.



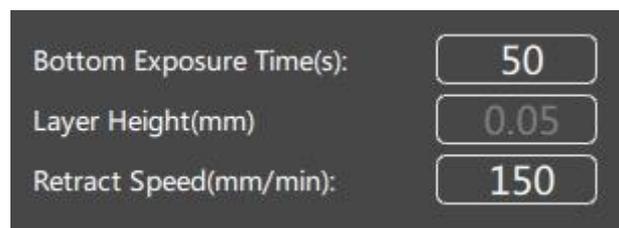
Nota: Imagen en software Autodesk Inventor, exportación de modelos 3D a. STL. Elaborado en: *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available:

<https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.

Para el proceso de impresión del brazo se hace uso de la impresión en 3D con plástico ABS, con el software Chitubox; dentro del cual se tiene que nos arroja las siguientes propiedades:

Figura 87.

Programa Chitubox para impresión 3D.



Nota: Imagen en software Chitubox.

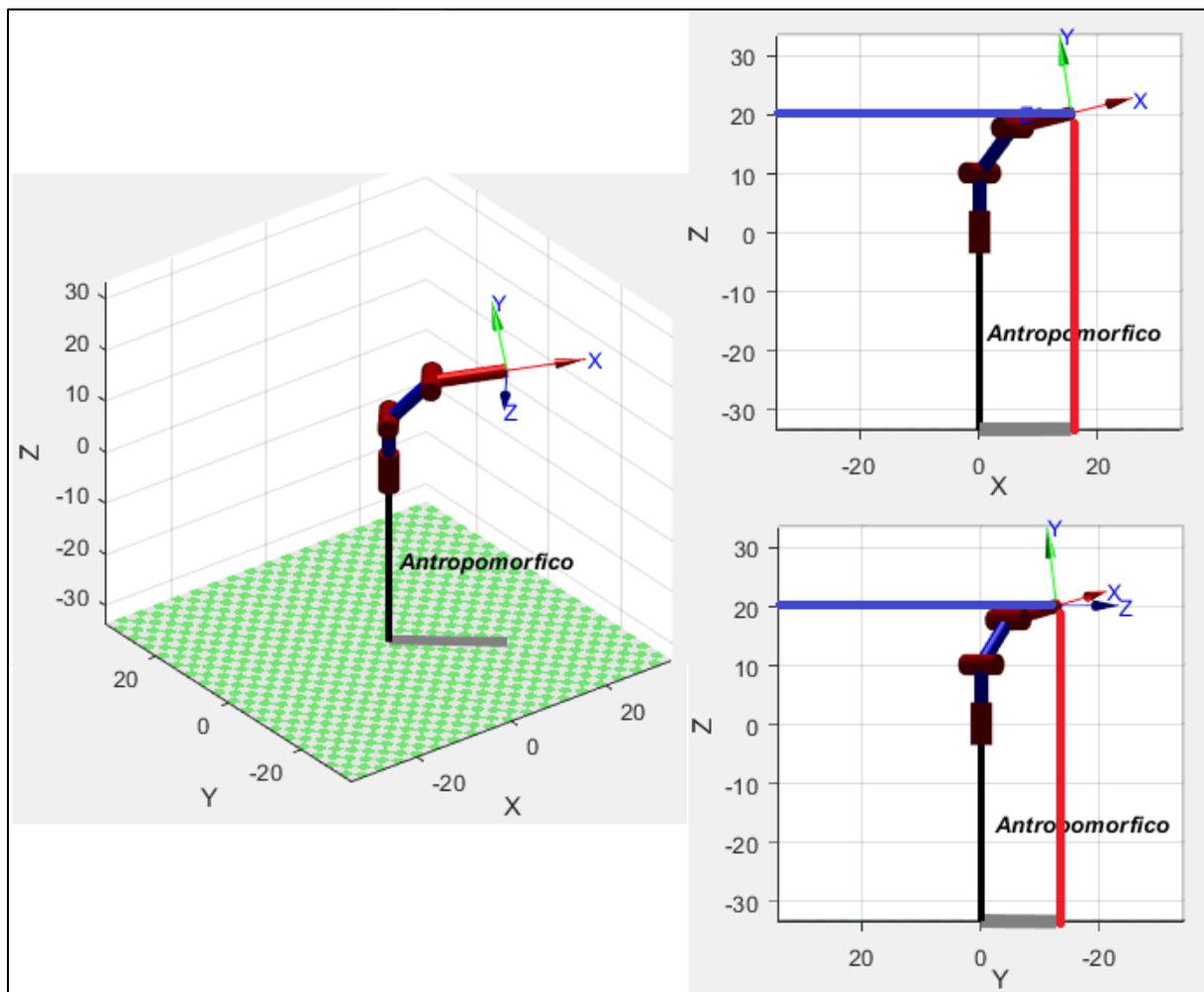
Donde se busca la máxima calidad que puede ofrecer esta alternativa, se implementa el paso entre capas de 0.12 milímetros, donde este es el más fino, en el cual se obtiene un espesor de capa de 0.05 milímetros. Este espesor brinda buena solidez y rigidez a la pieza, debido a que se logra una buena densidad por la separación entre capas (0.12milímetros). Estas propiedades brindan las propiedades mecánicas necesarias para que cada una de los elementos soporte las fuerzas a las cuales se verá sometida.

4.RESULTADOS

Para la validación de lo obtenido en la interfaz programada, se realiza la comparación de lo encontrado con respecto al método geométrico que se explica en el libro de “fundamentos de robótica”. Para este análisis es necesario conocer cómo medir las coordenadas dentro de la interfaz, en la figura 88 se puede evidenciar una posición aleatoria en perspectiva en 3 dimensiones (Izquierda) y 2 imágenes más vista desde los planos XZ y YZ(Derecha), donde se puede ver con líneas paralelas a los ejes X, Y, Z de color azul y rojo.

Figura 88.

Coordenadas en el simulador



Nota: Forma de obtener las coordenadas en el simulador.

4.1 Validación del algoritmo de Denavit-Hartenberg en el módulo didáctico

En este capítulo se muestra mediante un software el cual es Matlab, el algoritmo Denavit-Hartenberg acompañado de una simulación, la cual es posible gracias a un toolbox (paquete adicional para matlab) el cual es especializado en robótica y es de la autoría de Peter Corke. [13]

Para poder validar el algoritmo se procede a realizar la comparación en 5 posiciones aleatorias.

4.1.1 Demostración geométrica

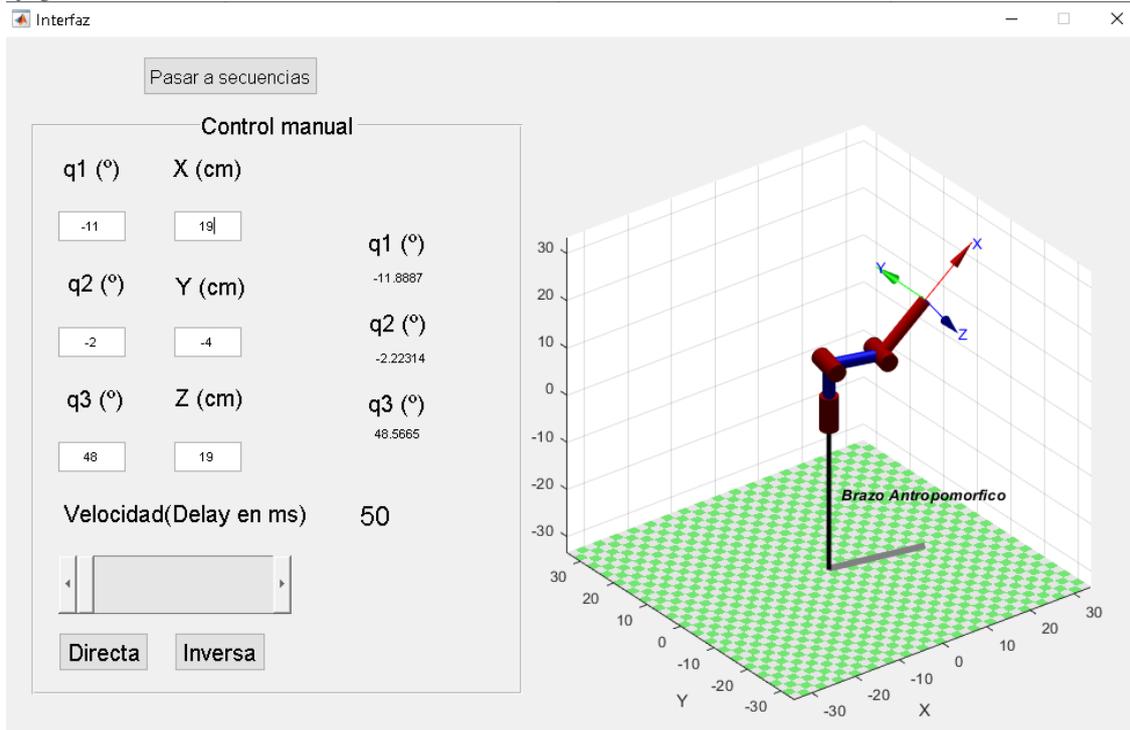
Resolución por el método geométrico

Este método es aplicado para encontrar las relaciones geométricas que existen entre la posición final del extremo del brazo robótico, las coordenadas articulares (grados de rotación en las articulaciones) y las dimensiones físicas del brazo robótico. [1]

En la figura 89 se puede ver la configuración del brazo robótico, la cual consta de 3 grados de libertad de rotación.

Figura 89.

Configuración brazo robótico

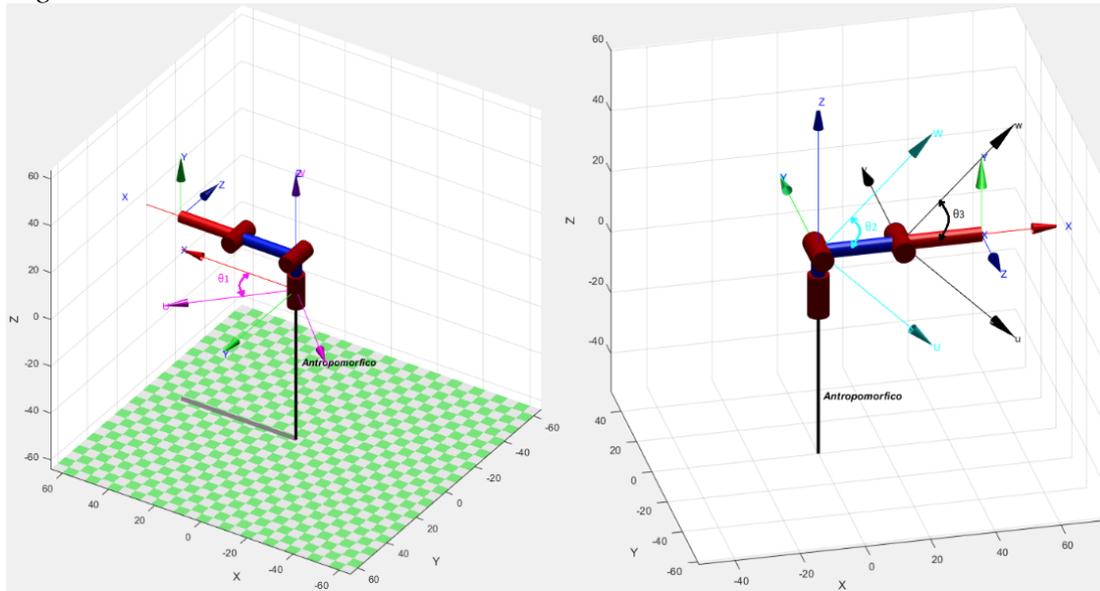


Nota: Interfaz gráfica en posición de estudio para la demostración geométrica

Con base en la configuración del brazo robótico se puede observar claramente el primer ángulo q_1 ó θ_1 ; El cual está entre los ejes de referencia X, Y, Z y los ejes rotados que son de color rosado U, V, W; Así mismo se puede evidenciar en la parte derecha los ángulos q_2 ó θ_2 y q_3 ó θ_3 (Ver figura 90)

Figura 90.

Ángulos de rotación en el brazo robótico



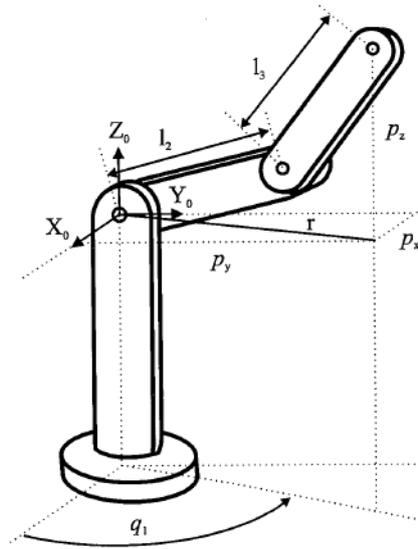
Nota: Descripción gráfica de los ángulos de rotación del brazo robótico.

Como se puede evidenciar en la figura 86 están las posiciones del extremo final las cuales son $x = 19, y = -4, Z = 19$ (medidas en centímetros).

Para realizar el método geométrico se debe tener en cuenta las siguientes convenciones. (ver figura 91)

Figura 91.

Convenciones de configuración de brazo antropomórfico.



Nota: Descripción gráfica donde se muestran las variables de la configuración del brazo antropomórfico. Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 110). Madrid: McGraw-Hill. [1]

Se tiene en cuenta la configuración y las convenciones de la figura 91 donde se puede evidenciar en el plano el ángulo q_1 .

Ecuación 5.

Valor de q_1

$$q_1 = \arctg\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

En la ecuación 2 hace referencia al triángulo formado por la proyección en el plano XY, es por esto que se aplica la ecuación 2, que se aplica de la función tangente; teniendo en cuenta que los eslabones 2 y 3 están en un plano (ver la figura 91) y utilizando el teorema del coseno, se tiene:

Ecuación 6. Valor de r

$$r^2 = p_x^2 + p_y^2$$

Se puede evidenciar el triángulo rectángulo en la figura 91 (teorema de Pitágoras)

Ecuación 7. Teorema del coseno para triángulo que se forman en los eslabones 2 y 3

$$r^2 + p_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3\cos(q_3)$$

Recordando que:

$$r^2 + p_z^2 = \text{Diagonal del triángulo formado por los eslabones 2 y 3 y el origen (ver figura 88)}$$

y

$$\cos(\pi - q_3) = -\cos(q_3) \text{ por esta razón en el teorema del coseno se tiene el signo}$$

Despejando $\cos(q_3)$ se tiene que:

Ecuación 8. Despeje $\cos(q_3)$ del teorema del coseno

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

“Esta expresión permite obtener q_3 en función del vector de posición del extremo \mathbf{p} . No obstante, y por motivos de ventajas computacionales, es más conveniente utilizar la expresión de arco tangente en lugar del arco seno” [1]

Ecuación 9. Aplicación del teorema de fundamental de trigonometría

Puesto que

$$\text{sen } q_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}$$

Ecuación 10. Obtención del arco tangente.

se tendrá que

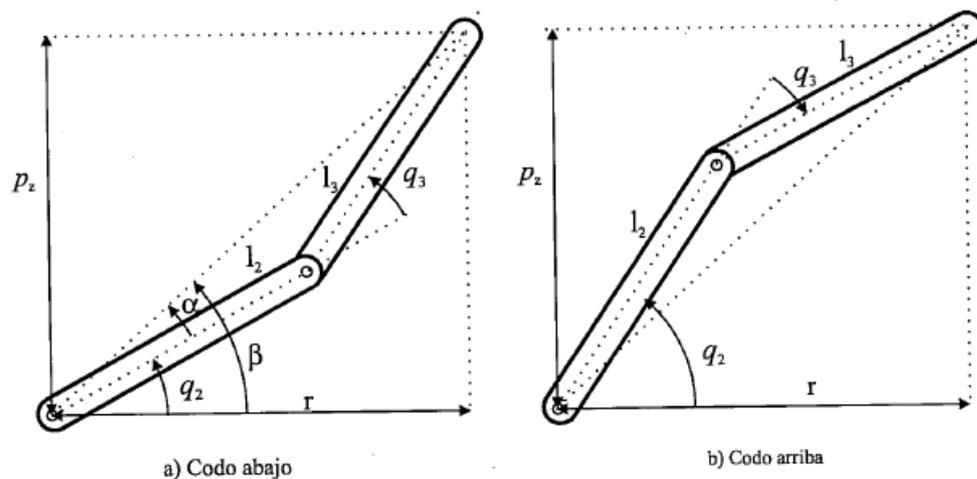
$$q_3 = \arctg \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}}{\cos q_3} \right)$$

$$\text{con } \cos q_3 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}$$

Como se puede evidenciar en la figura 92, se pueden dar 2 soluciones para q_3 , según el signo positivo o negativo en la raíz, como lo son las configuraciones de codo arriba y codo abajo. [1]

Figura 92.

Eslabones 2 y 3 en el plano r, z



Nota: Descripción gráfica donde se muestran los eslabones 2 y 3 en el plano r, z del brazo antropomórfico. Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2, pp. 111). Madrid: McGraw-Hill.

A partir del cálculo de q_3 , se halla q_2 .

Ecuación 11. Valor de q_2 en términos de β y α

El cálculo de q_2 se hace a partir de la diferencia entre β y α :

$$q_2 = \beta - \alpha$$

Ecuación 12. Valor de β y α

$$\beta = \arctg\left(\frac{p_z}{r}\right) = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{l_3 \operatorname{sen} q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right)$$

Ecuación 13. Valor de q_2 en términos de β y α

$$q_2 = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \operatorname{sen} q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right)$$

Teniendo en cuenta los dos posibles valores según el signo que dan lugar a los 2 tipos de configuraciones ya mencionadas.

Aplicación del método

Obtención del valor q_1

$$q_1 = \arctg\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

$$q_1 = \arctg\left(\frac{-11}{42}\right)$$

$$q_1 = -11.88^\circ$$

Obtención del valor de $\cos(q_3)$

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\cos(q_3) = \frac{(19)^2 + (-4)^2 + (19 - 10)^2 - (10.45)^2 - (13)^2}{2(10.45)(13)}$$

$p_z = 19 - 10$ (Se tiene en cuenta que la referencia para este método se toma en el origen del eslabón 2, por este motivo se debe restar la longitud del primer eslabón) Ver figura 91

$$\cos(q_3) = 0.661$$

Aplicación de ecuación 10

$$q_3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)}\right)$$

$$q_3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - (0.661)^2}}{0.661}\right)$$

$$q_3 = \pm 48.623^\circ$$

Finalmente se aplica la ecuación 13 para hallar el valor de q2

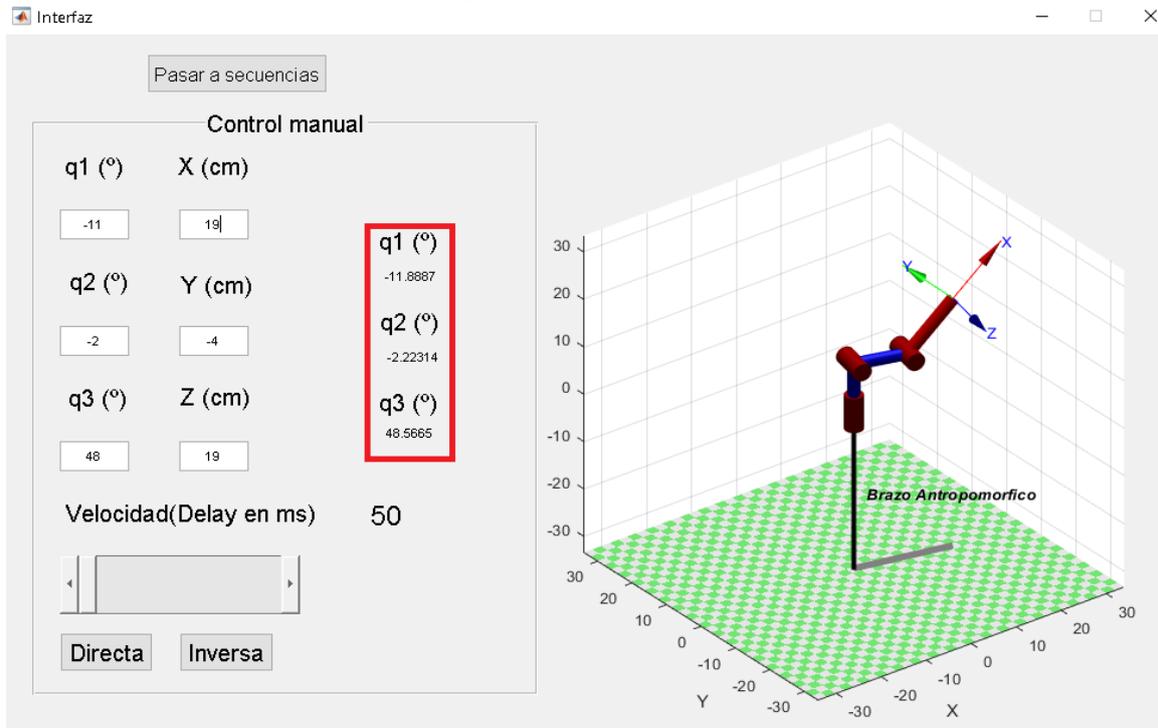
$$q_2 = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right)$$

$$q_2 = \arctg\left(\frac{(19 - 10)}{\pm\sqrt{(19)^2 + (-4)^2}}\right) - \arctg\left(\frac{13 \sin(48.623)}{10.45 + 13 \cos(48.623)}\right)$$

$$q_2 = -2.255^\circ \text{ o } 51.992^\circ$$

Figura 93.

Verificación en Matlab del método geométrico 1 Posición



Nota: Verificación en Matlab del método geométrico con sus valores de posición

Error en la articulación 1

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$
$$Error = \frac{-11.88^\circ - (-11.8887^\circ)}{-11.88^\circ} * 100\%$$
$$Error = 0.073\%$$

Error en la articulación 2

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$
$$Error = \frac{-2.255^\circ - (-2.22314^\circ)}{-2.255^\circ} * 100\%$$
$$Error = 1.41\%$$

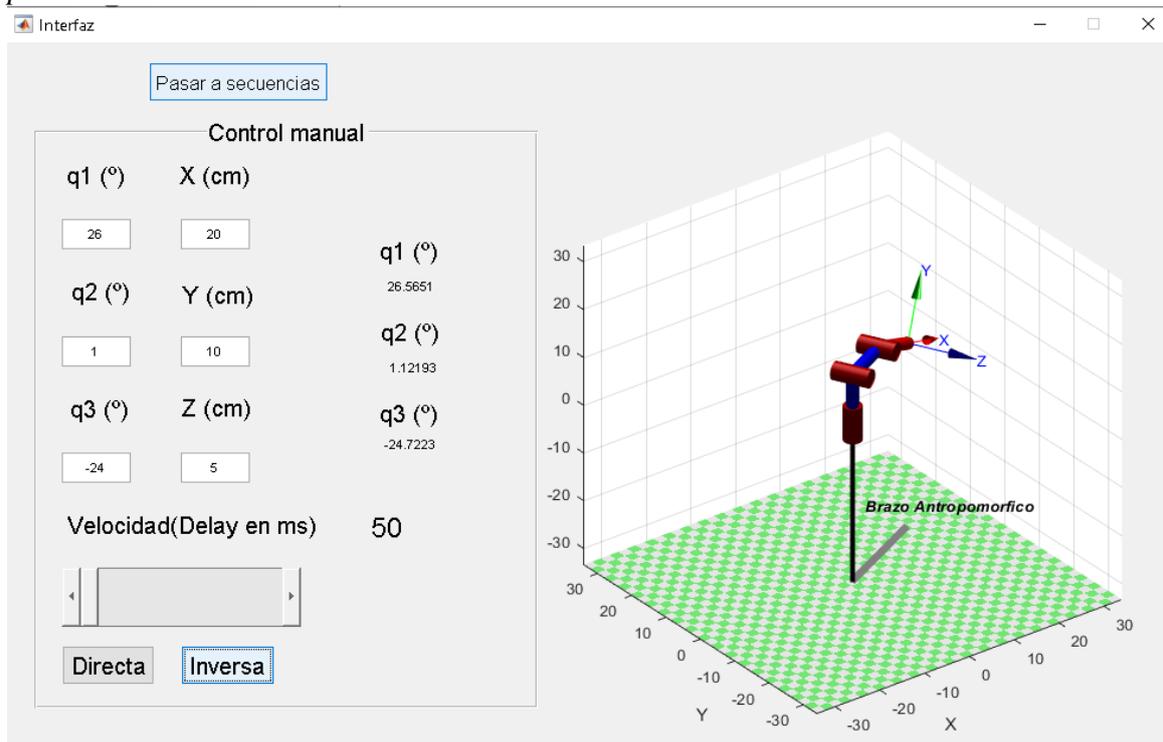
Error en la articulación 3

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$
$$Error = \frac{48.623^\circ - (48.5665^\circ)}{48.623^\circ} * 100\%$$
$$Error = 0.1162\%$$

2 Posición

Figura 94.

2 posición de estudio



Nota: Interfaz gráfica 2 posición de estudio para la demostración geométrica.

Como se puede evidenciar en la figura 94 están las posiciones del extremo final las cuales son $x = 20, y = 10, Z = 5$ (medidas en centímetros).

Obtención del valor q_1

$$q_1 = \arctg\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

$$q_1 = \arctg\left(\frac{20}{30}\right)$$

$$q_1 = 26.565^\circ$$

Obtención del valor de $\cos(q_3)$

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\cos(q_3) = \frac{(20)^2 + (10)^2 + (5 - 10)^2 - (10.45)^2 - (13)^2}{2(10.45)(13)}$$

$p_z = 5 - 10$ (Se tiene en cuenta que la referencia para este método se toma en el origen del eslabón 2, por este motivo se debe restar la longitud del primer eslabón) Ver figura 91

$$\cos(q3) = 0.9083$$

Aplicación de ecuación 10

$$q3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q3)}}{\cos(q3)}\right)$$

$$q3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - (0.9083)^2}}{0.9083}\right)$$

$$q3 = \pm 24.722^\circ$$

Finalmente se aplica la ecuación 13 para hallar el valor de $q2$

$$q2 = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \sin(q3)}{l_2 + l_3 \cos(q3)}\right)$$

$$q2 = \arctg\left(\frac{(5 - 10)}{\pm\sqrt{(20)^2 + (10)^2}}\right) - \arctg\left(\frac{13 \sin(24.722^\circ)}{10.45 + 13 \cos(24.722^\circ)}\right)$$

$$q2 = 1.121^\circ \text{ o } -47.58^\circ$$

Error en la articulación 1

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{26.565^\circ - 26.5651^\circ}{26.565^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.00037\%$$

Error en la articulación 2

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{1.121^\circ - 1.12193^\circ}{1.121^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.082\%$$

Error en la articulación 3

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

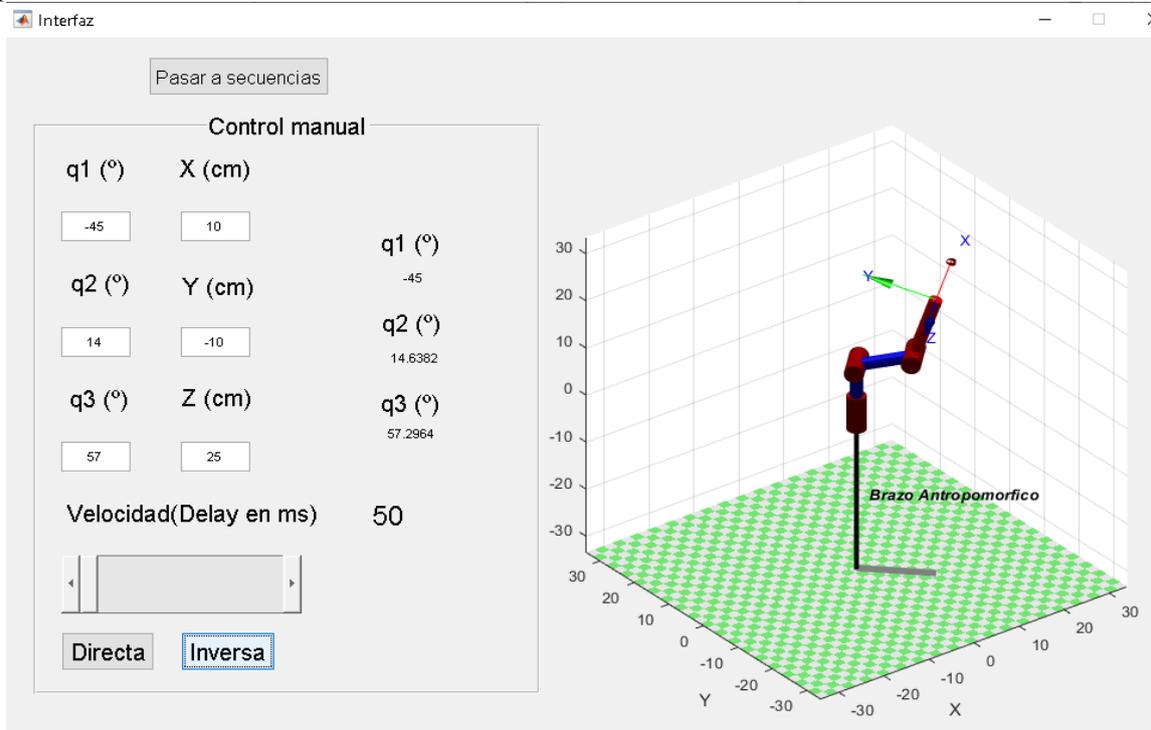
$$Error = \frac{-24.722^\circ - (-24.7223^\circ)}{-24.722^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.0012\%$$

3 posición

Figura 95.

3 posición de estudio



Nota: Interfaz gráfica 3 posición de estudio para la demostración geométrica.

Como se puede evidenciar en la figura 95 están las posiciones del extremo final las cuales son $x = 10, y = -10, Z = 25$ (medidas en centímetros).

Obtención del valor q1

$$q1 = \arctg\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

$$q1 = \arctg\left(\frac{-10}{10}\right)$$

$$q1 = -45^\circ$$

Obtención del valor de $\cos(q3)$

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\cos(q_3) = \frac{(10)^2 + (-10)^2 + (25 - 10)^2 - (10.45)^2 - (13)^2}{2(10.45)(13)}$$

$p_z = 25 - 10$ (Se tiene en cuenta que la referencia para este método se toma en el origen del eslabón 2, por este motivo se debe restar la longitud del primer eslabón)

$$\cos(q_3) = 0.5402^\circ$$

Aplicación de ecuación 10

$$q_3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)}\right)$$

$$q_3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - (0.5402)^2}}{0.5402}\right)$$

$$q_3 = \pm 57.302^\circ$$

Finalmente se aplica la ecuación 13 para hallar el valor de q_2

$$q_2 = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right)$$

$$q_2 = \arctg\left(\frac{(25 - 10)}{\pm\sqrt{(10)^2 + (10)^2}}\right) - \arctg\left(\frac{13 \sin(57.302^\circ)}{10.45 + 13 \cos(57.302^\circ)}\right)$$

$$q_2 = 14.634^\circ \text{ o } -78.73^\circ$$

Error en la articulación 1

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{-45^\circ - (-45^\circ)}{-45^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0\%$$

Error en la articulación 2

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{14.634^\circ - 14.6382^\circ}{14.634^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.0028\%$$

Error en la articulación 3

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

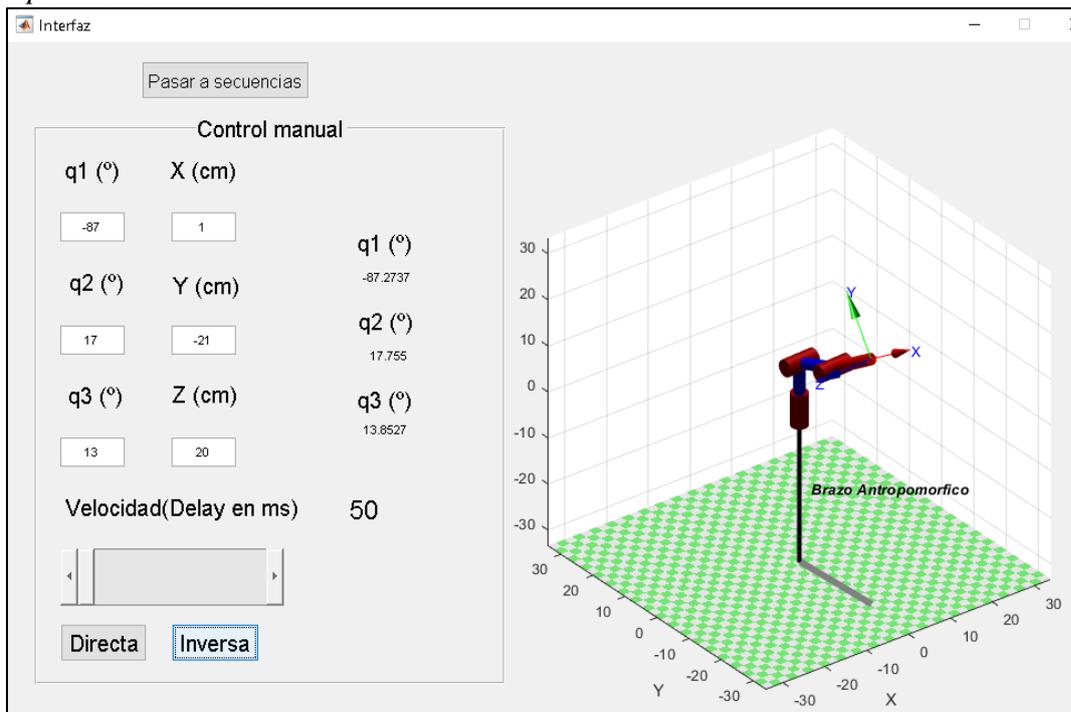
$$Error = \frac{57.302^\circ - 57.2964^\circ}{57.302^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.0097\%$$

4 posición

Figura 96.

4 posición de estudio



Nota: Interfaz gráfica 4 posición de estudio para la demostración geométrica.

Como se puede evidenciar en la figura 96 están las posiciones del extremo final las cuales son

$x = 1, y = -21, Z = 20$ (medidas en centímetros).

Obtención del valor q_1

$$q_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

$$q_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{-21}{1}\right)$$

$$q_1 = -87.273$$

Obtención del valor de $\cos(q_3)$

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\cos(q_3) = \frac{(1)^2 + (-21)^2 + (20 - 10)^2 - (10.45)^2 - (13)^2}{2(10.45)(13)}$$

$p_z = 20 - 10$ (Se tiene en cuenta que la referencia para este método se toma en el origen del eslabón 2, por este motivo se debe restar la longitud del primer eslabón)

$$\cos(q_3) = 0.9709$$

Aplicación de ecuación 10

$$q_3 = \operatorname{arctg}\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)}\right)$$

$$q_3 = \operatorname{arctg}\left(\frac{\pm\sqrt{1 - (0.9709)^2}}{0.9709}\right)$$

$$q_3 = \pm 13.85^\circ$$

Finalmente se aplica la ecuación 13 para hallar el valor de q_2

$$q2 = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \sin(q3)}{l_2 + l_3 \cos(q3)}\right)$$

$$q2 = \arctg\left(\frac{(20 - 10)}{\pm\sqrt{(1)^2 + (-21)^2}}\right) - \arctg\left(\frac{13 \sin(13.85^\circ)}{10.45 + 13 \cos(13.85^\circ)}\right)$$

$$q2 = 17.756^\circ \text{ o } -33.119^\circ$$

Error en la articulación 1

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{-87.273^\circ - (-87.2737^\circ)}{-87.273^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.0008\%$$

Error en la articulación 2

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{17.753^\circ - 14.755^\circ}{17.753^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.0112\%$$

Error en la articulación 3

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

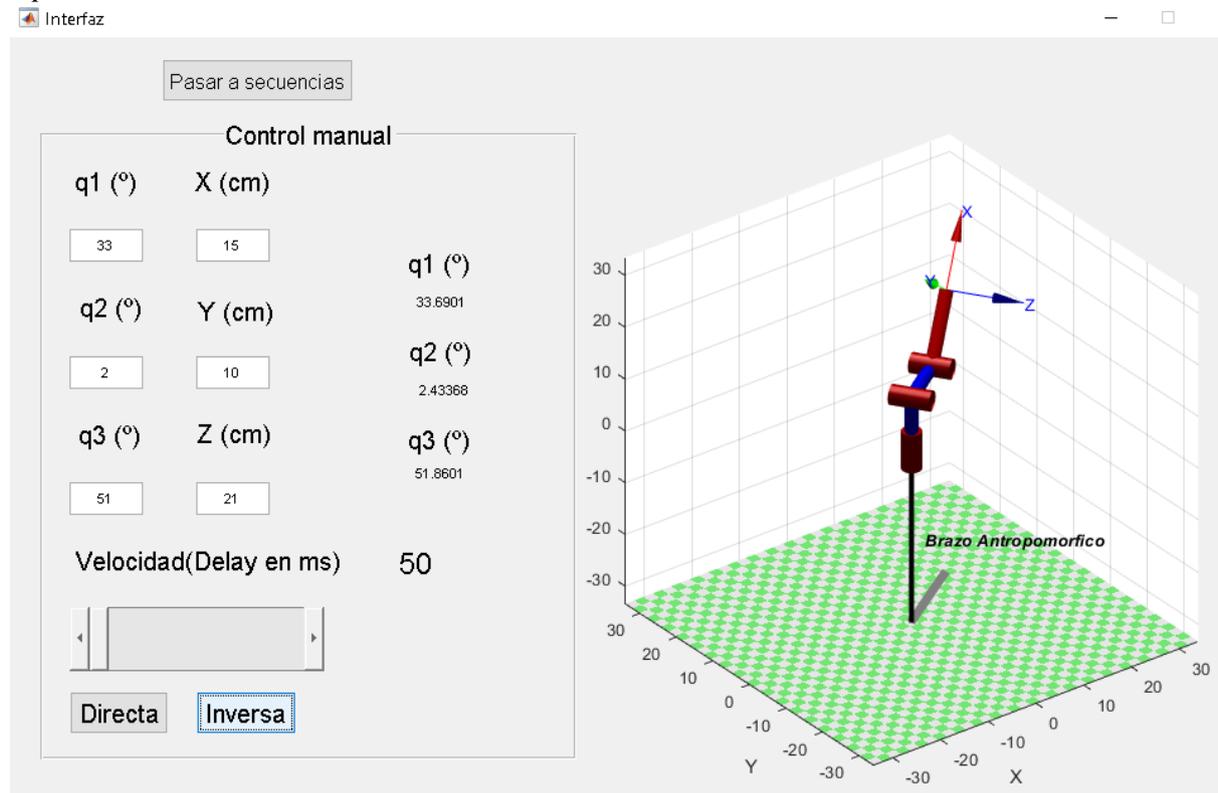
$$Error = \frac{13.85^\circ - 13.8527^\circ}{13.85^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.0194\%$$

5 posición

Figura 97.

5 posición de estudio



Nota: Interfaz gráfica 5 posición de estudio para la demostración geométrica.

Como se puede evidenciar en la figura 97 están las posiciones del extremo final las cuales son $x = 15, y = 10, Z = 21$ (medidas en centímetros).

Obtención del valor q1

$$q1 = \arctg\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

$$q1 = \arctg\left(\frac{10}{15}\right)$$

$$q1 = 33.69^\circ$$

Obtención del valor de $\cos(q3)$

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\cos(q_3) = \frac{(15)^2 + (10)^2 + (21 - 10)^2 - (10.45)^2 - (13)^2}{2(10.45)(13)}$$

$p_z = 21 - 10$ (Se tiene en cuenta que la referencia para este método se toma en el origen del eslabón 2, por este motivo se debe restar la longitud del primer eslabón)

$$\cos(q_3) = 0.6175$$

Aplicación de ecuación 10

$$q_3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)}\right)$$

$$q_3 = \arctg\left(\frac{\pm\sqrt{1 - (0.6175)^2}}{0.6175}\right)$$

$$q_3 = \pm 51.86^\circ$$

Finalmente se aplica la ecuación 13 para hallar el valor de q_2

$$q_2 = \arctg\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right)$$

$$q_2 = \arctg\left(\frac{(21 - 10)}{\pm\sqrt{(15)^2 + (10)^2}}\right) - \arctg\left(\frac{13 \sin(51.86^\circ)}{10.45 + 13 \cos(51.86^\circ)}\right)$$

$$q_2 = 2.433^\circ \text{ o } -60.34^\circ$$

Error en la articulación 1

$$\text{Error} = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$\text{Error} = \frac{33.69 - 33.6901^\circ}{33.69^\circ} * 100\%$$

$$Error = 0.00029\%$$

Error en la articulación 2

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{2.433^{\circ} - 2.43368^{\circ}}{2.433^{\circ}} * 100\%$$

$$Error = 0.027\%$$

Error en la articulación 3

$$Error = \frac{V_{teo} - V_{Interfaz}}{V_{teo}} * 100\%$$

$$Error = \frac{13.85^{\circ} - 13.8527^{\circ}}{13.85^{\circ}} * 100\%$$

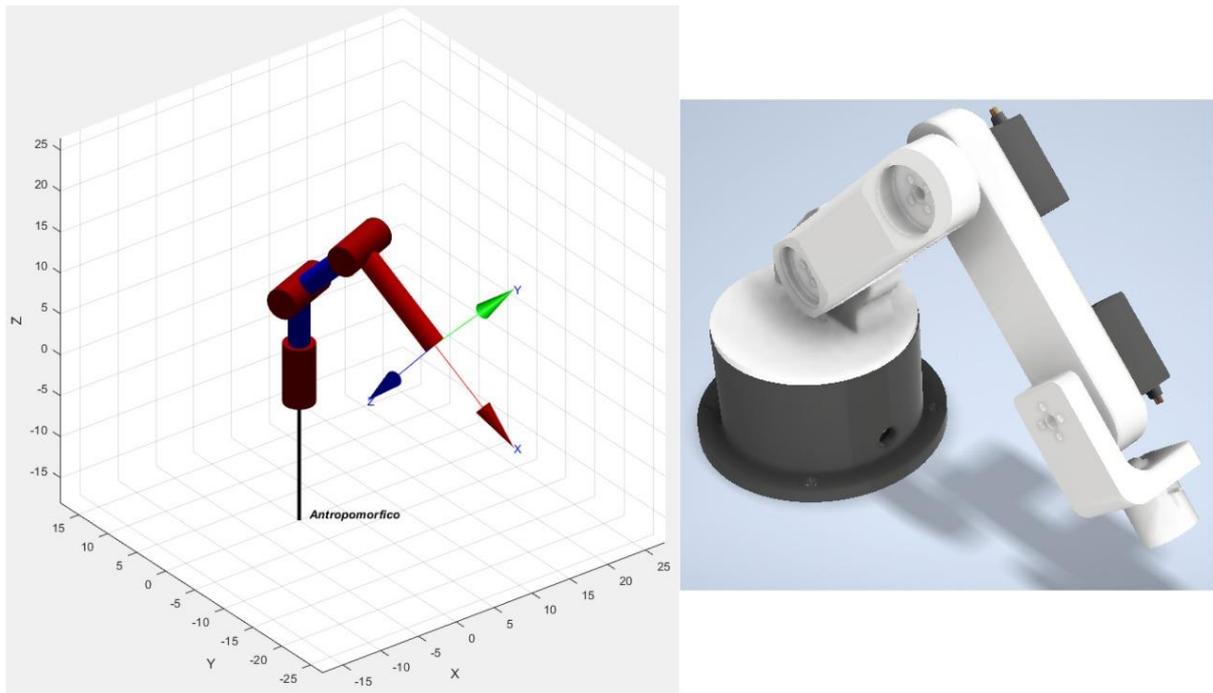
$$Error = 0.0194\%$$

4.1.1.a Resultados de la validación. Al analizar los resultados arrojados por el simulador y los obtenidos mediante los cálculos haciendo uso del método geométrico, se puede notar que la variación entre los datos es mínima, lo cual nos demuestra que el error entre uno, es del orden 0.1%, evidenciando así que el método geométrico coincide perfectamente con los valores arrojados por el software, validando así, que la simulación realizada con base en el toolbox de Peter Corke es efectivo y confiable para este tipo de análisis.

Para evidenciar esto de una mejor forma, se adjunta la figura 98 donde se comparan la misma posición en el simulador y el comportamiento físico del brazo.

Figura 98.

Comparación posición.



Nota: Representación gráfica de la posición. Izquierda, simulador y Derecha, brazo robótico.

5.MANUAL DE MANTENIMIENTO, OPERACIÓN Y GUIA DE LABORATORIO

5.1 Manual de operación

Especificaciones

Especificación del módulo didáctico

Capacidad máxima de elevación: 125 gramos

Nota: La variación en la capacidad máxima se debe a que para la construcción del prototipo se hace uso de un proceso por el cual el estado estructural de los componentes del brazo es mucho menos elaborado por costos de producción de las piezas en la parte de la densidad, por ende, la necesidad de la reducción de la carga es requerida. Cabe resaltar que, para la elaboración de esta herramienta, se hace uso de una escala prototipo lo que incidió en la reducción de la capacidad máxima de elevación.

Este manual del operador ha sido preparado para proporcionar la información necesaria sobre el funcionamiento del módulo didáctico.

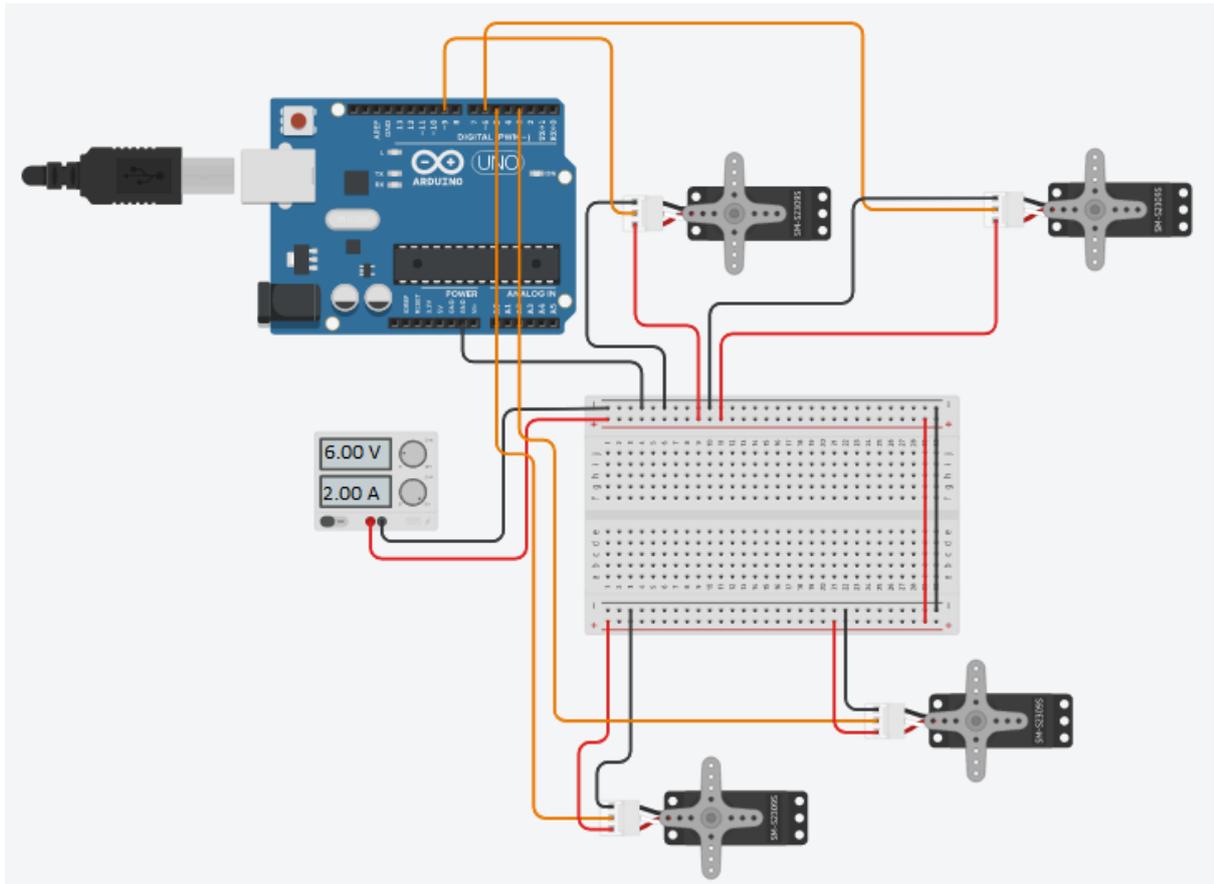
5.1.1 Verificación antes de la operación

Es importante antes de empezar a utilizar el módulo didáctico verificar el correcto conexionado de los componentes electrónicos, ver en la figura 99 el montaje de los servomotores y su correcta conexión, donde:

- Servomotor de la base: pin 3
- Servomotor del hombro: pin 5
- Servomotor del codo: pin 6
- Servomotor de la muñeca: pin 9

Figura 99.

Conexión para los servomotores



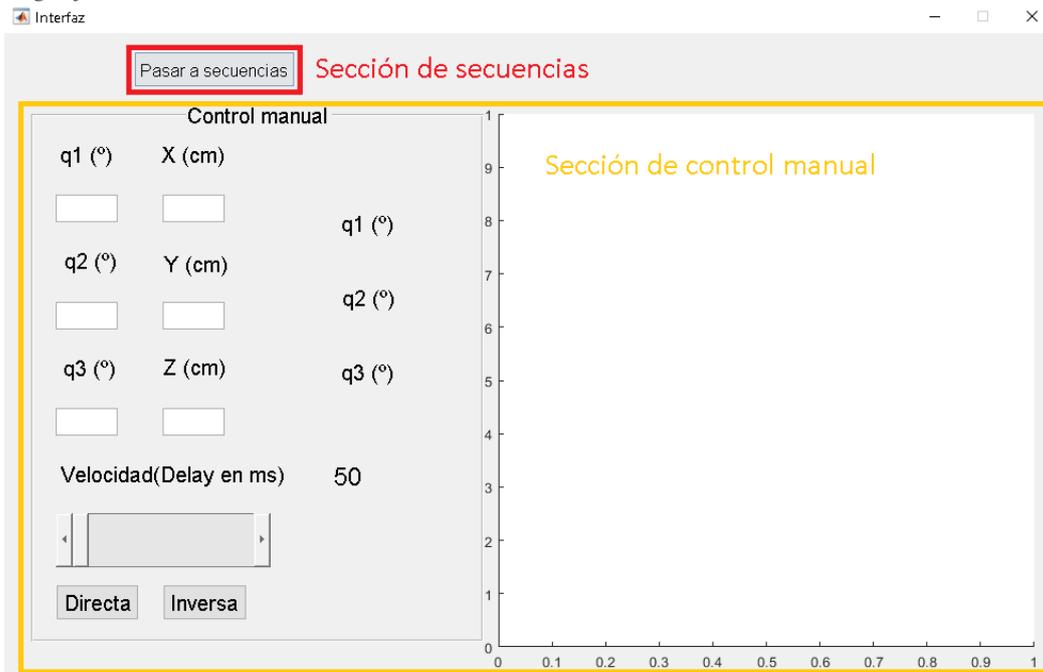
Nota: Representación de la conexión de los servomotores, elaborado en: *Tinkercad | Create 3D digital designs with online CAD* (). Available: <https://www.tinkercad.com/>.

5.1.2 Operación en la interfaz

El módulo didáctico cuenta con 2 secciones para su funcionamiento, a continuación, se especifica cada uno de ellos. (Ver figura 100)

Figura 100.

Interfaz gráfica secciones

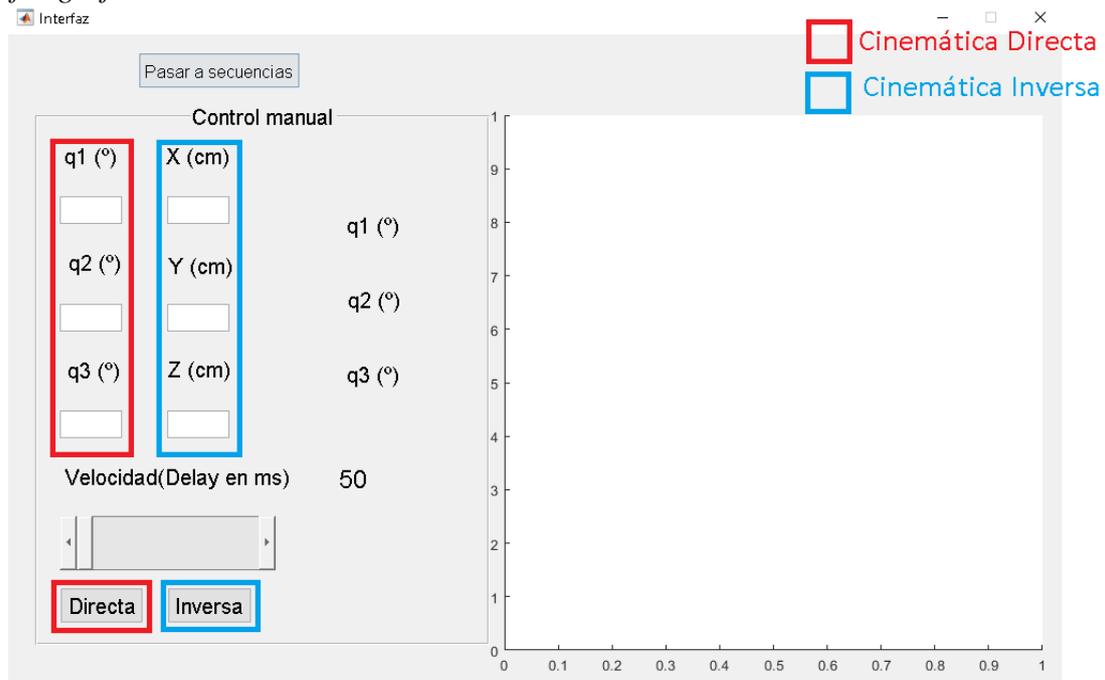


Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando las secciones disponibles

5.1.2.a Sección de control manual desde la interfaz. Inicialmente se cuenta con el control manual es cual tiene como función el control y simulación del movimiento del brazo robótico en una posición introducida por el usuario, es importante tener en cuenta que el brazo robótico cada vez que se introduzca una posición ya sea por cinemática directa o inversa el brazo siempre volverá a la posición inicial con valores articulares de 0, esta sección cuenta con: (Ver figura 101)

Figura 101.

Interfaz gráfica



Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando las partes de cinemática directa e inversa

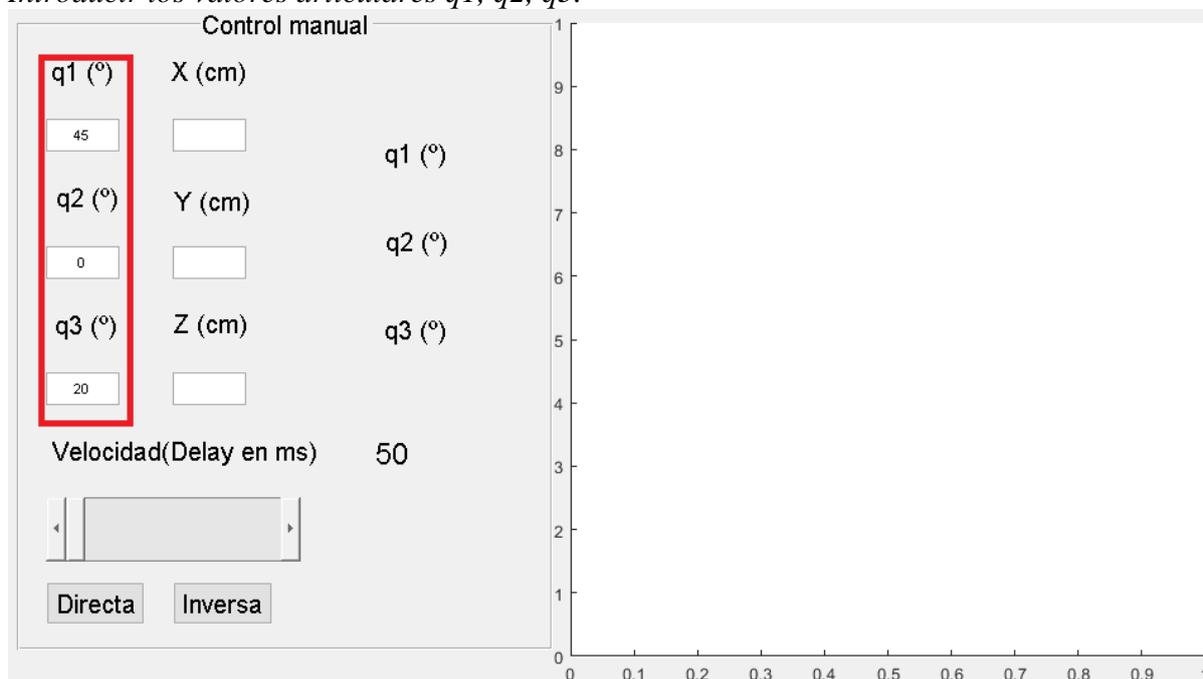
Control y simulación por cinemática directa

En este apartado se introduce los datos de los ángulos articulares para el dicho control y simulación del brazo robótico, a continuación, se muestra un ejemplo de cómo operar el interfaz:

1 paso: Introducir los valores articulares para q1, q2 y q3 (Ver figura 102)

Figura 102.

Introducir los valores articulares q1, q2, q3.

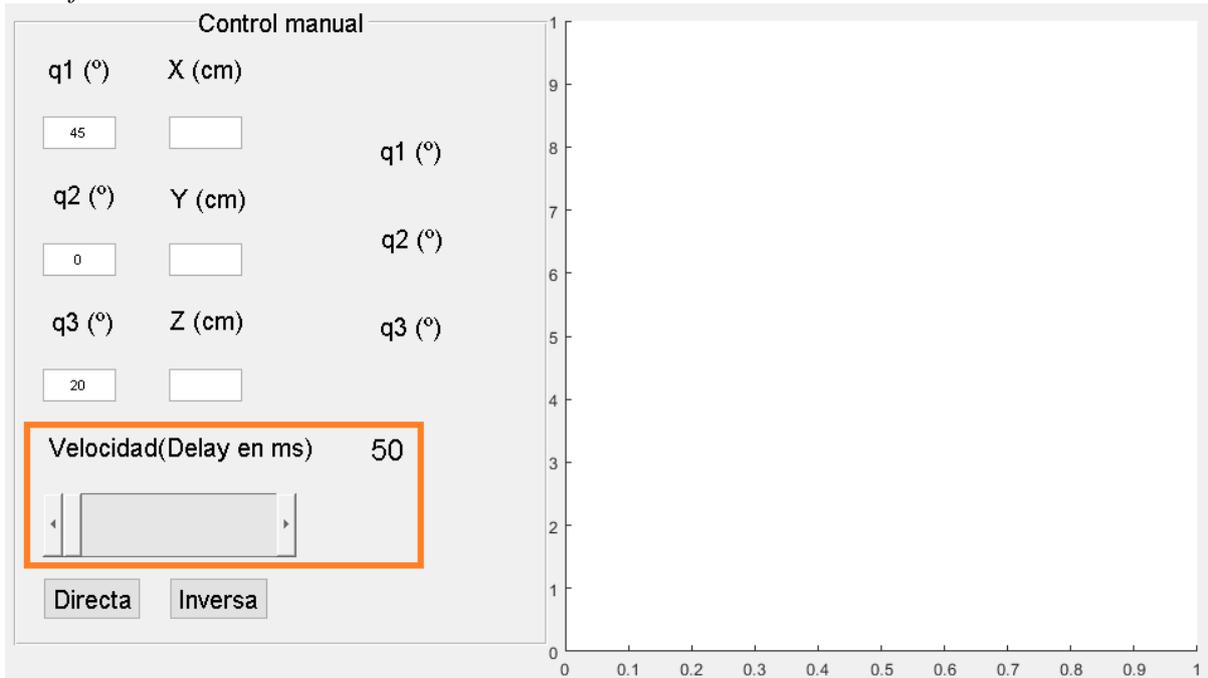


Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando los datos asignados para q1, q2 y q3

2Paso: Verificar la velocidad deseada, en tal caso modificarla a necesidad del usuario, recordando que esta velocidad está relacionada en cantidad de grados (2°) por ms en este caso es posible modificar el tiempo, así variando la velocidad en un rango de (50ms a 1500ms). (Ver figura 103)

Figura 103.

Modificación de la velocidad directa.

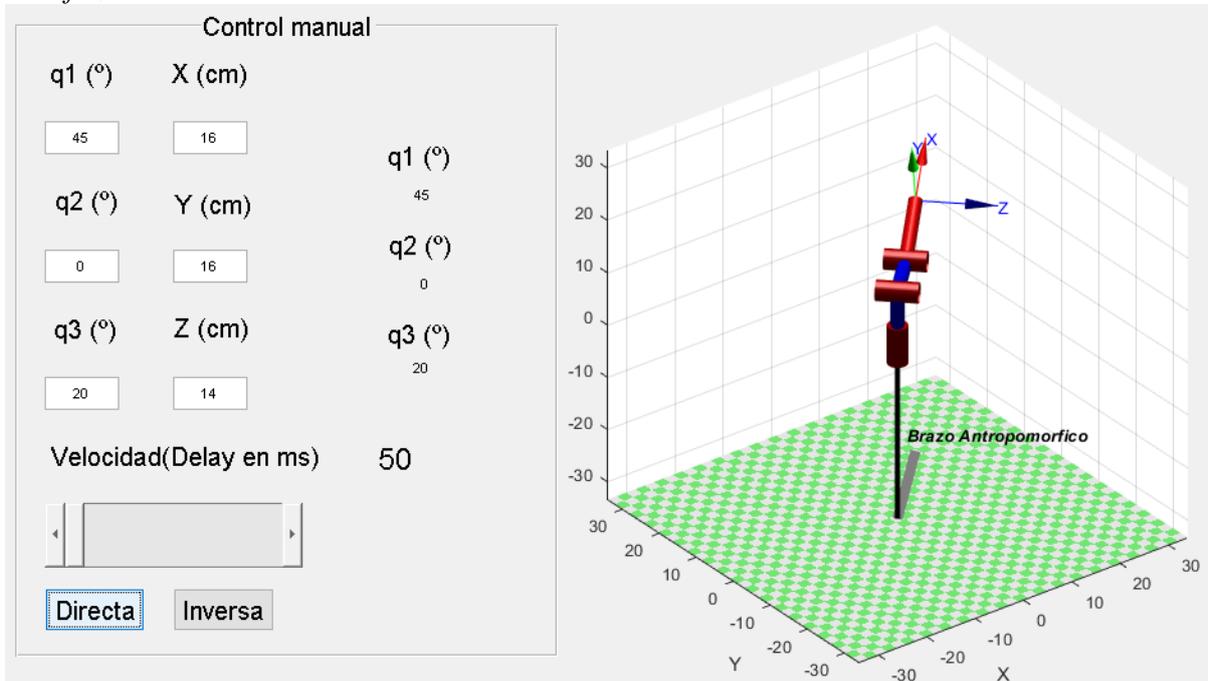


Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando el apartado del control de velocidad.

3 Paso: Se procede a pulsar el botón “Directa”, donde el programa muestra la simulación y calcula la posición del efector final. (Ver figura 104)

Figura 104.

Interfaz con la simulación directa



Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando la simulación.

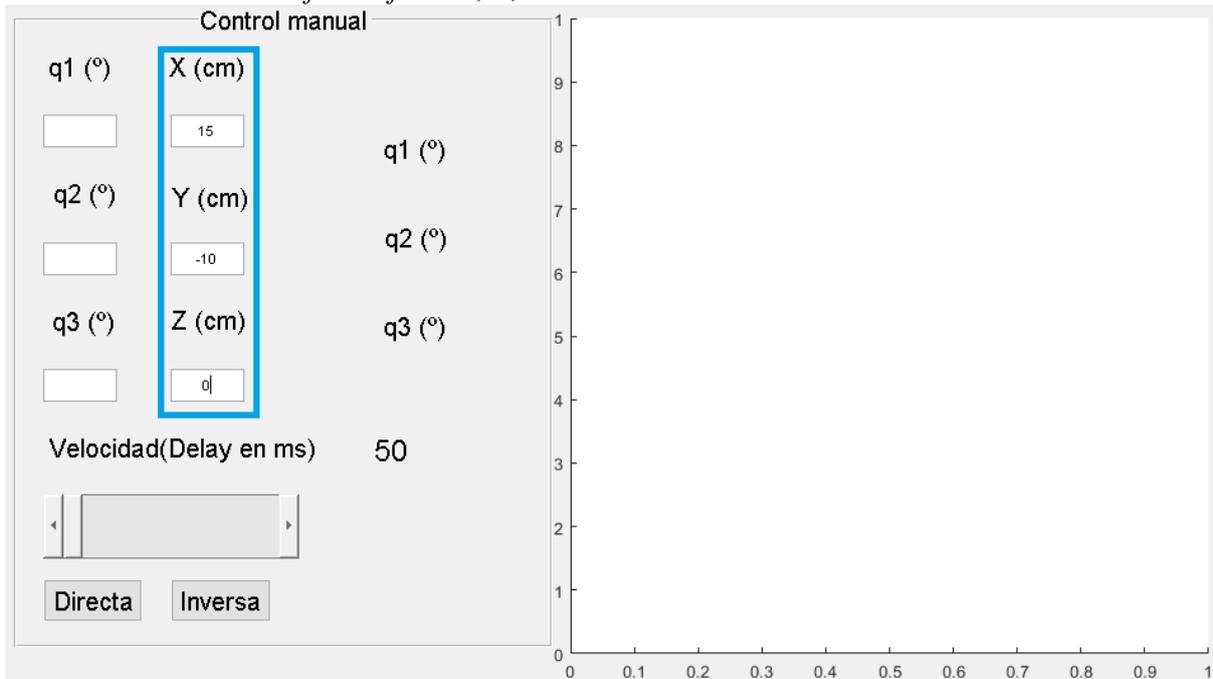
Control y simulación por cinemática inversa

En este apartado se introduce los datos del efector final para el dicho control y simulación del brazo robótico, a continuación, se muestra un ejemplo de cómo operar el interfaz:

1 paso: Introducir los valores del efector final (Ver figura 105)

Figura 105.

Introducir los valores efector final X, Y, Z.

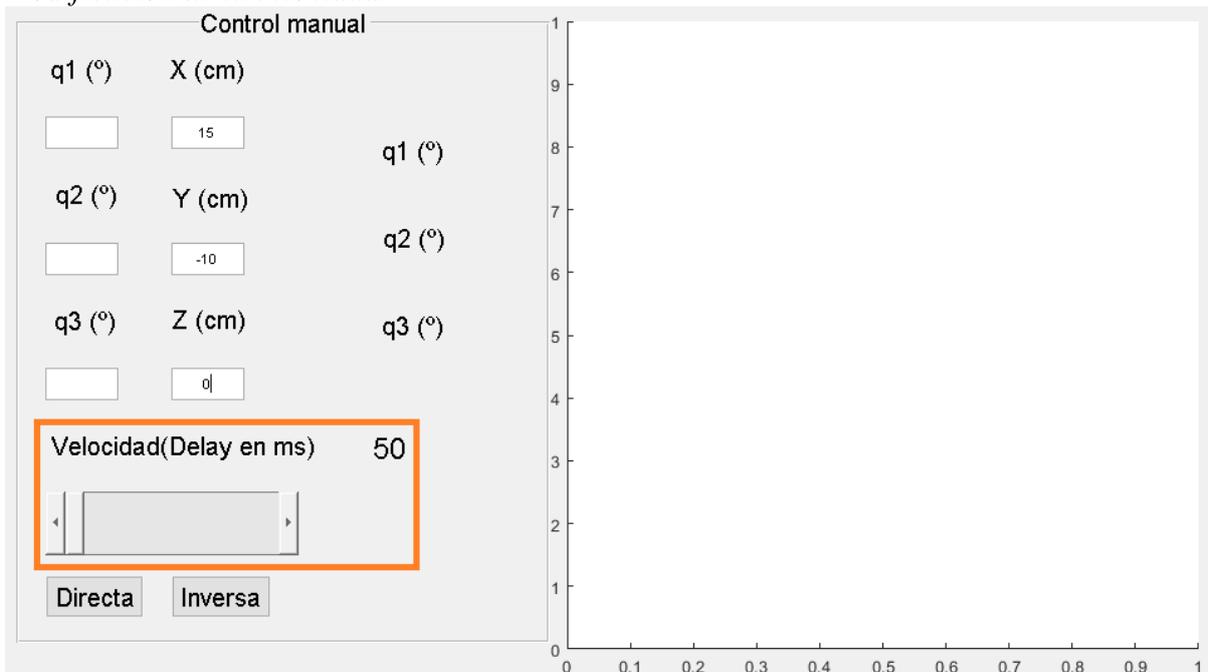


Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando los datos asignados para X, Y y Z

2 paso: Verificar la velocidad deseada, en tal caso modificarla a necesidad del usuario, recordando que esta velocidad está relacionada en cantidad de grados (2°) por ms en este caso es posible modificar el tiempo, así variando la velocidad. (Ver figura 106)

Figura 106.

Modificación de la velocidad.

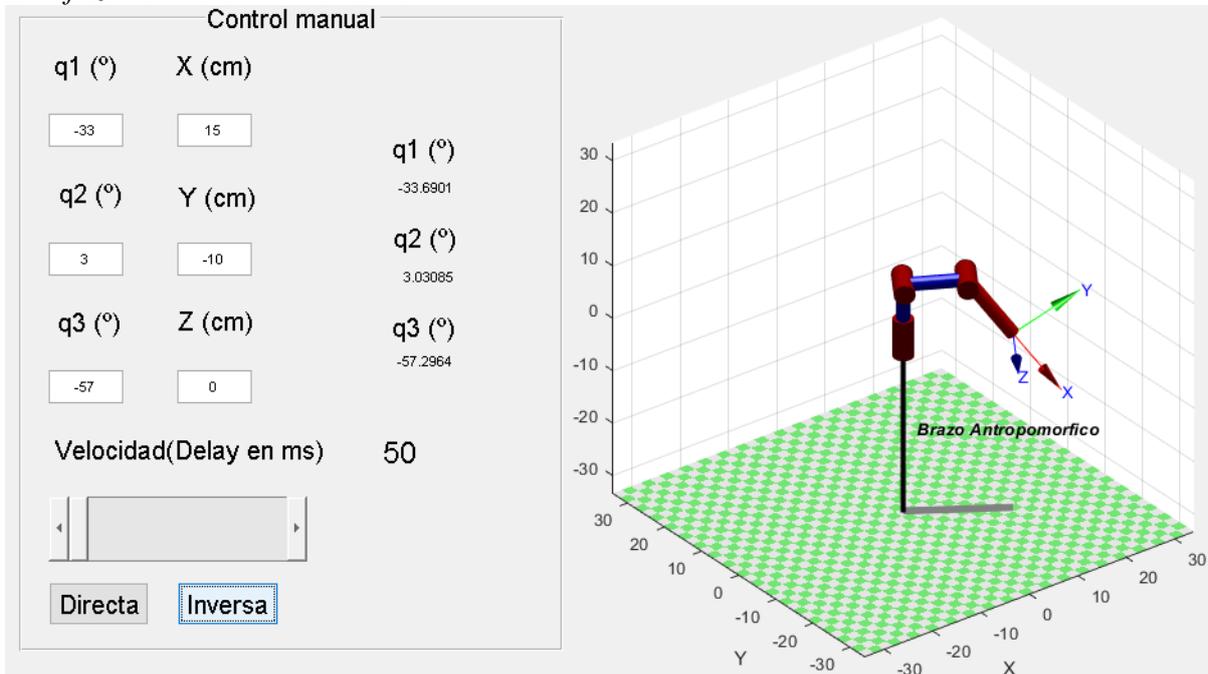


Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando el apartado del control de velocidad.

3 paso: Se procede a pulsar el botón “Inversa”, donde el programa muestra la simulación y calcula los grados articulares de q1, q2 y q3 (Ver figura 107)

Figura 107.

Interfaz con la simulación inversa



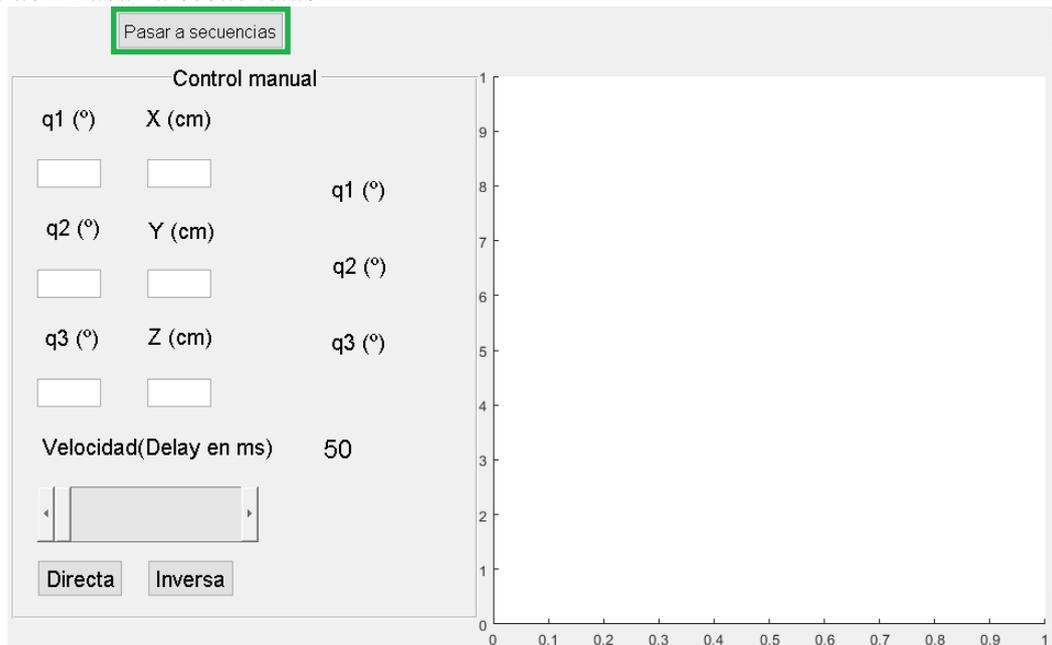
Nota: Imagen interfaz gráfica mostrando la simulación.

5.1.2.b Sección de control por secuencias desde la interfaz. Esta interfaz tiene como función generar movimientos secuenciales, así mismo se puede evidenciar la simulación del movimiento del brazo robótico, en esta sección se dispone de un rango de 2 a 4 movimientos secuenciales a ejecutar, ya sea por cinemática directa o inversa, a continuación, se muestra un ejemplo de cómo operar la sección de secuencias.

1 paso: Ubicar el botón “Pasar a secuencias” y pulsar para que se muestre la sección de secuencias (Ver figura 108)

Figura 108.

Botón de “Pasar a secuencias”

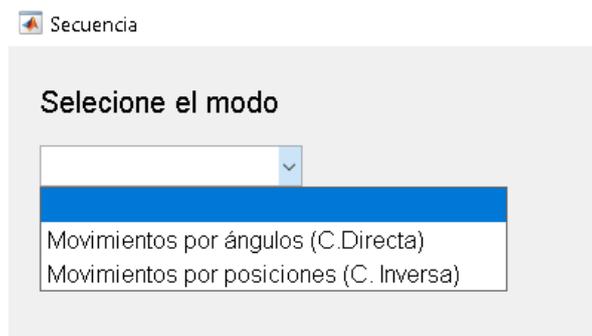


Nota: Interfaz gráfica ubicación del botón “Pasar a secuencias”

2 paso: Se debe desplegar el menú para seleccionar el modo de usar, ya sea cinemática directa o inversa. (Ver figura 109)

Figura 109.

Sección secuencias selección de modo.



Nota: Interfaz gráfica sección secuencias con los modos a seleccionar.

3 paso: Introducir el número de movimientos, que está en el rango de 2 a 4 y pulsar el botón “Siguiente”. (Ver figura 110)

Figura 110.

Sección secuencias número de movimientos

The screenshot shows a web interface titled "Selección de modo". At the top, there is a dropdown menu with the text "Movimientos por ángulos (C.Directa)". Below this, there is a label "Número de movimientos (2 a 4 pasos)" followed by a text input field containing the number "3". To the right of the input field is a button labeled "Siguiente", which is highlighted with a green border.

Nota: Interfaz gráfica sección secuencias con los números de movimientos a seleccionar.

4 paso: Introducir cada una de las variables de los movimientos en el caso del ejemplo es con 3 movimientos y es por el método de cinemática directa por esa razón se debe llenar con valores de ángulos articulares, se validar la información con el botón “Validar”. (Ver figura 111)

Figura 111.

Sección secuencias movimientos

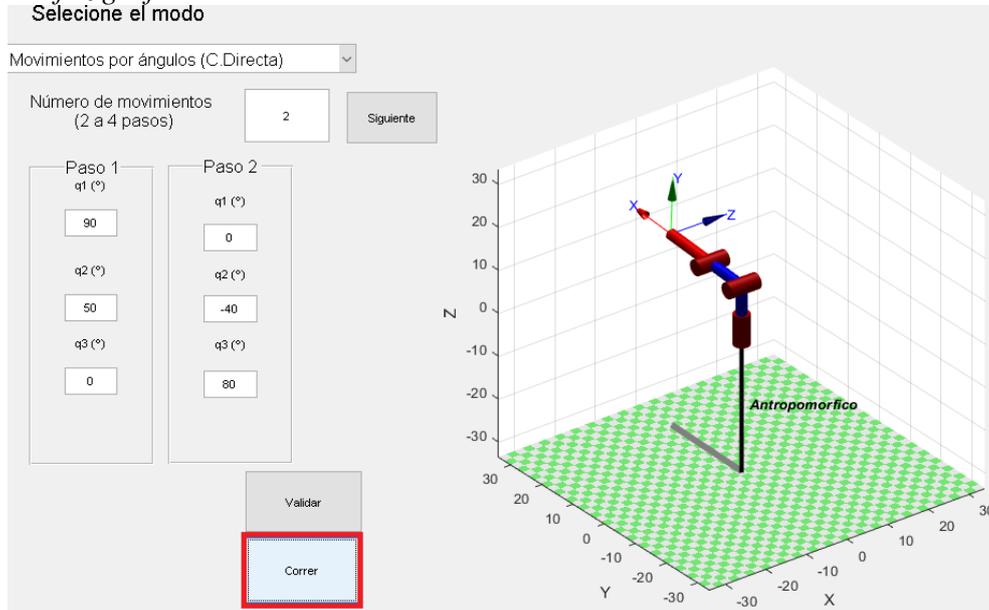
The screenshot shows a web interface titled "Selección de modo". At the top, there is a dropdown menu with the text "Movimientos por ángulos (C.Directa)". Below this, there is a label "Número de movimientos (2 a 4 pasos)" followed by a text input field containing the number "3". To the right of the input field is a button labeled "Siguiente". Below these elements, there are three columns labeled "Paso 1", "Paso 2", and "Paso 3". Each column contains three text input fields for joint angles q_1 (°), q_2 (°), and q_3 (°). The values entered are: Paso 1 (90, 0, 12), Paso 2 (-20, 50, 30), and Paso 3 (40, -45, 0). At the bottom center, there is a button labeled "Validar", which is highlighted with a green border.

Nota: Interfaz gráfica sección secuencias con variables de ángulos articulares deseados.

5 Paso: Se pulsa el botón “Correr”, y se puede ver la simulación al lado derecho. (ver figura 112)

Figura 112.

Interfaz gráfica secuencias animación

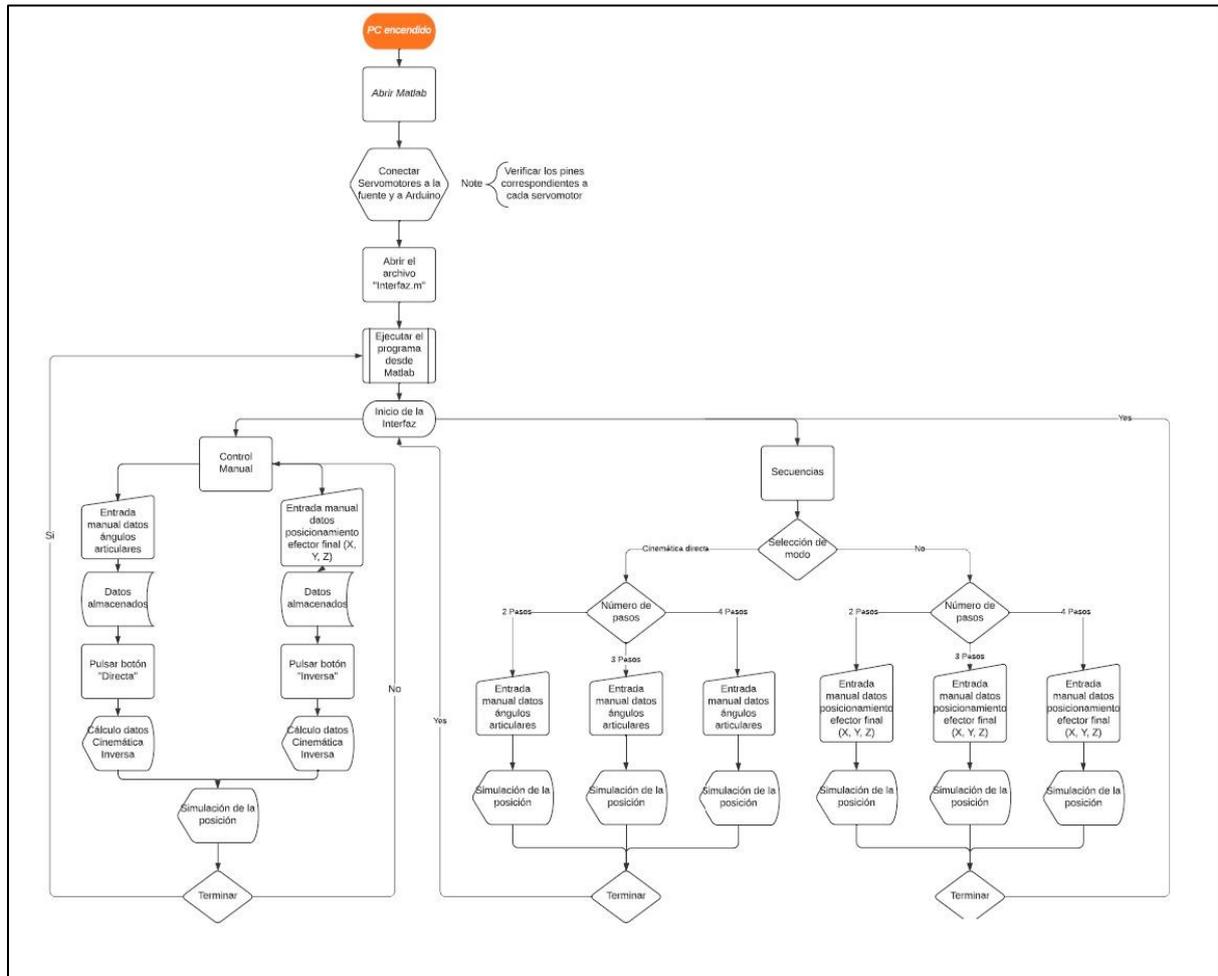


Nota: Interfaz gráfica secuencias de animación con sus respectivos movimientos.

De la misma manera funciona con el modo de cinemática inversa, para complementar este manual de operación se tiene el diagrama (Ver figura 113)

Figura 113.

Diagrama de flujo.



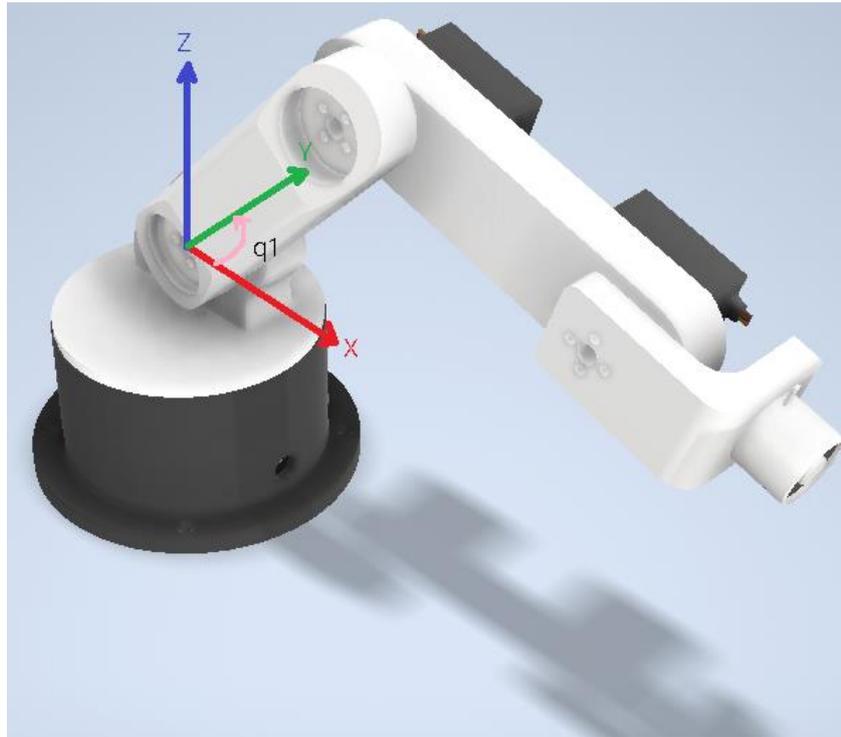
Nota: Diagrama de flujo del paso a paso para la operación del módulo.

Para verificar que los ángulos hallados por el programa son ejecutados por los servomotores y son los registrados en la interfaz, cada articulación posee un eje coordinado propio para referenciar la medición de estos valores.

En las figuras 114 y 115 se tiene un ejemplo del cómo se realizaría la medición.

Figura 114. Medición de ángulos.

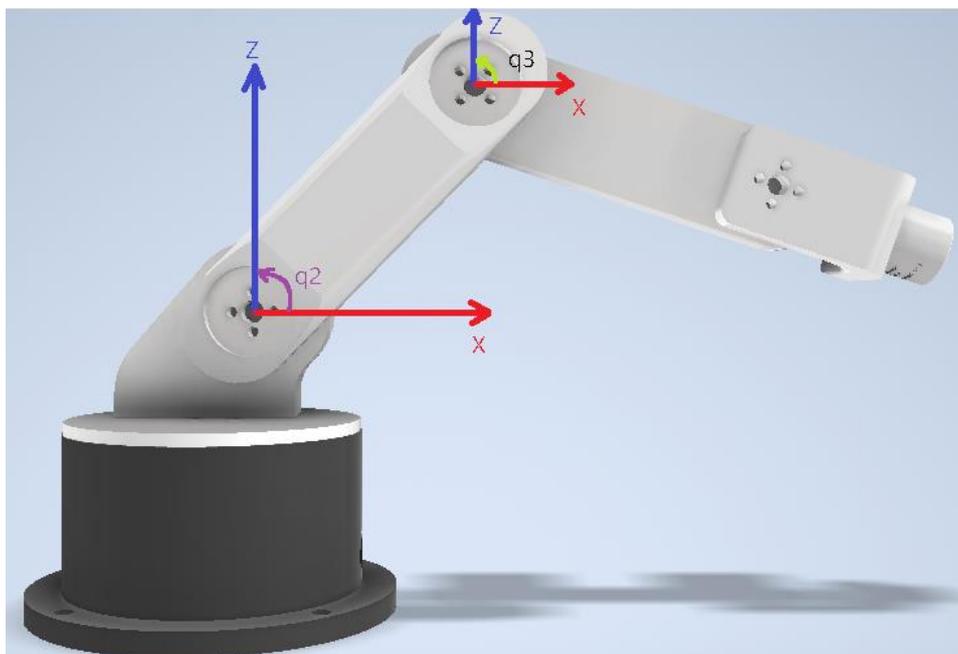
Medición de ángulos.



Nota: Método para la medición de los ángulos en las articulaciones.

Figura 115.

Medición de ángulos.



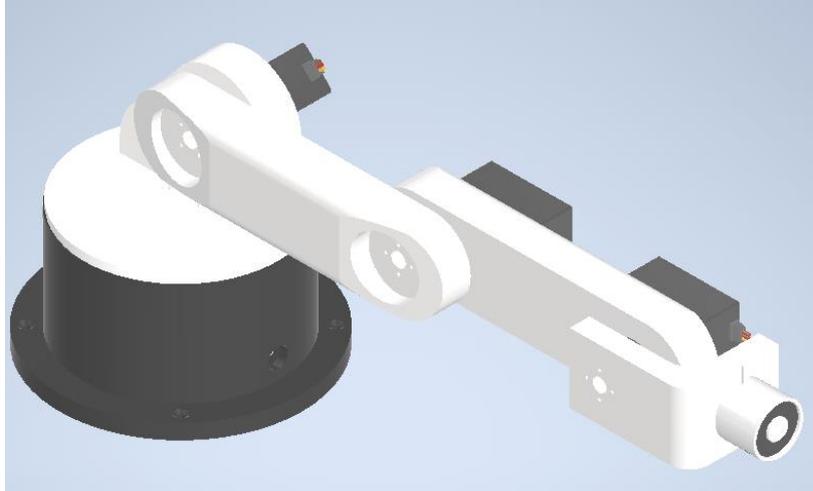
Nota: Método para la medición de los ángulos en las articulaciones.

5.2 Manual de mantenimiento

NOMBRE TÉCNICO: Brazo robótico antropomórfico / Brazo robótico angular / Brazo robótico articular.

Figura 116.

Brazo robótico antropomórfico / angular / articular



Nota: Modelo CAD del brazo robótico antropomórfico diseñado.

Descripción del equipo: Por lo general la configuración de este tipo de brazos robóticos es de 3 articulaciones rotacionales los cuales son llamados 3G o RRR, donde el primer eje básicamente es perpendicular al piso, los otros perpendiculares al primero y paralelos entre sí, estos 3 se utilizan para posicionar en un determinado lugar del espacio.

- **¿Cómo opera el brazo robótico?**

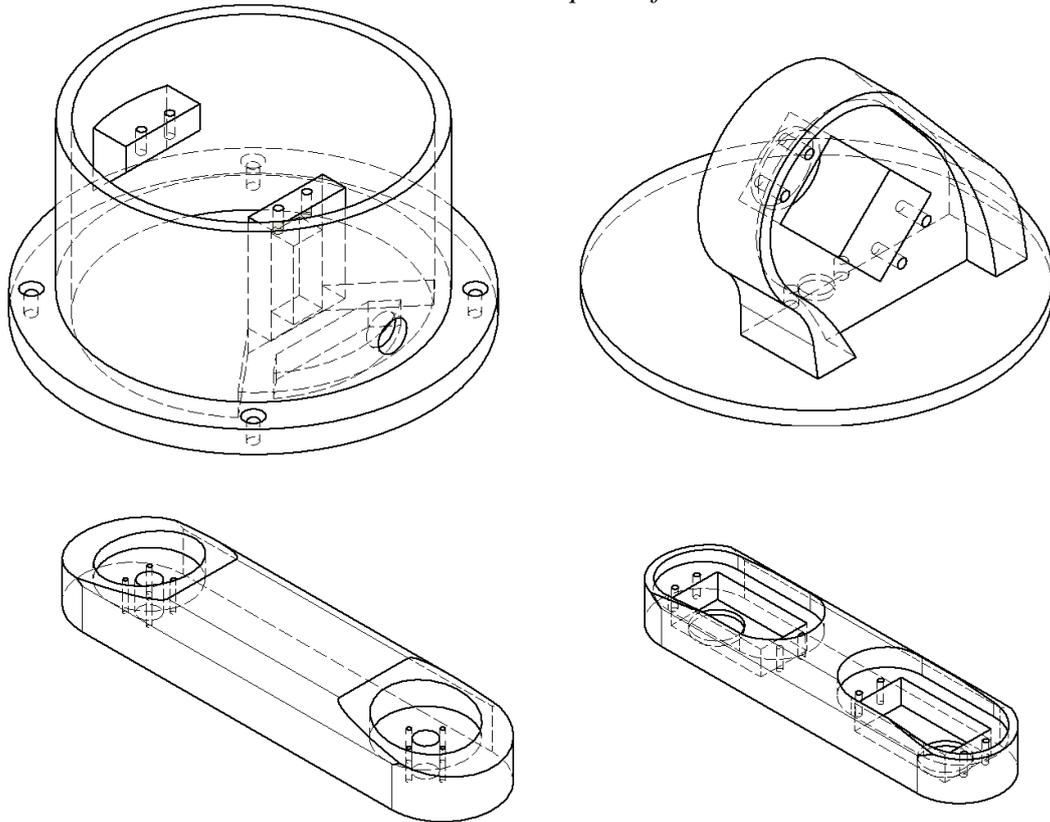
El brazo robótico antropomórfico es operado mediante un interfaz humano máquina, la cual está conectada mediante una tarjeta lógica programable (Arduino), la cual se encarga de enviar las señales a los servomotores y así controlar su movimiento

Partes básicas:

Estructura mecánica: Los brazos robóticos están formados por elementos o eslabones los cuales están unidos mediante articulaciones, es por esto que este tipo de robots tiene un parecido con el cuerpo humano específicamente con el brazo humano, es por este motivo que también se utilizan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca

Figura 117.

Estructura mecánica brazo robótico antropomórfico

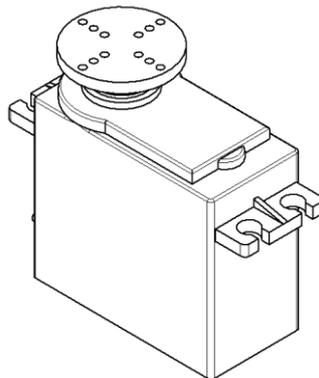


Nota: Eslabones que componen el brazo robótico antropomórfico.

Actuadores: Tienen como objetivo generar el movimiento en los elementos de brazo robótico, estos actuadores a su vez pueden utilizar diferentes tipos de energía, como por ejemplo energía neumática, hidráulica o eléctrica; para la selección de los actuadores se debe tener en cuenta ciertos parámetros como lo son la potencia, precisión, peso y volumen, etc.

Figura 118.

Servomotor (Actuador)

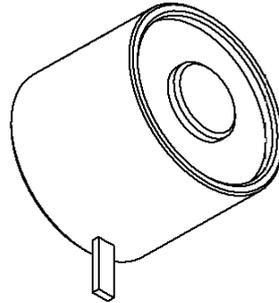


Nota: Servomotor implementado.

Elementos terminales: los elementos terminales o también llamados efectos finales son los que directamente tienen una interacción con el entorno en el que se encuentra el robot. Este tipo de instrumento se clasifica dependiendo del tipo de tarea a realizar. El primer grupo son los elementos de sujeción y estos a su vez se pueden clasificar dependiendo del sistema de sujeción empleado en este caso en particular es un electroimán.

Figura 119.

Electroimán (Elemento terminal)



Nota: Electroimán implementado.

Sistema electrónico: Los actuadores, encargados del movimiento de los eslabones, serán controlados mediante un sistema que contempla una conexión directa a un Arduino; el cual será el encargado de la distribución de las órdenes a cada uno de los servomotores y a su vez, la correcta distribución de la potencia necesaria para el funcionamiento de los mismos.

Sistema eléctrico: Dado que los dispositivos encargados en el funcionamiento del brazo son componentes que funcionan con electricidad, es necesario contar con una fuente de alimentación para su operación; por ende, es vital una conexión a diversos suministros de energías como lo son baterías y conexiones directas a tomas de corriente.

Posibles fallas en elementos:

- Problemas del motor (cortos, etc.)
- Amperaje incorrecto (en motor, resistencias, etc.)
- Mal anclaje
- Deterioro estructural
- Problemas del electroimán (cortos, desgastes, etc.)

5.2.1 Inspecciones a realizar

Tabla 10.

Inspecciones a realizar

Inspección	Descripción
Sistema eléctrico	
Revisar conexión eléctrica	ubicar las conexiones eléctricas y verificar su conexión
Revisar conexión eléctrica	verificar el estado de los cables y los puertos de conexión haciendo uso de un multímetro para corroborar la continuidad
Revisar funcionamiento brazo	verificar el estado de la fuente de alimentación con ayuda de un multímetro para verificar el voltaje de la misma
Sistema electrónico	
Revisar conexión electrónica	ubicar las conexiones electrónicas y verificar su conexión
Revisar conexión electrónica	verificar el estado de los cables y los puertos de conexión haciendo uso de un multímetro para corroborar la continuidad
Revisión electrónicos	verificar el óptimo estado de los componentes electrónicos examinando el comportamiento de los mismos al ejecutar un comando
Sistema estructural	
Revisar anclaje	verificar el correcto anclaje de la base del robot

Nota: Inspecciones a realizar por cada sistema del brazo robótico.

Tabla 10.*Inspecciones a realizar. (continuación)*

Revisar el estado de los eslabones y demás componentes estructurales	verificar el óptimo estado de los componentes. (sin grietas, deformaciones, fracturas, etc.) mediante una inspección
Sistema mecánico	
Revisar el movimiento del brazo	
Revisar el movimiento del brazo	verificar el estado de los motores

Nota: Inspecciones a realizar por cada sistema del brazo robótico.

5.2.2 Tablas de fallas

Tabla 11.*Tabla de fallas*

Falla	Descripción	Análisis de fallas	Periodicidad	Recursos que demanda
Cortocircuito en servomotor	Aumento en la intensidad de corriente que lo atraviesa.	Ausencia de movimiento del servomotor	Mensual	Técnico Financiero
Desalineación en servomotor	Desalineación del eje del servomotor	Imprecisión en el movimiento rotacional	Mensual	Técnico Financiero

Tabla 11.*Tabla de fallas (continuación)*

Sobrecarga en servomotor	Exigencia del servomotor fuera de su capacidad	Imprecisión o incapacidad del movimiento del servomotor	Mensual	Técnico Financiero
Amperaje incorrecto	Amperaje incorrecto en los diferentes dispositivos	Sobrecalentamiento en los dispositivos, quema del dispositivo	Diario	Técnico
Mal anclaje	Anclaje estructural insuficiente	Caída del equipo	Diario	Técnico
Deterioro estructural	Desgaste de los elementos estructurales	Desgaste de elementos del brazo robótico	Mensual	Técnico
Cortocircuito electroimán	Cortocircuito en electroimán	Ausencia de la sujeción del electroimán	Mensual	Técnico
Falla en placa microcontrolador	Fallo en la placa Arduino	Ausencia del movimiento de todo el equipo	Mensual	Técnico Financiero

Nota: Tabla de fallas con su descripción, análisis de fallas, periodicidad y recursos que demandan

5.2.3 Repuestos

Tabla 12.
Tabla de repuestos

#	nombre	referencia
1	Placa Arduino Uno Componentes de cambio: <ul style="list-style-type: none">● Cable de datos● Jumpers● Cambio del mismo	
2	Servomotor MG995 MG996R Componentes de cambio: <ul style="list-style-type: none">● Cables● Accesorios● Cambio del mismo	

Nota: Tabla de repuestos con sus respectivas imágenes

6. ESTUDIO FINANCIERO

Este capítulo consiste en el análisis de costos para comprender el coste total de fabricación, materiales y diseño del módulo didáctico. En este estudio no se tiene en cuenta la factibilidad del proyecto, donde se tiene en cuenta factores como TIR, VPN, etc...

6.1 Costos de ingeniería de diseño

En este apartado se muestra una tabla donde se encuentra especificado los costos relacionados con la ingeniería de diseño, en las cuales se encuentra la cantidad de horas invertidas por el director del proyecto, los orientadores y los proponentes, etc...

Tabla 13.
Costos de ingeniería de diseño.

Ítem	Unidad	Cantidad	\$/Unidad	Total	Fuente de financiación
Talento humano					
Proponentes (2)	Horas	900	\$ 10.000	\$ 9.000.000	Proponentes
Orientadores	Horas	20	\$ 20.000	\$ 400.000	U. América
Director	Horas	40	\$ 20.000	\$ 800.000	U. América
Total				\$ 10.200.000	
Gastos maquinaria y equipo					
Computadores	Unidad	2	\$ 2.000.000	\$ 4.000.000	Proponentes
Software Inventor	Horas	24	\$ 1.436	\$ 34.464	Proponentes
Software Matlab	Horas	140	\$ 120	\$ 16.800	Proponentes
Total				\$ 4.051.264	
Fungibles					
Internet	Mes	4	\$ 150.000	\$ 600.000	Proponentes
Luz	Mes	4	\$ 60.000	\$ 240.000	Proponentes
Total				\$ 840.000	
Total sin imprevistos	\$ 15.091.264				
Imprevistos (10%)	\$ 1.509.126				
Costo total	\$ 16.600.390				

Nota: Tabla de costos de ingeniería de diseño, elaborado en Google Sheets (Hojas de cálculo).

Se debe tener en cuenta que el valor por hora de los softwares se calcula a partir del valor de las licencias por mes, el software Autodesk Inventor con un valor aproximado de 275 USD, convertidos a pesos colombianos es 1.034.013, este valor dividido en 720 horas que tiene un mes arroja un valor de 1436 COP/Hora, y para el software Matlab con un valor de licencia por

año de 275 USD y valor mensual de 23 USD, convertidos a pesos colombianos es 86.481 COP, este valor dividido en 720 horas que tiene un mes arroja un valor de 120 COP/Hora

6.2 Costos de materiales

Para la fabricación del brazo robótico es necesario la selección de materiales los cuales se escogen según el criterio de diseño del brazo robótico.

Tabla 14.
Costos de materiales.

Costos materiales				
Ítem	Cantidad		\$/Unidad	Total
Servomotor MG996R	3	\$	26.000	\$ 78.000
Servomotor MG995	1	\$	24.000	\$ 24.000
Arduino	1	\$	27.000	\$ 27.000
Accesorios	1	\$	30.000	\$ 30.000
Total				\$ 159.000

Nota: Tabla de costos de materiales, elaborado en Google Sheets (Hojas de cálculo).

6.3 Costos de fabricación

A continuación, se presenta un cuadro en donde se muestran los costos del proceso de fabricación mediante impresión 3D que se requiere para fabricar las piezas y el ensamble del brazo robótico y el prototipo (Ver tablas xx)

Tabla 15.
Costos de materiales.

Costos de fabricación brazo			
Ítem	Tiempo (horas)	\$/min	Total
Proceso impresión 3D	70	\$ 100	\$ 7.000
	Cantidad	\$/Unidad	Total
Material	7	\$ 74.900	\$ 524.300
Total			\$ 531.300

Nota: Tabla de costos de fabricación brazo, elaborado en Google Sheets (Hojas de cálculo).

Tabla 16.
Costos de materiales.

Costos de fabricación prototipo			
Ítem	Tiempo (horas)	\$/min	Total
Proceso impresión 3D	30	\$ 100	\$ 3.000
	Cantidad	\$/Unidad	Total
Material	3	\$ 74.900	\$ 224.700
Total			\$ 227.700

Nota: Tabla de costos de fabricación prototipo, elaborado en Google Sheets (Hojas de cálculo).

Reuniendo todos los costos que conllevaría la elaboración del brazo para la implementación en el laboratorio de la universidad, obtenemos el siguiente valor:

Tabla 17.
Costos total brazo.

Costos de total brazo antropomórfico			
Ítem	Cantidad	\$/Unidad	Total
Servomotor MG996R	3	\$ 26.000	\$ 78.000
Servomotor MG995	1	\$ 24.000	\$ 24.000
Arduino	1	\$ 27.000	\$ 27.000
Accesorios	1	\$ 30.000	\$ 30.000
Proceso impresión 3D	70	\$ 100	\$ 7.000
Material	7	\$ 74.900	\$ 524.300
TOTAL INVERSIÓN			\$ 690.300

Nota: Análisis costo total del brazo robótico.

A continuación, tenemos un brazo con características similares al elaborado, con el cual se busca realizar una comparación para así justificar la viabilidad económica del proyecto.

El brazo robótico lynxmotion AL5DF-KT-32U es un brazo encontrado en el mercado el cual presenta las siguientes características (ver figura 120):

Figura 120.

Brazo robótico lynxmotion AL5DF-KT-32U.



Nota: imagen brazo robótico lynxmotion AL5DF-KT-32U.

- 4 grados de libertad.
- Alcance frontal: 10,25"
- Incluye la electrónica y el cable USB para controlar el brazo
- La opción de rotación de la muñeca se vende por separado

Además, está compuesto de los siguientes elementos:

- Hardware del brazo y la pinza de sujeción
- Software de control: FlowBotics Studio con proyecto demo incluido.
- Base giratoria (sin servos) (BR-NS)
- Soporte para la tarjeta electrónica (BEC-KT)
- Cable de datos USB
- SSC-32U Servo Controller (SSC-32U)
- Adaptador de energía Pack (WP-04)
- 1 x HS-422 servo estándar
- 2 x HS-485HB servo estándar
- 1 x HS-645MG servo estándar
- 1 x HS-755HB mega servo
- 1 x HS-805BB mega servo

Este brazo robótico se encuentra en el mercado con valores que rondan los \$2.300.000.

Al comparar los valores que se obtienen de uno y del otro, se puede observar que es rentable el desarrollo del brazo robótico planteado. Lo anterior se puede justificar al tener en cuenta el desarrollo en investigación que se realiza por parte del equipo involucrado en el proyecto y al analizar los costos respectivos en los componentes y el proceso de elaboración de la herramienta.

7. CONCLUSIONES

Se evidenció la versatilidad del algoritmo para el manejo de ambas cinemáticas de forma que al tener calculada la matriz de transformación homogénea, se logró hallar los valores de las posiciones finales o los ángulos necesarios para las articulaciones. Esta es una herramienta bastante útil para analizar el comportamiento posicional del brazo, debido a que permite alcanzar una gran exactitud en la identificación de las ubicaciones espaciales.

El uso del Matlab como programa base de toda la configuración y elaboración de la interfaz resultó ser la mejor alternativa debido a la amplia cantidad de herramientas que se pueden usar, la variedad de trabajos que se puede realizar y la facilidad de conexión con dispositivos como Arduino; base de la comunicación entre el controlador y el dispositivo.

Se demostró por qué el brazo antropomórfico escogido es la mejor selección para la actividad a realizar; teniendo en cuenta aspectos como volumen de trabajo, operatividad de los grados de libertad y el método de validación de la cinemática posicional.

Se cumplió con los estudios necesarios para un diseño adecuado de un brazo robótico, teniendo en cuenta aspectos como las cargas a la que este se ve sometido, el comportamiento de las velocidades y aceleraciones con respecto a los momentos requeridos para el movimiento y el comportamiento óptimo del material seleccionado con respecto a las reacciones del trabajo a realizar.

Se optó por el uso del ABS como material debido a su amplio uso en elementos didácticos, siendo este el propósito principal del brazo. De igual manera, aunque se implementa de esta manera, presenta buenas propiedades mecánicas que le dan usos amplios en la industria que reflejan su excelente rendimiento en ámbitos de mayor trabajo y complejidad.

El desarrollo de este proyecto abre la puerta a líneas de investigación como lo sería la robótica implementada en la automatización, haciendo énfasis en aspectos como el algoritmo de Denavit-Hartenberg sobre el control de dispositivos automáticos, además de la construcción y diseño de herramientas tecnológicas aplicadas en la industria; esto para lograr mejorar el estado actual de los espacios especializados que se encuentran en la universidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007) "Fundamentos de robótica" Madrid: McGraw-Hill.
- [2] N. Alvarado and Y.E. Gualteros, "Diseño de un brazo robótico para utilizar en un laboratorio de automatización," Tesis pregrado, Ingeniería mecánica, FUA, Bogotá D.C., 2019. DOI: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7440>
- [3] Serway, A. Jewett, W. (2008) "Física para ciencias e ingeniería" México: Cengage Learning Editores, S.A.
- [4] F. Bravo y A. Forero. "La robótica como un recurso para facilitar el aprendizaje y desarrollo de competencias generales." (2012) [En línea] https://gedos.usal.es/bitstream/handle/10366/121799/La_robotica_como_un_recurso_para_facilit.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [5] *Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store* (). Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [6] TowerPro, "MG995," https://www.Electronicoscaldas.Com/Datasheet/MG995_Tower-Pro.Pdf
- [7] *MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink* (). Available: <https://la.mathworks.com/>.
- [8] *Tinkercad | Create 3D digital designs with online CAD* (). Available: <https://www.tinkercad.com/>.
- [9] Altos hornos de México, *Manual de diseño para la construcción con acero. 2013*
- [10] F. P. Beer *et al*, *Mecánica De Materiales*. McGraw-Hill México, DF-México, 2010.
- [11] R. C. Hibbeler, *Mecánica Vectorial Para Ingenieros: Estática*. 2004.
- [12] Araujo Francisco, Ayala Luis and Bermeo Cristhian, "robots antropomórficos." Available: <https://studylib.es/doc/6073995/robots-antropom%C3%B3rficos>.
- [13] Corke, P. *Robotics Toolbox*. Available: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>.
- [14] Moran, M. E., (May 1,2007)."Evolution of robotic arms." *J Robotic Surg*. Available: <https://search.datacite.org/works/10.1007/s11701-006-0002-x>. DOI: 10.1007/s11701-

006-0002-x.

- [15] *Student and Education Software | 1-Year License | Autodesk Education Community* (). Available: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>.
- [16] "World Robotics Report 2020", IFR Press Conference. [En línea], Disponible en: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>
- [17] *MATLAB Compiler* (). Available: <https://la.mathworks.com/products/compiler.html>.
- [18] K.S. Fu, R. C. González y C. S. G. Lee, "Robótica: Control, detección, visión e inteligencia". México: Editorial McGraw-Hill. [En línea]. Disponible en http://www.itsbasicas.com/davila/Libro_Robotica.pdf
- [19] *Didácticas electrónicas* (). Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/~didactic/>.
- [20] "¿QUÉ ES UN SIMULADOR, EMULADOR, DEPURADOR?" 2017. Available: <http://vspm16.blogspot.com/2017/07/que-es-un-simulador-emulador-depurador.html>.
- [21] *Definición de Simulador* (mayo,). Available: <https://www.definicionabc.com/tecnologia/simulador.php>.
- [22] *MOOC - educaLAB* (). "Glosario de términos y conceptos robóticos,". Available: http://educalab.es/intef/formacion/formacion-en-red/mooc_
- [23] *Key to legendary mechanical lion found in code for Leonardo Da Vinci's robot*. Available: <https://www.news.com.au/technology/da-vicinis-robot/news-story/a72faa349b70221263e4ede498d738a8#.olz0t>.
- [24] Capello S, Moran ME, Belarmino J, Firoozi F, Kolios E, Perrotti M (2005) The da Vinci robot. 23rd world congress on endourology. J Endourol 19(1)
- [25] S. Barba-Romero y J-C. Pomerol, *Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Universidad de Alcalá, Madrid: (1997).
- [26] *Ultimaker Cura* (). Available: <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>.
- [27] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

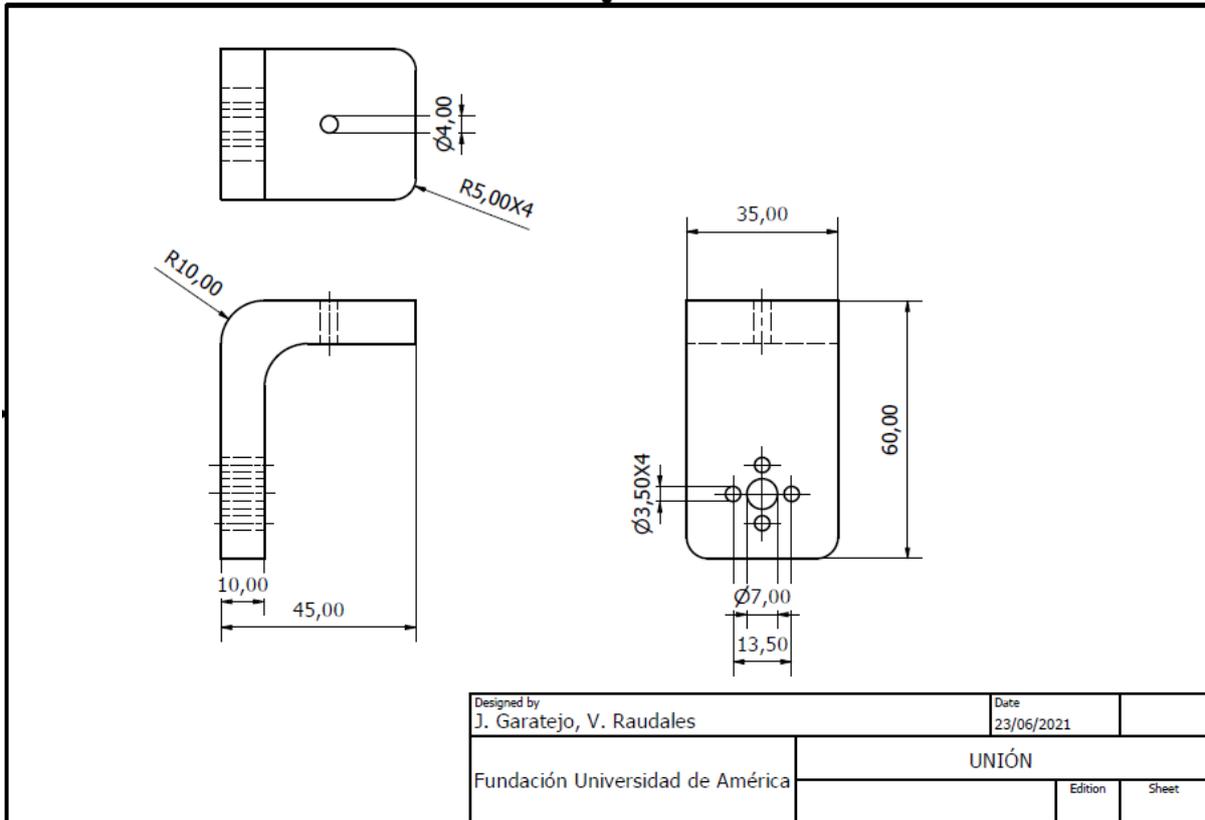
ANEXOS

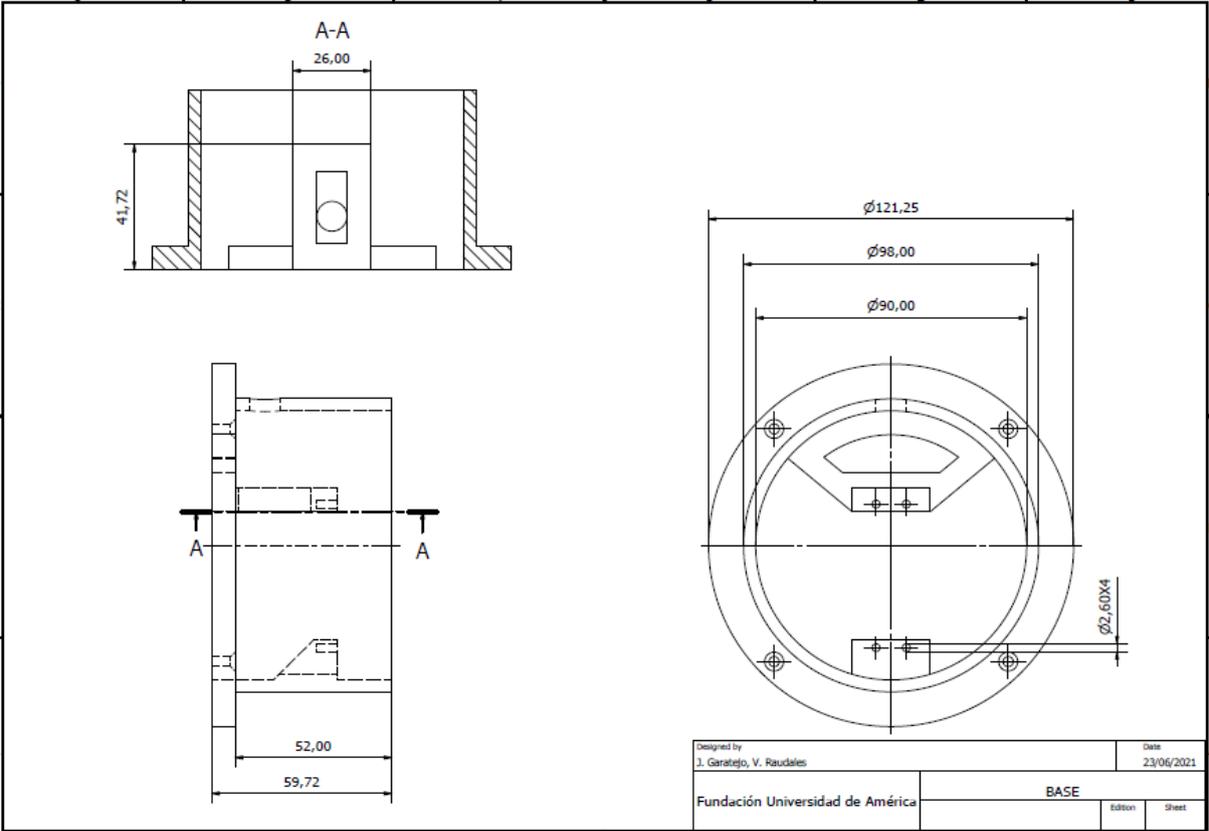
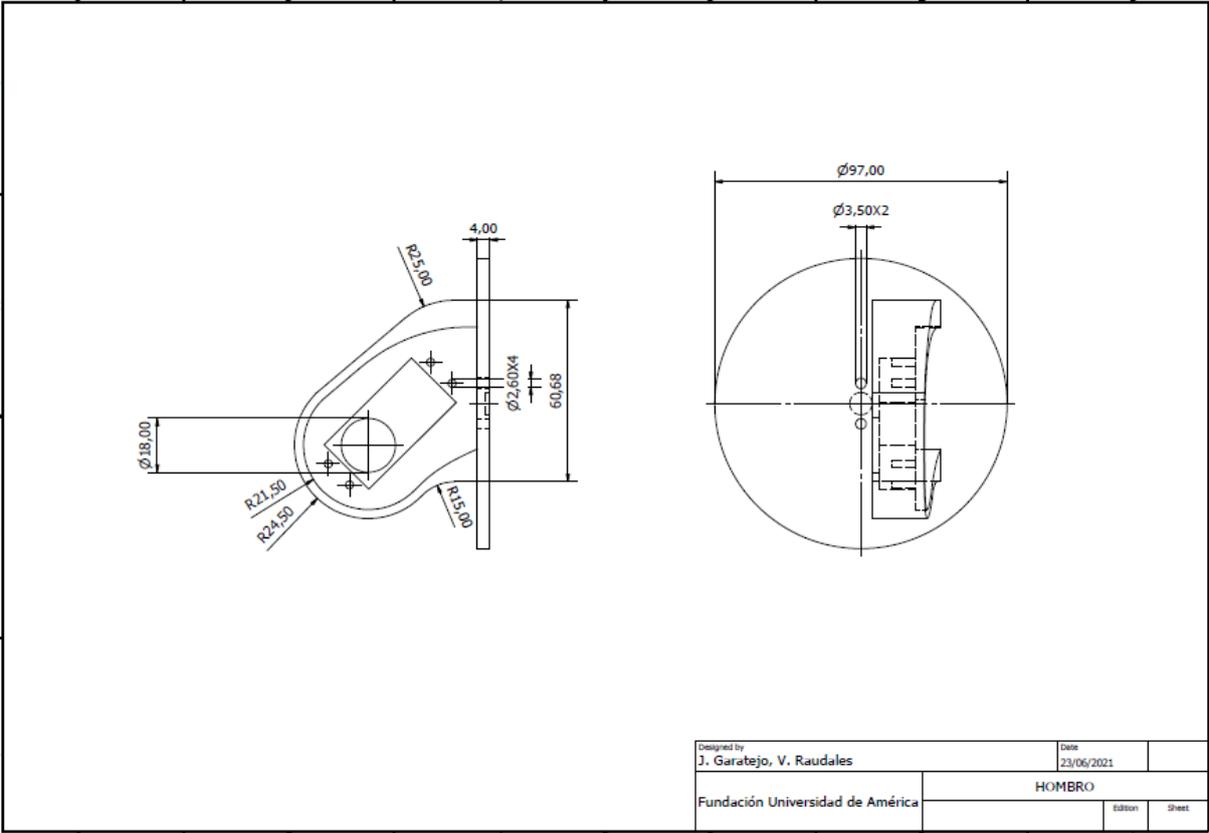
ANEXO 1

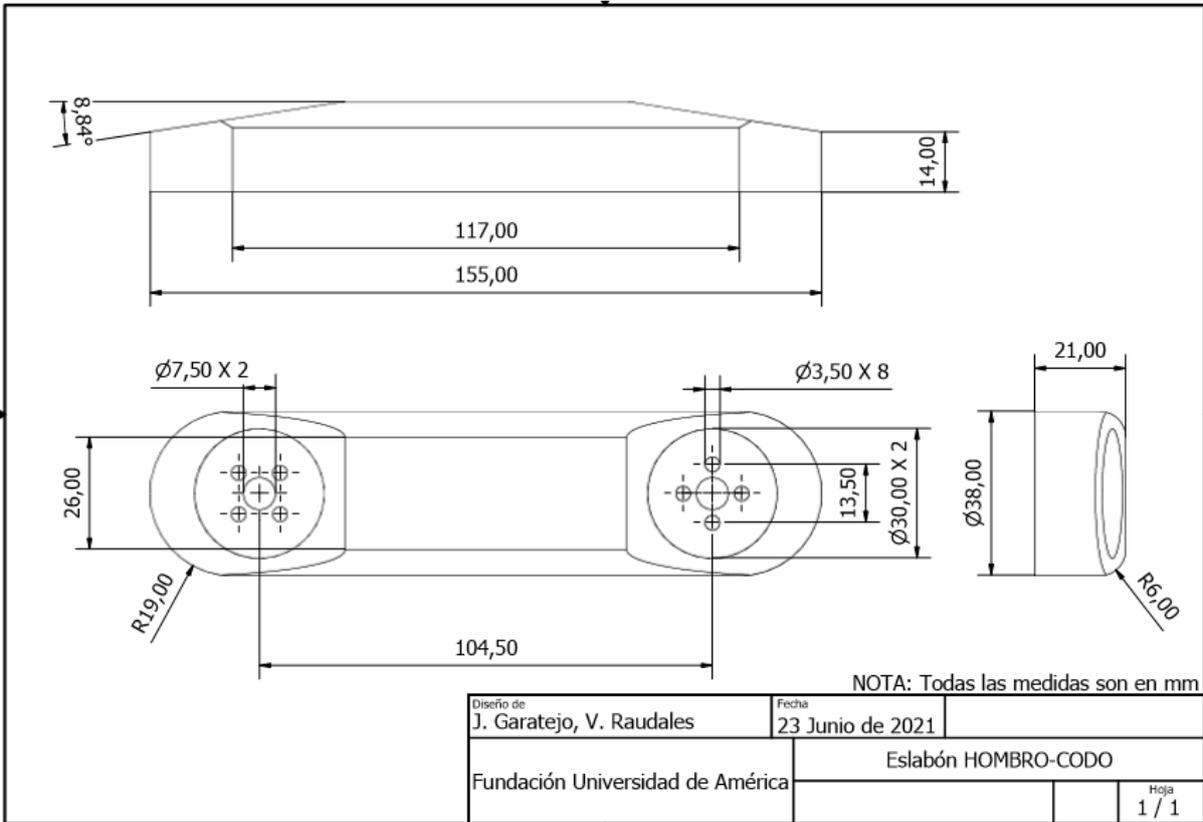
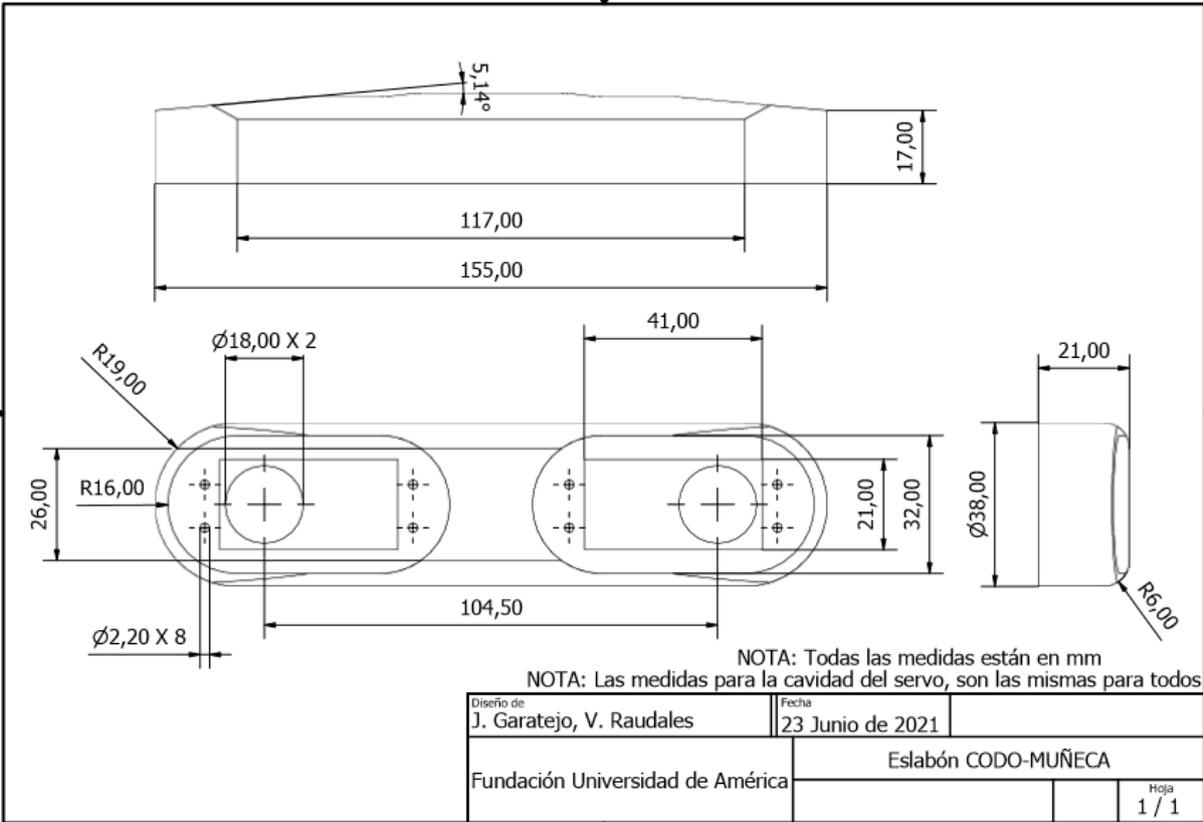
CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN INTERFAZ Y APLICACIÓN DEL SIMULADOR

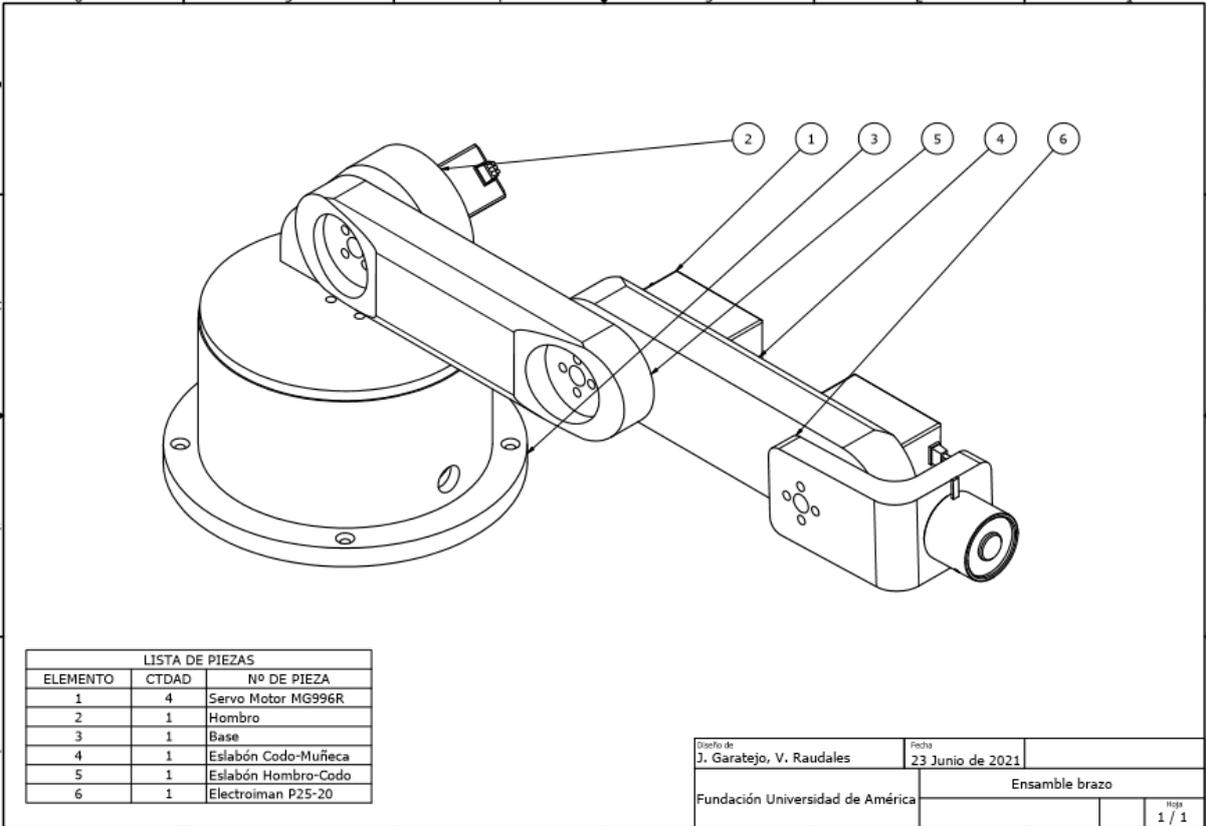
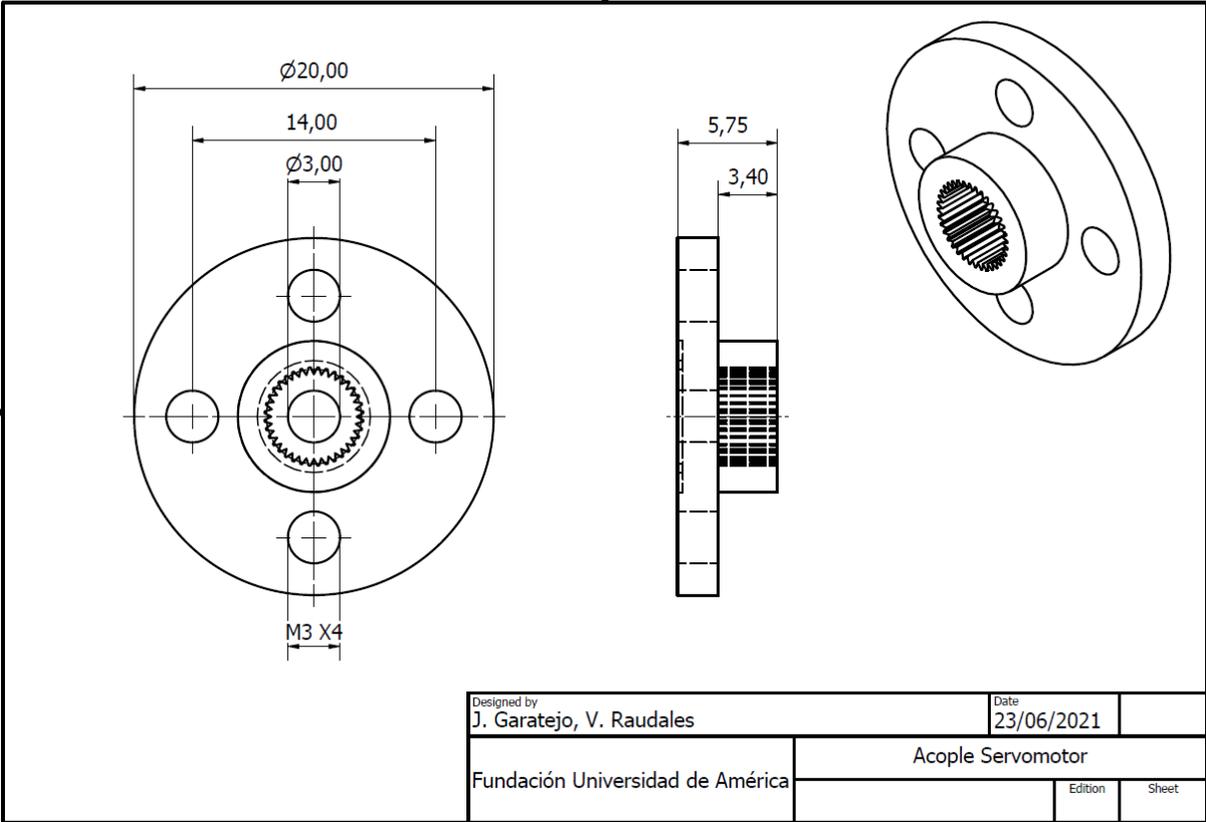
https://drive.google.com/drive/folders/1MPAK9RM4l25aixkrscJbL_Rx50NNDq8l?usp=sharing

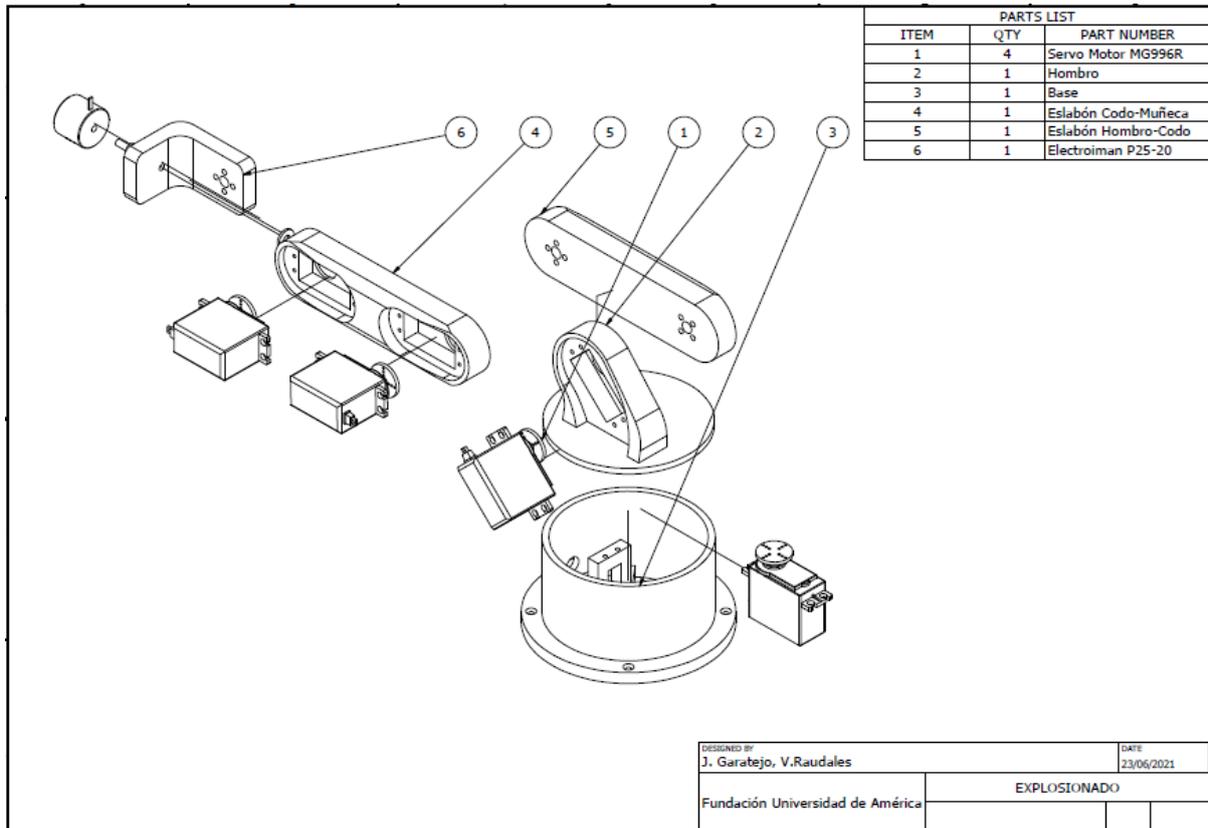
ANEXO 2
PLANOS



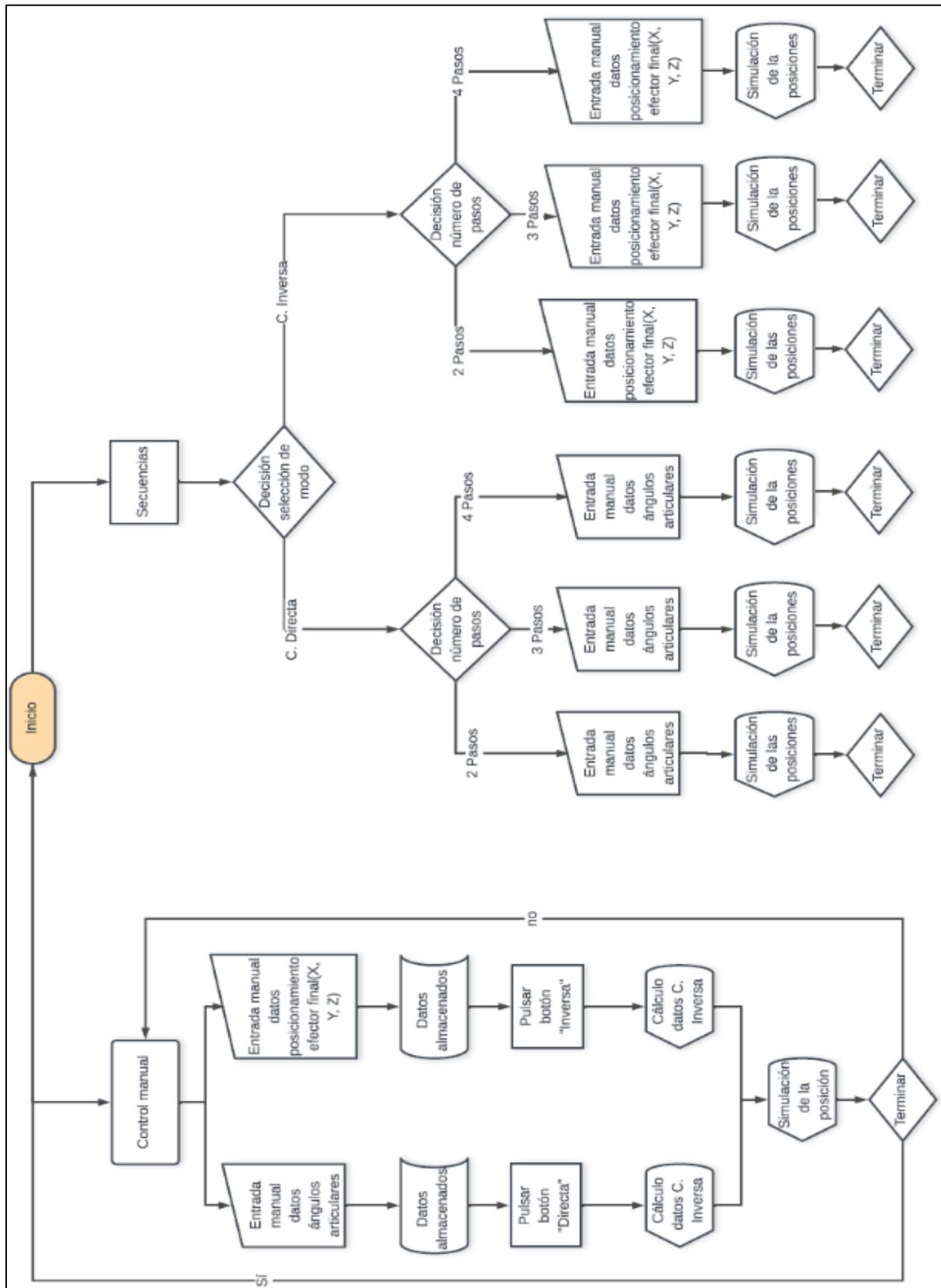






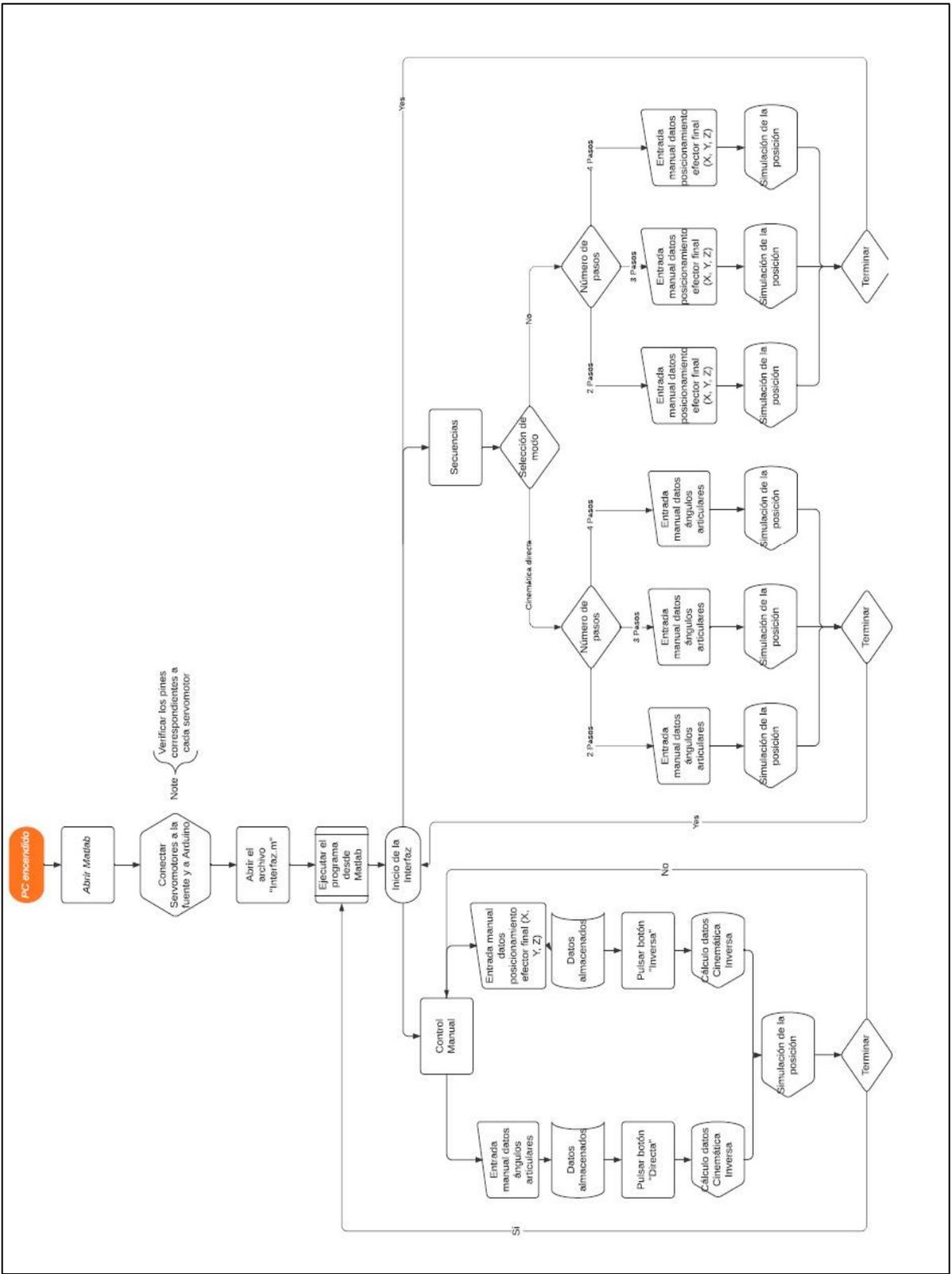


ANEXO 3
 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INTERFAZ GRÁFICA



ANEXO 4

DIAGRAMA DE FLUJO DEL MANUAL DE OPERACIÓN



ANEXO 5
 GUIA DE LABORATORIO

PRÁCTICA 1. VALIDACIÓN ALGORITMO DENAVIT-HARTENBERG.

En esta practica busca la validación del algoritmo de Denavit-Hartenberg mediante el control del posicionamiento del efector final y el movimiento de las articulaciones un brazo robótico antropomórfico haciendo uso de una interfaz HMI.

- ✓ Identificación del algoritmo.
- ✓ Caracterización de la matriz homogenea.
- ✓ Control de un brazo robótico mediante una HMI.



CRITERIO DE EVALUACION

ABORDAR

CE 1 : Validación y aplicación del algoritmo de Denavit-Hartenberg mediante la manipulación de un módulo didáctico.

Soporte teórico de la práctica

Algoritmo de Denavit-Hartenberg.

Denavit y Hartenberg propusieron en 1995 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.¹

Según la representación de D-H, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante cuatro transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.¹

1. Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i ; vector $d_i (0,0,d_i)$.
3. Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector $a_i (0,0,a_i)$
4. Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

La representación de Denavit-Hartenberg se reemplaza en la matriz de transformación homogénea ${}^{i-1}A_i$, la cual es un arreglo de 4×4 que contiene información relativa a la posición y orientación del sistema de referencia unido al i enlace del manipulador en relación con el sistema de referencia de la conexión $i-1$; de esa manera, la matriz 0A_1 representa la posición y orientación del sistema de coordenadas S_1 del robot con respecto al sistema de coordenadas

¹ Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007) "Fundamentos de robótica" Madrid: McGraw-Hill.

Si S_0 se coloca en el eje del manipulador y S_1 al final de un eslabón, la matriz 0A_1 representa la posición de S_1 referenciada al sistema de coordenadas fijo del robot. De esta forma, la matriz 0A_n , en la que n es el grado de libertad, es aquella que representa la posición final del manipulador con respecto al sistema de referencia; esta matriz comúnmente es denominada T y se representa mediante la siguiente ecuación:²

Ecuación matriz T.

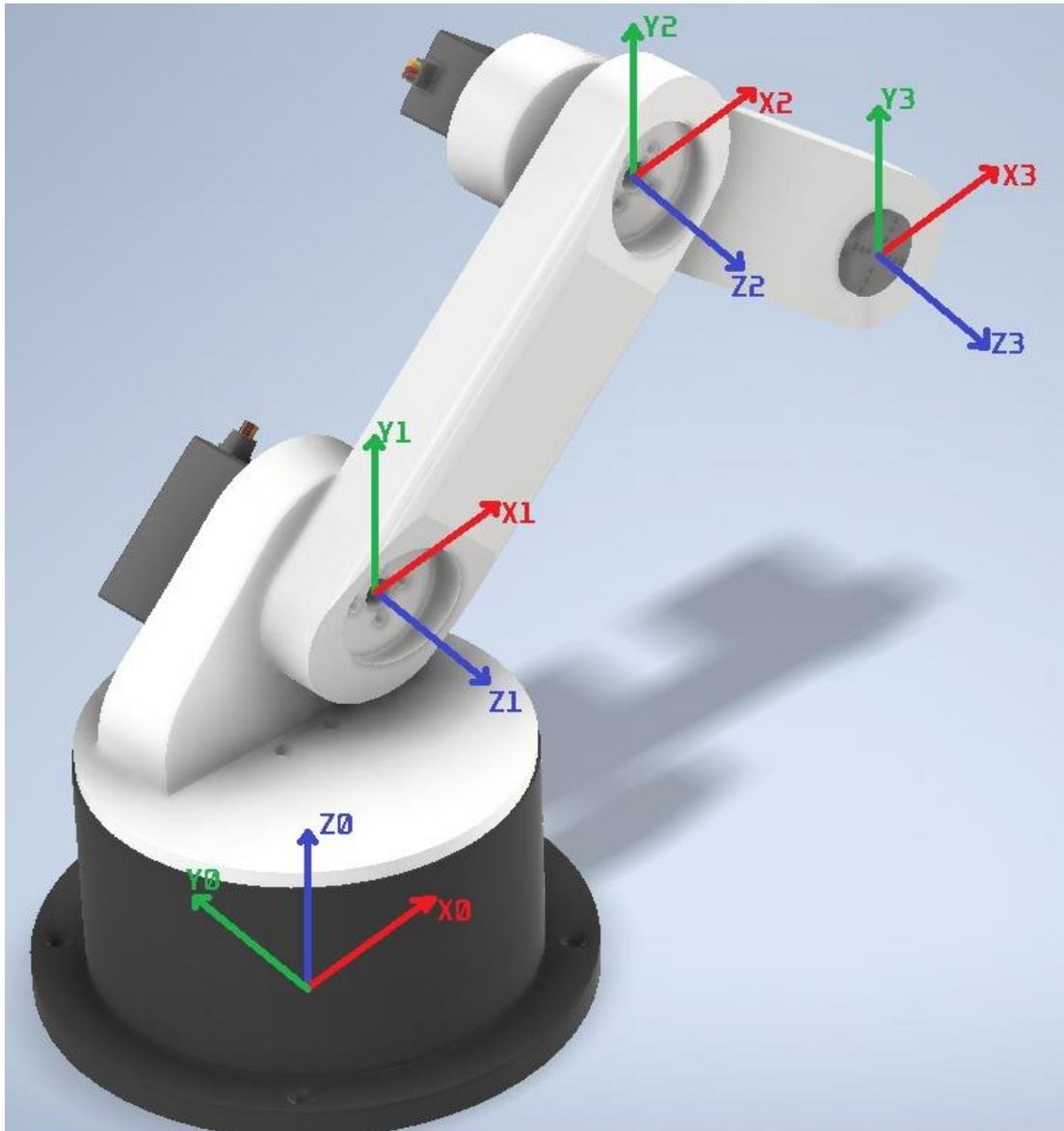
$$T = {}^0A_n = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \dots {}^{n-1}A_n, n \rightarrow Dof$$

Matriz de transformación homogénea.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\cos(\alpha_1)\sin(\theta_1) & \sin(\alpha_1)\sin(\theta_1) & a_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\alpha_1)\cos(\theta_1) & -\sin(\alpha_1)\cos(\theta_1) & a_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg

Articulación	θ	d[cm]	a[cm]	α [rad]
1	θ_1	10	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	10,45	0
3	θ_3	0	13	0



La forma general de las matrices de rotación es:

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{vmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$${}^0\mathbf{A}_1 = \begin{vmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 10,45\cos(\theta_2) \end{vmatrix}$$

$${}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 10,45\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 13\cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 13\sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente, operando las matrices anteriormente obtenidas, se tiene una matriz de la forma.²

Matriz de transformación homogénea.

$$T = \begin{bmatrix} n & o & a & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los vectores n , o y a representan la orientación del punto final del robot, y el vector P representa el valor de las coordenadas X , Y y Z en función de los ángulos θ .²

Vector posición.

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$$

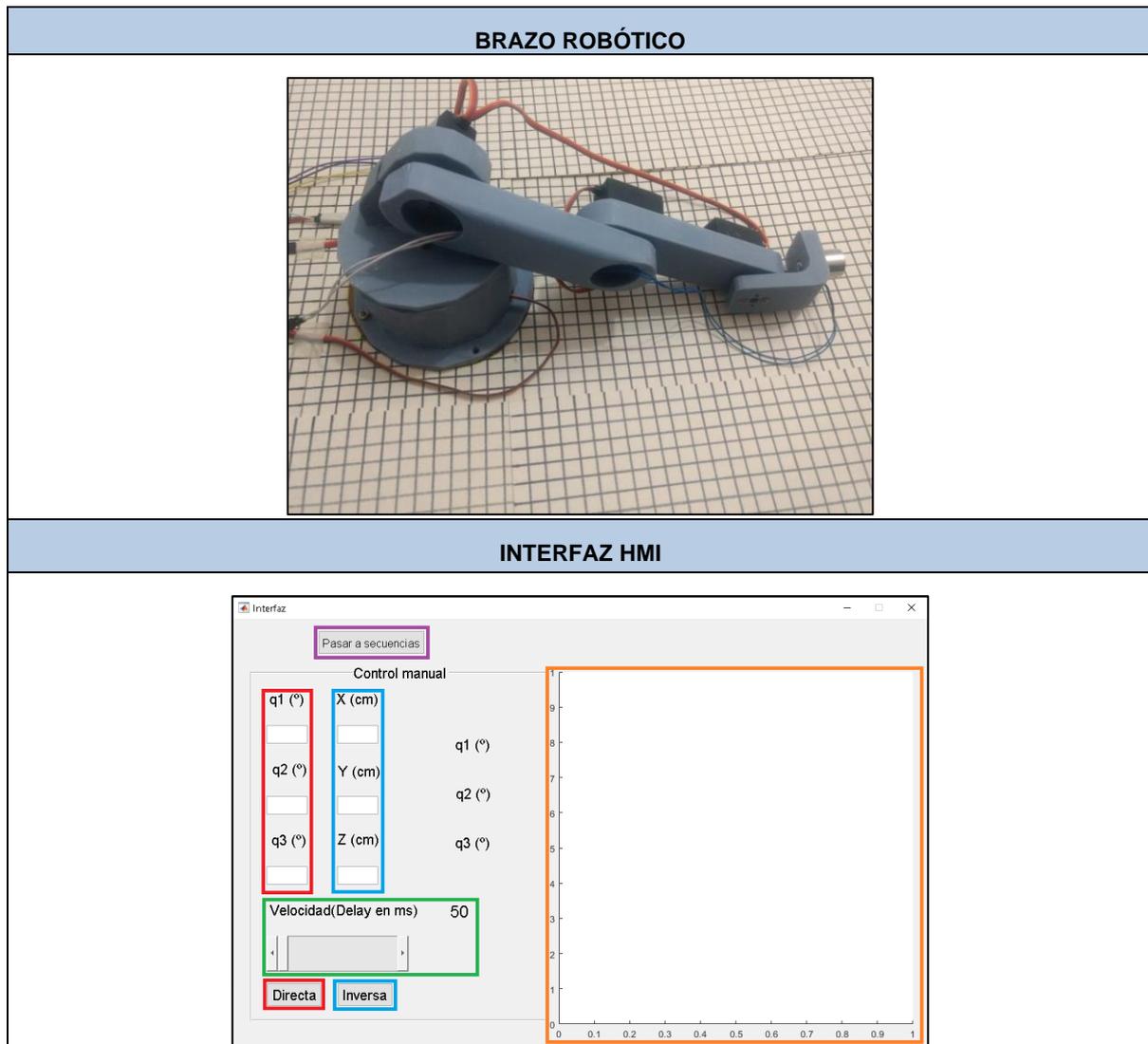
Las coordenadas del punto final son:

$$P_x = 10,45 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + 13 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - 13 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)$$

$$P_y = 10,45 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) + 13 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - 13 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)$$

$$P_z = 10,45 \sin(\theta_2) + 13 \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) + 13 \cos(\theta_3) \sin(\theta_2) + 10$$

Equipos a utilizar



El interfaz de control humano-máquina que consta principalmente de 2 partes, las cuales son:

- Control manual: Control por posición usando los dos tipos de cinemáticas, tanto directa como inversa.
- Control por secuencias: Control usando los dos tipos de cinemáticas, tanto directa como inversa con posibilidad de realizar movimientos de un punto a otro.

Esta interfaz será el medio de comunicación con el brazo, para tener control sobre los movimientos que realizará.

Actividades a Realizar

Realice las siguientes actividades:

A partir de las matrices de cada elemento (0A_1 , 1A_2 , 2A_3), hallar la matriz de transformación homogénea para cada una de las siguientes posiciones:

- $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$
- $\theta_1 = -89^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$
- $\theta_1 = -60^\circ$, $\theta_2 = 35^\circ$, $\theta_3 = -20^\circ$
- $\theta_1 = 75^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = -15^\circ$
- $\theta_1 = -45^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 60^\circ$

A medida que se realizan los cálculos, se debe realizar una comparación con los valores arrojados por el programa, para así validar que los datos son correctos y que el algoritmo es funcional.

Entregables:

1. Según las actividades solicitadas, hacer entrega de un documento que contenga cada una de las matrices con su respectivo procedimiento.
2. Análisis de los errores porcentuales que se generan entre los valores calculados y los generados por la interfaz.

Bibliografía

- ✓ Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007) "Fundamentos de robótica" Madrid: McGraw-Hill.
- ✓ J.L. Ramírez Arias, A. Rubiano Fonseca. "Modelamiento matemático de la cinemática directa e inversa de un robot manipulador de tres grados de libertad". Revista Ingeniería Solidaria, vol. 8, núm. 15, 2012, pp. 46-52.

ANEXO 5

RECOMENDACIONES

Realizar un análisis dinámico detallado para estudiar el comportamiento de la relación entre fuerzas y velocidades. (Newton-Euler y Lagrange)

Realizar un estudio cinemático con ayuda de forma matricial (jacobianos) para estudiar el comportamiento de las velocidades y aceleraciones.

Revisar de forma periódica el estado de las articulaciones y los eslabones.

Diseñar diferentes efectores finales (ventosas, pinzas, etc.) para darle mayor versatilidad en las aplicaciones que pueda realizar el brazo.

Recomendar al docente encargado de la práctica supervisar el manejo del brazo para que su manipulación sea la correcta.

Se recomienda explorar la implementación de otros softwares como el Labview.