



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: MANEJO DE SUSTANCIAS TÓXICAS POR MEDIO DE UNA
MANO INALÁMBRICA**

“ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL”

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.**

JHONNY MARCELO OROZCO RAMOS
jhonny.orozco@epn.edu.ec

DIRECTOR: WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO
william.venegas@epn.edu.ec

CO - DIRECTOR: OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA
ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, julio, 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Jhonny Marcelo Orozco Ramos bajo mi supervisión.

Ing. William Venegas Toro. Msc
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Oscar Ivan Zambrano Orejuela. Msc
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Jhonny Marcelo Orozco Ramos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jhonny Marcelo Orozco Ramos

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a mis padres Sr. César Orozco, Sra. María Ramos por ser parte fundamental en mi aprendizaje de vida y de esfuerzo constante me enseñaron el progreso y la lucha continua que se realiza para alcanzar los objetivos planteados, a mi amada esposa Gabriela Abarca por ser parte primordial y compañera de viaje en cada logro que se realiza con su comprensión y ternura me invitan a ser mejor cada día.

Con todo mi amor Jhonny Orozco R.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional por el elevado nivel de conocimientos impartidos a lo largo de la Maestría y por su esfuerzo al llevar adelante dicho programa. A los profesores de la Maestría, quienes con total desinterés pusieron sus conocimientos al servicio del estudiantado. Al Ing. William Ricardo Venegas Toro, MSc, y al Ing. Oscar Iván Zambrano por la acertada dirección prestada para la culminación de este proyecto.

Jhonny Marcelo Orozco Ramos

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Aprobación del director	i
Declaración de autoría	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice de contenidos	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Resumen	xiii
Summary	xiv
Introducción	1
Pregunta de Investigación	3
Objetivos	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Robótica	4
1.2. Tipos de robots	5
1.3. Robot antropomórfico	6
1.4. Cinemática de los Robots Industriales	7
1.4.1. Cinemática directa de robots manipuladores	8
1.4.2. Cinemática inversa	8
1.4.3. Eslabón (link)	9
1.5. Espacio de trabajo de un robot industrial (workspace)	10
1.6. Transformaciones homogéneas	10
1.7. Manos robóticas	12
1.8. Manipulación y exposición del ser humano a sustancias tóxicas	18
1.9. ABS	22
1.10. Estudio antropométrico	23
1.11. Simulación de la Mano Inalámbrica	25
1.11.1. Eslabones del brazo robótico	25
1.12. Bluetooth	26
1.13. Servomotor	27
1.14. Sensor flex	27
1.15. Guante Sensorial	28
2. ASPÉCTOS METODOLÓGICOS	29
2.1. Definición de requisitos y especificaciones	30
2.1.1. Definición del entorno	30

2.1.2. Definición de las tareas a realizar	31
2.1.3. Análisis detallado de las características de diseño.....	32
2.1.4. Análisis funcional de la mano inalámbrica.....	34
2.1.5. Análisis del sistema accionador óptimo.....	35
2.1.6. Definición del sistema accionador posible.....	36
2.1.7. Especificaciones de diseño	37
2.2. Diseño y desarrollo de subsistemas.....	40
2.2.1. Conexiones Eléctricas.....	41
2.2.2. Sistema Sensorial	41
2.2.3. Simulación Virtual	42
2.2.4. Sistema accionador para el movimiento de la mano	42
2.3. Diseño y desarrollo del prototipo final.	43
2.3.1. Prototipo 1	43
2.3.2. Prototipo 2	44
2.3.3. Prototipo Final.....	45
3. RESULTADOS	47
3.1. Informe de Evaluación Ergonómica	47
3.1.1. Resultado del Informe de evaluación ergonómica en la zona derecha	49
3.1.2. Resultado del Informe de evaluación ergonómica en la zona izquierda	50
3.1.3. Conclusiones de la evaluación ergonómica	51
3.2. Diseño de la mano Inalámbrica.....	52
3.3. Análisis cinemático de la mano inalámbrica.....	57
3.3.1. Análisis y simulación del dedo índice	59
3.3.2. Análisis y simulación del dedo medio.....	68
3.3.3. Análisis y simulación del dedo anular.....	75
3.3.4. Análisis y simulación del dedo meñique.....	85
3.3.5. Análisis y simulación del dedo pulgar.....	95
3.4. Ensamble de los tres dedos Anular, Medio e Índice.....	100
3.4.1. Ensamble completo de la mano inalámbrica	101
3.4.2. Pruebas de trayectoria por medio de la cinemática inversa.....	103
3.4.3. Análisis cinemático del giro de la muñeca.....	105
3.5. Simulación de la mano inalámbrica.....	106
3.6. Articulaciones de la mano inalámbrica	110
3.7. Relaciones de parentesco.....	115
3.8. Impresión de las piezas	128
3.9. Programación y conexiones de Arduinos para la mano inalámbrica	129

3.9.1. Conexiones y programación de un servo con una galga	131
3.9.2. Programación de la tarjeta y conexiones de los cinco dedos junto a las galgas flexo métricas	133
3.9.3. Pruebas de puño cerrado.....	135
3.9.4. Pruebas de Señalización	136
3.9.5. Conexión inalámbrica.....	137
3.9.6. Conexión completa	139
3.10. Ensamble y pruebas de manipulación de la mano inalámbrica en el manejo de sustancias tóxicas	141
4. DISCUSIÓN.....	151
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	152
5.1. Conclusiones	152
5.2. Recomendaciones	153
Referencias bibliográficas.....	154
Anexos	i

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1.	Clasificación de robots	5
Tabla I.2.	Parámetros DHS de un robot con 2gdl.....	12
Tabla I.3	Manos Robóticas	13
Tabla I.4.	Efectos en la salud de las sustancias tóxicas	20
Tabla I.5.	Productos químicos manejables.....	21
Tabla I.6.	Propiedades Mecánicas y Físicas del material ABS y PLA.....	22
Tabla I.7.	Características de la mano y la muñeca.....	24
Tabla I.8.	Características del bluetooth	26
Tabla II.1.	Actuadores eléctricos	38
Tabla II.2	Elección del transmisor de movimientos para la mano	39
Tabla III.1.	Medidas de la extremidad superior.....	53
Tabla III.2.	Medidas de los dedos de la mano en cm.	53
Tabla III.3.	Medidas promedio de cada una de las partes de la mano.....	54
Tabla III.4.	Cuadro DH para el dedo índice	60
Tabla III.5.	Cuadro DH para el dedo índice en posición de agarre	66
Tabla III.6.	Cuadro DH para el dedo medio.....	69
Tabla III.7.	Cuadro DH para el dedo medio en posición de agarre	73
Tabla III.8.	Cuadro DH para el dedo anular.....	76
Tabla III.9.	Cuadro DH para el dedo anular en posición de agarre.....	80
Tabla III.10.	Cuadro DH para el dedo anular con el movimiento de la palma	83
Tabla III.11.	Cuadro DH para el dedo meñique	85
Tabla III.12.	Cuadro DH para el dedo meñique en posición de agarre	90
Tabla III.13.	Cuadro DH para el dedo meñique con el movimiento de la palma	92
Tabla III.14.	Cuadro DH para el dedo pulgar.....	95
Tabla III.15.	Posiciones, orientaciones y propiedades dinámicas de la mano	109
Tabla III.16.	Propiedades de las articulaciones.	112
Tabla III.17.	Posiciones y orientaciones de las articulaciones.	112
Tabla III.18.	Propiedades de las juntas dinámicas	113
Tabla III.19.	Relación de la mano.....	114
Tabla III.20.	Rango de movimientos angulares en las articulaciones de cada dedo.....	146
Tabla III.21.	Pruebas de manipulación de la mano inalámbrica.	147
Tabla III.22.	Tiempo de respuesta de movimientos.....	147
Tabla III.23.	Manejo de las sustancias tóxicas	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Robot antropomórfico.....	6
Figura 1.2. Giros de un robot antropomórfico.....	7
Figura 1.3. Relación entre cinemática directa e inversa.....	9
Figura 1.4. Tipos de articulaciones: a) rotacional, b) lineal.....	9
Figura 1.5. Elementos que forman un eslabón de un robot manipulador.....	9
Figura 1.7. Base, hombro y codo de un robot industrial.....	10
Figura 1.8. Cinemática directa del brazo robótico.....	11
Figura 1.9. Grados de libertad de un brazo robótico.....	11
Figura 1.10. Eslabones para el cuadro DH.....	12
Figura 1.11. Vías de acceso al organismo de las sustancias tóxicas.....	19
Figura 1.12. Filamento ABS.....	23
Figura 1.13. Antropometría Estática.....	24
Figura 1.14. Giro de la muñeca.....	24
Figura 1.15. Mano ensamblada en el software de simulación.....	26
Figura 1.16. Servomotor.....	27
Figura 1.17. Sensor flex.....	27
Figura 1.18. Guante sensorizado.....	28
Figura 2.1. Mano humana y sus funciones.....	29
Figura 2.2. Metodología para la realización de la mano inalámbrica.....	30
Figura 2.3. Definición de requisitos y especificaciones.....	30
Figura 2.4. Entorno en la manipulación de sustancias tóxicas.....	31
Figura 2.5. Recorte de la tabla de clasificación de tipos de agarre.....	31
Figura 2.6. Contacto de los dedos en un objeto.....	33
Figura 2.7. Interacción de las Matrices Jacobianas de Agarre de la Mano.....	33
Figura 2.8. Esquema de coordenadas para los contactos rodantes o deslizantes.....	34
Figura 2.9. Componentes de un actuador.....	35
Figura 2.10. Configuración genérica de un actuador.....	36
Figura 2.11. Configuración de un actuador multi estado.....	37
Figura 2.12. Transformadores de energía.....	37
Figura 2.13. Clasificación de transmisión de movimiento con actuadores eléctricos.....	39
Figura 2.14. Diseño y desarrollo de subsistemas.....	40
Figura 2.15. Conexiones con arduino.....	41
Figura 2.16. Diseño y desarrollo del prototipo final.....	43
Figura 2.17. Prototipo 1 de la mano.....	43
Figura 2.18. Prototipo 2 de la mano.....	44

Figura 2.19. Prototipo 1 y 2 en ubicación para la manipulación de elementos	45
Figura 2.20. Prototipo final.....	46
Figura 2.21. Guante sensorial.....	46
Figura 3.1. Resultado de la evaluación ergonómica del lado derecho. ^[19]	49
Figura 3.2. Resultado de la evaluación ergonómica del lado izquierdo. ^[19]	50
Figura 3.3. Resumen de la evaluación ergonómica del lado derecho	50
Figura 3.4. Resumen de la evaluación ergonómica del lado izquierdo	51
Figura 3.5. Partes de una mano humana	52
Figura 3.6. Movimiento de los dedos de la mano humana	55
Figura 3.7. Ubicación del tendón en cada uno de los dedos de la mano inalámbrica.....	55
Figura 3.8. Diseño de la mano inalámbrica	56
Figura 3.9. Diseño y ensamble del dedo y la palma.....	56
Figura 3.10. Dedo pulgar en unión a la palma	56
Figura 3.11. Estructura de la muñeca	57
Figura 3.12. Ensamble en Solidwork de la mano que se va a imprimir	57
Figura 3.13. Número de articulaciones y ubicación del eje Z en la mano.	58
Figura 3.14. Ejes de movilidad para el análisis cinemático de los dedos.....	59
Figura 3.15. Medidas del dedo Índice	60
Figura 3.16. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo índice	65
Figura 3.17. Movilidad por los desplazamientos angulares en $q_4 = -1,256$	65
Figura 3.18. Movimiento de la falange, falangina, falangeta del dedo índice.....	66
Figura 3.19. Simulación cinemática del dedo índice en posición de inicio de agarre.....	68
Figura 3.20. Dedo índice en posición de agarre.....	68
Figura 3.21. Medidas del dedo medio	68
Figura 3.22. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo medio.....	72
Figura 3.23. Simulación del dedo medio con los desplazamientos angulares	73
Figura 3.24. Simulación de la falange, falangina, falangeta del dedo medio	73
Figura 3.25. Simulación cinemática del dedo medio en posición de inicio de agarre	75
Figura 3.26. Dedo Medio en posición de agarre.....	75
Figura 3.27. Medidas del dedo anular.....	75
Figura 3.28. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo anular	79
Figura 3.29. Simulación del dedo anular por desplazamientos angulares	80
Figura 3.30. Simulación de la falange, falangina, falangeta del dedo anular	80
Figura 3.31. Simulación de la cinemática del dedo anular en inicio de agarre	82
Figura 3.32. Dedo anular en posición de agarre	82
Figura 3.33. Simulación cinemática del dedo anular considerando la palma.....	84

Figura 3.34. Dedo anular en posición de agarre con el movimiento de la palma.....	85
Figura 3.35. Medidas del dedo meñique	85
Figura 3.36. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo meñique.....	89
Figura 3.37. Simulación del dedo meñique con $q_4 = -1,2566$ radianes	90
Figura 3.38. Simulación de la falange, falangina, falangeta del dedo meñique	90
Figura 3.39. Simulación cinemática del dedo meñique en posición de inicio de agarre....	92
Figura 3.40. Dedo Meñique en posición de agarre.....	92
Figura 3.41. Simulación cinemática del dedo meñique en inicio de agarre con palma	94
Figura 3.42. Dedo meñique en posición de agarre con el movimiento de la palma	94
Figura 3.43. Medidas del dedo pulgar	95
Figura 3.44. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo pulgar	99
Figura 3.45. Simulación del dedo pulgar con desplazamientos angulares	99
Figura 3.46. Simulación de la falange del dedo pulgar.....	99
Figura 3.47. Ensamble de los dedos anular, medio e índice en MatLab	101
Figura 3.48. Ensamblaje total de la mano en MatLab	103
Figura 3.49. Simulación del dedo indice por medio de cinemática inversa.....	104
Figura 3.50. Cinemática inversa en posición de agarre.....	104
Figura 3.51. Propiedades del objeto	106
Figura 3.52. Piezas a ensamblar	107
Figura 3.53. Palma de la mano inalámbrica	108
Figura 3.54. Articulaciones de la mano inalámbrica	110
Figura 3.55. Ubicación de los puntos de articulaciones.....	111
Figura 3.56. Movimientos de la mano	111
Figura 3.57. Propiedades de los elementos.	114
Figura 3.58. Relaciones de parentesco.....	115
Figura 3.59. Simulación del ensamble de los dedos de la mano.....	127
Figura 3.60. Verificación de la simulación en modo indicación y en puño.	127
Figura 3.61. Impresoras 3 D	128
Figura 3.62. Impresión del dedo anular.....	128
Figura 3.63. Reconocimiento de las piezas de unión.	129
Figura 3.64. Palma en el software de impresion 3D.....	129
Figura 3.65. Programación de los movimientos de los dedos en un software libre.....	129
Figura 3.66. Diagrama de flujo para la programación en el giro de la muñeca	130
Figura 3.67. Conexión de un servo motor	131
Figura 3.68. Movimientos del servomotor según la señal analógica.....	133
Figura 3.69. Componentes electrónicos para el movimiento de la mano.....	133

Figura 3.70. Simulación de la mano en efecto del puño cerrado	135
Figura 3.71. Pruebas de funcionamiento, pulgar abierto	136
Figura 3.72. Pruebas de funcionamiento “Dedo índice”	136
Figura 3.73. Pruebas de funcionamiento, Tres dedos	137
Figura 3.74. Conexiones del bluetooth para el mando inalámbrico	137
Figura 3.75. Conexiones completas de la mano inalámbrica	140
Figura 3.76. Tarjeta arduino con la tarjeta de los canales de comunicación.....	140
Figura 3.77. Conexión del guante sensorial con el bluetooth y la tarjeta electrónica.	141
Figura 3.78. Conexión a la mano inalámbrica con el bluetooth y la tarjeta electrónica. ...	141
Figura 3.79. Dedos impresos	142
Figura 3.80. Ensamble y transmisión de los dedos de la mano.....	142
Figura 3.81. Ubicación de los tendones	143
Figura 3.82. Mano impresa terminada y ensamblada.....	143
Figura 3.83. Ensamble de los motores de la mano inalámbrica	143
Figura 3.84. Comunicación de las tarjetas arduino	144
Figura 3.85. Fuente de 6 voltios junto a la mano inalámbrica.....	144
Figura 3.86. Pruebas de funcionamiento del guante sensorial con la mano inalámbrica	144
Figura 3.87. Movimientos de un dedo de la mano.....	145
Figura 3.88. Ángulos de giro de los dedos	145
Figura 3.89. Comparación de movimiento entre la mano real y la mano inalámbrica.....	146
Figura 3.90. Pruebas de funcionamiento en manejo de sustancias tóxicas.....	148
Figura 3.91. Manejo de sustancias tóxicas en tubos de ensayo.....	148
Figura 3.92. Giro de muñeca en verter sustancias tóxicas en recipientes.	149

MANEJO DE SUSTANCIAS TÓXICAS POR MEDIO DE UNA MANO INALÁMBRICA

El manejo de sustancias tóxicas por medio de una mano inalámbrica, parte de un estudio de los compuestos que son manipulados por las personas, verificando el grado de incidencia que tienen estos productos químicos en su organismo y grado de exposición a estos agentes. El modelado de la mano humana se diseña con un percentil de 95, considerando los movimientos y la antropometría, el mismo que es comandado por un guante sensorial con sensores flex, colocado en el operario, con una fuente de alimentación independiente, estos movimientos son el resultado de la reproducción de la anatomía, la modelación, ensamblaje, simulación y reproducción de movimientos por medio de placas Arduino ensamblado al bluetooth HC05 en condición master – esclavo en la comunicación inalámbrica, en un rango experimental de 15 a 20 metros. Cada uno de los elementos que conforman la mano inalámbrica son diseñados y ensamblados en Solidworks, para posteriormente ser ejecutado cada movimiento considerando el efector final, paso previo a la impresión 3D de cada parte y concluir en la unión de todos los mecanismos de movimientos, en este caso servomotores, generando una fuerza de sujeción de 8 a 12 kgf que es lo que una persona normal tiene como capacidad, consiguiendo una efectividad promedio del 85%; investigación importante para precautelar la integridad de los trabajadores que manipulan productos nocivos en la salud humana.

Palabras clave: Mano, Inalámbrico, Arduino, Bluetooth, Servomotores.

TOXIC SUBSTANCES MANAGEMENT THROUGH A WIRELESS HAND

The handling of toxic substances by means of a wireless hand, part of a study of the compounds that are manipulated by the people, verifying the degree of incidence that these chemicals have in their organism and degree of exposure to these agents. The modeling of the human hand is designed with a percentile of 95, considering the movements and the anthropometry, the same that is commanded by a sensor glove with flex sensors, placed in the operator, with an independent power supply, these movements are the Result of reproduction of the anatomy, modeling, assembly, simulation and movement reproduction by means of Arduino boards assembled to bluetooth HC05 in master - slave condition in wireless communication, in an experimental range of 15 to 20 meters. Each of the elements that make up the wireless hand are designed and assembled in Solidworks, to be executed later each movement considering the final efector, previous step to the 3D printing of each part and to conclude in the union of all the mechanisms of movements, in This case servomotors, generating a force of subjection of 8 to 12 kgf that is what a normal person has like capacity, obtaining an average effectiveness of 85%; Important research to safeguard the integrity of workers handling harmful products in human health.

Keywords: Hand, Wireless, Arduino, Bluetooth, Servomotors

INTRODUCCIÓN

La automatización de los procesos y la utilización de elementos robóticos en las operaciones industriales ya no son historias de ciencia ficción, sino más bien, realidades en los mercados productivos y por tanto se está considerando a la robótica industrial como una ciencia en pleno desarrollo. De acuerdo a la RIA (Robot Institute of America) la robótica industrial es el estudio, fabricación y utilización de robots en los procesos industriales, sin embargo, los robots industriales son considerados como: “Un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar diferentes trabajos”, los cuales en los países industrializados ya son empleados y en países como el nuestro, se pretende ir incorporando en los procesos industriales que involucra exactitud, destrezas y como en el caso de esta investigación, en aplicaciones cuyos ambientes se consideren altamente contaminantes y peligrosos para la vida de los trabajadores. En algunas industrias ecuatorianas, específicamente en los sectores con procesos productivos que involucra la manipulación de sustancias tóxicas, los operarios se encuentran expuestos a sufrir algún accidente o enfermedad laboral por manipulación de dichos elementos con las subsecuentes consecuencias de salud e incluso económicas. Según informe anual de actividades 2010 del IESS se registraron 7102 casos reportados de accidentes laborales, de los cuales 3554 accidentes ocurrieron en las ramas de Agricultura, Explotación de Minas y Canteras, Industrias Manufactureras todos ellos relacionados con el inadecuado manejo de sustancias químicas.^[1] Algunas universidades del país, están también trabajando en el campo de la automatización y robótica como la Universidad Nacional de Loja, Universidad de Cuenca, Politécnica del Ejército y otras; sin embargo, se considera que existen alternativas más prácticas, técnicas y modernas, que hacen que la comunicación, programación y construcción de los elementos del manipulador tengan mayores y mejores prestaciones.

La solución a este problema es crear una propuesta alternativa que permita dar solución a estos eventos, mediante el empleo de artefactos con accionamientos remotos para la manipulación de sustancias tóxicas.

Una de esas alternativas es crear un dispositivo o equipo que permita tener la finura y las cualidades de sujeción que proporciona la mano humana teniendo como propuesta la creación de una mano robótica que realice esta manipulación, para este tipo de movimientos y no seguir patrones establecidos que me impidan tener decisiones en situaciones de alto riesgo por este motivo se piensa en la manipulación a distancia por

medio de bluetooth en una zona de confort y evitando el daño al ser humano que debe realizar estos trabajos.

JUSTIFICACIÓN

Debido al alto índice de accidentes registrados en las áreas de manejo de sustancias tóxicas y lugares de trabajo de alto riesgo, es alternativa adecuada el poder eliminar el contacto directo del proceso productivo con el trabajador, a través de una máquina que pueda reproducir con la mayor exactitud posible los movimientos de un trabajador, ubicado en una zona segura. La aplicación de los robots en la industria son netamente actividades repetitivas realizadas por variables programables definidas, sobre todo en la definición de valores de colocación inicial y final de los movimientos y posicionales; cualquier cambio en uno de estos parámetros puede afectar su programación y por ende se pueden generar errores; al ser sustituidas las actividades repetitivas por elementos de control inalámbrica y de reproducción casi instantánea mediante comunicación de enlace por radio frecuencia y unidireccional de los movimientos del trabajador, estos errores serán evitables. Por tanto, se propone que el operario o trabajador manipule los elementos de su área de trabajo a través de la simulación ejecutada mediante elementos sensoriales ubicados en la mano del trabajador y que son repetidos por la mano inalámbrica. Esto mediante una interfaz inalámbrica Bluetooth (Operario-Mano Robótica), la señal emitida por el emisor (operario) es interpretada por un módulo receptor el cual convierte las señales análogas en posicionamientos de los servomotores de la mano. Indudablemente la aplicación de este equipo para los casos antes mencionados beneficia tanto a empleadores y empleados de industrias que involucren procesos con los riesgos antes mencionados. Para los empleadores la seguridad de tener a su operario completamente libre de cualquier accidente evitando de esta manera los gastos que se generan a la empresa en caso de cualquier incidente. En el caso del empleado, el control inalámbrico debe garantizar su integridad física.

Pregunta de Investigación

¿Se puede manipular sustancias tóxicas por medio de una mano robótica a una distancia determinada?

Objetivo General

- Precautelar la integridad física de las personas por medio de una mano inalámbrica para el manejo de sustancias tóxicas.

Objetivos Específicos

- Analizar la manipulación y exposición del ser humano a sustancias tóxicas.
- Determinar las variables básicas de la anatomía, ergonomía y antropométricos para dimensionar parámetros del diseño de la mano inalámbrica.
- Realizar el modelado y simulación de los movimientos de la mano inalámbrica.
- Realizar la vinculación de los elementos electrónicos para el control inalámbrico.
- Prototipar y construir mediante una impresora 3D una mano inalámbrica para el manejo de sustancias tóxicas.
- Realizar las pruebas de funcionamiento, mando inalámbrico y sujeción de elementos.

1. MARCO TEÓRICO

Debido al alto índice de accidentes registrados en las áreas de manejo de sustancias tóxicas y lugares de trabajo de alto riesgo, es alternativa adecuada el poder eliminar el contacto directo del proceso productivo con el trabajador, a través de una máquina que pueda reproducir con la mayor exactitud posible los movimientos de un trabajador, ubicado en una zona segura.

La aplicación de los robots en la industria son netamente actividades repetitivas realizadas por variables programables definidas, sobre todo en la definición de valores de colocación inicial y final de los movimientos y posicionales; cualquier cambio en uno de estos parámetros puede afectar su programación y por ende se pueden generar errores; al ser sustituido esta programación por elementos de control inalámbrica y de reproducción casi instantánea mediante comunicación de enlace por radio frecuencia y unidireccional de los movimientos del trabajador, estos errores serán evitables.

Por tanto, se propone que el operario o trabajador dirija los movimientos desde una distancia determinada sin exponerse a los agentes químicos mediante elementos sensoriales ubicados en la mano del trabajador y que son repetidos por la mano robótica. Esto mediante una interfaz inalámbrica Bluetooth (Operario-Mano Inalámbrica), la señal emitida por el emisor (operario) es interpretada por un módulo receptor el cual convierte las señales análogas en una modulación por ancho de pulsos para determinar el ángulo de giro en cada motor, el mismo que controla el posicionamiento de cada elemento del brazo.

1.1. Robótica

La robótica es una rama de la tecnología que se encarga de investigar y desarrollar una clase exclusiva de sistemas mecánicos, denominados robots manipuladores, diseñados para realizar una variedad de aplicaciones como son: industriales, científicas, domésticas y comerciales.

La robótica combina diferentes disciplinas que permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento tales como matemáticas, física, electrónica, computación, visión e inteligencia artificial, entre otras, aun cuando la robótica es un área especialmente experimental, todos sus resultados se mantienen con rigor científico y hoy en día, se ha convertido en un área estratégica y clave para todo país en desarrollo¹. (Cortes, 2011)

1.2. Tipos de robots

En la actualidad existe una gran diversidad de robots con diferentes estructuras geométricas y mecánicas que definen su funcionalidad y aplicación¹, estos están clasificados como se indica en la tabla 1.

Tabla I.1. Clasificación de robots

Clasificación de robots	
Móviles	Terrestres: con movimientos de ruedas o patas
	Submarinos
	Aéreos
	Espaciales
Humanoides	Diseño Complejo
Industriales	Brazos Mecánicos
	Robots Manipuladores

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores¹)

a. Robots Industriales

Oficialmente la ISO (International Organization for Standardization) lo define como un manipulador multipropósitos, reprogramable y controlado automáticamente en tres o más ejes.²

Los robots industriales conocidos como brazos robots o brazos mecánicos, por su similitud al brazo humano, se componen de una base la cual puede rotar 360° grados alrededor de su eje de giro, además de que poseen articulaciones para hombro y codo¹.

En el extremo final del codo está ubicada la muñeca que le permite orientar a la herramienta final que es la que define la aplicación a realizar.

Supera el desempeño de las personas ya que el robot como característica principal puede trabajar sin descansar las 24 horas al día, y repitiendo el proceso siempre con el mismo tiempo y la misma calidad.

b. Componentes de los Robots Industriales

En forma general un robot industrial está formado por los siguientes elementos:

- **Articulaciones**

Formadas por motores paso a paso o servomotores, permiten la realización de movimientos al robot. Dependiendo del tipo de movimiento pueden ser de tipo rotacional o lineal.

- **Actuadores**

Suministran las señales necesarias a las articulaciones para producir movimiento, pueden ser servomotores, elementos neumáticos, eléctricos o hidráulicos.

- **Sensores**

Proporcionan información del estado interno o externo del robot en este caso de la mano inalámbrica cayendo en una reproducción de movimientos por medio de galgas flexométricas.

- **Sistema mecánico**

Consiste en una secuencia de eslabones rígidos de metal conectados en cadena abierta por medio de articulaciones, considerando la carcasa y alojamiento de los servomotores.

- **Consola de control**

Se compone de un sistema electrónico y es la encargada de suministrar energía al robot para su movimiento.¹

1.3. Robot antropomórfico

La gran mayoría de los robots industriales tienen la configuración antropomórfica debido a que presentan mayor versatilidad en sus movimientos.¹

El robot antropomórfico presenta mayor habilidad en su espacio de trabajo, ya que sus eslabones están unidos por tres articulaciones rotacionales.¹

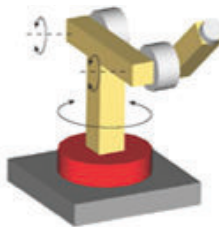


Figura 1.1. Robot antropomórfico.

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores)¹

El sistema de referencia cartesiano fijo Σ_0 se encuentra sobre la base del robot, donde el eje z_0 coincide con el eje de rotación de la articulación de la base z_1 . El eje z_0 es ortogonal a los ejes de rotación z_2 y z_3 del hombro y codo, respectivamente. Los ejes de z_2 y z_3 son paralelos entre sí, tal y como se muestra en la figura 2.¹

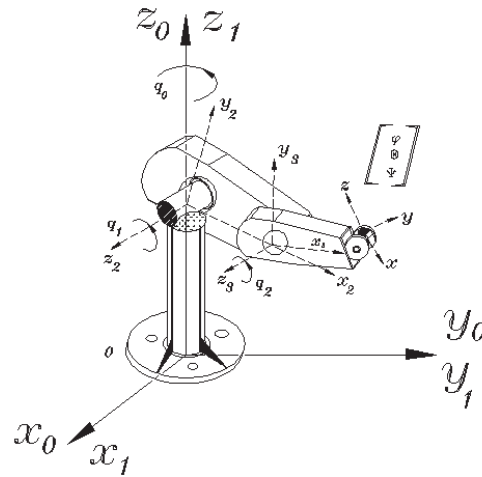


Figura 1.2. Giros de un robot antropomórfico.
(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores ¹)

Tecnología de robots

Por medio de la construcción de sus articulaciones y eslabones, y a través de la tecnología se pueden clasificar en robots tradicionales y robots de transmisión directa.¹

- Robots tradicionales. Estos robots utilizan los sistemas de engranes, para modificar las características de velocidad y aumentar su potencia, también desempeñan una función importante en la construcción y diseño de robots manipuladores, sin embargo, estos sistemas aumentan notablemente el fenómeno de fricción y cascabeleo.
- Robots de transmisión directa. Los robots de transmisión directa funcionan por medio de servomotores, el rotor del motor está directamente acoplado al eslabón, lo que no produce pérdidas de energía y su fenómeno de fricción es muy bajo como ocurre en los sistemas de engrane.

1.4. Cinemática de los Robots Industriales

La cinemática trata el movimiento de un sistema mecánico sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen.

En un espacio tridimensional la posición del robot requiere de 6 coordenadas: 3 coordenadas para su posición cartesiana del extremo final del robot (x,y,z) y 3 coordenadas

para la orientación de la herramienta de trabajo expresadas por los ángulos de Euler (θ, ϕ, ψ) , esta relación entre coordenadas se denomina cinemática directa.³ (Cortes, 2011)

1.4.1. Cinemática directa de robots manipuladores

Es el estudio del movimiento del robot sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen, con respecto a un sistema de referencia cartesiano fijo $\Sigma(x, y, z)$ relacionando la dependencia que existe entre las coordenadas articulares o generalizadas $q \in R^n$, sus parámetros geométricos y las coordenadas cartesianas $[x, y, z]^T \in R^3$ y de orientación $[\theta, \phi, \psi]^T \in R^3$ del extremo final del robot.³

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = f_R(q)$$

(Ec. 1.1)

En esta definición f_R es una función continua en el vector de posiciones o desplazamiento articular $q \in R^n$, n representa el número de grados de libertad y la dimensión del vector de posiciones o desplazamiento articular, $x, y, z \in R$ son las coordenadas cartesianas asociadas al extremo final del robot y θ, ϕ, ψ son ángulos de Euler, que representan la orientación de la herramienta colocada en el extremo final con respecto al sistema de referencia fijo en la base del robot, m es la dimensión de la función vectorial $f_R(q) = [x, y, z, \theta, \phi, \psi]^T \in R^6$, para el caso general $m = 6$, cuando $n > m$ se denominan robots redundantes.

1.4.2. Cinemática inversa

Es la que determina el movimiento para que el extremo final del brazo se coloque en la posición deseada. Es un problema no lineal que relaciona las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas. Este problema representa la solución inversa de la ecuación de la cinemática directa, dada la posición cartesiana y la orientación de la herramienta colocada en el extremo final del robot.³

$$q = f_R^{-1}(x, y, z, \theta, \phi, \psi)$$

(Ec. 1.2)

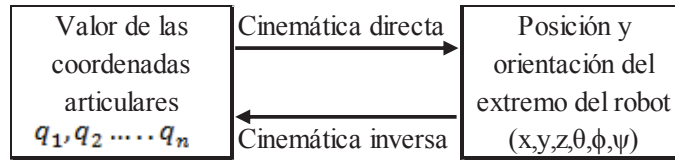


Figura 1.3. Relación entre cinemática directa e inversa.

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores)

La estructura matemática de la cinemática es generalmente no lineal en las variables de estado de posición, compuesta por funciones trigonométricas y parámetros del robot como son las longitudes.¹

a. Morfología del robot. La morfología es la descripción de componentes, partes y estructura mecánica, entre ellas tenemos las siguientes.

b. Articulaciones (joints). Pueden producir movimiento rotacional o giratorio denominadas articulaciones rotacionales, y también producen movimiento lineal que se denomina articulaciones prismáticas o lineales.

En la figura 3 se muestran los dos tipos de articulaciones.

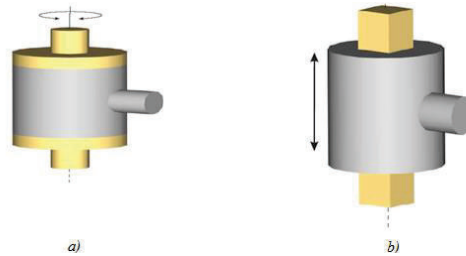


Figura 1.4. Tipos de articulaciones: a) rotacional, b) lineal.

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores)

1.4.3. Eslabón (link)

Está formado por una barra metálica acoplada mecánicamente al rotor y al estator de la siguiente articulación. En la figura 4 se muestran las partes que componen a un eslabón de un robot manipulador.¹

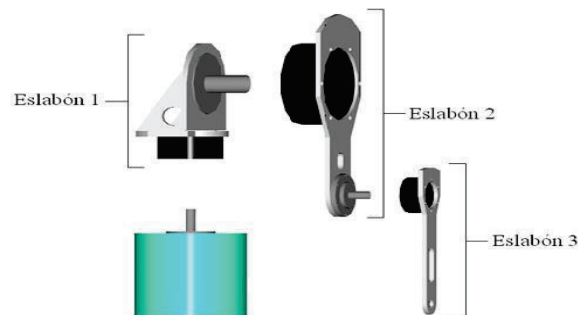


Figura 1.5. Elementos que forman un eslabón de un robot manipulador.

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores)

1.5. Espacio de trabajo de un robot industrial (workspace)

Es el espacio o lugar donde el robot puede realizar todos sus posibles movimientos, está determinado por la geometría del robot y la naturaleza de las articulaciones (lineales y rotacionales).¹

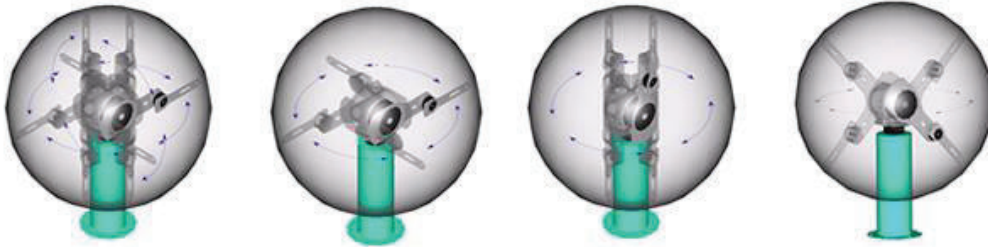


Figura 1.6. Espacio de trabajo de un robot industrial.

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores)

a. Extremo final (end-effector)

Es la parte terminal o final del último eslabón, destinado a colocar la herramienta adecuada para una aplicación específica, la posición del extremo final se representa por $[x, y, z]^T$ y su orientación se denota a través de los ángulos Euler.³

La figura 1.7 muestra la analogía entre un brazo humano y un brazo robot o robot industrial.

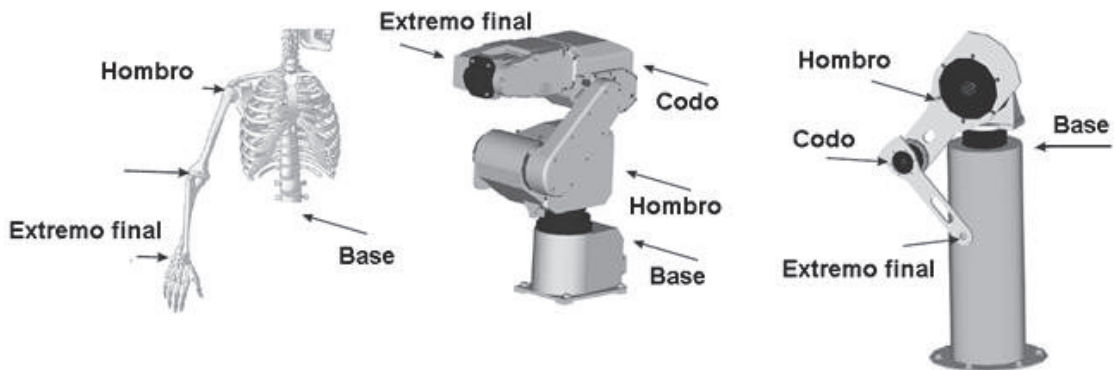


Figura 1.7. Base, hombro y codo de un robot industrial.

(Fuente: Robótica, control de robots manipuladores)

1.6. Transformaciones homogéneas

La transformación homogénea es una herramienta matemática que abarca operaciones de rotación y traslación dentro de una matriz de 4x4 para transformar un vector expresado en

coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas.⁴

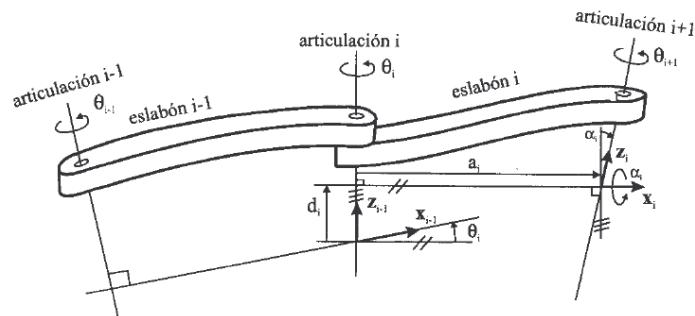


Figura 1.8. Cinemática directa del brazo robótico.

(Fuente: Fundamentos de robótica Arrau, 2005)

Grados de libertad de Robots industriales

Los grados de libertad (GDL) son el número de movimientos independientes que se puede realizar cada articulación. Un grado de libertad es la capacidad de moverse a lo largo de un eje produciendo un movimiento lineal, o de rotar a lo largo del eje produciendo un movimiento rotacional.

Por ejemplo, un brazo robótico soldador por su necesaria precisión trabaja con 6 grados de libertad en nuestro caso la mano tiene 15 grados de libertad considerando la muñeca.



Figura 1.9. Grados de libertad de un brazo robótico.

(Fuente: <http://goo.gl/Tzh43G>)

En cada uno de los dedos se realiza el análisis cinemático mediante la tabla Denavit-Hartenberg Estandar (DHS), verificando los movimientos y los ángulos de desplazamiento que tienen las articulaciones que conforman la mano inalámbrica.⁵

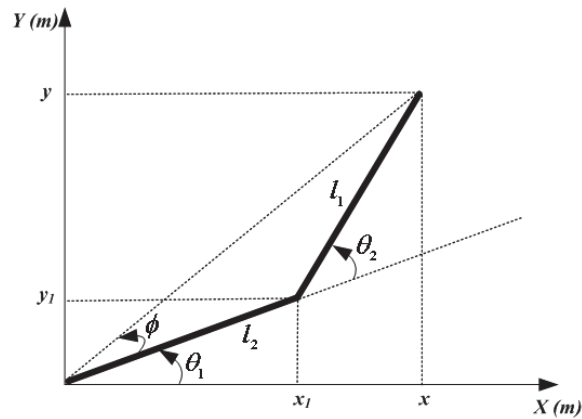


Figura 1.10. Eslabones para el cuadro DH

(Fuente. <http://article.sapub.org/10.5923.j.control.20130303.03.html>)

Tabla I.2. Parámetros DHS de un robot con 2gdl.

Eslabón	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_2	0	0	θ_1
2	l_1	0	0	θ_2

(Fuente. <http://article.sapub.org/10.5923.j.control.20130303.03.html>)

1.7. Manos robóticas


Una vez analizado todos los parámetros que incluyen en la creación y movilidad de la mano robótica se realiza un estado del arte considerando tres grandes grupos dependiendo del número de dedos que tenga y la configuración que se va a realizar.



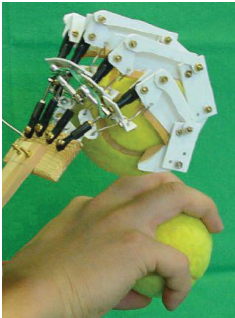
- Manos robóticas antropomórficas: Son las mas similares a la mano humana con la característica principal que posee cuatro dedos y el pulgar, dando mayor agarre y similitud en los trabajos que se necesite una sustitución de la mano humana.
- Manos robóticas semiantropomórficas: La configuración de este tipo de manos es similar a la mano humano con la diferencia que le falta uno o varios dedos dándoles aplicaciones específicas donde no se necesite una manipulación exigente como la real.
- Manos robóticas no antropomórficas: Son todas aquellas manos que no tienen similitud en la configuración a una mano humana independientemente del número de dedos que contenga

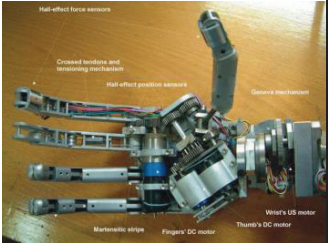
Considerando esta clasificación la mano robótica que más se ajusta al requerimiento de manejo de sustancias tóxicas es la antropomórfica por lo que se conoce una de las manos más avanzada a nivel mundial es Robonaut Hand - NASA (1999) que al pasar de los tiempos se ha incrementado y mejorado, utilizando como inspiración para la creación de una mano inalámbrica que cumpla la función de manipulación de agentes tóxicos y que a la vez se pueda reponer con facilidad cada una de las piezas.


Además de la configuración de la mano Robonaut Hand – NASA existe otras manos robóticas que han tenido impacto mundial como es el caso:

Tabla I.3 Manos Robóticas

Nombre	Característica	Imagen
<p>Robonaut Hand – NASA</p>	<p>La finalidad del Robonaut es reemplazar a los astronautas en las tareas de la nave, tanto dentro como fuera de ellas, y en aquellos lugares donde el ser humano corre peligro.</p> <p>La Robonaut Hand esta compuesta por cuatro dedos y un pulgar. Junto con la muñeca y el antebrazo, poseen 22 GDLs o articulaciones (20 en la mano y dos en la muñeca).⁶</p> <p>De estos, 14 (12 en la mano y 2 en la muñeca) son controlados y accionados de manera remota por motores sin escobillas ubicados en el antebrazo, cuyo diámetro es de cuatro pulgadas. La cinemática del dispositivo se aproxima, en un alto porcentaje, a la de la estructura humana.</p>	
	<p>Diseñada en la Universidad de Tokyo.⁷</p> <p>El principal adelanto tecnológico que incorporó esta mano robótica fué el desarrollo de un actuador neumático liviano y pequeño basado en el Musculo Artificial de McKibben. Este actuador,</p>	

<p>La mano robótica Tokyo Hand</p>	<p>creado especialmente para la mano robótica, tiene solo 3,5mm de diámetro y una longitud de 380mm. Gracias a sus materiales, este actuador realiza una fuerza máxima de 700gr, con una contracción inversamente proporcional a la fuerza de 30mm. Todo ello a una presión de 0,35MPa</p>	
<p>Ultralight Anthropomorphic Hand - Research Center of Karlsruhe</p>	<p>Desarrollada por el Centro de Investigación de Karlsruhe.⁸</p> <p>La estructura de la mano está compuesta por 17 elementos independientes y 18 articulaciones.</p> <p>13 de estas (tres en la muñeca y diez en los dedos) son controladas. El tamaño de la Ultralight Anthropomorphic Hand es mayor que el de la mano humana</p> <p>La mano robótica está dividida en tres secciones. Una primera con los dedos que contienen los actuadores, con los sensores de flexión y con los sensores de tacto. Una segunda con el metacarpo, que se provee de espacio suficiente para alojar el microcontrolador, las micro-válvulas, la fuente de energía y el micro-compresor. Una última con la muñeca, que contiene los actuadores necesarios para exionar la mano.</p>	
<p>TUAT-Karlsruhe</p>	<p>La mano robótica TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand, desarrollada en conjunto entre la Universidad de Tokyo y la Universidad de Karlsruhe, fue diseñada para ser montada en el robot humanoide ARMAR se pensó como posible prótesis para seres humanos.⁹</p>	

<p>Humanoid Hand - Universidad de Tokyo y Karlsruhe</p>	<p>Por tal motivo, el brazo robótico donde se monta la mano robótica se parece a un brazo humano. La curiosidad de este brazo es que es accionado a través de motores ultrasónicos esféricos</p> <p>En total, la mano robótica posee 22 elementos estructurales y 24 GDLs o articulaciones.</p> <p>Todas ellas son accionadas con un solo actuador (motor eléctrico) que puede ser montado dentro o alrededor de la mano.</p> <p>Esto hace que el diseño cinemático de la mano sea verdaderamente sorprendente, dejando claro que el prototipo está concebido sólo para tareas de agarre. En ese sentido, su configuración no le permite hacer tareas de manipulación de objetos, puesto que el control sobre cada uno de los elementos estructurales es prácticamente nulo.</p>	
<p>Manus Hand</p>	<p>La Manus Hand es un desarrollo en conjunto entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC (España), la Universidad Católica de Leuven (Bélgica), el Centro de Recuperación de Minusválidos Físicos del IMSERSO (España), la Aloman Advanced Medical Technologies Ltd. (Israel) y el Advanced Material Technologies N.V. (Bélgica). El objetivo principal de este proyecto es el de desarrollar una mano robótica antropomorfa para prótesis en seres humanos. Esto justifica que su configuración sea igual a la de la mano humana.¹⁰</p>	

	<p>Una de las características de diseño más importantes que se han tenido en cuenta en ella es lo que se denomina manos robóticas subactuadas. Es conseguir una máxima capacidad de agarre y manipulación con una gran cantidad de elementos estructurales, que permitan adaptarse a las tareas esperadas con la menor cantidad posible de actuadores</p>	
<p>KH Hand Type S</p>	<p>Esta es la última versión de manos robóticas diseñadas por la Universidad de GIFU.</p> <p>Su configuración estructural se mantiene idéntica a la GIFU Hand III, de 21 elementos con 20 GDLs. Pero, en este caso solo hay 15 articulaciones controladas.¹¹</p> <p>El peso total de la mano robótica es de unos 656 gramos, reduciéndolo en más de un 50% con respecto a su antecesora, la GIFU Hand III, que pesaba 1.400 gramos.</p> <p>Para demostrar la efectividad de la mano robótica, fue montada en un brazo robótico y se construyó un sistema maestro-esclavo con retorno de fuerza para poder realizar tareas de teleoperación. Los resultados demostraron que la mano robótica es capaz de realizar gran cantidad de tareas de agarre y manipulación de forma óptima</p>	
	<p>La Universidad de Bologna desarrolla manos robóticas desde 1988, año en el que presentó su primer prototipo, la UB Hand I</p>	

<p>UB Hand III</p>	<p>La estructura de la UB Hand III está compuesta por una palma, un pulgar y cuatro dedos. Todos los dedos y el pulgar poseen cuatro GDLs y tienen la capacidad de ser accionados independientemente o en parejas, imitando el funcionamiento real de la mano humana.¹²</p> <p>La estructura del dedo es particularmente diferente a lo que se puede ver en las manos robóticas tradicionales. Su diseño está inspirado en el modelo biológico del dedo humano. No posee articulaciones convencionales rotativas. Por el contrario, sus falanges están unidas por medio de bisagras elásticas accionadas por tendones. Este concepto de diseño hace que el dedo sea más simple y más económico, sin perjudicar el aspecto funcional del mismo. El dedo finalmente es recubierto y protegido por un material elástico y sintético que reproduce la textura de la piel humana.</p>	 
<p>Shadow Hand - Shadow</p>	<p>La Shadow Robot Company es una empresa de robótica que en los últimos años ha enfocado una de sus principales líneas de investigación al desarrollo de una mano robótica, la Shadow Hand.¹³</p> <p>Esta mano robótica ha tenido varios prototipos y versiones de cada uno de ellos. Han evolucionado desde el Prototipo A hasta el más reciente, que es el Prototipo C. Básicamente, la diferencia entre ellos fueron avances tecnológicos en materia de control, nuevos materiales, mejoras estructurales y configuraciones</p>	 

<p>Robot Company</p>	<p>más avanzadas que imitaban de mejor forma el movimiento y la cinemática de la mano humana. Los materiales utilizados para la construcción de la estructura de los prototipos son una gran variedad de sintéticos, aluminios, aceros, otros metales especiales hasta corcho; haciendo que la mano pese 3,9 kilogramos en su prototipo final (sin considerar la fuente de energía neumática).¹⁴</p> <p>EL prototipo C cuenta la estructura con 26 elementos y 25 articulaciones. Esto permite a la mano robótica realizar tareas muy cercanas a la mano humana.¹⁴</p> <p>La mano robótica es accionada por medio de actuadores neumáticos basados en los Músculos de McKibben. Su movimiento es guiado desde el antebrazo hasta cada articulación a través de tendones. Para el funcionamiento de toda la mano, se necesitan, en un principio, 32 de estos actuadores y, después, en la última versión, 40.</p>	
-----------------------------	--	---

(Fuente: Propia)

1.8. Manipulación y exposición del ser humano a sustancias tóxicas

El peligro de trabajar manipulando sustancias tóxicas se deriva principalmente del desconocimiento que puedan tener los trabajadores de los riesgos para la salud que tienen muchas sustancias químicas. Las sustancias químicas más nocivas que manipulan los trabajadores son de muy variada composición y de efectos muy diversos sobre la salud. En los procesos de la industria moderna intervienen miles de productos químicos distintos, presentando cada uno características que hacen que su empleo presente distintos grados de riesgo variando los efectos sobre la salud y sobre el medio ambiente de forma notoria de unos a otros. Medidas de seguridad en la manipulación de sustancias tóxicas:¹⁵

- Establecer procedimientos seguros para manipulación de productos químicos, las personas que están en contacto con sustancias químicas deben ser capacitadas sobre los peligros que pueden ocurrir.
- Nunca manipular sustancias desconocidas con las manos, mantener siempre mucha concentración en el trabajo.
- Siempre estar acompañado durante operaciones de riesgo con sustancias químicas peligrosas, en particular en horarios inusuales (fuera de horas habituales o por las noches).
- No desprender por ningún motivo las etiquetas en recipientes y botellas. No reutilizar recipientes para otros productos sin quitar la etiqueta original.
- Tener información suficiente para actuar en caso de derrame o contacto con agentes químicos, para la eliminación o neutralización.
- Cada actividad tendrá su EPP específico, se debe usar de forma correcta. En algún caso se puede requerir de EPP especiales como máscaras.
- Disponer de sistemas de seguridad y planes de contingencia en cada área donde se trabaje con sustancias químicas para una rápida actuación en caso de accidentes o incidentes (incendio, explosión, derrame), también es importante contar con cámaras de descontaminación o duchas de seguridad y una fuente lavavojos, estos sistemas estarán controlados periódicamente para controlar su buen funcionamiento.
- Con nuestra investigación el procedimiento para manipular sustancias químicas será altamente seguro, porque el trabajador no estará en contacto con sustancias peligrosas gracias al brazo controlado inalámbricamente.

La manipulación de sustancias tóxicas en mezclas vienen dadas por muchos compuestos que afectan a la salud humana y estas a su vez encuentran modos de ingreso por vía respiratoria, dérmica, parenteral y digestiva ocasionando graves problemas en la piel, el estómago, en casos extremos cáncer y posteriormente la muerte. ^[16]



Figura 1.11. Vías de acceso al organismo de las sustancias tóxicas.

(Fuente. Atexga, 2016, Vías de entrada de los contaminantes en el organismo, http://www.atexga.com/prevencion/es/estudio-sustancias-nocivas/2_vias_de_entrada.php)

Una de las maneras de corregir estos daños ocasionados por la exposición de las manos como principal fuente de sujeción e interacción con el medio ambiente a las sustancias tóxicas es modificar el proceso para eliminar la exposición química. Por ejemplo, cuando realice mezclas de sustancias tóxicas, en lugar de limpiar a mano las partes metálicas, utilice un limpiador mecánico, en nuestro caso es crear una mano robótica que se encargue de la manipulación de estas sustancias teniendo en cuenta la necesidad de decisión del ser humano va a ser dirigido por el mismo a una distancia o en una zona de confort donde no aplique riesgos para la salud humana.

Tabla I.4. Efectos en la salud de las sustancias tóxicas

Riesgo específico SK	Efectos en la salud	Definición
SYS	Efectos sistémicos	<p>Las sustancias químicas pueden causar daños sistémicos o generalizados en el cuerpo más allá del punto de contacto con la piel.</p> <p>Las áreas dañadas pueden ser órganos específicos (p. ej., hígado, corazón y riñones) y aparatos o sistemas biológicos (p. ej., sistema nervioso, aparato reproductor y sistema inmunitario).</p> <p>Subanotación de SK: SYS</p>
(MORTAL)	Efectos letales o mortales	<p>Se asigna a las sustancias químicas que son muy tóxicas o extremadamente tóxicas y que pueden ser letales o poner en riesgo la vida tras una exposición en la piel</p> <p>Las sustancias químicas pueden causar daños en el punto de contacto con la piel o cerca de este.</p>

DIR	Efectos directos (localizados)	Los efectos en la salud pueden consistir en irritación y corrosión, decoloración u oscurecimiento de la piel o cánceres de piel.
(IRR)	Irritación en la piel	Subanotación de SK: DIR
(COR)	Corrosión en la piel	Subanotación de SK: DIR
SEN	Reacciones alérgicas o de otra índole inmunitaria	La sustancia química puede causar dermatitis de contacto alérgico (DCA), sensibilización de la piel expuesta o sensibilización de las vías respiratorias después del contacto con la piel

(Fuente. "Norma ntp 245" Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. España 2009)

Las sustancias tóxicas que afectan a las personas en menor grado por la manipulación y exposición a estos compuestos son las siguientes

Tabla I.5. Productos químicos manejables.

LETRA CÓDIGO	PRODUCTO QUÍMICO
A	Metanol
B	Acetona
C	Acetonitrilo
D	Diclorometano
E	Sulfuro de carbono
F	Tolueno
G	Dietilamina
H	Tetrahidrofurano
I	Acetato de etilo
J	n-Heptano
K	Hidróxido sódico 40%

(Fuente. "Norma ntp 245" Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. España 2009)

Los compuestos de difícil manipulación para el ser humano son los siguientes ácidos: sulfúrico, fosfórico, acético, clorhídrico, cítrico, además de fertilizantes sintéticos, explosivos, tintas y colorantes, la acción de este ácido sobre el organismo cuando se

introduce en el mismo sea en forma líquida o de vapor, produce gran irritación y quemaduras de tipo químico en las mucosas del aparato respiratorio, con secreción nasal abundante, estornudos a repetición, sensación de quemazón en la garganta y región retro esternal, tos, dificultad para respirar, en ocasiones espasmos de las cuerdas vocales, también quemaduras en el aparato digestivo, en los dientes, ojos y la piel. Cuando este ácido contacta con la piel produce una intensa deshidratación con gran producción de calor que causa quemaduras similares a las térmicas que pueden clasificarse al igual que estas en quemaduras de primer, segundo y tercer grado. Las altas concentraciones del ácido sulfúrico pueden causar esputos sanguinolentos, hematemesis (vómitos con sangre) gastritis, por estas razones es de vital importancia la creación de una mano robótica que manipule estas sustancias.

Considerando la utilización de estos productos químicos y el daño que provocan por medio de inhalación, absorción y contacto se considera la utilización de una mano inalámbrica que precautele la integridad de las personas poniéndoles a una distancia de confort, se pueda utilizar sin perder las prestaciones y la sensibilidad que le da el ser humano en la manipulación de las mismas.

1.9. ABS

Dentro de los materiales más comunes que se utilizan en las impresoras 3D son el ABS y PLA poniendo como mejor alternativa para este tipo de aplicación el ABS.

Tabla I.6. Propiedades Mecánicas y Físicas del material ABS y PLA

Material	Densidad (g/cm ²)	Resistencia a la rotura (Kg/cm ²)	Temperatura de fusión °C
ABS	1,07	450 -750	215 – 250
PLA	1,50 - 1,64	0	160 – 230

(Fuente: Propia)

El ABS es un polímero compuesto por tres bloques, *acrilonitrilo*, *butadieno* y *estireno* por lo que se le denomina *terpolímero*.

Cada uno de los tres bloques aporta características distintas. El *acrolonitrilo* rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a las altas temperaturas. El *butadieno*, tenacidad a la temperatura cuando ésta es especialmente baja y resistencia a impacto; y el *estireno*, resistencia mecánica, rigidez, brillo, dureza. ^[17]

Esta mezcla de propiedades hace que el producto final sea de gran aplicación en la fabricación de equipos pesados y aparatos electrónicos.

El filamento se puede encontrar en dos dimensiones de 1,75 mm y 2,75 mm esta característica se debe considerar en el tipo de impresora 3D que se va a utilizar.



Figura 1.12. Filamento ABS
(Fuente. Filamento ABS de las impresoras 3D)

1.10. Estudio antropométrico

Antropometría es la ciencia que se encarga del estudio de las dimensiones del cuerpo humano con el fin de establecer diferencias entre los seres humanos.

El estudio antropométrico resulta de gran importancia en el diseño industrial, diseño de equipos de protección individual, diseño de equipos etc., además nos sirve para determinar el espacio que una persona necesita para realizar las actividades. Para contar con datos fiables sobre las dimensiones del cuerpo humano, se miden distintas poblaciones teniendo en cuenta diferentes factores como:

- Sexo
- Edad
- Grupo étnico
- País

Clasificación de la antropometría

La antropometría se clasifica según el reposo y movimiento del cuerpo.

Antropometría estática: La antropometría estática es la encargada del estudio de las medidas del cuerpo y de la mano en reposo con diferentes posiciones

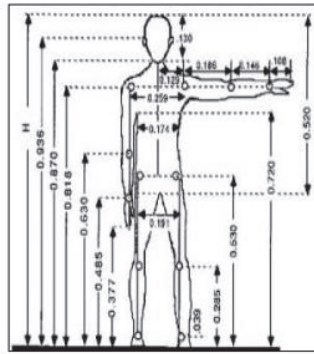


Figura 1.13. Antropometría Estática.

(Fuente: <https://ergonomia2010.wordpress.com/2010/05/06/unidad-5-antropometria/>)

Antropometría dinámica: La antropometría dinámica es la que analiza o se dedica al estudio del cuerpo durante las actividades, considera el desplazamiento horizontal, vertical laterales y axiales. [18]

En el estudio antropométrico de una mano humana, se determina los principales tipos de movimientos y ángulos para los siguientes elementos:

Tabla I.7. Características de la mano y la muñeca

Desviación de muñeca	$< 100^{\circ}$
Giro de muñeca	$< 120^{\circ}$
Carga sujeción vertical puño cerrado	$< 35 \text{ Kg}$
Fuerza de agarre	$< 12 \text{ Kg}$
Distancia de agarre	$< 4,12 \text{ cm}$

(Fuente: Propia)

En argonautas me permite visualizar el movimiento de las manos y el giro de la muñeca teniendo sus rangos de acción. [19]



Figura 1.14. Giro de la muñeca.

(Fuente: Ergonautas.com)

1.11. Simulación de la Mano Inalámbrica

La simulación de los movimientos de la mano inalámbrica se lo realiza por medio de V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform) que es un simulador de robótica con una extensa capacidad, funcionalidades y APIs (conjunto de funciones y métodos para ser utilizado por otros softwares).

El simulador de robótica V-REP dispone de una interfaz o entorno de desarrollo (IDE) en la que cada modelo u objeto está basado en una arquitectura de control distribuido (puede ser controlado por un script propio, un plugin, una aplicación cliente remota a través de su API, etc). Esto hace ideal a la plataforma de simulación en un entorno multi-robot. Los controladores de los robots pueden ser escritos en C/C++, Python, Java, Lua, Matlab o Urbi. ^[20]

La siguiente lista son sólo una de las posibles aplicaciones de uso de V-REP: Simulación de sistemas de fabricación automatizados.

- Monitorización remota.
- Control de hardware.
- Prototipado rápido y verificación.
- Monitorización de seguridad.
- Enseñanza de robótica.
- Presentación de producto.

V-REP puede ser utilizado como una aplicación individual (a través de su IDE) o puede ser incrustada en una aplicación cliente principal. Dispone de un intérprete (lenguaje de programación) que lo hace muy versátil con la capacidad de combinar funcionalidades de alto y bajo nivel para obtener resultados espectaculares con pocas líneas de código.

1.11.1. Eslabones del brazo robótico

Con objeto de introducir las diversas funcionalidades del software, utilizaremos una mano robot, a la que llamaremos ManoR. Se trata de una mano robot imprimible con impresoras 3D. Lo que obtendremos tras la realización de este tutorial nos permitirá tener un conocimiento del simulador.

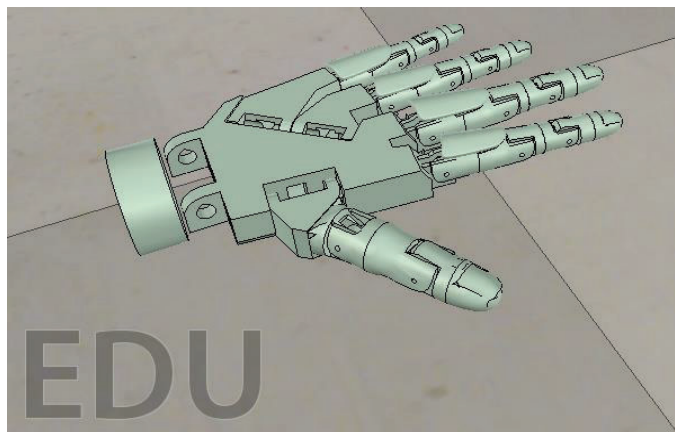


Figura 1.15. Mano ensamblada en el software de simulación
(Fuente. Propia)

1.12. Bluetooth

Para poder mover los dedos y la muñeca en nuestro brazo robótico se requiere tener una conexión vía bluetooth para esto es necesario seleccionar un módulo bluetooth adecuado. El módulo Bluetooth Hc-05 es el que ofrece una mejor relación de precio y características en el mercado, ya que es un módulo maestro esclavo, es decir que además de recibir conexiones desde un ordenador o Tablet también envía señales mediante bluetooth. La entrada de voltaje es de 3.3 v, el arduino posee los reguladores que entregan 3.3v y 5 v, no se debe exceder de este voltaje. Otro parámetro para seleccionar este módulo es que en este proyecto se utiliza un arduino Leonardo R3 que posee una conexión micro USB, esto servirá para comunicarse con el modulo y configurarlo. ^[21]

Tabla I.8. Características del bluetooth

Bluetooth	versión V2.0 + EDR
Tensión de alimentación	3.3 V
Frecuencia	2.4 GHz banda ISM
Modulación	GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)	2.1 Mbps (Max) /160 kbps: Sincrono: 1 Mbps / 1 Mbps
Temperatura de trabajo	-20 °C a + 75°C
Dimensiones	26.9 mm x 13mm x 2.2 mm
Configuración por defecto para el puerto COM	9600,N, 8.1

(Fuente. Características del bluetooth)

1.13. Servomotor

Para la selección del servomotor se tomó en consideración el peso y el torque que debía ejercer, este servomotor será el encargado de mover toda la estructura de la mano. Nuestra selección además se basó en el dato de características del servomotor y según esta información son especialmente usados para brazos robóticos y sistemas que requieran un alto torque, es decir que este servomotor fue el indicado para mover toda la estructura del brazo robótico. Su voltaje de operación está dentro del rango de nuestra fuente de alimentación. Los engranajes son hechos de un nylon altamente resistente, esta característica es buena debido a la carga constante que estará sometido es sistema de engranajes por el continuo movimiento. [22]



Figura 1.16. Servomotor.
(Fuente. Propia)

1.14. Sensor flex

El guante sensorizado contiene 5 sensores de 45 a 145 Koms que me marca el cambio analógico que tiene cada uno de estos sensores.



Figura 1.17. Sensor flex
(Fuente. <http://rees52.com/57-flex-sensor-45.html>)

Para la programación del arduino se utiliza un software open source o libre que me permite enlazar los elementos electrónicos con el guante sensorial para poder manipularlo.

1.15. Guante Sensorial

El guante sensorizado es un elemento provisto con sensores de flexión y un Giróscopo de 4 ejes, se utilizó un sensor flex 2.2 por cada dedo, ya que miden flexión. Son sensores modulares resistivos, es decir que su resistencia cambia a medida que haya flexión. Los 5 sensores están montados estratégicamente en un guante diestro flexible, para censar el movimiento de la muñeca se utilizó un Giróscopo de 4 ejes para maximizar la sensibilidad. Una vez digitalizados los datos de posición estos son procesados, almacenados y actualizados continuamente y se entabla la comunicación vía bluetooth realizando un master esclavo.

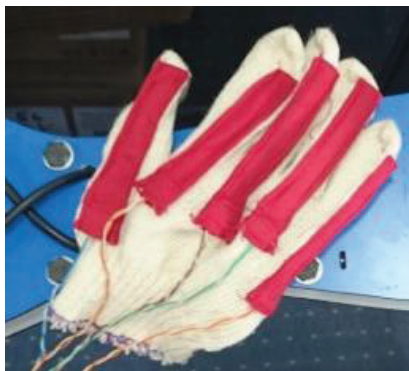


Figura 1.18. Guante sensorizado.
(Fuente. Propia)

2. ASPÉCTOS METODOLÓGICOS

Si se considera a una mano humana como una mano robótica completa, considerando sus especificaciones técnicas se tendría que poseer alrededor de 20 grados de libertad (GLD) con el doble de actuadores musculares y un promedio superior a los 15000 sensores táctiles en un volumen pequeño de medio kilo todos estos elementos estrechamente conectados con el 35 – 40% del cerebro humano con los estudios que actualmente no se sabe exactamente su funcionamiento se puede decir que ocupa 400 cm³ con un peso de 400gr. [23]

El objetivo principal del área de la robótica destinada a la manipulación es de imitar total o parcialmente algunas tareas que realiza una mano humana.

Con el fin de estudiarlas de mejor manera en cuanto a la utilidad y funcionalidad que tiene se ha dividido en tres grandes grupos que son: [24]

- Pinzas robóticas
- Manos robóticas subactuadas
- Manos robóticas

Con estas características detalladas se puede apreciar que tan lejos se encuentra la ciencia y tecnología actual poder imitarle por lo que se ha dividido en varios factores como la gráfica anterior según la manipulación y tareas de agarre para su estudio en el caso concreto de este trabajo es la de manipulación de sustancias tóxicas.

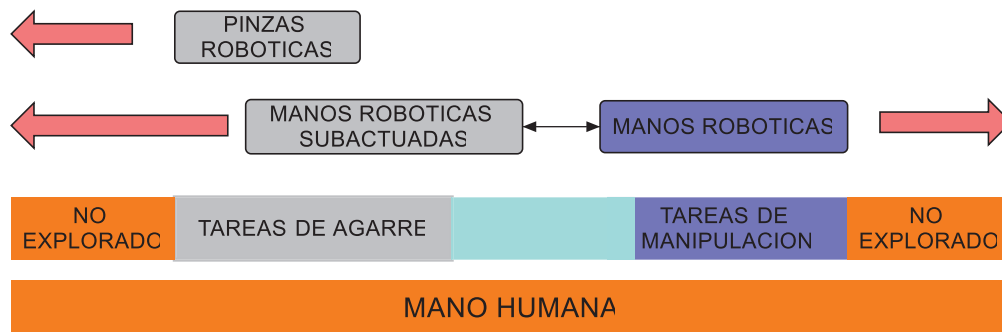


Figura 2.1. Mano humana y sus funciones

(Fuente: Propia)

La metodología que se va a aplicar para la modelación, simulación, construcción y pruebas de la mano inalámbrica es la siguiente: [25]

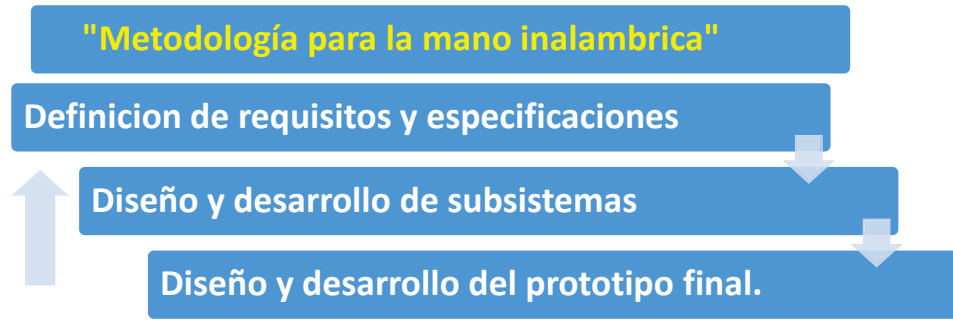


Figura 2.2. Metodología para la realización de la mano inalámbrica
(Fuente. Propia)

2.1. Definición de requisitos y especificaciones

La mano inalámbrica tendrá como primera función la repetitividad de movimientos a una mano real en un tiempo similar, manejada desde una distancia determinada o llamada área de confort para la manipulación de sustancias tóxicas que es el lugar donde se va a precautelar la integridad de las personas involucradas en estas tareas.

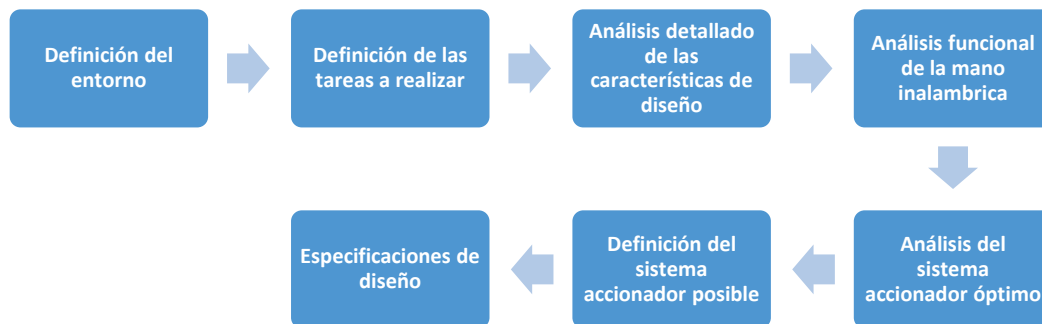


Figura 2.3 Definición de requisitos y especificaciones
(Fuente: Propia)

En esta fase de diseño, se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

2.1.1. Definición del entorno

El entorno donde trabaja la mano inalámbrica es en ambientes hostiles de manipulación donde se mueven los dedos y la mano en manipulación de elementos.

La distancia de manipulación es mínima ya que se ubican los elementos en las mesas de trabajo, el mayor peligro es la inhalación, contacto y aspiración por medio de los poros lo que ocasiona severos problemas en los seres humanos como es el caso de aparición de manchas, cambios en el comportamiento digestivo, alteraciones en el cuerpo y en medidas extremas cáncer.

Los lugares donde se manipulan estas sustancias por lo general son cerrados con filtros de aire y ventilación adecuada en el caso de accidentes se dispone de los elementos necesarios para los primeros auxilios en el personal, esto permite que las personas tengan un tiempo determinado para llegar a una casa de salud y pueda tener su tratamiento adecuado.

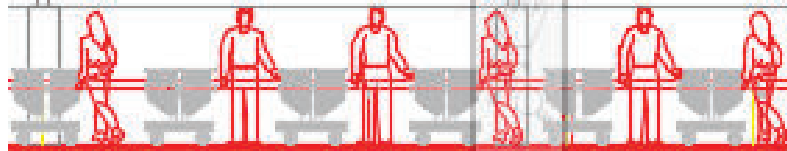


Figura 2.4. Entorno en la manipulación de sustancias tóxicas
(Fuente: Propia)

2.1.2. Definición de las tareas a realizar

Las tareas que se van a realizar con la manipulación de las sustancias tóxicas tienen como finalidad sujetar estos agentes y girar para ubicarles en un recipiente.

El primer caso es tener una mano con giro de muñeca para la manipulación de estas sustancias pudiendo considerar que en un futuro la investigación terminaría en el antebrazo y un brazo completo para tener total control en la manipulación de sustancias tóxicas.

El sistema accionador que se escoja o, mejor dicho, el grado de funcionalidad que debe poseer el mismo depende exclusivamente de este punto, es importante hacer un análisis coherente del mismo.

En el diagrama que se detalla a continuación se observa los elementos estructurales con interacción en la manipulación de ciertos tipos de elementos, que sirve de base para el diseño de la mano y las principales características que debe poseer el prototipo que se va a realizar.

Opposition Type: Virtual Finger 2:	Power						Intermediate			Precision				
	Palm		Pad				Side			Pad		Side		
	3-5	2-5	2	2-3	2-4	2-5	2	3	3-4	2	2-3	2-4	2-5	3
Thumb Abd.														
Thumb Add.														

Figura 2.5. Recorte de la tabla de clasificación de tipos de agarre
(Fuente: Thomas Feix dentro del proyecto GRASP utilizando una herramienta virtual)

Dentro del proyecto GRASP, y gracias a los avances tecnológicos, se ha desarrollado una herramienta virtual que permite representar cada uno de los tipos de agarre. Esta herramienta es la utilizada para generar una segunda tabla de clasificación general de tipos de agarre, la cual se puede observar, parcialmente debido a su tamaño

En la tabla se colocan los tipos de agarres

- poder
- precision
- intermedios

En este caso hay tres tipos de oposiciones definidos por Iberall en 1987 ^[26]

a. Oposición con la yema de los dedos (Pad opposition)

Las fuerzas son aplicadas con las yemas de los dedos en una dirección más o menos paralela a los ejes distal de los dedos.

b. Oposición con la palma (Palm opposition)

La palma de la mano es usada como uno de los lados del agarre mientras que el otro lado lo componen dedos o yemas de dedos. En este caso los ejes de las fuerzas aplicadas son más o menos perpendiculares a la palma.

c. Oposición de lado (Side opposition)

En este caso el costado de uno o más dedos, son usados para fijar el objeto. Las direcciones de las fuerzas son más o menos paralelas a los ejes radiales de los dedos. Por otro lado, nuevamente Iberall en 1997 ^[27], define el concepto de dedo virtual refiriéndose tanto a cada elemento como al grupo de elementos que conforman la mano robótica y que interviene en un agarre para fijar un objeto, sea la palma, el pulgar, un dedo o varios dedos.

2.1.3. Análisis detallado de las características de diseño

Definir los grados de libertad que tiene una mano humana es una tarea compleja, ya que cada articulación o posible articulación en algunos casos están definidas como parciales. Bajo estas condiciones, se puede decir que la mano manipuladora de sustancias toxicas se tendrá entre 12 a 20 grados de libertad (GDL) dependiendo de cuan complejo se quiera hacer la palma o la estructura soporte de los dedos.

Como el número de GDL está relacionado con las tareas que se deseen realizar con la mano robótica el interrogante está en considerar cuáles serán dichos objetivos y en la calidad de destreza que se quiera otorgar a la misma.

Se puede mencionar que cada objeto se puede sujetar en un espacio de tres dimensiones con tres o cuatro puntos de contacto.

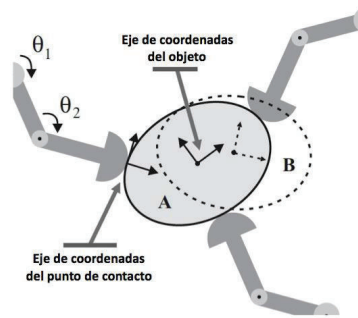


Figura 2.6 Contacto de los dedos en un objeto

(Fuente: Ramiro Cabas. Tesis Doctoral de metodología de diseño para manos robóticas)

La matriz Jacobiana estándar de cada uno de los dedos le interpreta como un manipulador individual teneniendo la siguiente ecuación.

$$v_i = J_i^T f_{tip_i} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Las matrices Jacobianas estándar de cada uno de los dedos se unen para conseguir la matriz jacobiana de la mano en etapa de contacto con algún elemento.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2^T & \dots & \tau_2 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & J_m^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{tip_1} \\ f_{tip_2} \\ \dots \\ f_{tip_m} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Se puede observar como la Matriz Jacobiana de Agarre y la Matriz Jacobiana de la Mano interactúan juntas, tanto en lo que a fuerzas y torques se refiere como también a las velocidades que son necesarias en cada caso [28].

Para el caso de la Planificación del Agarre en tareas de manipulación, se puede decir que hay dos objetivos principales:

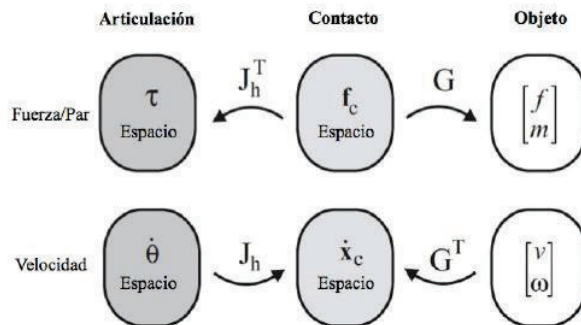


Figura 2.7. Interacción de las Matrices Jacobianas de Agarre de la Mano.

(Fuente: Ramiro Cabas. Tesis Doctoral de metodología de diseño para manos)

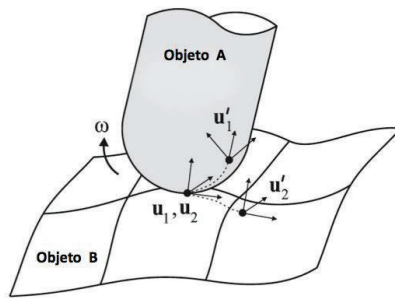


Figura 2.8 Esquema de coordenadas para los contactos rodantes o deslizantes.

(Fuente: Ramiro Cabas. Tesis Doctoral de metodología de diseño para manos)

Existe una complejidad en la manipulación de objetos en cuanto a control se refiere por lo que se aplica a tres niveles.

Nivel Alto: Se genera el sistema de eventos discretos por medio de la planificación y la tarea de agarre que se va a realizar.

Nivel Medio: Se genera los eventos discretos puntuales analizando las transacciones considerando la manipulación e independencia de operación de un dedo con el resto del sistema.

Nivel bajo: Se realiza el control de cada fase y la formulación estática, dinámica y los esfuerzos.

2.1.4. Análisis funcional de la mano inalámbrica

Para tener una funcionalidad adecuada en la mano inalámbrica para el manejo de sustancias tóxicas se hace necesario contar con un sinnúmero de pruebas que se detallarán en los ítems correspondientes, teniendo en cuenta sus movimientos, las principales etapas en la funcionalidad son:

- Estructura de los dedos
- Movimiento de los dedos según los grados de libertad
- Programación de tarjetas electrónicas
- Conexión inalámbrica
- Prototipo

Una vez vistas las características de la mano se debe analizar el número de dedos que va a tener la mano inalámbrica, ya que los dedos son los elementos más importantes de la

mano porque a través de ellos se entra en contacto con el objeto. Teniendo una directa relación con el agarre, manipulación, algoritmos de planificación y control.

Según el estudio realizado por Alba, Armada y Ponticelli [29], se llega a la conclusión de que la preferencia respecto a la cantidad de dedos que deba tener una mano robótica es la configuración antropomórfica, o sea, de cuatro dedos más un pulgar.

Esto es posible gracias a las nuevas tecnologías como la electrónica más eficiente, actuadores más pequeños, nuevos materiales y recursos computacionales más potentes, que permiten conseguir prestaciones cada vez más ambiciosas. Esta tendencia es sencilla de comprender, ya que el objetivo es imitar a la mano humana. En la actualidad, aproximadamente la mitad de las manos robóticas poseen esta configuración.

2.1.5. Análisis del sistema accionador óptimo

El sistema accionador más sencillo es aquel formado por un solo actuador que ofrece a un sistema robótico los tres estados necesarios. Un actuador está formado por un transformador de energía, un transmisor de movimiento y en algunos casos parte del transformador de datos en eventos. El tipo de estado que puede otorgar un actuador a un sistema robótico viene dado por la configuración entre el transformador de energía y el tipo de transmisor de movimiento.

Considerando como ideal el sistema de movimiento que promueve la transformación de movimientos.

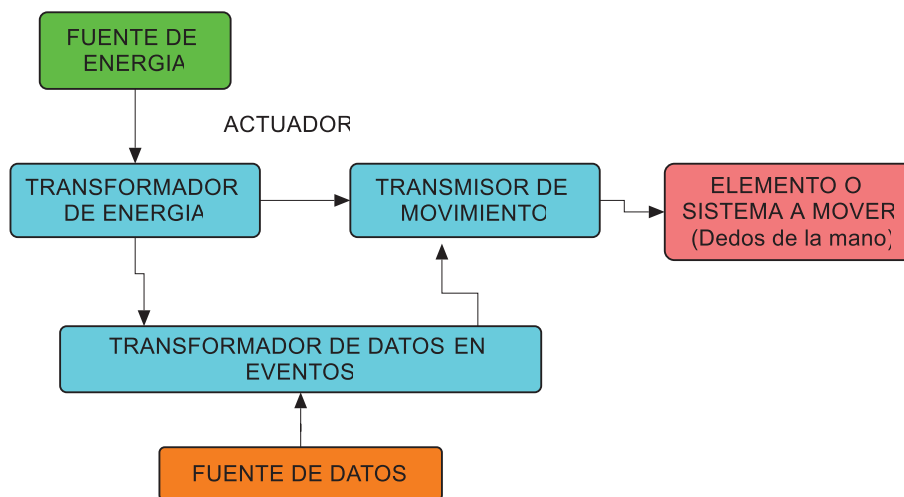


Figura 2.9. Componentes de un actuador
(Fuente. Propia)

2.1.6. Definición del sistema accionador posible

Una vez definido el sistema accionador ideal, se analizan diferentes configuraciones de actuadores directos, Actuadores Multi-Estados (AME) y mecanismos que permitan diseñar un sistema accionador posible y que alcance con la mayor calidad al ideal. En este punto quizás es donde es imprescindible el desarrollo de un subsistema que valide el sistema accionador.

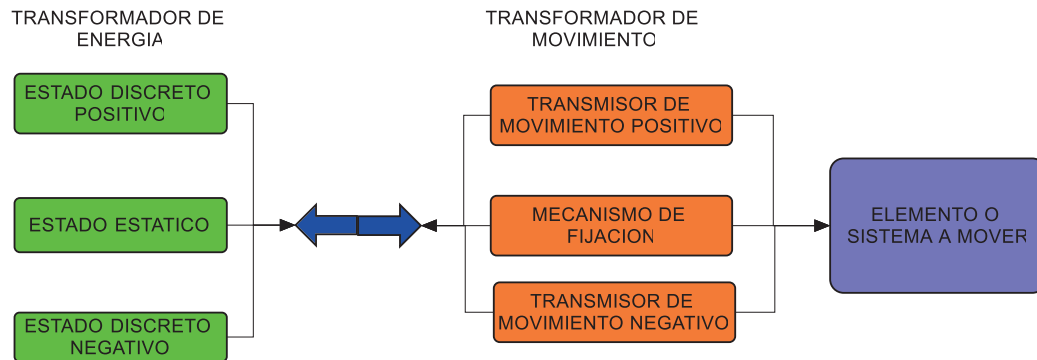


Figura 2.10. Configuración genérica de un actuador
(Fuente: Propia)

La metodología para el diseño de manos robóticas multi estado nos muestra que es necesario desarrollar y diseñar un sistema accionador formado por actuadores que provea una cantidad de estados superiores a un actuador normal de tres estados, los mismos que están compuestos por las siguientes consideraciones:

- Transformador de energía
- Transformador de datos en eventos
- Sistema de mecanismos

Los tres al unirse como un complemento me dan como resultado un grado de libertad (GDL) asociado, la figura a continuación muestra un transformador de energía con tres estados discretos en este caso un motor eléctrico que con ayuda del transformador de datos en eventos pueden pasar a estados relativos, siendo los mecanismos de tres estados agrupan un n conjunto de tres estados dando a cada grado de libertad la funcionalidad de un sistema robótico permitiendo tener un único transformador de energía convencional.

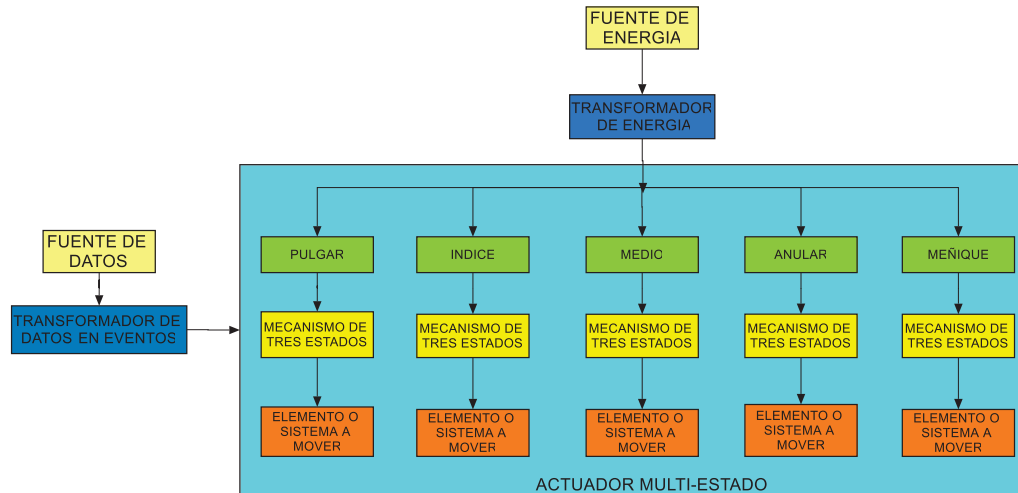


Figura 2.11. Configuración de un actuador multi estado

(Fuente: Propia)

2.1.7. Especificaciones de diseño

Dentro de las especificaciones del diseño se considera los actuadores que nos servirán para el movimiento de cada uno de los dedos teniendo la siguiente propuesta:

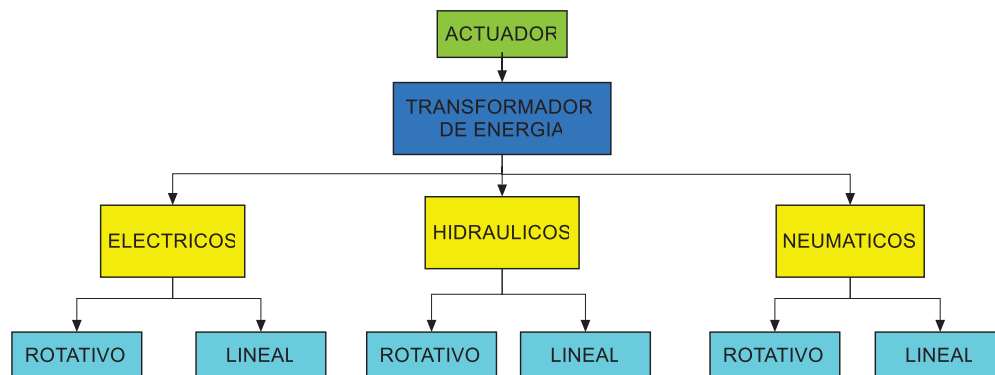


Figura 2.12. Transformadores de energía

(Fuente: Propia)

Cada uno de los actuadores en cuanto a los eléctricos, neumáticos e hidráulicos tienen su grado de complejidad en cuanto a la estación de generación al actuador como se presenta en los siguientes casos:

En el caso de actuadores neumáticos e hidráulicos tienen una desventaja en cuanto a la utilidad y la maniobra de la mano para el manejo de sustancias tóxicas como es el caso del compresor en el caso neumático y en el caso hidráulico la bomba hidráulica o acumuladores, por este motivo la mejor alternativa son los actuadores eléctricos.

Los actuadores eléctricos se detallan a continuación para escoger la mejor opción.

Tabla II.1. Actuadores eléctricos

Motor	Compra	Instalación	Mantenimiento	Aplicación
CC	Alto	Medio	Alto	Laminadoras Extrusoras Elevación Enrolladoras Ventilación Cintas transportadoras
CA	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Accionamiento directos con contactores Accionamiento con arrancadores electrónicos Variadores de velocidad de poca potencia y precisión Aplicaciones sin regulación
Rotor Bobinado	Alto	Medio	Alto	Arranque de motores de decenas y centenas KW Regulación de maniobras de elevación de decenas y centenas KW
Paso a Paso	Bajo	Bajo	Bajo	Industria Textil Máquinas de envase y embalaje Equipos Medicos
Servo	Alto	Medio	Bajo	Máquinas de Herramientas CNC Robótica

(Fuente: Propia)

Luego de un análisis a la tabla 2.1 de los actuadores eléctricos se considera como mejor opción los servomotores, los mismos que se seleccionan según el torque que se va a utilizar en la aplicación deseada.

La transmisión que se tiene con los actuadores eléctricos y en este caso con los servomotores como mejor opción tenemos:

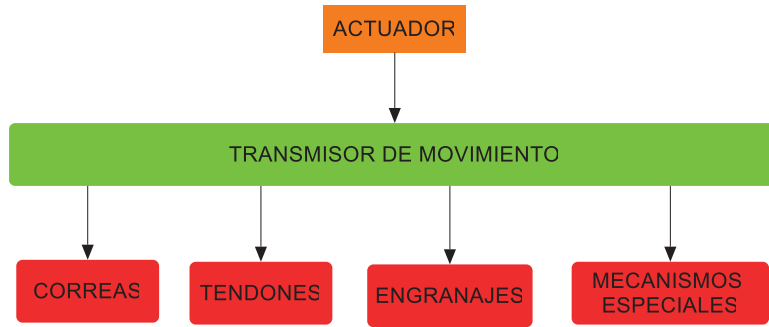


Figura 2.13. Clasificación de transmisión de movimiento con actuadores eléctricos.

(Fuente: Propia)

Las clasificaciones en los transmisores de movimiento se registrarán al:

- Modelado
- Espacio
- Fuerza
- Costo
- Mantenimiento

Tabla II.2 Elección del transmisor de movimientos para la mano

	MODELADO	FUERZA	COSTO	ESPACIO	MANTENIMIENTO	TOTAL
CORREAS	3	4	3	4	4	18
TENDONES	4	3	4	5	5	21
ENGRANAJES	2	5	2	2	2	13
MECANISMOS ESPECIALES (MEMBRANA – MUSCULO)	3	5	2	2	2	14

(Fuente: Propia)

Dentro de estas propuestas una primera opción es la ubicación de tendones por medio de cables por que cumple con las siguientes características:

- El traslado de un sitio a otro es mas sencillo
- No ocupan demasiado espacio
- Son flexibles
- Costo bajo
- Facilmente controlable
- No requiere mantenimiento

Una de las alternativas por el espacio en la mano inalámbrica es el hilo nylon, considerando que este material en un diámetro de 0,30 mm tiene un aguante de 5,5 Kg. en peso muerto, en las versiones actuales y debido a la tecnología podemos encontrar en el mercado diferentes marcas con una combinación de diferentes materiales de nylon que nos proporcionan diámetros finos con una gran capacidad de resistencia y superando los 5 kg de resistencia.

2.2. Diseño y desarrollo de subsistemas

Una vez concluido las especificaciones y los requisitos se pasan a la siguiente fase que es el diseño y desarrollo de la mano inalámbrica con miras en comprobar su funcionamiento considerando los siguientes subsistemas:

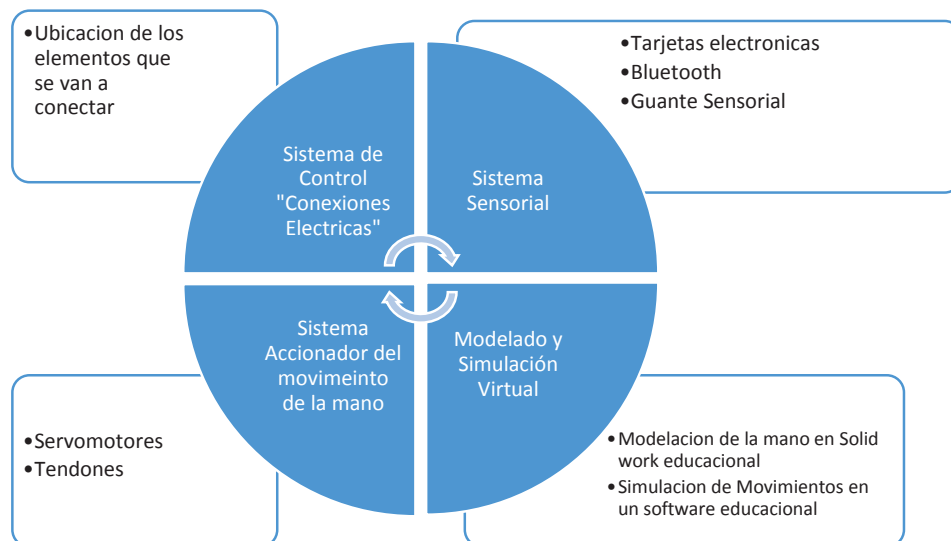


Figura 2.14. Diseño y desarrollo de subsistemas

(Fuente. Propia)

➤ Sistema de Control

El sistema de control se define por las conexiones eléctricas que se van a realizar en la mano inalámbrica para que cumpla con las prestaciones necesarias en la manipulación de sustancias tóxicas.

Dentro de los elementos necesarios para la conexión tenemos:

- Arduino Leonardo
- Bluetooth, Master- Esclavo
- Fuente de Poder
- Guante Sensorial

2.2.1. Conexiones Eléctricas

Para realizar las conexiones eléctricas y este a su vez la programación se tiene como alternativa el uso del Arduino que es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. Arduino Leonardo R3 es la primera placa de desarrollo de Arduino que utiliza un microcontrolador ATmega32U4 el cual tiene incorporado el puerto USB eliminando la necesidad de otro chip para la comunicación con la PC lo que permite que la placa sea más barata y más simple. Otra de sus ventajas es que hay bibliotecas de código para el puerto USB lo que permiten que la placa pueda emular un teclado de computadora, un ratón, y más. Arduino Leonardo R3 cuenta con 20 entradas / salidas digitales (de los cuales 7 se pueden utilizar como salidas PWM y 12 entradas como analógicas), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión micro USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reset. Se puede alimentar conectándolo a un ordenador con un cable USB o una batería. Al ser una plataforma abierta las placas pueden fabricarse en todo el mundo, por lo que cabe aclarar que es idéntica en todos sus componentes que la fabricada en Italia, pero su construcción es en China, aunque es compatible 100% con el software y hardware Arduino

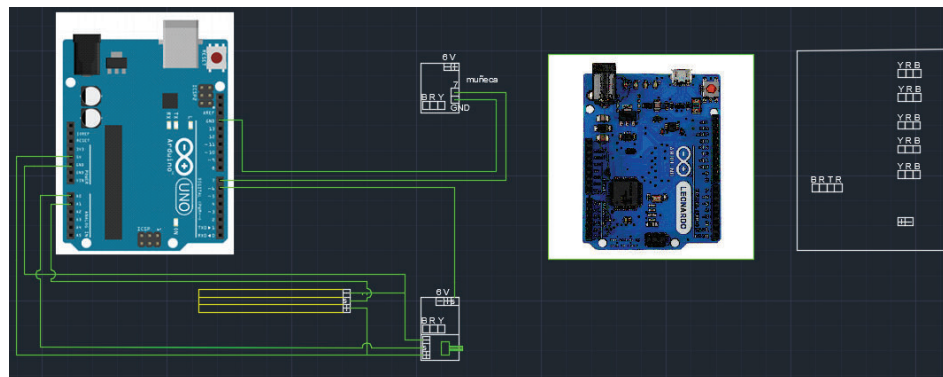


Figura 2.15. Conexiones con arduino.

(Fuente: Propia)

2.2.2. Sistema Sensorial

El sistema sensorial viene integrado por los siguientes elementos:

- Guante
- Cable de conexiones
- Fuente de energía
- Bluetooth
- Sensores flexibles

2.2.3. Simulación Virtual

La mano inalámbrica una vez diseñada se debe enviar a simulaciones de ensamble para verificar los parámetros de unión entre los eslabones y articulaciones.

La simulación se puede realizar en dos entornos cada uno con su complejidad.

- Solid work educacional
- V- RED- PRO- Educacional

Para utilizar un simulador se considera la versatilidad y el entorno más amigable, en el caso de la mano inalámbrica se utiliza el V-RED-PRO- Educacional, pese a que Solid work es un buen paquete para el área de diseño, en donde se realizó cada una de las piezas de la mano inalámbrica, la simulación se realiza en el paquete mencionado donde se maneja tablas dinámicas, programación y ubicación de elementos estáticos y rotacionales.

2.2.4. Sistema accionador para el movimiento de la mano

El sistema accionador viene compuesto por los siguientes elementos.

- Servomotores
- Tendones

La selección de los servomotores que cumpla con las necesidades de manejo de sustancias tóxicas viene dada por la fuerza que se va a utilizar, la fuente de energía en este caso se necesita que sea independiente y transportable por una fuente de 6v, el servomotor será de corriente continua para la precisión de los movimientos. El giro será en ambos sentidos para los movimientos de flexión y extensión de los dedos o traducido en apertura y cierre de los elementos de la mano.

Dentro de este sistema se considera algunas alternativas que darán la funcionalidad y movimientos deseados considerando:

- Presupuesto
- Diseño
- Funcionalidad

2.3. Diseño y desarrollo del prototipo final.

La mano inalámbrica para el manejo de sustancias tóxicas tiene tres prototipos que se detallarán a continuación.



Figura 2.16. Diseño y desarrollo del prototipo final

(Fuente: Propia)

2.3.1. Prototipo 1

En el prototipo 1 se considera las siguientes características:

- Se ubican cinco dedos considerando las dimensiones adquiridas por medio de la cadena de las bicicletas
- Los tendones son por medio del cable de freno de las bicicleta
- La mayoría de sus partes son reutilizadas
- La mano no cuenta con muñeca
- Este prototipo es alámbrica por medio de potenciómetros para verificar su utilidad.
- Las conexiones son sencillas y se realiza por medio de circuitos en un protoboard.
- Fuente de voltage de 6V para los servomotores

El desarrollo del primer prototipo comprende de las siguientes etapas:

- Recolección de información bibliográfica y linkográfica.
- Procesamiento de datos obtenidos.
- Diseño y construcción mecánica.
- Diseño y ensamble de la parte electrónica.
- Pruebas y ajustes finales.

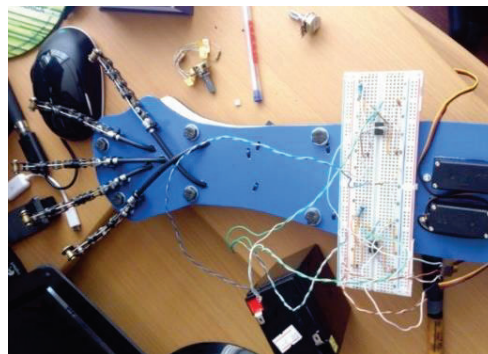


Figura 2.17. Prototipo 1 de la mano

(Fuente: Propia)

2.3.2. Prototipo 2

En el prototipo 2 se considera las siguientes características:

- Se ubican cinco dedos considerando las dimensiones adquiridas por medio de la cadena de las bicicletas
- Los tendones son por medio del cable de freno de las bicicleta
- La mayoría de sus partes son reutilizadas
- La mano no cuenta con muñeca
- Este prototipo es inalámbrico por medio de sensors flex, Arduino y bluetooth para verificar su utilidad.
- Las conexiones se realizan en el Arduino previa programación.
- Fuente de voltage de 6V para los servomotores
- Se utiliza un guante sensorial.
- El diseño es menos rustico y más acorde en la manipulación de objetos.
- Se tiene una cubierta para los agentes tóxicos

El desarrollo del segundo prototipo comprende de las siguientes etapas:

- Recolección de información bibliográfica y linkográfica.
- Procesamiento de datos obtenidos.
- Diseño y construcción mecánica.
- Diseño y ensamble de la parte electrónica y establecimiento de la comunicación (bluetooth).
- Pruebas y ajustes finales.



Figura 2.18. Prototipo 2 de la mano

(Fuente: Propia)

En la imagen que se ubica a continuación muestra la comparación de los dos prototipos y los cambios que tienen en cuanto al diseño y la ubicación de los dedos. El segundo prototipo tiene una mejor distribución de los dedos y la conexión inalámbrica para el control a distancia.

Como primera versión se tiene un prototipo rustico que es el modelo de la mano derecha, la segunda versión mejorada es el modelo de la mano izquierda considerando las modificaciones pertinentes para la manipulación de sustancias tóxicas como es el caso de la comunicación inalámbrica y el interfaz entre las galgas flexo métricas con el arduino.



Figura 2.19. Prototipo 1 y 2 en ubicación para la manipulación de elementos

(Fuente: Propia)

2.3.3. Prototipo Final

El prototipo 3 o final viene de algunas pruebas y corrección de errores realizados en el ensamblaje y comunicación de las anteriores llegando a tal punto que se tiene ya un estudio detallado de la modelación, simulación y pruebas, considerando aplicaciones ingenieriles de alta calidad.

En el prototipo 3 o final se considera las siguientes características:

- Modelación de cada uno de los dedos en un software de diseño en este caso solidwork educacional
- Los tendones son por medio del cable de pesca o tambien llamado nylon resistente.
- Toda la mano es ensamblada e impresa en las impresoras 3D
- La mano tiene la muñeca que es de vital importancia para el giro de los elementos que sujete.
- Este prototipo es inalámbrico por medio de sensors flex, Arduino master- esclavo y bluetooth.
- Se realiza el movimiento de cada parte de los dedos en el software V-RED-PRO Educacional
- Las conexiones se realizan en el Arduino previa programación.
- Fuente de voltage de 6V para los servomotores
- Se utiliza un guante sensorial.
- El diseño puede manipular objetos.

- Tiene una cubierta para los agentes tóxicos



Figura 2.20. Prototipo final

(Fuente: Propia)

El guante sensorial es mucho más flexible para el comando de los movimientos de cada uno de los dedos de la mano a una distancia determinada.



Figura 2.21. Guante sensorial.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS

La metodología propuesta para la mano robótica multiestado relacionado a la manipulación de sustancias tóxicas parte de los parámetros antes mencionados y que en este capítulo se muestran los resultados obtenidos en años de investigación.

3.1. Informe de Evaluación Ergonómica

El método REBA es un método donde involucra cada una de las manipulaciones de los elementos en este caso de la manipulación de las sustancias tóxicas.

a. Introducción y parámetros de evaluación

La evaluación ergonómica tiene por objeto detectar el nivel de presencia, en los puestos evaluados, de factores de riesgo para la aparición, en los trabajadores que los ocupan, de problemas de salud de tipo disergonómico. Existen diversos estudios que relacionan estos problemas de salud de origen laboral con la presencia, en un determinado nivel, de dichos factores de riesgo. Es por lo tanto necesario llevar a cabo evaluaciones ergonómicas de los puestos para detectar el nivel de dichos factores de riesgo. Aunque las legislaciones de cada país son más o menos exigentes, es obligación de las empresas identificar la existencia de peligros derivados de la presencia de elevados riesgos ergonómicos en sus puestos de trabajo. ^[28]

La identificación inicial de riesgos (nivel de análisis básico) permite la detección de factores de riesgo en los puestos. En caso de ser estos detectados se procederá con el nivel avanzado.

Buenos indicadores de la presencia de riesgos son, por ejemplo: la presencia de lesiones agudas (lumbalgias, fatiga física, hernias discales, ciáticas...), lesiones crónicas (epicondilitis, síndrome del túnel carpiano...), o enfermedades profesionales entre los trabajadores de un determinado puesto. Los análisis estadísticos de los registros médicos de la empresa pueden ser de gran ayuda para esta detección inicial de riesgos.

Para llevar a cabo la identificación inicial de riesgos es conveniente el empleo de listas de identificación de riesgos como la "Lista de comprobación ergonómica" o el "Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en la PYME del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España". La aplicación de las listas de identificación inicial de riesgos parte de la agrupación de los puestos de la empresa que tengan características similares en cuanto a tareas realizadas, diseño del puesto y

condiciones ambientales. En una segunda fase se aplica la lista de identificación de riesgos a cada puesto o a cada tipo de puestos si han sido agrupados.

En el nivel avanzado de análisis se evalúan la amplitud de los factores de riesgo detectados (mediante la evaluación inicial de riesgos si se ha realizado previamente). Para evaluar el nivel de riesgo asociado a un determinado factor de riesgo existen diversos métodos para apoyar al evaluador. Cada factor de riesgo puede estar presente en un puesto en diferentes niveles. Así, por ejemplo, debe evaluarse si la repetitividad de movimientos, que es un factor de riesgo para la aparición de Transtornos Músculo-Esqueléticos (TMEs) en la zona cuello-hombros, presenta un nivel suficiente en el puesto evaluado como para considerar necesaria una actuación ergonómica.

Dentro de los datos que se consideran para este tipo de análisis son:

- Nombre del evaluador
- Fecha de la evaluación
- Nombre del trabajador
- Sexo
- Edad
- Antigüedad en el puesto
- Tiempo que ocupa el puesto por jornada
- Duración de la jornada laboral

En el caso de estudio se realiza para una jornada de trabajo total de 8 horas y parcial de 2 y 4 horas en la manipulación de sustancias tóxicas, además de la edad y sexo del trabajador.

Para el Informe de la evaluación ergonómica se considera los siguientes parámetros.

- Posición del tronco está entre 20 y 60 grados de flexión o más de 20 grados de extensión, ubicado en el grupo A que corresponde a cuello, tronco y extremidades inferiores.
- Grupo B: Cuello, tronco y extremidades inferiores considerando la posición del cuello extendido o flexionado más de 20 grados, torsión o inclinación lateral.
- Posición de las piernas, soporte unilateral, soporte ligero o postura inestable
- Posición del brazo está entre 46 y 90 grados de flexión, el ángulo de flexión del brazo del trabajador, ubicado en el grupo B: extremidades superiores de la zona derecha del cuerpo
- Posición del antebrazo está flexionado por debajo de 60 grados o por encima de 100 grados
- Posición de la muñeca está entre 0 y 15 grados de flexión o extensión

Posición del brazo está entre 20 grados de flexión o 20 grados de extensión, ángulo de flexión del brazo del trabajador y si el hombro está elevado, ubicado en el Grupo B: extremidades superiores de la zona izquierda del cuerpo

- Posición del antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión

Posición de la muñeca está entre 0 y 15 grados de flexión o extensión, existe torsión o desviación lateral de la muñeca.

Tipo de actividad muscular y fuerzas ejercidas para la evaluación ergonómica

- Fuerzas ejercidas, tipo de agarre y tipo de actividad muscular, la carga o fuerza es menor de 5 kg.
- Actividad muscular y fuerzas ejercidas considerando si el agarre con la mano es aceptable pero no ideal o el agarre es aceptable utilizando otras partes del cuerpo
- Actividad muscular, si una o más partes del cuerpo permanecen estáticas, por ejemplo, soportadas durante más de 1 minuto.

3.1.1. Resultado del Informe de evaluación ergonómica en la zona derecha

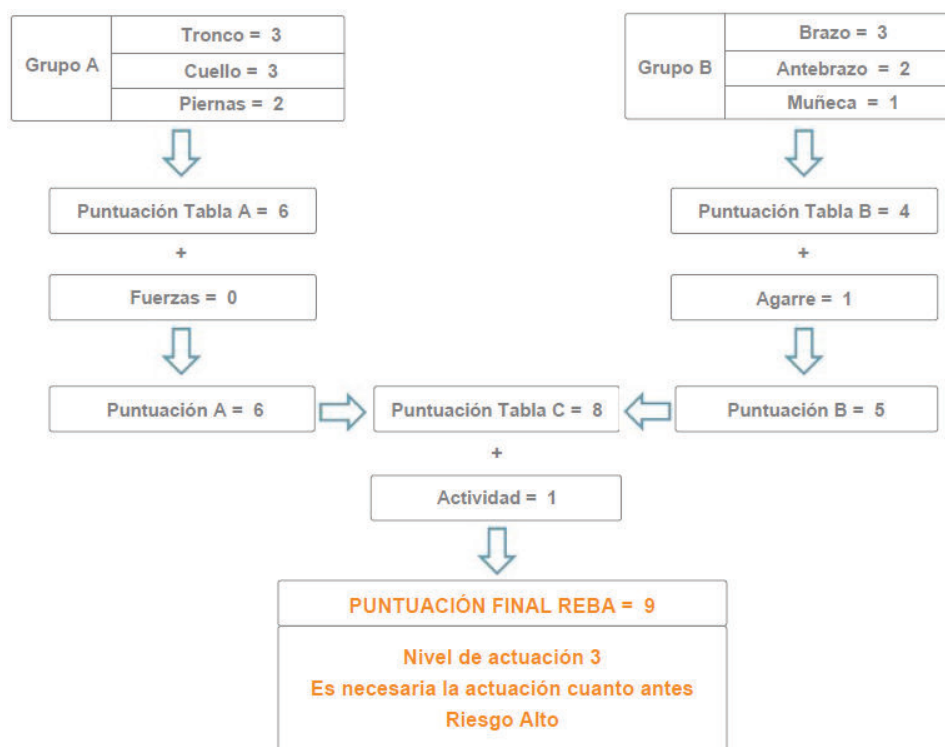


Figura 3.1. Resultado de la evaluación ergonómica del lado derecho. ^[19]

(Fuente: Ergonautas.com/ Método REBA)

PUNTUACIÓN FINAL REBA = 9

Es necesaria la actuación inmediata debido a que se encuentra en Riesgo Alto.

3.1.2. Resultado del Informe de evaluación ergonómica en la zona izquierda

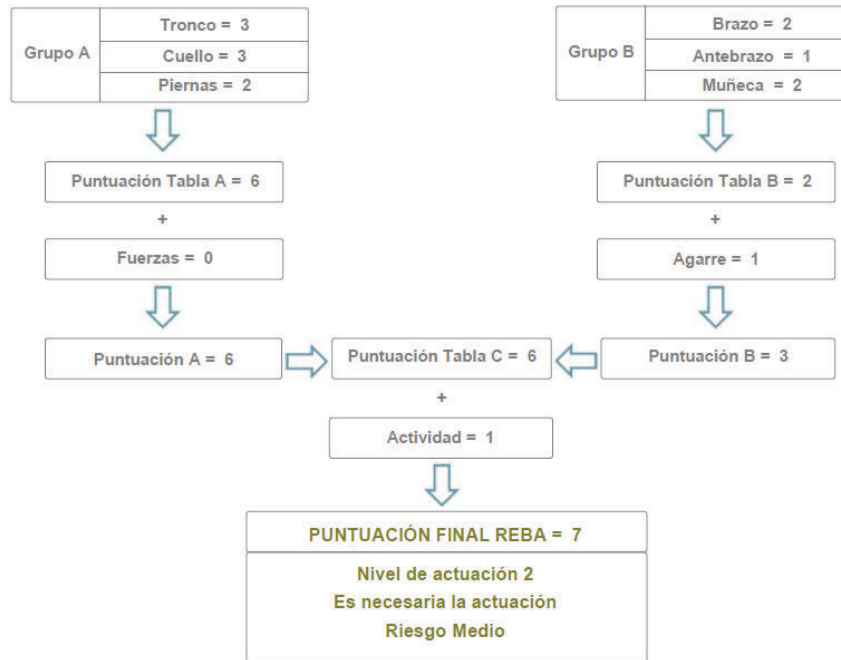


Figura 3.2. Resultado de la evaluación ergonómica del lado izquierdo. ^[19]

(Fuente: Ergonautas.com/ Método REBA)

Las siguientes tablas muestran el resumen de las diferentes puntuaciones obtenidas para la zona derecha e izquierda del cuerpo del trabajador/a, así como las puntuaciones finales y niveles de actuación y riesgo propuestos por el método para cada lado del cuerpo.

Grupo A					
Tronco	Cuello	Piernas	Puntuación Tabla A	Fuerzas	Puntuación A
3	3	2	6	0	6

Grupo B					
Brazo	Antebrazo	Muñeca	Puntuación Tabla B	Agarre	Puntuación B
3	2	1	4	1	5

Puntuación C	Actividad
8	1

Puntuación FINAL	Nivel de Actuación	Nivel de riesgo
9	Nivel de actuación 3 Es necesaria la actuación cuanto antes	Riesgo Alto

Figura 3.3. Resumen de la evaluación ergonómica del lado derecho

(Fuente: Ergonautas.com/ Método REBA)

Como se puede observar el lado derecho tiene un alto grado de riesgo por lo que la actuación debe ser inmediata y de esta manera dar soluciones al movimiento o remplazo de este tipo de movimiento.

Grupo A					
Tronco	Cuello	Piernas	Puntuación Tabla A	Fuerzas	Puntuación A
3	3	2	6	0	6

Grupo B					
Brazo	Antebrazo	Muñeca	Puntuación Tabla B	Agarre	Puntuación B
2	1	2	2	1	3

Puntuación C	Actividad
6	1

Puntuación FINAL	Nivel de Actuación	Nivel de riesgo
7	Nivel de actuación 2 Es necesaria la actuación	Riesgo Medio

Figura 3.4. Resumen de la evaluación ergonómica del lado izquierdo

(Fuente: Ergonautas.com/ Método REBA)

3.1.3. Conclusiones de la evaluación ergonómica

- La identificación inicial de riesgos (nivel de análisis básico) permite la detección de factores de riesgo en los puestos. En caso de ser estos detectados se procederá con el nivel avanzado.
- Buenos indicadores de la presencia de riesgos son, por ejemplo: la presencia de lesiones agudas (lumbalgias, fatiga física, hernias discales, ciáticas...), lesiones crónicas (epicondilitis, síndrome del túnel carpiano), o enfermedades profesionales entre los trabajadores de un determinado puesto. El análisis estadístico de los registros médicos de la empresa puede ser de gran ayuda para esta detección inicial de riesgos.
- Para llevar a cabo la identificación inicial de riesgos es conveniente el empleo de listas de identificación de riesgos como la "Lista de comprobación ergonómica" o el "Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en la PYME del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España". La aplicación de las listas de identificación inicial de riesgos parte de la agrupación de los puestos de la empresa que tengan características similares en cuanto a tareas realizadas, diseño del puesto y condiciones ambientales. En una segunda fase se aplica la lista de identificación de riesgos a cada puesto o a cada tipo de puestos si han sido agrupados.

- En el nivel avanzado de análisis se evalúan la amplitud de los factores de riesgo detectados (mediante la evaluación inicial de riesgos si se ha realizado previamente). Para evaluar el nivel de riesgo asociado a un determinado factor de riesgo existen diversos métodos para apoyar al evaluador. Cada factor de riesgo puede estar presente en un puesto en diferentes niveles. Así, por ejemplo, debe evaluarse si la repetitividad de movimientos, que es un factor de riesgo para la aparición de Transtornos Músculo-Esqueléticos (TMEs) en la zona cuello-hombros, presenta un nivel suficiente en el puesto evaluado como para considerar necesaria una actuación ergonómica.
- Los estudios realizados por medio de manipulación y exposición a sustancias tóxicas da como resultado en la zona derecha con una puntuacion de 9 y actuacion 3 que quiere decir de actuacion inmediata por riesgo alto, en este caso una alternativa a este problema es la creación de la mano derecha para el manejo de estos agentes químicos.

3.2. Diseño de la mano Inalámbrica

Para el diseño de la mano inalámbrica se tiene como primer paso analizar cada uno de los elementos que consta en una mano real como se muestra en la figura a continuación.

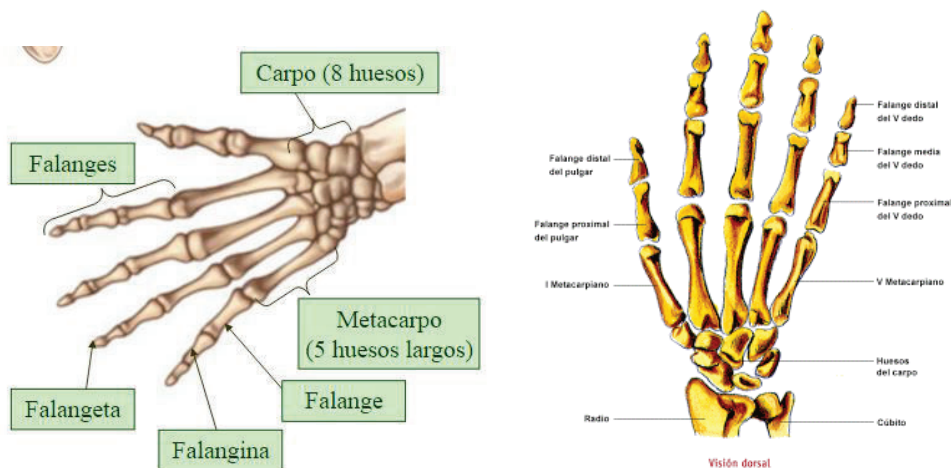


Figura 3.5. Partes de una mano humana

(Fuente: Sistema Musco esquelético, <http://jonybiologia.blogspot.com/>)

Las medidas necesarias son todas las longitudes más representativas del brazo derecho, estas son:

- Longitud de la mano
- Alcance mínimo del brazo hacia delante con agarre
- Alcance mínimo del brazo hacia delante sin agarre
- Largo del brazo a 90° con respecto a la pared
- Diámetro de agarre interior

Para crear una mano con proyección a tener en un tiempo determinado una extremidad superior, se toma las medidas de varios trabajadores y de esta manera garantizar la proporcionalidad de la mano que se va diseñar.

Tabla III.1. Medidas de la extremidad superior.

Edad (años)	26	24	44	27	31	28	25	29
Número de trabajadores	1	2	3	4	5	6	7	8
Mediciones realizadas (Número de mediciones)	10	10	10	10	10	10	10	10
Longitud de la mano (cm)	17,5	18	19	18,5	20	18	17	19
Diámetro de agarre interior (cm)	4,5	5	5,5	5	6,5	4,5	4	6
Largo del brazo a 90° con respecto a la pared (cm)	80	82,5	83,5	83	85	83	83	84
Antebrazo hacia delante con agarre (cm)	35	35,5	37	37	38,5	35	35,5	38
Longitud el antebrazo (cm)	25	24	29	24,5	30	24	24	28

(Fuente: Propia)

Una vez obtenido las medidas del brazo en general, se procede a realizar las medidas de cada uno de los dedos para tener como base en el diseño y modelado de la mano inalámbrica con la similitud deseada a una mano humana.

Tabla III.2. Medidas de los dedos de la mano en cm.

Dedos de la mano	Huesos (Medidas en cm)	Número de Trabajadores									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Meñique	Falangeta	1,85	2	2,05	1,9	2,1	2	1,9	2	2	1,95
	Falangina	1,75	1,8	1,9	1,8	1,85	1,7	1,7	1,85	1,8	1,85
	Falange	3,65	3,7	3,6	3,7	3,9	3,6	3,5	3,5	3,55	3,6
Anular	Falangeta	1,9	2,1	2,15	1,9	2,3	2,2	2	2,2	2,1	2,2
	Falangina	2	1,9	1,85	2,1	2	2,2	2,3	1,8	2	2,1
	Falange	4,25	4,5	4,6	4,9	4,7	4,4	4,3	4,6	4,5	4,5

Medio	Falangeta	2,4	2,4	2,4	2,5	2,4	2,4	2,45	2,35	2,4	2,45
	Falangina	2,4	2,25	2,3	2,25	2,4	2,45	2,5	2,4	2,35	2,4
	Falange	4,65	5	5,1	4,5	5,2	4,9	4,8	5,4	4,9	5
Índice	Falangeta	2,3	2,2	2,24	2,5	2,35	2,4	2,5	2,45	2,35	2,4
	Falangina	2,38	2,3	2,35	2,29	2,5	2,3	2	2,3	2,35	2,4
	Falange	4,1	4	4,3	4,25	4,5	4,3	4,4	4,2	4,25	4,3
Pulgar	Falangeta	2,35	2,5	2,4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,5	2,5	2,6
	Falangina	3,95	4,2	4,3	4	4,5	4,4	4	4,4	4,3	4,5

(Fuente: Propia)

Las medidas antropométricas serán similares al promedio de la mano de los trabajadores, en este caso se calculará el percentil, el percentil se enfoca en calcular las medidas requeridas excluyendo un cierto porcentaje de la población, por ejemplo, si se quiere calcular un percentil de (P95) se refiere a que el 95% de la población estará incluida en las medidas dejando un 5 % fuera.

Tabla III.3. Medidas promedio de cada una de las partes de la mano

Dedos de la mano	Partes de los dedos	Promedio (cm)	σ (cm)	P 95 (cm)
Meñique	Falangeta	1,975	0,0845	2,11
	Falangina	1,9	0,0729	1,97
	Falange	3,65	0,1294	3,86
Anular	Falangeta	1,9	0,1474	2,14
	Falangina	2	0,1731	2,18
	Falange	4,25	0,2154	4,6
Medio	Falangeta	2,415	0,0776	2,49
	Falangina	2,37	0,1499	2,52
	Falange	4,65	0,2945	5,13
Índice	Falangeta	2,3	0,1147	2,48
	Falangina	2,317	0,2478	2,56
	Falange	4,1	0,1591	4,36
Pulgar	Falangeta	2,35	0,1557	2,6
	Falangina	3,95	0,2137	4,3

(Fuente: Propia)

En las tablas anteriores se tiene las dimensiones de los dedos y en general de la mano por lo que se procede a la modelación de la mano, a la par verificando los grados de movimiento y de libertad que tiene cada dedo.

Para efectos de simulación de los grados que puede manejar cada dedo y esto a su vez me permite ingresar en Matlab para ver los rangos y proceder a la programación de los elementos físicos para el funcionamiento de la mano inalámbrica.

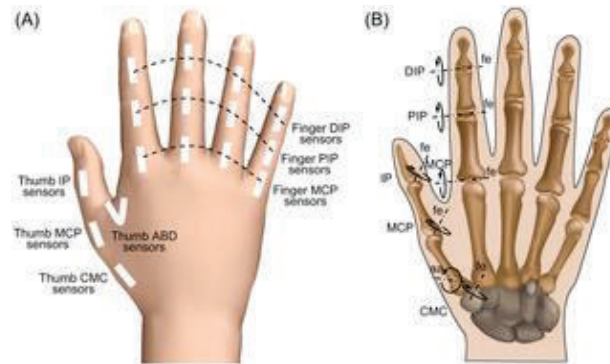


Figura 3.6. Movimiento de los dedos de la mano humana

(Fuente: Artículo de creacionista de la mano, <http://francis.naukas.com/2016/03/13/francis-en-rosavientos-3/>)

Una vez obtenidas las medidas y los rangos de movilidad, se procede a realizar el diseño de cada parte de la mano como es el caso de los dedos, palma y muñeca, cada uno de estos elementos se encuentran hechos en solidwork.

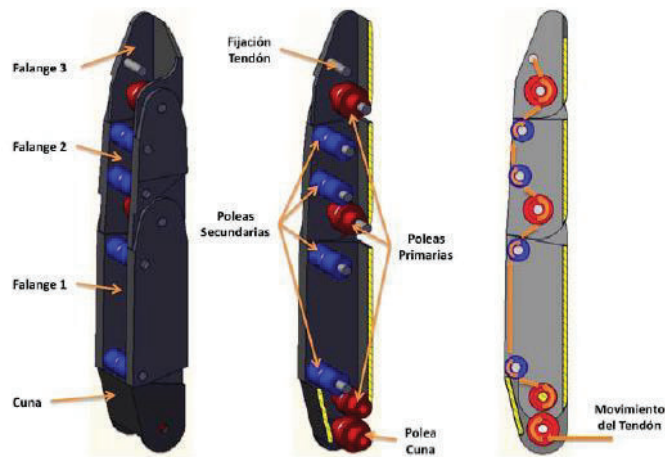


Figura 3.7. Ubicación del tendón en cada uno de los dedos de la mano inalámbrica

(Fuente: Ramiro Cabas. Tesis Doctoral de metodología para manos robóticas)

El diseño se realiza previo la selección del mejor elemento de transmisión que es el tendón en este caso se va a utilizar un cable de nylon de pesca por las características que tiene este material.

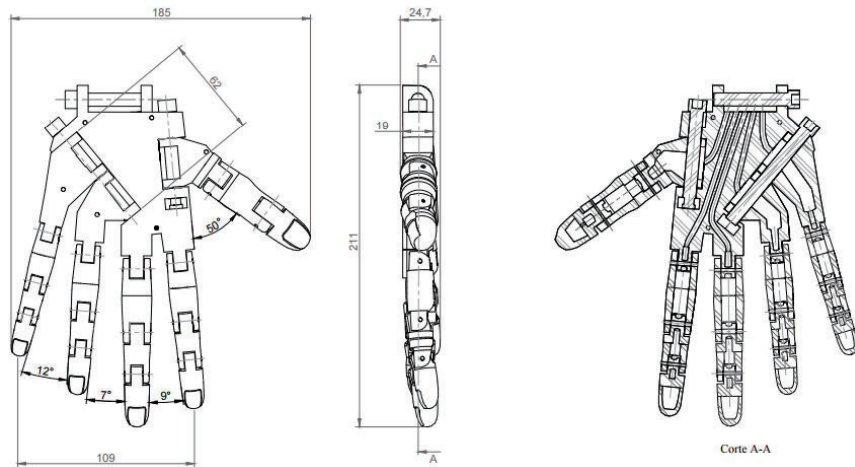


Figura 3.8. Diseño de la mano inalámbrica
(Fuente: Propia)

Cada uno de los dedos se encuentran con dimensiones establecidas y de acuerdo al análisis previamente realizado considerando el percentil de 95 para cada una de las medidas.

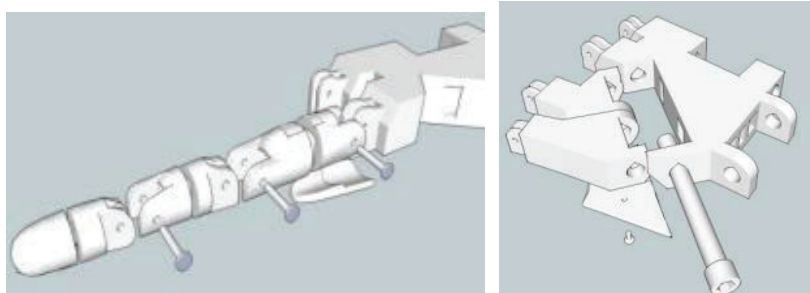


Figura 3.9. Diseño y ensamble del dedo y la palma
(Fuente: Propia)

En el ensamblaje de los dedos se ubican las juntas de unión considerando los eslabones y articulaciones para obtener el movimiento de una mano real.

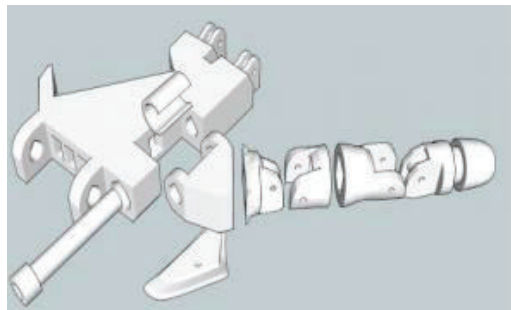


Figura 3.10. Dedo pulgar en unión a la palma
(Fuente: Propia)

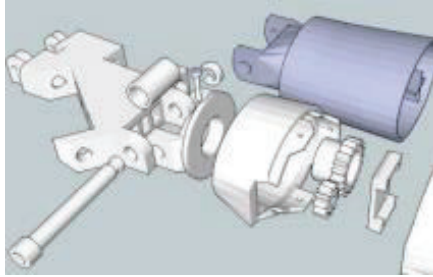


Figura 3.11. Estructura de la muñeca
(Fuente: Propia)

La mano se encuentra diseñada en su totalidad y similar a una mano real considerando que las medidas son la media de los datos obtenidos.

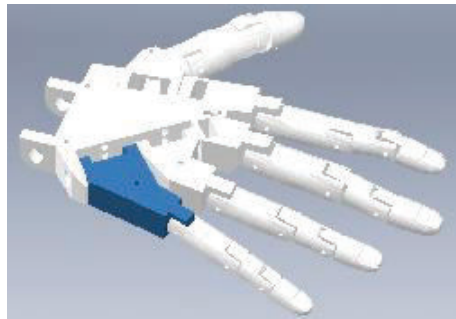


Figura 3.12. Ensamble en Solidwork de la mano que se va a imprimir.
(Fuente: Propia)

La simulación de movimientos consiguiendo el efector final se muestra en el análisis cinemático de la mano inalámbrica por medio de la tabla DHS en cada uno de los dedos.

3.3. Análisis cinemático de la mano inalámbrica

Una vez obtenido el diseño favorable para la impresión de la mano, se realiza un análisis geométrico-dimensional de cada uno de los dedos que arroja como resultado la obtención de los parámetros Denavit – Hartenberg (D-H) necesarios para proceder con la simulación de la cinemática directa.

La cinemática directa es la determinación de la posición que alcanzan el efector final, al proporcionar ciertos desplazamientos angulares o lineales a cada una de las juntas que conforman la totalidad del mecanismo. Para tener estos desplazamientos se utilizará el método Denavit - Hartenberg estándar (DHS) con la ayuda informática del software Matlab. Lo primero que debe hacerse es seguir el algoritmo desarrollado y utilizado por el método, que se resume en los siguientes pasos:

Procedimiento para la ubicación de los ejes de referencia

- Numerar los eslabones considerando el eslabón 0 como punto de partida que es el bastidor y n que es el final.
- Numerar las articulaciones considerando si son rotativas o prismáticas
- Se definen los movimientos de cada articulación en el caso de los dedos, todos los movimientos son rotacionales sin existir los movimientos prismáticos
- Se ubican los ejes de movimiento considerando la regla de la mano derecha como primer paso el eje Z perpendicular al movimiento.
- Se ubican los ejes X y Y
- Una vez definidos los sistemas de referencia en todas las articulaciones se procede a definir los cuatro parámetros D-H

En el cuadro D-H se considera los siguientes parámetros para el llenado de esta matriz:

- i = Número de articulaciones
- α_{i-1} Es el ángulo formado entre los ejes Z considerando el analizado con el anterior por este motivo se pone el bastidor como punto inicial y eje 0 de referencia.
- a_{i-1} Es la longitud existente entre los ejes Z, siempre y cuando exista perpendicularidad entre los ejes analizados.
- θ_i Es el ángulo comprendido entre los ejes X
- d_i Es la distancia perpendicular entre los ejes X

Considerando estos parámetros se tiene que los dedos índices, medio, anular y meñique tienen similares características en cuanto a movimientos según el prototipo, lo único que varía son las dimensiones que tiene cada uno de los dedos, el dedo pulgar por el contrario tiene diferente tipo de movilidad.

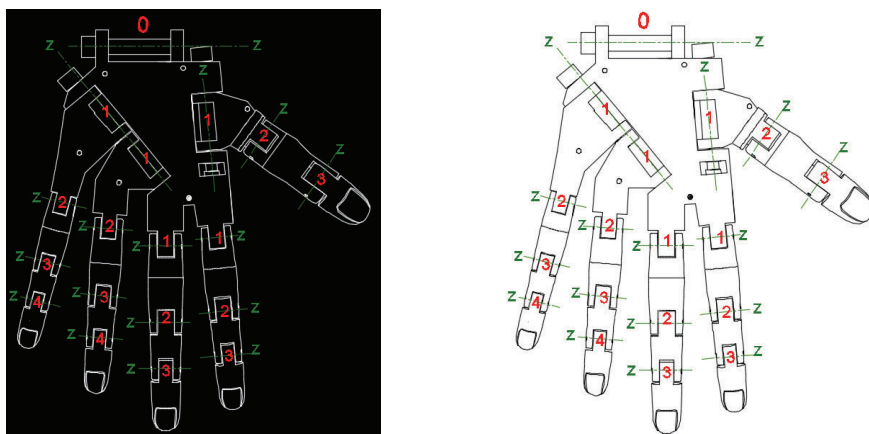


Figura 3.13. Número de articulaciones y ubicación del eje Z en la mano.

(Fuente: Propia)

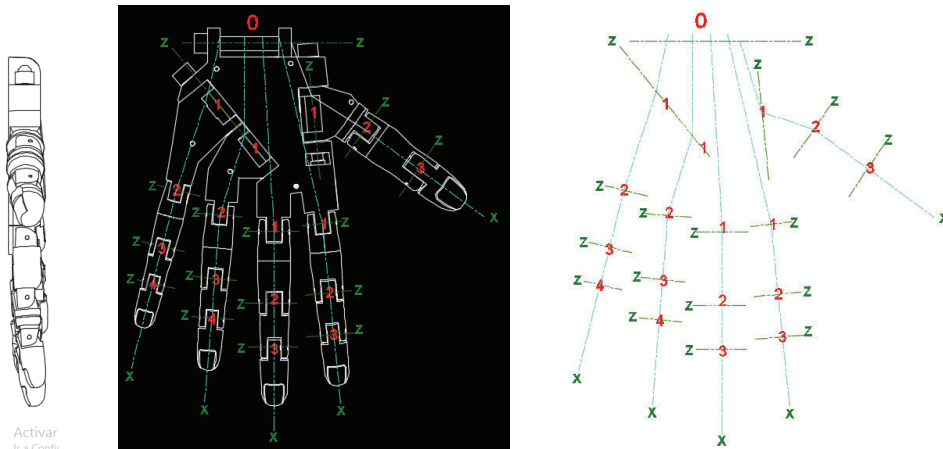


Figura 3.14. Ejes de movilidad para el análisis cinemático de los dedos.

(Fuente: Propia)

3.3.1. Análisis y simulación del dedo índice

El dedo índice tiene 6 grados de libertad considerando los giros de la muñeca en el caso del análisis, según el prototipo realizado el dedo tiene tres grados de libertad o tres articulaciones que maneja una mano real.

El algoritmo Denavit – Hartenberg establece los movimientos en secuencia para cada articulación designada, la secuencia genera una matriz de transformación de coordenadas para cada articulación, en el caso de cada dedo se tiene 6 matrices por las articulaciones que se tiene en los movimientos.

La matriz de transformación de la articulación i está determinada por la siguiente ecuación:

$$A_i = R_{z,\theta_i} T_{z,d_i} T_{x,a_i} R_{x,\alpha_i}$$

(Ec. 3.1)

Las variables de la ecuación son:

A_i = La matriz de transformación de coordenadas de la articulación i

R_{z,θ_i} = La matriz rotación alrededor del eje Z_i

T_{z,d_i} = La matriz de traslación en el eje Z_i , en este caso es constante al no existir traslación.

T_{x,a_i} = La matriz traslación en el eje X_i , en este caso se mantiene constante

R_{x,α_i} = La matriz rotación alrededor del eje X_i

La matriz de transformación A_i se obtiene mediante los siguientes parámetros y datos:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.2)

Las dimensiones de los eslabones son necesarias para el movimiento de la mano, cada dedo tiene sus medidas, para empezar a ubicar dentro de la matriz y realizar el análisis cinemático de los movimientos, como primer análisis el dedo índice.



Figura 3.15. Medidas del dedo Índice

(Fuente: Propia)

Tabla III.4. Cuadro DH para el dedo índice

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	113	θ_2	19
3	90	0	θ_3	0
4	0	43,6	θ_4	0
5	0	25,6	θ_5	0
6	0	24,8	θ_6	0

(Fuente: Propia)

La generación de la matriz por medio de MatLab ubica valores numéricos para que el software envíe resultados y tener una matriz equivalente según los ángulos que se van a utilizar.

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.3)

La matriz de transformación A_i se genera mediante valores de teta (θ), alfa (a), a, d enviados a una matriz equivalente según la movilidad del ángulo de cada uno de los dedos.

Para calcular la matriz A_i se tiene la siguiente programación:

```
%Matriz Ai
A1=[cos(teta),-sin(teta).*cos(teta),sin(teta).*sin(alfa),a.*cos(teta);
sin(teta),(cos(teta).*cos(alfa)),cos(teta).*sin(alfa),a.*sin(teta);
0,(sin(alfa)),(cos(alfa)),d;
0,0,0,1]
teta=pi/4
alfa=pi/4
a=2.2
d=2.4
a1=cos(teta)
a2=-sin(teta).*cos(teta)
a3=sin(teta).*sin(alfa)
a4=a.*cos(teta)
b1=sin(teta)
b2=cos(teta).*cos(alfa)
b3=-cos(teta).*sin(alfa)
b4=a.*sin(teta)
c1=0
c2=sin(alfa)
c3=cos(alfa)
A=[a1 a2 a3 a4;b1 b2 b3 b4;c1 c2 c3 d;0 0 0 1]
```

Solución en Mat Lab

$A_i =$

0.7071	-0.5000	0.5000	1.5556
0.7071	0.5000	-0.5000	1.5556
0	0.7071	0.7071	2.4000
0	0	0	1.0000

Con datos del dedo índice tenemos los siguientes parámetros:

```
teta=pi/4
alfa=pi/4
a=1.01
d=0.19
a1=cos(teta)
a2=-sin(teta).*cos(teta)
a3=sin(teta).*sin(alfa)
a4=a.*cos(teta)
b1=sin(teta)
b2=cos(teta).*cos(alfa)
b3=-cos(teta).*sin(alfa)
b4=a.*sin(teta)
c1=0
c2=sin(alfa)
c3=cos(alfa)
A=[a1 a2 a3 a4;b1 b2 b3 b4;c1 c2 c3 d;0 0 0 1]
```

Resultado

A =

$$\begin{bmatrix} 0.7071 & -0.5000 & 0.5000 & 0.7142 \\ 0.7071 & 0.5000 & -0.5000 & 0.7142 \\ 0 & 0.7071 & 0.7071 & 0.1900 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Para simplificar la escritura de las matrices generadas por cada dedo, considerando que son seis para movilidad de la mano y cinco en posición de agarre, se procede a ubicar variables en las matrices generadas en este caso el coseno con la letra “a” y el seno con la letra “b”.

$$a1=\cos \theta_1; a2= \cos \theta_2; a3= \cos \theta_3; a4= \cos \theta_4; a5= \cos \theta_5; a6= \cos \theta_6$$

$$b1=\sin\theta_1; b2= \sin \theta_2; b3= \sin \theta_3; b4= \sin \theta_4; b5= \sin \theta_5; b6= \sin \theta_6$$

Las variables de una manera simplificada en las matrices de transformación generadas en el caso del dedo índice son:

$$A1 = \begin{bmatrix} a1 & 0 & -b1 & 0 \\ b1 & 0 & a1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 1.13a2 \\ b2 & 0 & a2 & 1.13b2 \\ 0 & -1 & 0 & 0.19 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0 \\ b3 & 0 & a3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & 0 & -b4 & 0.436a4 \\ b4 & 0 & a4 & 0.436b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.256a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.256b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A6 = \begin{bmatrix} a6 & -b6 & 0 & 0.248a6 \\ b6 & a6 & 0 & 0.248b6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T2 en este sistema resulta al realizar:

$$T2=A1*A2*A3*A4*A5*A6$$

(Ec. 3.4)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T2 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.5)

Se consigue las componentes rotacionales globales (R11, R12, R13, R21, R22, R23, R31, R32, R33) de la siguiente manera:

$$\mathbf{R11} = a6\{a5[a4(b1*b3 + a1*a2*a3)+a1*b2*b4]-b5[b4*(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*a4*b2]\} - b6\{a5[b4(b1*b3 + a1*a2*a3) - a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*b2*b4]\}$$

(Ec. 3.6)

$$\mathbf{R12} = -a6\{a5[b4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*b2*b4]\} - b6\{a5[a4(b1*b3 + a1*a2*a3)+a1*b2*b4]-b5[b4(b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*a4*b2]\}$$

(Ec. 3.7)

$$\mathbf{R13} = a3*b1 - a1*a2*b3$$

(Ec. 3.8)

$$\mathbf{R21} = b6\{a5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)+a4*b1*b2]+b5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)-b1*b2*b4]\} - a6\{a5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)-b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)+a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.9)

$$\mathbf{R22} = a6\{a5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)+a4*b1*b2]+b5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)-b1*b2*b4]\} + b6\{a5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)-b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3 - a2*a3*b1) + a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.10)

$$\mathbf{R23} = - a1*a3 - a2*b1*b3$$

(Ec. 3.11)

$$\mathbf{R31} = a6[a5(a2*b4-a3*a4*b2)+b5(a2*a4+a3*b2*b4)] + b6[a5(a2*a4+a3*b2*b4) - b5(a2* b4 -a3*a4*b2)]$$

(Ec. 3.12)

$$\mathbf{R32} = a6[a5(a2*a4+a3*b2*b4)-b5(a2*b4 - a3*a4*b2)] - b6[a5(a2*b4-a3*a4*b2)+ b5(a2* a4 + a3*b2*b4)]$$

(Ec. 3.13)

$$\mathbf{R33} = b2*b3$$

(Ec. 3.14)

Las componentes rectangulares de la posición del efector final (Px, Py, Pz) están constituidas por:

$$\mathbf{Px} = \{31*a6*\{a5* [a4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*b2*b4]-b5[b4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*a4*b2]\} /125 - \{31*b6\{a5 [b4 (b1*b3+a1*a2*a3) - a1*a4*b2] + b5 [a4 (b1*b3 +a1*a2 *a3) +a1*b2*b4]\}\}/125 + [109*a4 (b1*b3+a1*a2*a3)]/250 + \{32*a5 [a4 (b1*b3+ a1*a2*a3)$$

$$+a1*b2*b4]/125 - \{32*b5 [b4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*a4*b2]/125 + (113*a1*a2)/1000 + (109*a1*b2*b4)/250 - (109*b1)/250$$

(Ec. 3.15)

$$Py = - \{31*a6\{a5[a4(a1*b3-a2*a3*b1)-b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)+ a4*b1*b2]\} / 125 - [109*a4(a1*b3 - a2*a3*b1)]/250 + \{31*b6\{a5[b4(a1*b3-a2*a3*b1) + a4* b1* b2] + b5[a4 (a1*b3-a2*a3*b1)-b1*b2*b4]\}\}/125 - \{32*a5[a4 (a1*b3 - a2*a3*b1)-b1*b2*b4]/125 + \{32*b5[b4(a1*b3 - a2*a3*b1)+a4*b1*b2]\}/125 + (113*a2*b1)/100 + (109*b1*b2*b4)/250 + (19*a1)/100$$

(Ec. 3.16)

$$Pz = [32*a5(a2*b4-a3*a4*b2)]/125 - (113*b2)/100 + [32*b5(a2*a4 + a3*b2*b4)]/125 + \{31* a6 [a5(a2*b4 - a3*a4*b2) + b5*(a2*a4 + a3*b2*b4)]\}/125 + \{31*b6 [a5(a2*a4 + a3*b2*b4) - b5(a2*b4 - a3*a4*b2)]\}/125 + (109*a2*b4)/250 - (109*a3*a4*b2)/250$$

(Ec. 3.17)

Las ecuaciones que involucran a Px, Py y Pz son las que determinan el extremo final del dedo o también llamado efector final que alcanza al dar un desplazamiento angular de θ_i a cada una de las articulaciones que involucran al dedo índice.

Para el proceso de simulación de cada una de las articulaciones junto a las distancias de los eslabones se utiliza la herramienta toolbox de MatLab para robótica, ingresando los parámetros ubicados en la tabla D-H del dedo índice, colocando adicionalmente el valor de 0 en la última coordenada de cada vector "L" dando a notar una junta rotatoria, utilizando el comando drivebot se genera la simulación del dedo índice.

La programación para la simulación del dedo índice es el siguiente:

```
%SIMULACION DEL DEDO INDICE DE LA MANO IMPRESA EN 3D
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.13 0 .19 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .436 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .256 0 0 0], 'standard');
L{6} = link([0 .248 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
indice = robot(L, 'Dedo Índice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'Dedo Índice';
indice.manuf = 'Unimation';
drivebot(indice);
title ('Diagrama del dedo Índice de la mano impresa en 3D')
```

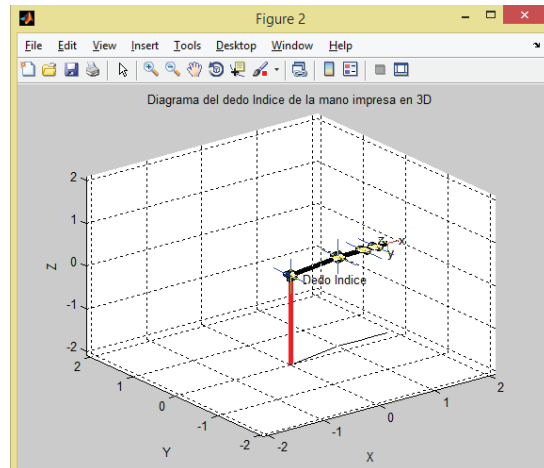
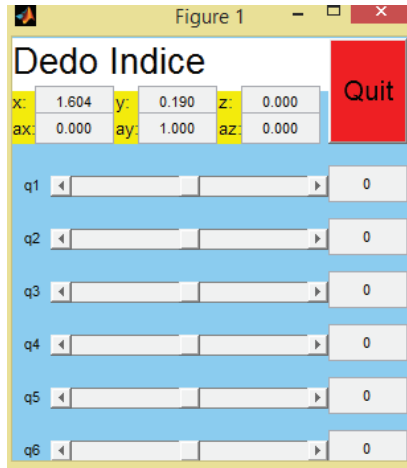


Figura 3.16. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo índice
(Fuente: Propia)

En la figura de desplazamientos angulares se puede ver que el valor inicial de los vectores “q1, q2, q3, q4, q5 y q6” son cero en todas sus celdas.

Al ingresar en esta pantalla valores de desplazamiento angular “q” (en radianes) como se presenta a continuación en el caso de $q_4 = -1.2566$, se obtienen las coordenadas de desplazamiento finales del extremo del dedo, estos valores deben coincidir con los valores calculados en el vector de traslación (Px, Py, Pz).

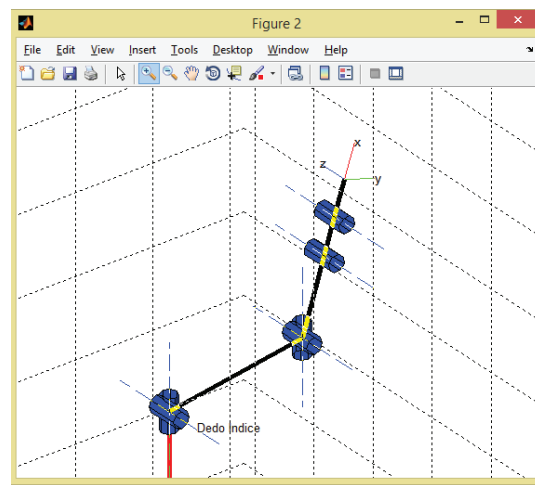
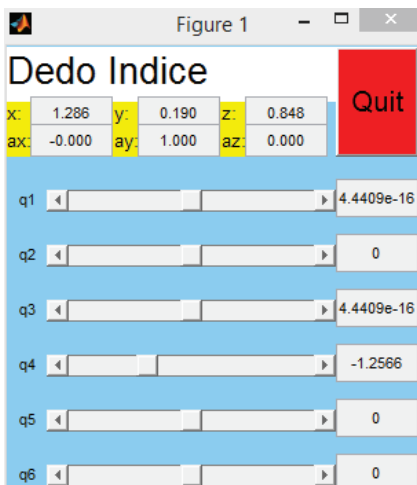


Figura 3.17. Movilidad por los desplazamientos angulares en $q_4 = -1,256$
(Fuente: Propia)

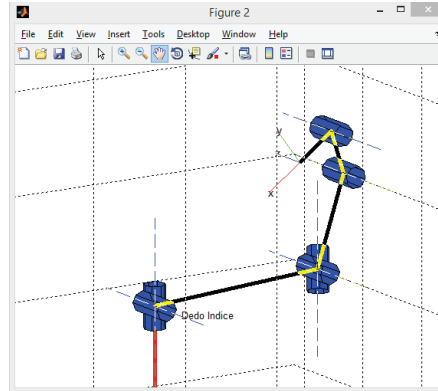
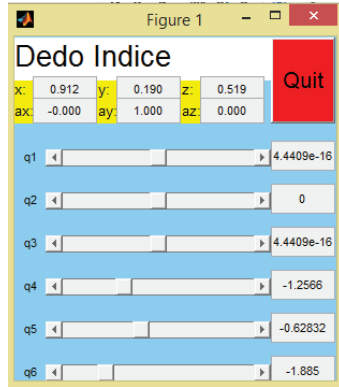


Figura 3.18. Movimiento de la falange, falangina, falangeta del dedo índice

(Fuente: Propia)

a. Posición de agarre del dedo índice

Para la posición de agarre se tiene la siguiente tabla D-H

Tabla III.5. Cuadro DH para el dedo índice en posición de agarre

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	113	θ_2	19
3	0	43,6	θ_3	0
4	0	25,6	θ_4	0
5	0	24,8	θ_5	0

(Fuente: Propia)

La generación de la matriz por medio de MatLab ubica valores numéricos para que el software envíe resultados y tener una matriz equivalente según los ángulos que se van a utilizar.

En el caso de la simulación del dedo índice en posición de agarre genera las siguientes matrices de transformación homogénea:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & -a_{31} & 0 \\ b_{11} & 0 & b_{31} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_{12} & 0 & a_{32} & 1.13a_{42} \\ b_{12} & 0 & b_{32} & 1.13b_{42} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} a_{13} & 0 & -a_{33} & 0.436a_{43} \\ b_{13} & 0 & b_{33} & 0.436b_{43} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a14 & -a24 & 0 & 0.256a44 \\ b14 & b24 & 0 & 0.256b44 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a15 & -a25 & 0 & 0.248a45 \\ b15 & b25 & 0 & 0.248b45 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T2 en este sistema resulta al realizar:

$$T2=A1*A2*A3*A4*A5$$

(Ec. 3.18)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T2 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.19)

Una vez especificado las matrices generadas en el análisis cinemático del dedo índice se realiza la programación en MatLab mediante el paquete de Peter Corke que es una ayuda en el área de la robótica, por medio de la tabla D-H se realiza los vectores de movimientos de agarre en el manejo de las sustancias tóxicas desde el punto cero hasta el punto de flexión de cada dedo.

```
%SIMULACION DEL DEDO INDICE EN POSICION DE AGARRE
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.13 0 0 0], 'standard');
L{3} = link([0 .436 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .256 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .248 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0];
qstretch = [0 0 0 0 0];
indice = robot(L, 'Índice - Agarre', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'Dedo Índice en agarre';
indice.manuf = 'Unimation';
drivebot(indice);
title ('Diagrama en agarre del dedo índice')
```

Realizada la programación se ejecuta el editor dando click en run (correr) y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables para MatLab.

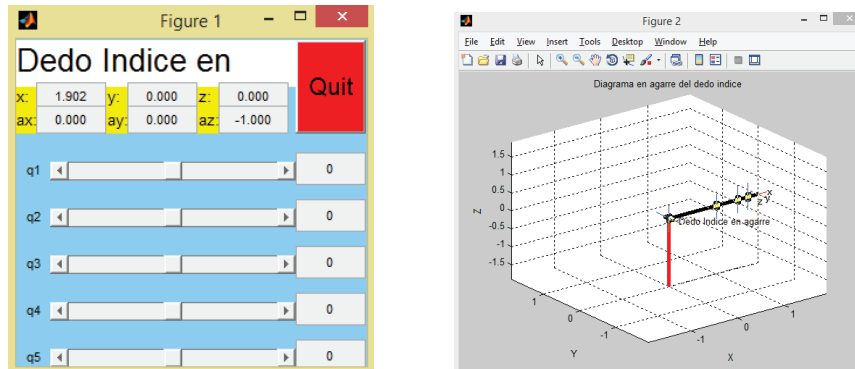


Figura 3.19. Simulación cinemática del dedo índice en posición de inicio de agarre
(Fuente: Propia)

Para la posición de agarre se ubica valores de desplazamientos angulares en q_1 , q_2 , q_3 , q_4 , q_5 en radianes, determinando el efector final en posición de sujeción.

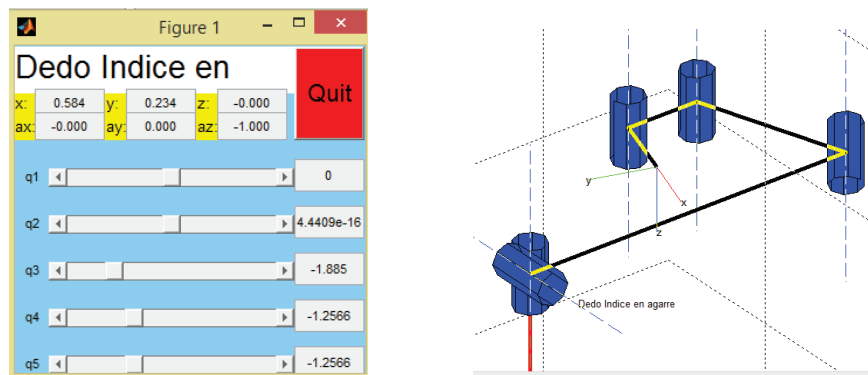


Figura 3.20. Dedo índice en posición de agarre
(Fuente: Propia)

3.3.2. Análisis y simulación del dedo medio

Las dimensiones de los eslabones que conforman el dedo medio son necesarias para ubicar dentro de la matriz D-H y realizar el análisis cinemático de los movimientos considerando el efector final.

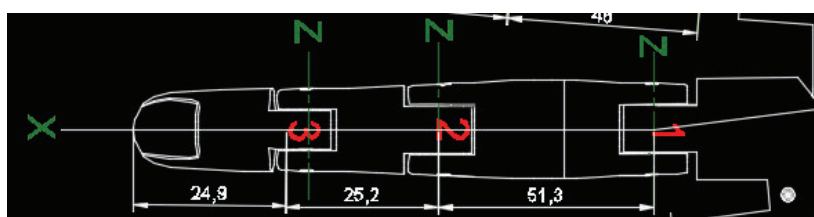


Figura 3.21. Medidas del dedo medio
(Fuente: Propia)

Tabla III.6. Cuadro DH para el dedo medio

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	115	θ_2	0
3	90	0	θ_4	0
4	0	51.3	θ_4	0
5	0	25.2	θ_5	0
6	0	24.4	θ_6	0

(Fuente: Propia)

La matriz de transformación A_i se genera mediante valores de teta (θ), alfa (α), a, d enviados a una matriz equivalente según la movilidad del ángulo de cada uno de los dedos.

Para calcular la matriz A_i se tiene la siguiente programación:

```
%A1=[(cos(teta)),(sin(teta).*cos(teta)),(sin(teta).*sin(alfa)),(a.*cos(teta));(sin(teta)),(cos(teta).*cos(alfa)),(cos(teta).*sin(alfa)),(a.*sin(teta));0,(sin(alfa)),(cos(alfa)),d;0,0,0,1]
teta=-pi/5
alfa=-pi/5
a=1.01
d=0.19
a1=cos(teta)
a2=-sin(teta).*cos(teta)
a3=sin(teta).*sin(alfa)
a4=a.*cos(teta)
b1=sin(teta)
b2=cos(teta).*cos(alfa)
b3=-cos(teta).*sin(alfa)
b4=a.*sin(teta)
c1=0
c2=sin(alfa)
c3=cos(alfa)
A=[a1 a2 a3 a4;b1 b2 b3 b4;c1 c2 c3 d;0 0 0 1]
```

Resultado de los datos puestos en la matriz

$A_i =$

0.8090	0.4755	0.3455	0.8171
-0.5878	0.6545	0.4755	-0.5937
0	-0.5878	0.8090	0.1900
0	0	0	1.0000

Para simplificar la escritura de las matrices generadas por cada dedo considerando que son seis para movilidad de la mano y cinco en posición de agarre, se procede a ubicar variables en las matrices generadas en este caso el coseno con la letra "a" y el seno con la letra "b".

$a_1 = \cos \theta_1$; $a_2 = \cos \theta_2$; $a_3 = \cos \theta_3$; $a_4 = \cos \theta_4$; $a_5 = \cos \theta_5$; $a_6 = \cos \theta_6$

$b_1 = \sin \theta_1$; $b_2 = \sin \theta_2$; $b_3 = \sin \theta_3$; $b_4 = \sin \theta_4$; $b_5 = \sin \theta_5$; $b_6 = \sin \theta_6$

Se ubican las variables de una manera simplificada en las matrices de transformación generadas en el caso del dedo medio tenemos.

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & -b_1 & 0 \\ b_1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_2 & 0 & -b_2 & 1.15a_2 \\ b_2 & 0 & a_2 & 1.15b_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} a_3 & 0 & -b_3 & 0 \\ b_3 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} a_4 & 0 & -b_4 & 0.513a_4 \\ b_4 & 0 & a_4 & 0.513b_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} a_5 & -b_5 & 0 & 0.252a_5 \\ b_5 & a_5 & 0 & 0.252b_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} a_6 & -b_6 & 0 & 0.244a_6 \\ b_6 & a_6 & 0 & 0.244b_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T3 resulta al realizar:

$$T_3 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6$$

(Ec. 3.20)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T_3 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.21)

Se consigue las componentes rotacionales globales (R_{11} , R_{12} , R_{13} , R_{21} , R_{22} , R_{23} , R_{31} , R_{32} , R_{33}) de la siguiente manera:

$$R_{11} = a_6 \{ a_5 [a_4 (b_1 * b_3 + a_1 * a_2 * a_3) - a_1 * b_2 * b_4] - b_5 [b_4 * (b_1 * b_3 + a_1 * a_2 * a_3) + a_1 * a_4 * b_2] \} - b_6 \{ a_5 [b_4 (b_1 * b_3 + a_1 * a_2 * a_3) + a_1 * a_4 * b_2] + b_5 [a_4 (b_1 * b_3 + a_1 * a_2 * a_3) - a_1 * b_2 * b_4] \}$$

(Ec. 3.22)

$$R12 = -a6 \{a5 [b4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]+b5[a4 (b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\} - b6 \{a5 [a4(b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5[b4(b1*b3 + a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\}$$

(Ec. 3.23)

$$R13 = a1*a2*b3-a3*b1$$

(Ec. 3.24)

$$R21 = b6 \{a5 [b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]+b5 [a4 (a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]\} - a6 \{a5 [a4(a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]-b5 [b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.25)

$$R22 = a6\{a5 [b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]+b5 [a4(a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]\} + b6 \{a5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3 - a2*a3*b1) - a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.26)

$$R23 = a1*a3 + a2*b1*b3$$

(Ec. 3.27)

$$R31 = -a6 [a5(a2*b4+a3*a4*b2)+b5 (a2*a4-a3*b2*b4)] + b6 [a5(a2*a4-a3*b2*b4) - b5 (a2*b4+a3*a4*b2)]$$

(Ec. 3.28)

$$R32 = b6 [a5(a2*b4+a3*a2*b4)+b5 (a2*a4 - a3*b4*b2)] - a6[a5(a2*a4-a3*b4*b2)- b5 (a2*b4 + a3*a4*b2)]$$

(Ec. 3.29)

$$R33 = -b2*b3$$

(Ec. 3.30)

Las componentes rectangulares de la posición del efector final (Px, Py, Pz) están constituidas por:

$$Px = \{23*a6*\{a5*[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5[b4(b1*b3+a1*a2*a3)+ a1*a4* b2]\}\} / 200 - \{23*b6\{a5[b4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+ a1*a2 *a3)-a1*b2*b4]\}\} / 200 + \{513*a4(b1*b3+a1*a2*a3)\} / 1000 + \{63*a5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\} / 250 - \{63 *b5 [b4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\} / 250 + (23*a1*a2) / 200 - (513*a1*b2*b4) / 1000$$

(Ec. 3.31)

$$Py = \{23*b6\{a5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]+b5[a4(a1*b3-a2*a3*b1)+ b1*b2 *b4]\}\} / 200 - \{23*a6 \{a5 [a4 (a1*b3-a2*a3*b1)+ b1*b2*b4]-b5 [b4 (a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]\}\} / 200 - \{63*a5[a4(a1*b3-a2*a3*b1)+b1*b2*b4]\} / 250 + \{63*b5[b4 (a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1 *b2]\} / 250 - \{513*a4*(a1*b3-a2*a3*b1)\} / 1000 + (23*a2*b1) / 200 - (513*b1*b2*b4) / 1000$$

(Ec. 3.32)

$$Pz = - (23*b2) / 200 - \{63*a5*(a2*b4+a3*a4*b2)\} / 250 - \{63*b5*(a2*a4 - a3*b2*b4)\} / 250 - \{23* a6[a5(a2*b4+a3*a4*b2)+b5(a2*a4-a3*b2*b4)]\} / 200 - \{23*b6[a5(a2*a4-a3*b2*b4) -b5(a2 *b4 + a3*a4*b2)]\} / 200 - (513*a2*b4) / 1000 - (513*a3*a4*b2) / 1000$$

(Ec. 3.33)

La programación para el dedo medio considerando los vectores en el toolbox del paquete “robot” es la siguientes:

```
%SIMULACION DEDO MEDIO
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standard
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.15 0 0 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .513 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .252 0 0 0], 'standard');
L{6} = link([0 .244 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
medio = robot(L, 'Dedo del Medio', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
medio.name = 'Dedo del Medio';
medio.manuf = 'Unimation';
drivebot(medio);
title ('Diagrama del dedo medio impreso en 3D')
```

Una vez realizada la programación se ejecuta el editor dando click en “run” y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables de MatLab.

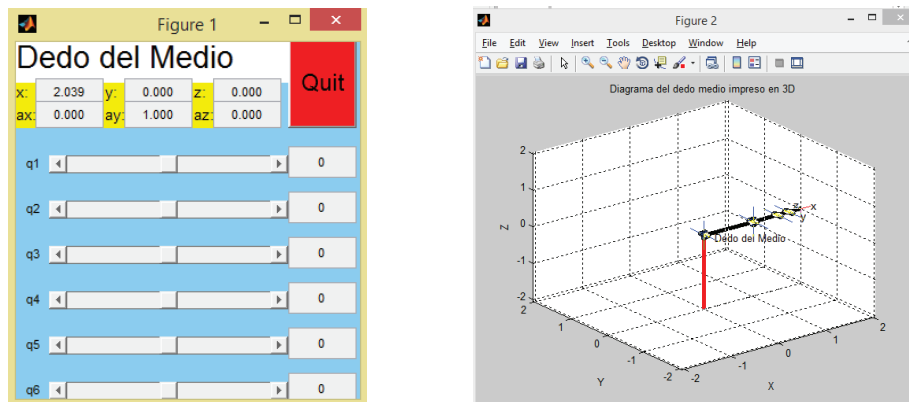


Figura 3.22. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo medio (Fuente: Propia)

En la figura de desplazamientos angulares se puede ver que el valor inicial de los vectores “q1, q2, q3, q4, q5, q6” son cero en todas sus celdas.

Al ingresar en esta pantalla valores de desplazamiento angular “q” (en radianes) como se presenta a continuación en el caso de q4=-1.2566, se obtienen las coordenadas de desplazamiento finales del extremo del dedo, estos valores deben coincidir con los valores calculados en el vector de traslación (Px, Py,Pz).

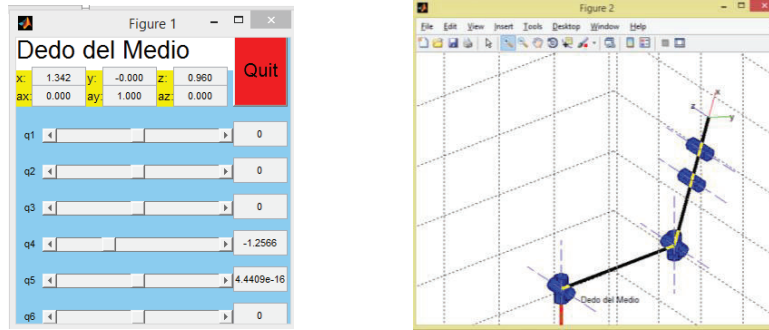


Figura 3.23. Simulación del dedo medio con los desplazamientos angulares

(Fuente: Propia)

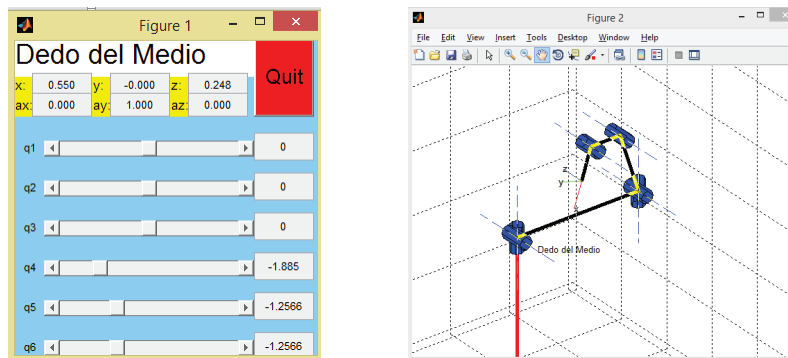


Figura 3.24. Simulación de la falange, falangina, falangeta del dedo medio

(Fuente: Propia)

a. Posición de agarre del dedo Medio

La posición de agarre la tabla de D-H está conformada por los siguientes parámetros:

Tabla III.7. Cuadro DH para el dedo medio en posición de agarre

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	115	θ_2	0
3	0	51.3	θ_3	0
4	0	25.2	θ_4	0
5	0	24.4	θ_5	0

(Fuente: Propia)

Las matrices de transformación de la simulación del dedo medio en posición de agarre son:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & -b_1 & 0 \\ b_1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_2 & 0 & -b_2 & 1.15a_2 \\ b_2 & 0 & a_2 & 1.15b_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0.513a3 \\ b3 & 0 & a3 & 0.513b3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & -b4 & 0 & 0.252a4 \\ b4 & a4 & 0 & 0.252b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.244a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.244b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T3 resulta al realizar:

$$T3 = A1*A2*A3*A4*A5$$

(Ec. 3.34)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T3 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.35)

Una vez especificado las matrices generadas en el análisis cinemático del dedo medio se realiza la programación en MatLab mediante el paquete de Peter Corke que es una ayuda en el área de la robótica, por medio de la tabla D-H se realiza los vectores de movimientos de agarre en el manejo de las sustancias tóxicas desde el punto cero hasta el punto de flexión de cada eslabón correspondiente al dedo.

```
%SIMULACION DEDO MEDIO EN POSICION DE AGARRE
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standard
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.15 0 0 0], 'standard');
L{3} = link([0 .513 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .252 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .244 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
medio = robot(L, 'Dedo del Medio en posición de agarre', 'Unimation',
'params of 8/95');
clear L
medio.name = 'Dedo del Medio en posición de agarre';
medio.manuf = 'Unimation';
drivebot(medio);
title ('Diagrama del dedo medio en posición de agarre impreso en 3D')
```

Una vez realizada la programación se ejecuta el editor dando click en “run” y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables de MatLab.

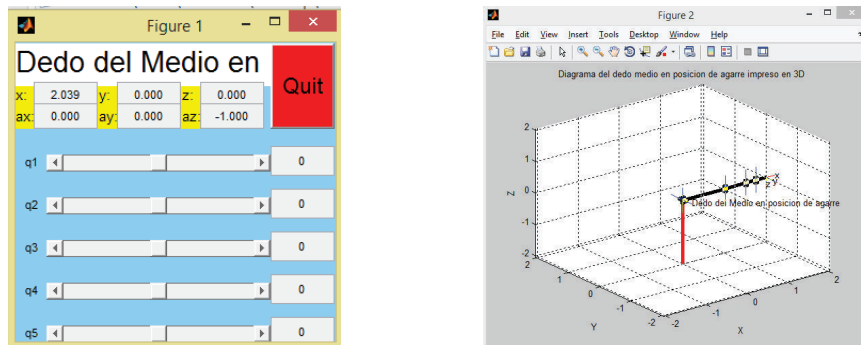


Figura 3.25. Simulación cinemática del dedo medio en posición de inicio de agarre
(Fuente: Propia)

Para la posición de agarre se ubica valores de desplazamientos angulares en q1, q2, q3, q4, q5 en radianes, determinando el efector final en posición de sujeción.

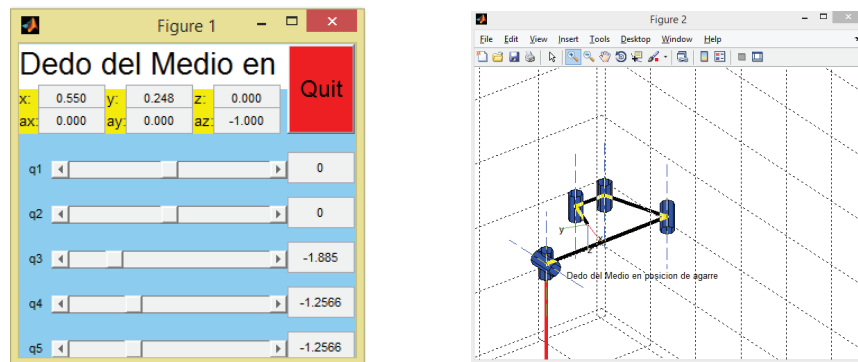


Figura 3.26. Dedo Medio en posición de agarre
(Fuente: Propia)

3.3.3. Análisis y simulación del dedo anular

Las dimensiones de los eslabones que conforman el dedo anular son necesarias para ubicar dentro de la matriz D-H y realizar el análisis cinemático de los movimientos considerando el efector final.

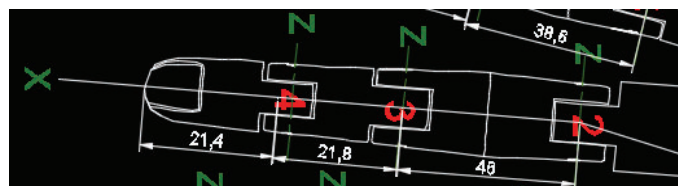


Figura 3.27. Medidas del dedo anular
(Fuente: Propia)

Tabla III.8. Cuadro DH para el dedo anular

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	114	θ_2	-17
3	90	0	θ_4	0
4	0	46.0	θ_4	0
5	0	21.8	θ_5	0
6	0	21.4	θ_6	0

(Fuente: Propia)

La matriz de transformación A_i se genera mediante valores de teta (θ), alfa (α), a, d enviados a una matriz equivalente según la movilidad del ángulo de cada uno de los dedos.

Para calcular la matriz A_i se tiene la siguiente programación:

```
%A1=[(cos(teta)),(sin(teta).*cos(teta)),(sin(teta).*sin(alfa)),(a.*cos(teta));
(sin(teta)),(cos(teta).*cos(alfa)),(cos(teta).*sin(alfa)),(a.*sin(teta));
0,(sin(alfa)),(cos(alfa)),d;0,0,0,1]
teta=-pi/5
alfa=-pi/5
a=1.01
d=0.19
a1=cos(teta)
a2=-sin(teta).*cos(teta)
a3=sin(teta).*sin(alfa)
a4=a.*cos(teta)
b1=sin(teta)
b2=cos(teta).*cos(alfa)
b3=-cos(teta).*sin(alfa)
b4=a.*sin(teta)
c1=0
c2=sin(alfa)
c3=cos(alfa)
A=[a1 a2 a3 a4;b1 b2 b3 b4;c1 c2 c3 d;0 0 0 1]
```

Resultado de los datos puestos en la matriz

```
Ai =  0.8090  0.4755  0.3455  0.8171
      -0.5878  0.6545  0.4755 -0.5937
      0      -0.5878  0.8090  0.1900
      0      0      0      1.0000
```

Para simplificar la escritura de las matrices generadas por cada dedo considerando que son seis para movilidad del dedo de la mano y cinco en posición de agarre, se procede a ubicar variables en las matrices generadas en este caso el coseno con la letra "a" y el seno con la letra "b".

$a_1 = \cos \theta_1$; $a_2 = \cos \theta_2$; $a_3 = \cos \theta_3$; $a_4 = \cos \theta_4$; $a_5 = \cos \theta_5$; $a_6 = \cos \theta_6$

$b_1 = \sin \theta_1$; $b_2 = \sin \theta_2$; $b_3 = \sin \theta_3$; $b_4 = \sin \theta_4$; $b_5 = \sin \theta_5$; $b_6 = \sin \theta_6$

Se ubican las variables de una manera simplificada en las matrices de transformación generadas en el caso del dedo anular tenemos.

$$A1 = \begin{bmatrix} a1 & 0 & -b1 & 0 \\ b1 & 0 & a1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 1.14a2 \\ b2 & 0 & a2 & 1.14b2 \\ 0 & -1 & 0 & -0.17 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0 \\ b3 & 0 & a3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & 0 & -b4 & 0.46a4 \\ b4 & 0 & a4 & 0.46b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.218a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.218b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A6 = \begin{bmatrix} a6 & -b6 & 0 & 0.214a6 \\ b6 & a6 & 0 & 0.214b6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T4 del dedo anular resulta al realizar:

$$T4 = A1*A2*A3*A4*A5*A6$$

(Ec. 3.36)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T4 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.37)

Se consigue las componentes rotacionales globales (R11, R12, R13, R21, R22, R23, R31, R32, R33) de la siguiente manera:

$$R11 = a6\{a5[a4(b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5[b4*(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\} - b6\{a5 [b4(b1*b3 + a1*a2*a3) + a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\}$$

(Ec. 3.38)

$$\mathbf{R12} = -a_6 \{a_5 [b_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2] + b_5 [a_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4]\} - b_6 \{a_5 [a_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4] - b_5 [b_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2]\}$$

(Ec. 3.39)

$$\mathbf{R13} = a_1^*a_2^*b_3 - a_3^*b_1$$

(Ec. 3.40)

$$\mathbf{R21} = b_6 \{a_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2] + b_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4]\} - a_6 \{a_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4] - b_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2]\}$$

(Ec. 3.41)

$$\mathbf{R22} = a_6 \{a_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2] + b_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4]\} + b_6 \{a_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4] - b_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2]\}$$

(Ec. 3.42)

$$\mathbf{R23} = a_1^*a_3 + a_2^*b_1^*b_3$$

(Ec. 3.43)

$$\mathbf{R31} = -a_6 [a_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2) + b_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)] + b_6 [a_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4) - b_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)]$$

(Ec. 3.44)

$$\mathbf{R32} = b_6 [a_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2) + b_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)] - a_6 [a_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4) - b_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)]$$

(Ec. 3.45)

$$\mathbf{R33} = -b_2^*b_3$$

(Ec. 3.46)

Las componentes rectangulares de la posición del efector final (Px, Py, Pz) están constituidas por:

$$\mathbf{Px} = \{107^*a_6 \{a_5 [a_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4] - b_5 [b_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2]\} / 500 - \{107^*b_6 \{a_5 [b_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2] + b_5 [a_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4]\} / 500 + [23^*a_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3)] / 50 + \{109^*a_5 [a_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4] / 500 - \{109^*b_5 [(b_4 (b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2)] / 500 + (57^*a_1^*a_2) / 500 - (115^*a_1^*b_2^*b_4) / 250 + (107^*b_1) / 500\}$$

(Ec. 3.47)

$$\mathbf{Py} = \{107^*b_6 \{a_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2] + b_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4]\} / 500 - \{107^*a_6 \{a_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4] - b_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2]\} / 500 - [115^*a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1)] / 250 - (107^*a_1) / 500 - \{109^*a_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4] / 500 + \{109^*b_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2] / 500 + (57^*a_2^*b_1) / 500 - (115^*b_1^*b_2^*b_4) / 250\}$$

(Ec. 3.48)

$$\mathbf{Pz} = (57^*b_2) / 500 - [109^*a_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)] / 500 - [109^*b_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)] / 500 - \{107^*a_6 [a_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2) + b_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)] / 500 - \{107^*b_6 [a_5 (a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4) - b_5 (a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)] / 500 - (115^*a_2^*b_4) / 250 - (115^*a_3^*a_4^*b_2) / 250\}$$

(Ec. 3.49)

Las ecuaciones que involucran a P_x , P_y y P_z son las que determinan el extremo final del dedo o también llamado efector final que alcanza al dar un desplazamiento angular de θ_i a cada una de las articulaciones que involucran al dedo anular.

La programación para la simulación del dedo anular es la siguiente:

```
%SIMULACION DEL DEDO ANULAR DE LA MANO IMPRESA EN 3D
%Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.14 0 -.17 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .46 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .218 0 0 0], 'standard');
L{6} = link([0 .214 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
anular = robot(L, 'Dedo Anular', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
anular.name = 'Dedo Anular';
anular.manuf = 'Unimation';
drivebot(anular);
title ('Diagrama del dedo Anular de la mano impresa en 3D')
```

Una vez realizada la programación se ejecuta el editor dando click en “run” y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables de MatLab.

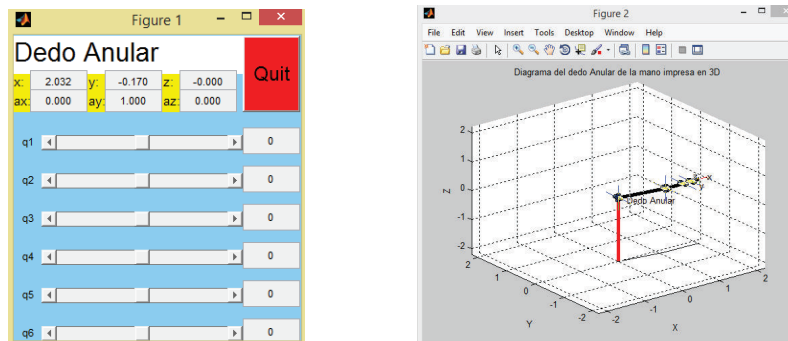


Figura 3.28. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo anular
(Fuente: Propia)

En la figura de desplazamientos angulares se puede ver que el valor inicial de los vectores “ q_1 , q_2 , q_3 , q_4 , q_5 y q_6 ” son cero en todas sus celdas, al ingresar en esta pantalla valores de desplazamiento angular “ q ” (en radianes) como se presenta a continuación en el caso de $q_4 = -1.2566$, se obtienen las coordenadas de desplazamiento finales del extremo del dedo, estos valores deben coincidir con los valores calculados en el vector de traslación (P_x , P_y , P_z).

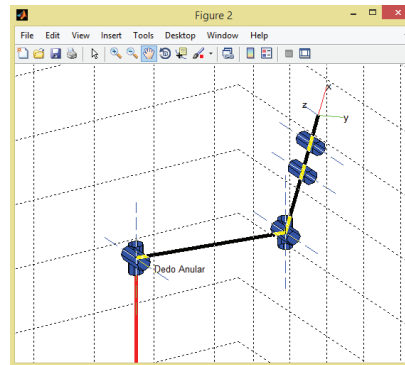
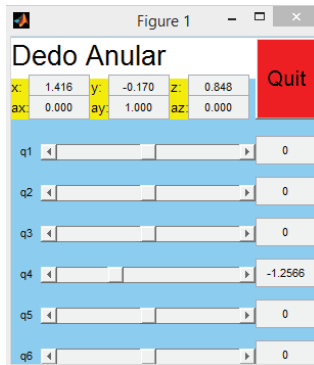


Figura 3.29. Simulación del dedo anular por desplazamientos angulares
(Fuente: Propia)

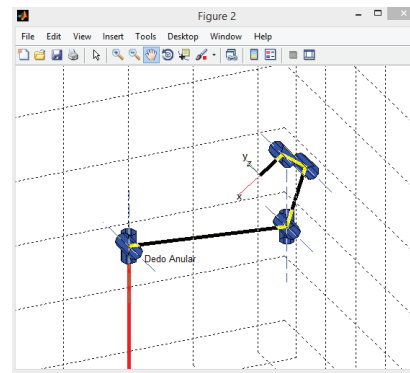
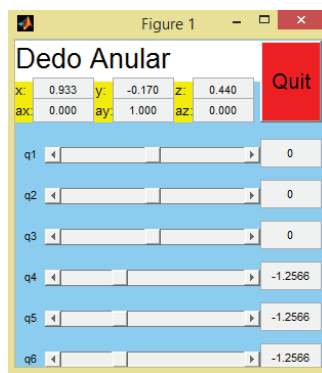


Figura 3.30. Simulación de la falange, falangina, falangeta del dedo anular
(Fuente: Propia)

a. Posición de agarre del dedo Anular

Para la posición de agarre del dedo anular se tiene la siguiente tabla D-H

Tabla III.9. Cuadro DH para el dedo anular en posición de agarre

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	114	θ_2	-0,17
3	0	46,0	θ_3	0
4	0	21,8	θ_4	0
5	0	21,4	θ_5	0

(Fuente: Propia)

La generación de la matriz por medio de MatLab ubica valores numéricos para que el software envíe resultados y tener una matriz equivalente según los ángulos que se van a utilizar.

En el caso de la simulación del dedo anular en posición de agarre genera las siguientes matrices de transformación homogénea:

$$A1 = \begin{bmatrix} a1 & 0 & -b1 & 0 \\ b1 & 0 & a1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 1.14a2 \\ b2 & 0 & a2 & 1.14b2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0.46a3 \\ b3 & 0 & a3 & 0.46b3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & -b4 & 0 & 0.218a4 \\ b4 & a4 & 0 & 0.218b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.214a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.214b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T4 para el dedo anular en posición de agarre resulta al realizar:

$$T4 = A1*A2*A3*A4*A5$$

(Ec. 3.50)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T4 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.51)

Una vez especificado las matrices generadas en el análisis cinemático del dedo anular se realiza la programación en MatLab mediante el paquete de Peter Corke que es una ayuda en el área de la robótica, por medio de la tabla D-H se realiza los vectores de movimientos de agarre en el manejo de las sustancias tóxicas desde el punto cero hasta el punto de flexión del dedo anular.

```
%SIMULACION DEL DEDO ANULAR EN POSICION DE AGARRE DE LA MANO IMPRESA EN
3D
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.14 0 -.17 0], 'standard');
L{3} = link([0 .46 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .218 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .214 0 0 0], 'standard');
```

```

qz = [0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 0 0 0];
anular = robot(L, 'Dedo Anular en posición de agarre', 'Unimation',
'params of 8/95');
clear L
anular.name = 'Dedo Anular en agarre';
anular.manuf = 'Unimation';
drivebot(anular);
title ('Diagrama del dedo Anular en posición de agarre de la mano impresa
en 3D')

```

Realizada la programación se ejecuta el editor dando click en run (correr) y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables para MatLab.

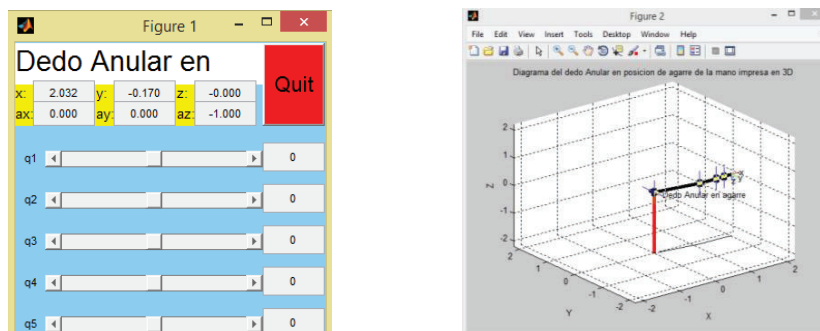


Figura 3.31. Simulación de la cinemática del dedo anular en inicio de agarre
(Fuente: Propia)

Para la posición de agarre se ubica valores de desplazamientos angulares en q1, q2, q3, q4, q5 en radianes, determinando el efector final en posición de sujeción.

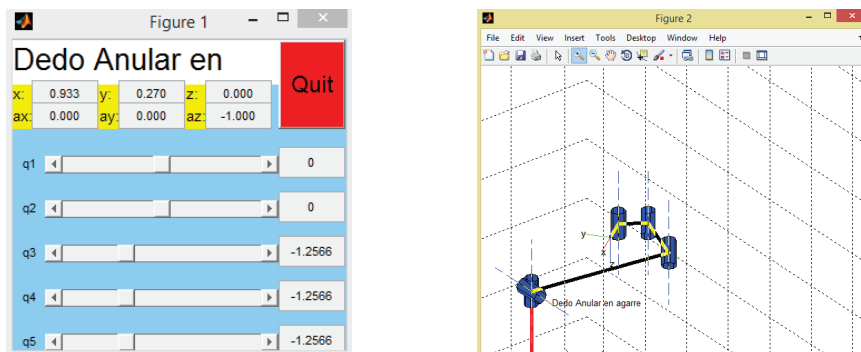


Figura 3.32. Dedo anular en posición de agarre
(Fuente: Propia)

b. Considerando el movimiento de la palma

Para la posición de agarre considerando el movimiento de la mano se tiene la siguiente tabla D-H

Tabla III.10. Cuadro DH para el dedo anular con el movimiento de la palma

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	74	θ_2	0
3	0	40	θ_3	0
4	0	46,0	θ_3	0
5	0	21,8	θ_4	0
6	0	21,4	θ_5	0

(Fuente: Propia)

En el caso de la simulación del dedo anular en posición de agarre considerando el movimiento de la palma genera las siguientes matrices de transformación homogénea:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & -b_1 & 0 \\ b_1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_2 & 0 & -b_2 & 0.74a_2 \\ b_2 & 0 & a_2 & 0.74b_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} a_3 & 0 & -b_3 & 0.40a_3 \\ b_3 & 0 & a_3 & 0.40b_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} a_4 & 0 & -b_4 & 0.46a_4 \\ b_4 & 0 & a_4 & 0.46b_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} a_5 & -b_5 & 0 & 0.218a_5 \\ b_5 & a_5 & 0 & 0.218b_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} a_6 & -b_6 & 0 & 0.214a_6 \\ b_6 & a_6 & 0 & 0.214b_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T4 con el movimiento de la palma resulta al realizar:

$$T_4 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6$$

(Ec. 3.52)

La solución genérica de la matriz se obtiene de la siguiente manera:

$$T_4 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.53)

Una vez especificado las matrices generadas en el análisis cinemático del dedo anular con el movimiento de la palma se realiza la programación en MatLab mediante el paquete de Peter Corke que es una ayuda en el área de la robótica, por medio de la tabla D-H se realiza los vectores de movimientos de agarre en el manejo de las sustancias tóxicas desde el punto cero hasta el punto de flexión de cada dedo.

```
%SIMULACION DEL DEDO ANULAR CON LA PALMA DE LA MANO IMPRESA EN 3D
%Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 0.74 0 0 0], 'standard');
L{3} = link([0 0.40 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .46 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .218 0 0 0], 'standard');
L{6} = link([0 .214 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 0 0 0 0 0];
qstretch = [0 0 0 0 0 0];
anular = robot(L, 'Dedo Anular con palma', 'Unimation', 'params of
8/95');
clear L
anular.name = 'Dedo Anular con palma';
anular.manuf = 'Unimation';
drivebot(anular);
title ('Diagrama del dedo Anular considerando el movimiento de la palma
de la mano impresa en 3D')
```

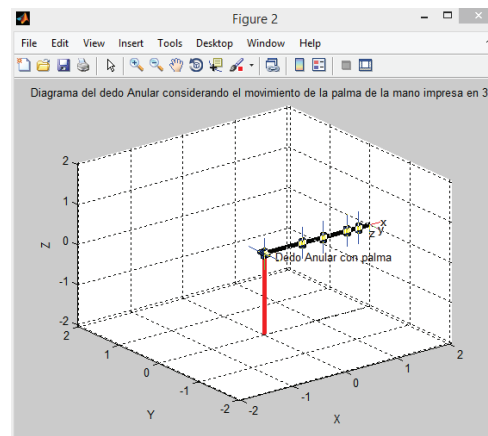


Figura 3.33. Simulación cinemática del dedo anular considerando la palma.

(Fuente: Propia)

Se asigna valores a los q considerando que el desplazamiento de la palma es menor a las articulaciones de cada uno de los dedos.

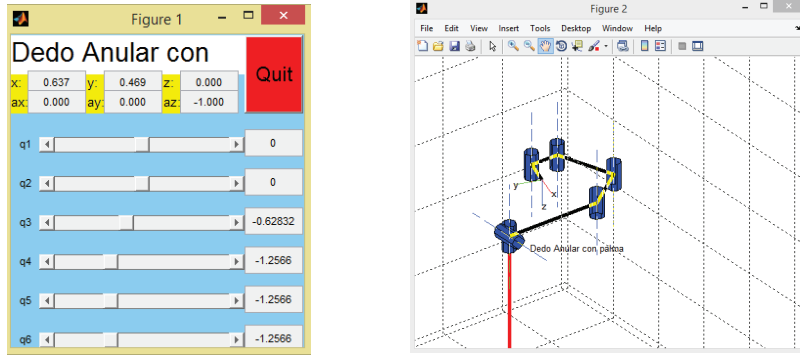


Figura 3.34. Dedo anular en posición de agarre con el movimiento de la palma

(Fuente: Propia)

3.3.4. Análisis y simulación del dedo meñique

Las dimensiones de los eslabones son necesarias para el movimiento de la mano, cada dedo tiene sus medidas, para empezar a ubicar dentro de la matriz y realizar el análisis cinemático de los movimientos, como cuarto análisis el dedo meñique.



Figura 3.35. Medidas del dedo meñique

(Fuente: Propia)

Tabla III.11. Cuadro DH para el dedo meñique

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	110	θ_2	-34
3	90	0	θ_4	0
4	0	38,6	θ_4	0
5	0	19,7	θ_5	0
6	0	21,1	θ_6	0

(Fuente: Propia)

La generación de la matriz por medio de MatLab ubica valores numéricos para que el software envíe resultados y tener una matriz equivalente según los ángulos que se van a utilizar.

La matriz de transformación A_i se genera mediante valores de teta (θ), alfa (a), a , d enviados a una matriz equivalente según la movilidad del ángulo entre eslabones del dedo meñique.

Para calcular la matriz A_i se tiene la siguiente programación:


```

%A1=[(cos(teta)),(sin(teta).*cos(teta)),(sin(teta).*sin(alfa)),(a.*cos(te
ta)];(sin(teta)),(cos(teta).*cos(alfa)),(cos(teta).*sin(alfa)),(a.*sin(te
ta));0,(sin(alfa)),(cos(alfa)),d;0,0,0,1]
teta=-pi/5
alfa=-pi/5
a=1.01
d=0.19
a1=cos(teta)
a2=-sin(teta).*cos(teta)
a3=sin(teta).*sin(alfa)
a4=a.*cos(teta)
b1=sin(teta)
b2=cos(teta).*cos(alfa)
b3=-cos(teta).*sin(alfa)
b4=a.*sin(teta)
c1=0
c2=sin(alfa)
c3=cos(alfa)
A=[a1 a2 a3 a4;b1 b2 b3 b4;c1 c2 c3 d;0 0 0 1]

```

Resultado de los datos puestos en la matriz

Ai =

```

0.8090  0.4755  0.3455  0.8171
-0.5878  0.6545  0.4755 -0.5937
0  -0.5878  0.8090  0.1900
0  0  0  1.0000

```

Para simplificar la escritura de las matrices generadas por cada dedo, considerando que son seis para movilidad del dedo de la mano y cinco en posición de agarre, se procede a ubicar variables en las matrices generadas en este caso el coseno con la letra “a” y el seno con la letra “b”.

a1=cos θ1; a2= cos θ2; a3= cos θ3; a4= cos θ4; a5= cos θ5; a6= cos θ6

b1=sinθ1; b2= sin θ2; b3= sin θ3; b4= sin θ4; b5= sin θ5; b6= sin θ6

Se ubican las variables de una manera simplificada en las matrices de transformación generadas en el caso del dedo meñique tenemos.

$$A1 = \begin{bmatrix} a1 & 0 & -b1 & 0 \\ b1 & 0 & a1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 1.10a2 \\ b2 & 0 & a2 & 1.10b2 \\ 0 & -1 & 0 & -0.34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0 \\ b3 & 0 & a3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & 0 & -b4 & 0.386a4 \\ b4 & 0 & a4 & 0.386b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.197a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.197b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A6 = \begin{bmatrix} a6 & -b6 & 0 & 0.211a6 \\ b6 & a6 & 0 & 0.211b6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T5 para el dedo meñique resulta al realizar:

$$T5 = A1*A2*A3*A4*A5*A6$$

(Ec. 3.54)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T5 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.55)

Se consigue las componentes rotacionales globales (R11, R12, R13, R21, R22, R23, R31, R32, R33) de la siguiente manera:

$$R11 = a6\{a5[a4(b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5[b4*(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\} - b6\{a5[b4(b1*b3 + a1*a2*a3) + a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\}$$

(Ec. 3.56)

$$R12 = -a6\{a5[b4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\} - b6\{a5[a4(b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5[b4(b1*b3 + a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\}$$

(Ec. 3.57)

$$R13 = a1*a2*b3-a3*b1$$

(Ec. 3.58)

$$R21 = b6\{a5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]+b5[a4(a1*b3-a2*a3*b1)+b1*b2*b4]\} - a6\{a5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.59)

$$\mathbf{R22} = a_6 \{a_5 [b_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2] + b_5 [a_4 (a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4]\} + b_6 \{a_5 [a_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4] - b_5 [b_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2]\}$$

(Ec. 3.60)

$$\mathbf{R23} = a_1^*a_3 + a_2^*b_1^*b_3$$

(Ec. 3.61)

$$\mathbf{R31} = -a_6[a_5(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2) + b_5(a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)] + b_6[a_5(a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4) - b_5(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)]$$

(Ec. 3.62)

$$\mathbf{R32} = b_6[a_5(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2) + b_5(a_2^*a_4 - a_3^*b_4^*b_2)] - a_6[a_5(a_2^*a_4 - a_3^*b_4^*b_2) - b_5(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)]$$

(Ec. 3.63)

$$\mathbf{R33} = -b_2^*b_3$$

(Ec. 3.64)

Las componentes rectangulares de la posición del efector final (Px, Py, Pz) están constituidas por:

$$\mathbf{Px} = \{211^*a_6[a_5[a_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4] - b_5[b_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2]]\} / 1000 - \{211^*b_6[a_5[b_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2] + b_5[a_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4]]\} / 1000 + [193^*a_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3)]/500 + \{197^*a_5[a_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) - a_1^*b_2^*b_4]\}/1000 - \{197^*b_5[b_4(b_1^*b_3 + a_1^*a_2^*a_3) + a_1^*a_4^*b_2]\}/1000 + (11^*a_1^*a_2)/10 - (193^*a_1^*b_2^*b_4)/500 + (17^*b_1)/50$$

(Ec. 3.65)

$$\mathbf{Py} = \{211^*b_6[a_5[b_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2] + b_5[a_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4]]\} / 1000 - \{211^*a_6[a_5[a_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4] - b_5[b_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2]]\} / 1000 - [193^*a_4^*(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1)]/500 - (17^*a_1)/50 - \{197^*a_5[a_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) + b_1^*b_2^*b_4]\}/1000 + \{197^*b_5[b_4(a_1^*b_3 - a_2^*a_3^*b_1) - a_4^*b_1^*b_2]\}/1000 + (57^*a_2^*b_1)/500 - (193^*b_1^*b_2^*b_4)/500$$

(Ec. 3.66)

$$\mathbf{Pz} = - (57^*b_2)/500 - [197^*a_5(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)]/1000 - [197^*b_5^*(a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)]/1000 - \{211^*a_6^*[a_5(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2) + b_5(a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4)]\}/1000 - \{211^*b_6[a_5(a_2^*a_4 - a_3^*b_2^*b_4) - b_5^*(a_2^*b_4 + a_3^*a_4^*b_2)]\}/1000 - (193^*a_2^*b_4)/500 - (193^*a_3^*a_4^*b_2)/500$$

(Ec. 3.67)

Para el proceso de simulación de cada una de las articulaciones junto a las distancias de los eslabones se utiliza la herramienta toolbox de MatLab para robótica, ingresando los parámetros ubicados en la tabla D-H del dedo meñique, colocando adicionalmente el valor de 0 en la última coordenada de cada vector "L" dando a notar una junta rotatoria, utilizando el comando drivebot se genera la simulación del dedo índice.

La programación para la simulación del dedo meñique es la siguiente:

```

%SIMULACION DEDO MEÑIQUE
%Peter I. Corke
%clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.10 0 .34 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .386 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .197 0 0 0], 'standard');
L{6} = link([0 .211 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
menique = robot(L, 'Dedo Meñique', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
menique.name = 'Dedo Meñique';
menique.manuf = 'Unimation';
drivebot(menique);
title ('Diagrama del dedo Meñique de la mano impresa en 3D')

```

Una vez realizada la programación se ejecuta el editor dando click en “run” y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables de MatLab.

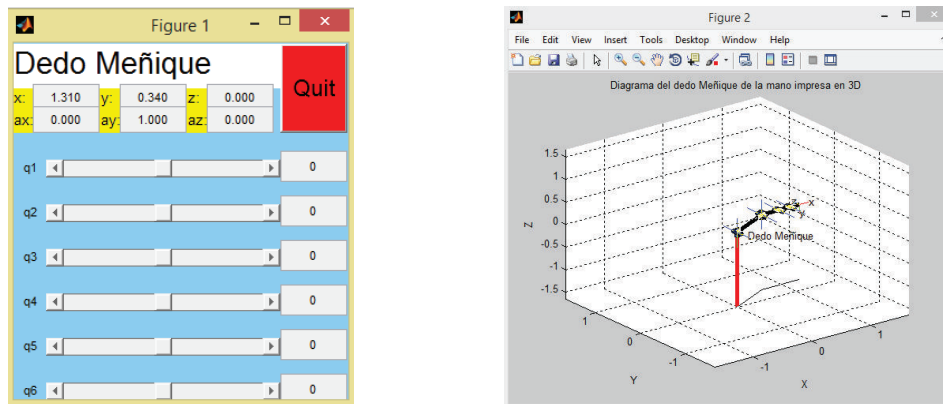


Figura 3.36. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo meñique

(Fuente: Propia)

En la figura de desplazamientos angulares se puede ver que el valor inicial de los vectores “q1, q2, q3, q4, q5 y q6” son cero en todas sus celdas.

Al ingresar en esta pantalla valores de desplazamiento angular “q” (en radianes) como se presenta a continuación en el caso de q4=-1.2566, se obtienen las coordenadas de desplazamiento finales del extremo del dedo, estos valores deben coincidir con los valores calculados en el vector de traslación (Px, Py,Pz).

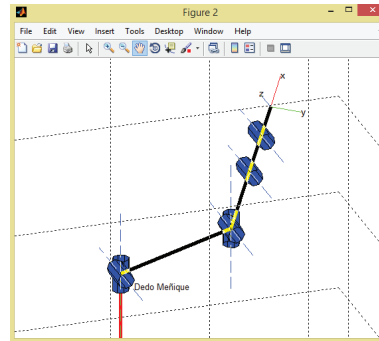
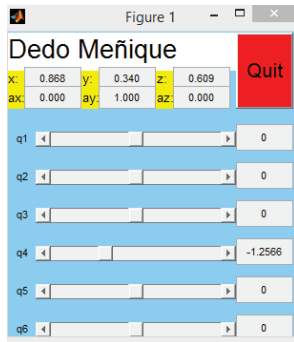


Figura 3.37. Simulación del dedo meñique con $q_4 = -1,2566$ radianes
(Fuente: Propia)

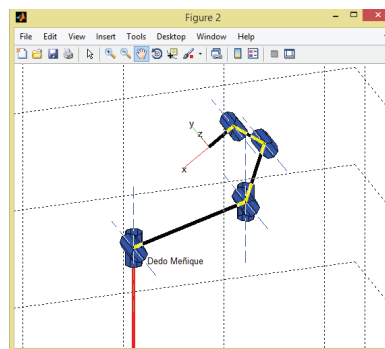
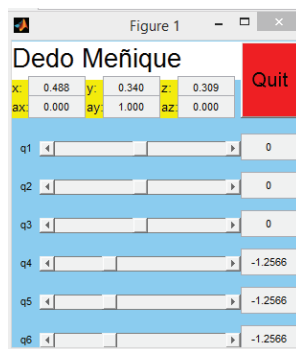


Figura 3.38. Simulación de la falange, falangina, falangeta del dedo meñique
(Fuente: Propia)

a. Posición de agarre del dedo Meñique

Para la posición de agarre se tiene la siguiente tabla D-H

Tabla III.12. Cuadro DH para el dedo meñique en posición de agarre

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	110	θ_2	0
3	0	48,6	θ_3	0
4	0	19,7	θ_4	0
5	0	21,1	θ_5	0

(Fuente: Propia)

La generación de la matriz por medio de MatLab ubica valores numéricos para que el software envíe resultados y tener una matriz equivalente según los ángulos que se van a utilizar.

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & -b_1 & 0 \\ b_1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 1.10a2 \\ b2 & 0 & a2 & 1.10b2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0.386a3 \\ b3 & 0 & a3 & 0.386b3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & -b4 & 0 & 0.197a4 \\ b4 & a4 & 0 & 0.197b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.211a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.211b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T5 resulta al realizar:

$$T5 = A1*A2*A3*A4*A5$$

(Ec. 3.68)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T5 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.69)

Una vez especificado las matrices generadas en el análisis cinemático del dedo meñique se realiza la programación en MatLab mediante el paquete de Peter Corke que es una ayuda en el área de la robótica, por medio de la tabla D-H se realiza los vectores de movimientos de agarre en el manejo de las sustancias tóxicas desde el punto cero hasta el punto de flexión de cada dedo.

```
%SIMULACION DEDO MEÑIQUE EN POSICION DE AGARRE
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
%clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 1.10 0 0 0], 'standard');
L{3} = link([0 .386 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .197 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .211 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 0 0 0];
menique = robot(L, 'Dedo Meñique en agarre', 'Unimation', 'params of
8/95');
clear L
menique.name = 'Dedo Meñique en agarre';
```

```

menique.manuf = 'Unimation';
drivebot(menique);
title ('Diagrama del dedo Meñique en posición de agarre de la mano
impresa en 3D')

```

Realizada la programación se ejecuta el editor dando click en run (correr) y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables para MatLab.

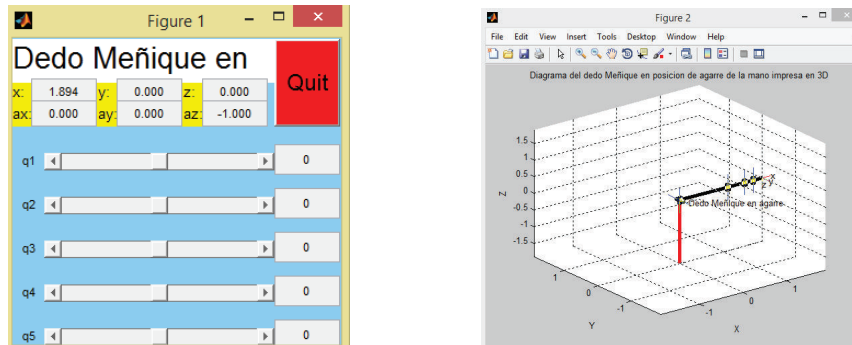


Figura 3.39. Simulación cinemática del dedo meñique en posición de inicio de agarre (Fuente: Propia)

Para la posición de agarre se ubica valores de desplazamientos angulares en q1, q2, q3, q4, q5 en radianes, determinando el efector final en posición de sujeción.

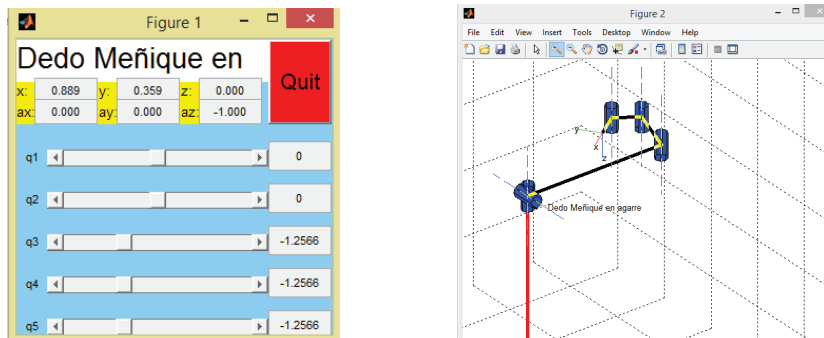


Figura 3.40. Dedo Meñique en posición de agarre (Fuente: propia)

b. Considerando el movimiento de la palma

La tabla de D-H en posición de agarre del dedo meñique con el movimiento de la palma está conformada por los siguientes parámetros:

Tabla III.13. Cuadro DH para el dedo meñique con el movimiento de la palma

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	-90	0	θ_1	0
2	-90	35	θ_2	0
3	0	75	θ_3	0
4	0	38,6	θ_3	0

5	0	19,7	θ_4	0
6	0	21,1	θ_5	0

(Fuente: Propia)

En el caso de la simulación del dedo meñique en posición de agarre considerando el movimiento de la palma genera las siguientes matrices de transformación homogénea:

$$A1 = \begin{bmatrix} a1 & 0 & -b1 & 0 \\ b1 & 0 & a1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 0.35a2 \\ b2 & 0 & a2 & 0.35b2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0.75a3 \\ b3 & 0 & a3 & 0.75b3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & 0 & -b4 & 0.386a4 \\ b4 & 0 & a4 & 0.386b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.197a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.197b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A6 = \begin{bmatrix} a6 & -b6 & 0 & 0.211a6 \\ b6 & a6 & 0 & 0.211b6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T5 del dedo meñique resulta al realizar:

$$T5 = A1 \cdot A2 \cdot A3 \cdot A4 \cdot A5 \cdot A6$$

(Ec. 3.70)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T5 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.71)

Las matrices generadas en el análisis cinemático del dedo meñique sirven para realizar la programación en MatLab mediante el paquete de Peter Corke que es una ayuda en el área de la robótica, por medio de la tabla D-H se realiza los vectores de movimientos de agarre

en el manejo de las sustancias tóxicas desde el punto cero hasta el punto de flexión de cada dedo.

```
%SIMULACION DEL DEDO MEÑIQUE CON LA PALMA DE LA MANO IMPRESA EN 3D
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2 0.35 0 0 0], 'standard');
L{3} = link([0 0.75 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .386 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .197 0 0 0], 'standard');
L{6} = link([0 .211 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 0 0 0 0 0];
qstretch = [0 0 0 0 0 0];
menique = robot(L, 'Dedo meñique con palma', 'Unimation', 'params of
8/95');
clear L
menique.name = 'Dedo meñique con palma';
menique.manuf = 'Unimation';
drivebot(menique);
title ('Diagrama del dedo meñique considerando el movimiento de la palma
de la mano impresa en 3D')
```

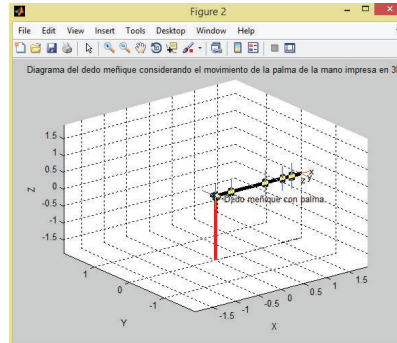


Figura 3.41. Simulación cinemática del dedo meñique en inicio de agarre con palma
(Fuente: Propia)

Se asigna valores a los q considerando que el desplazamiento de la palma es menor a las articulaciones de cada uno de los dedos.

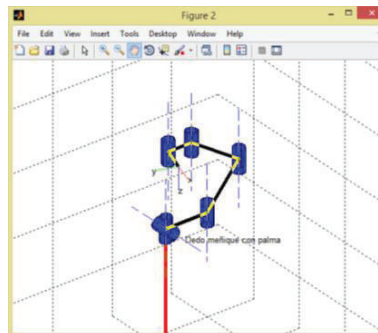


Figura 3.42. Dedo meñique en posición de agarre con el movimiento de la palma
(Fuente: Propia)

3.3.5. Análisis y simulación del dedo pulgar

El dedo pulgar tiene una movilidad diferente y una orientación opuesta a todos los demás, lo que confiere a la mano humana la capacidad de agarre. El procedimiento para la simulación de este dedo es esencialmente igual al seguido para los otros dedos. La configuración geométrica dimensional del dedo se representa en la figura que se detalla a continuación:



Figura 3.43. Medidas del dedo pulgar
(Fuente: Propia)

Tabla III.14. Cuadro DH para el dedo pulgar

Eslabón	α_i	a_i (mm)	θ_i	d_i (mm)
1	90	0	θ_1	0
2	0	50,0	θ_2	40
4	-90	30,0	θ_4	29
5	0	26,0	θ_5	0
6	0	33,0	θ_6	0

(Fuente: Propia)

La generación de la matriz por medio de MatLab ubica valores numéricos para que el software envíe resultados y tener una matriz equivalente según los ángulos que se van a utilizar.

La matriz de transformación A_i se genera mediante valores de teta (θ), alfa (a), a, d enviados a una matriz equivalente según la movilidad del ángulo de cada uno de los dedos.

Para calcular la matriz A_i se tiene la siguiente programación:

```
%A1=[(cos(teta)),(sin(teta).*cos(teta)),(sin(teta).*sin(alfa)),(a.*cos(teta));(sin(teta)),(cos(teta).*cos(alfa)),(cos(teta).*sin(alfa)),(a.*sin(teta));0,(sin(alfa)),(cos(alfa)),d;0,0,0,1]
teta=-pi/5
alfa=-pi/5
a=1.01
d=0.19
a1=cos(teta)
a2=-sin(teta).*cos(teta)
```

```

a3=sin(teta).*sin(alfa)
a4=a.*cos(teta)
b1=sin(teta)
b2=cos(teta).*cos(alfa)
b3=-cos(teta).*sin(alfa)
b4=a.*sin(teta)
c1=0
c2=sin(alfa)
c3=cos(alfa)
A=[a1 a2 a3 a4;b1 b2 b3 b4;c1 c2 c3 d;0 0 0 1]

```

Resultado de los datos puestos en la matriz

A =

```

0.8090  0.4755  0.3455  0.8171
-0.5878  0.6545  0.4755 -0.5937
0  -0.5878  0.8090  0.1900
0  0  0  1.0000

```

En el caso del dedo pulgar se emplea las mismas equivalencias que los dedos analizados anteriormente, se ubica las variables en las matrices generadas en este caso el coseno con la letra "a" y el seno con la letra "b".

a1=cos θ1; a2= cos θ2; a3= cos θ3; a4= cos θ4; a5= cos θ5; a6= cos θ6

b1=sinθ1; b2= sin θ2; b3= sin θ3; b4= sin θ4; b5= sin θ5; b6= sin θ6

Se ubican las variables de una manera simplificada en las matrices de transformación generadas en el caso del dedo pulgar son:

$$A1 = \begin{bmatrix} a1 & 0 & -b1 & 0 \\ b1 & 0 & a1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} a2 & 0 & -b2 & 0.50a2 \\ b2 & 0 & a2 & 0.50b2 \\ 0 & -1 & 0 & 0.40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} a3 & 0 & -b3 & 0.30a3 \\ b3 & 0 & a3 & 0.30b3 \\ 0 & -1 & 1 & 0.29 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} a4 & -b4 & 0 & 0.430a4 \\ b4 & a4 & 0 & 0.430b4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} a5 & -b5 & 0 & 0.260a5 \\ b5 & a5 & 0 & 0.260b5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz global de transformación T1 del dedo pulgar resulta al realizar:

$$T1 = A1*A2*A3*A4*A5$$

(Ec. 3.72)

La solución genérica se obtiene de la siguiente manera:

$$T1 = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & Px \\ R21 & R22 & R23 & Py \\ R31 & R32 & R33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.73)

Se consigue las componentes rotacionales globales (R11, R12, R13, R21, R22, R23, R31, R32, R33) de la siguiente manera:

$$R11 = \{a5 [a4 (b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5 [b4*(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\} - \{a5 [b4 (b1*b3 + a1*a2*a3) + a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\}$$

(Ec. 3.74)

$$R12 = -\{a5[b4(b1*b3+a1*a2*a3)+a1*a4*b2]+b5[a4(b1*b3+a1*a2*a3)-a1*b2*b4]\} - \{a5 [a4 (b1*b3 + a1*a2*a3)-a1*b2*b4]-b5[b4(b1*b3 + a1*a2*a3)+a1*a4*b2]\}$$

(Ec. 3.75)

$$R13 = a1*a2*b3-a3*b1$$

(Ec. 3.76)

$$R21 = \{a5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]+b5[a4(a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]\} - \{a5 [a4 (a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.77)

$$R22 = \{a5 [b4(a1*b3-a2*a3*b1)-a4*b1*b2]+b5 [a4(a1*b3-a2*a3*b1)+b1*b2*b4]\} + \{a5[a4 (a1*b3 - a2*a3*b1)+b1*b2*b4]-b5[b4(a1*b3 - a2*a3*b1) - a4*b1*b2]\}$$

(Ec. 3.78)

$$R23 = a1*a3 + a2*b1*b3$$

(Ec. 3.79)

$$R31 = -[a5(a2*b4+a3*a4*b2)+b5(a2*a4-a3*b2*b4)]+[a5(a2*a4-a3*b2*b4)-b5(a2*b4 + a3 * a4*b2)]$$

(Ec. 3.80)

$$R32 = [a5(a2*b4+a3*a2*b4)+b5(a2*a4 - a3*b4*b2)]-[a5(a2*a4-a3*b4*b2)- b5(a2*b4+ a3 * a4*b2)]$$

(Ec. 3.81)

$$R33 = -b2*b3$$

(Ec. 3.82)

Las componentes rectangulares de la posición del efector final (Px, Py, Pz) están constituidas por:

$$Px = - \{13\{a5(a1*a2*b3 + a1*a3*b2) + b5[b1*b4 + a4(a1*a2*a3 - a1*b2*b3)]\}/50 + [3*a4(a1*a2*a3 - a1*b2*b3)]/10 + \{43*a5[b1*b4 + a4(a1*a2*a3 - a1*b2*b3)]/100 + \{13\{a5[b1*b4 + a4(a1*a2*a3 - a1*b2*b3)] - b5*(a1*a2*b3 + a1*a3*b2)\}/50 - [43*b5(a1*a2*b3 + a1*a3*b2)]/100 + (a1*a2*a3)/2 - (a1*b2*b3)/2 + (b1)/4 + (3*b1*b4)/10$$

(Ec. 3.83)

$$Py = \{13\{a5[a4(a2*a3*b1 - b1*b2*b3) - a1*b4] - b5(a2*b1*b3 + a3*b1*b2)\}/50 - \{13\{a5(a2*b1*b3 + a3*b1*b2) + b5[a4(a2*a3*b1 - b1*b2*b3) - a1*b4]\}/50 + \{43*a5[a4(a2*a3*b1 - b1*b2*b3) - a1*b4]\}/100 + [3*a4(a2*a3*b1 - b1*b2*b3)]/10 - [43*b5(a2*b1*b3 + a3*b1*b2)]/100 - (3*a1*b4)/10 + (a2*a3*b1)/2 - (b1*b2*b3)/2 - (a1)/4$$

(Ec. 3.84)

$$Pz = (b2)/2 - \{13*a6[b5(b2*b3 - a2*a3) - a4*a5(a2*b3 + a3*b2)]\}/50 - \{13*b6[a5(b2*b3 - a2*a3) + a4*b5(a2*b3 + a3*b2)]\}/50 + [3*a4(a2*b3 + a3*b2)]/10 + (a2*b3)/2 + (a3*b2)/2 - [b5(b2*b3 - a2*a3)]/2 + [a4*a5*(a2*b3 + a3*b2)]/2$$

(Ec. 3.85)

Las ecuaciones que involucran a Px, Py y Pz son las que determinan el extremo final del dedo o también llamado efector final que alcanza al dar un desplazamiento angular de θ_i a cada una de las articulaciones que involucran al dedo índice.

La programación para la simulación del dedo pulgar es la siguiente:

```
%SIMULACION DEDO PULGAR DE LA MANO IMPRESA EN 3D
%Peter I. Corke
%clear L
% Alpha a Theta d sigma standar
L{1} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([0 .50 0 .40 0], 'standard');
L{3} = link([-pi/2 .30 0 .29 0], 'standard');
L{4} = link([0 .430 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .260 0 0 0], 'standard');
qz = [0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 0 0 0];
pulgar = robot(L, 'Dedo Pulgar', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
pulgar.name = 'Dedo Pulgar';
pulgar.manuf = 'Unimation';
drivebot(pulgar);
title ('Dedo del pulgar de la mano impresa en 3D')
```

Una vez realizada la programación se ejecuta el editor dando click en “run” y a su vez guardar la programación dentro de los ejecutables de MatLab.

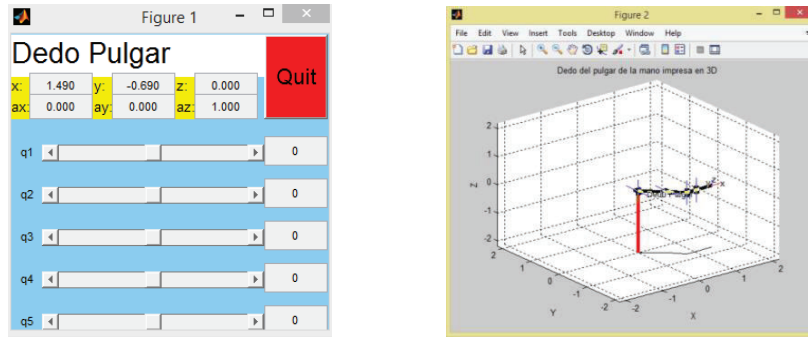


Figura 3.44. Desplazamientos angulares y simulación cinemática del dedo pulgar

(Fuente: Propia)

En la figura de desplazamientos angulares se puede ver que el valor inicial de los vectores “q1, q2, q3, q4 y q5” son cero en todas sus celdas.

Al ingresar en esta pantalla valores de desplazamiento angular “q” (en radianes) como se presenta a continuación en el caso de $q_3 = 1.2566$, se obtienen las coordenadas de desplazamiento finales del extremo del dedo, estos valores deben coincidir con los valores calculados en el vector de traslación (Px, Py, Pz).

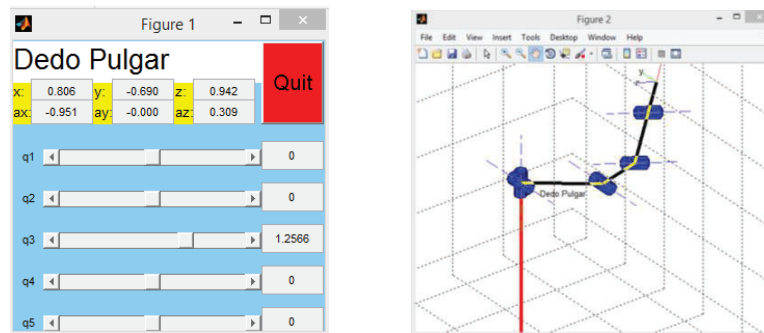


Figura 3.45. Simulación del dedo pulgar con desplazamientos angulares

(Fuente: Propia)

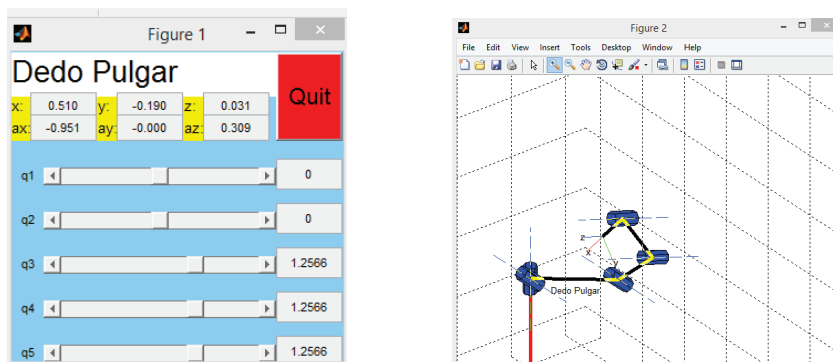


Figura 3.46. Simulación de la falange del dedo pulgar

(Fuente: Propia)

3.4. Ensamble de los tres dedos Anular, Medio e Índice

Una vez realizado el análisis cinemático se ensambla los dedos para verificar la posición de cada uno de ellos en este caso los dedos anular, medio e índice.

Para conseguir este ensamblaje se tiene la siguiente programación:

```
%DEDO INDICE
clear LI
% Alpha a Theta d sigma standar
LI{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LI{2} = link([-pi/2 1.13 0 -.19 0], 'standard');
LI{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LI{4} = link([0 .436 0 0 0], 'standard');
LI{5} = link([0 .256 0 0 0], 'standard');
LI{6} = link([0 .248 0 0 0], 'standard');
indice = robot(LI, 'indice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'i';
indice.manuf = 'Unimation';

%DEDO MEDIO
clear LM
LM{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LM{2} = link([-pi/2 1.15 0 0 0], 'standard');
LM{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LM{4} = link([0 .513 0 0 0], 'standard');
LM{5} = link([0 .252 0 0 0], 'standard');
LM{6} = link([0 .249 0 0 0], 'standard');
medio = robot(LM, 'Medio', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LM
medio.name = 'm';
medio.manuf = 'Unimation';

%DEDO ANULAR
clear LA
% Alpha a Theta d sigma standar
LA{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LA{2} = link([-pi/2 1.14 0 .17 0], 'standard');
LA{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LA{4} = link([0 .46 0 0 0], 'standard');
LA{5} = link([0 .218 0 0 0], 'standard');
LA{6} = link([0 .214 0 0 0], 'standard');
anular = robot(LA, 'Anular', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LA
113
anular.name = 'a';
anular.manuf = 'Unimation';
q1=[0 0 0 0 0 0];
q2=[0 0 .1745 .5239 1.3963 .6981];
q3=[1.5708 0 0 .7584 0 0];
q4=[1.5784 .0873 -.8981 1.6581 -.6981 .5236];
T=jtraj(q1,q2,25);
T3=jtraj(q3,q4,25);
plot(indice,T);
114
plot(medio,T);
plot(anular,T);
cla
T1=jtraj(q2,q1,25);
```

```

T4=jtraj(q4,q3,25);
plot(indice,T1);
hold on
plot(medio,T1);
plot(anular,T1);
title('Ensamble de los tres dedos en posición inicial "Anular, Medio e Índice"')

```

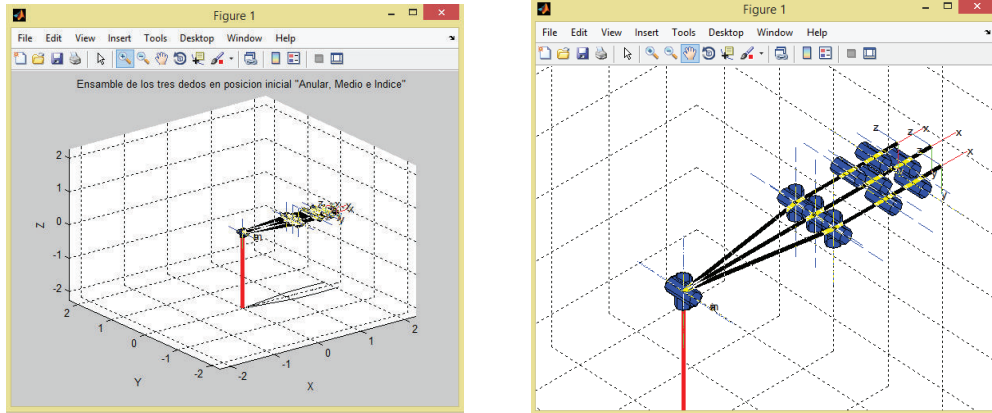


Figura 3.47. Ensamble de los dedos anular, medio e índice en MatLab

(Fuente: Propia)

3.4.1. Ensamble completo de la mano inalámbrica

El ensamblaje total de la mano se realiza mediante la siguiente programación:

```

%SIMULACION MANO ROBOTICA PARA EL MANEJO DE SUSTANCIAS TOXICAS
%DEDO INDICE
clear LI
% Alpha a Theta d sigma standar
LI{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LI{2} = link([-pi/2 .79 0 -.19 0], 'standard');
LI{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LI{4} = link([0 .38 0 0 0], 'standard');
LI{5} = link([0 .246 0 0 0], 'standard');
LI{6} = link([0 .188 0 0 0], 'standard');
indice = robot(LI, 'indice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'i';
indice.manuf = 'Unimation';

%DEDO MEDIO
clear LM
LM{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LM{2} = link([-pi/2 .76 0 0 0], 'standard');
LM{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LM{4} = link([0 .427 0 0 0], 'standard');
LM{5} = link([0 .275 0 0 0], 'standard');
LM{6} = link([0 .171 0 0 0], 'standard');
medio = robot(LM, 'Medio', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LM
medio.name = 'm';
medio.manuf = 'Unimation';

%DEDO ANULAR
clear LA
% Alpha a Theta d sigma standar

```



```

LA{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LA{2} = link([-pi/2 .71 0 .17 0], 'standard');
LA{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LA{4} = link([0 .39 0 0 0], 'standard');
LA{5} = link([0 .267 0 0 0], 'standard');
LA{6} = link([0 .17 0 0 0], 'standard');
anular = robot(LA, 'Anular', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LA
113
anular.name = 'a';
anular.manuf = 'Unimation';
%DEDO MENIQUE
clear LN
% Alpha a Theta d sigma standar
LN{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LN{2} = link([-pi/2 .67 0 .34 0], 'standard');
LN{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LN{4} = link([0 .30 0 0 0], 'standard');
LN{5} = link([0 .19 0 0 0], 'standard');
LN{6} = link([0 .15 0 0 0], 'standard');
menique = robot(LN, 'Menique', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LN
menique.name = 'n';
menique.manuf = 'Unimation';

%Dedo Pulgar
clear LP
% Alpha a Theta d sigma standar
LP{1} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
LP{2} = link([0 .167 0 0 0], 'standard');
LP{3} = link([pi/2 .139 0 -.0695 0], 'standard');
LP{4} = link([-pi/2 .30 0 0 0], 'standard');
LP{5} = link([0 .430 0 0 0], 'standard');
LP{6} = link([0 .260 0 0 0], 'standard');
pulgar = robot(LP, 'Pulgar', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LP
pulgar.name = 'p';
pulgar.manuf = 'Unimation';
q1=[0 0 0 0 0 0];
q2=[0 0 .1745 .5239 1.3963 .6981];
q3=[-1.5708 0 0 -.7584 0 0];
q4=[1.5784 .0873 -.8981 1.6581 -.6981 .5236];
T=jtraj(q1,q2,25);
T3=jtraj(q3,q4,25);
plot(indice,T);
114
plot(medio,T);
plot(anular,T);
plot(menique,T);
plot(pulgar,T3);
cla
T1=jtraj(q2,q1,25);
T4=jtraj(q4,q3,25);
plot(indice,T1);
hold on
plot(medio,T1);
plot(anular,T1);
plot(menique,T1);
plot(pulgar,T4);
title ('Ensamble total de la mano analizada')

```

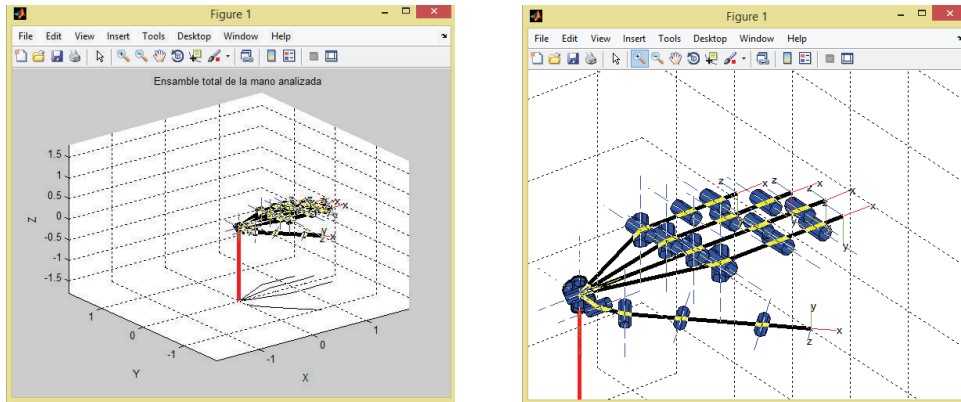


Figura 3.48. Ensamblaje total de la mano en MatLab

(Fuente: Propia)

3.4.2. Pruebas de trayectoria por medio de la cinemática inversa

Las pruebas de trayectoria se realizan por medio de una transformación homogénea que indica la posición del efector final, generando un número de puntos intermedios en este caso por la variable n, utilizando la función `jtraj(q1, q2, n)`

```
%SIMULACION DEDO INDICE
% PRUEBA DE TRAYECTORIA
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([pi/2 1.13 0 .17 0], 'standard');
L{3} = link([0 .436 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .256 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .248 0 0 0], 'standard');
qz = [0 -pi/2 0 0 0]
qr = [0 pi/2 0 0 0]
qstretch = [0 0 0 0 0]
indice = robot(L, 'Dedo Índice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'Dedo Índice';
indice.manuf = 'Unimation';
drivebot(indice);
q1=[0 -pi/2 0 0 0]
q2=[pi/4 pi/4 pi/4 pi/4 pi/4]
T=fkine(indice,q1)
[q,qd,qdd] = jtraj(q1, q2, 20)
T = jtraj(q1, q2, 100)
plot(indice,T)
title ('Diagrama del dedo índice de la mano impresa en 3 D "Cinemática Inversa"')
qz = 0 -1.5708 0 0 0
qr = 0 1.5708 0 0 0
qstretch = 0 0 0 0 0
```

$$q1 = \begin{matrix} 0 & -1.5708 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$q2 = \begin{matrix} 0.7854 & 0.7854 & 0.7854 & 0.7854 & 0.7854 \end{matrix}$$

$$T = \begin{matrix} 0.0000 & 0.0000 & -1.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.1700 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 2.0700 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{matrix}$$

Los cálculos dependen del valor de n que se ubique en los primeros casos de 20 y en análisis de T de 100

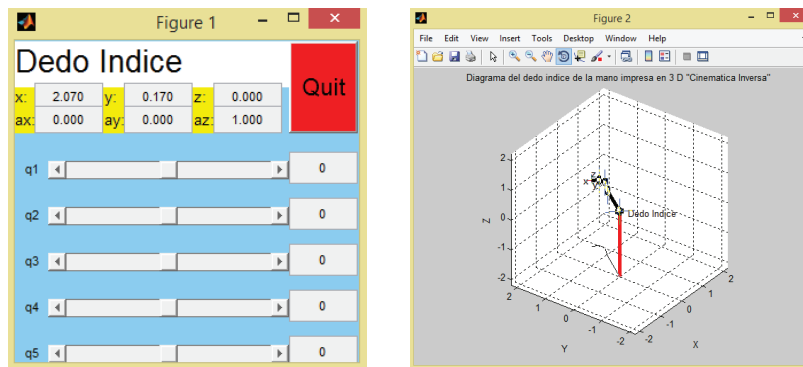


Figura 3.49. Simulación del dedo indice por medio de cinemática inversa
(Fuente: Propia)

Al manipular los q3, q4 y q5 se observa en posición de agarre considerando los parametros reales como el angulo de 72 grados en movilidad de la falange, falangina y falangeta.

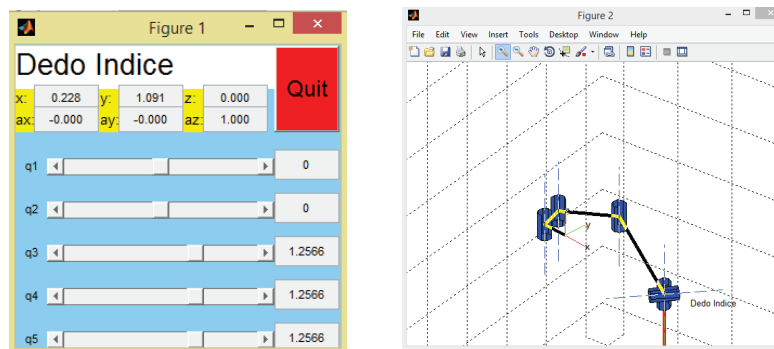


Figura 3.50. Cinemática inversa en posición de agarre
(Fuente: Propia)

El análisis cinemático de los demás dedos se fundamenta en el mismo principio de esta manera se desarrolla un dedo y los demas cambian las dimensiones en los vectores de la cinemática inversa.

3.4.3. Análisis cinemático del giro de la muñeca

El dimensionamiento de la mano robótica contempla, el análisis cinemático que permite encontrar las ecuaciones físicas para determinar la transmisión de movimientos en los dedos, esto a partir de la matriz jacobiana, y posteriormente la determinación del espacio de trabajo real.

Si consideramos como punto de inicio el hombro, seguido por el antebrazo y finalmente el giro de la muñeca se tiene dos grados de libertad en una matriz jacobiana que determina la velocidad en la muñeca aplicando las siguientes matrices:

Las matrices de transformación homogénea (H) son:^[30]

$$H^0_1(\theta_1) \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & a1c1 \\ s1 & c1 & 0 & a1s1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.86)

$$H^1_2(\theta_2) \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & a2c2 \\ s2 & c2 & 0 & a2s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.87)

$$H^0_2(\theta_1, \theta_2) \begin{bmatrix} c12 & -s12 & 0 & a1c1 + a2c2 \\ s12 & c12 & 0 & a1s1 + a2s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.88)

Las velocidades en la muñeca se obtienen al aplicar la siguiente ecuación:

$$\vec{\omega}^0_2 = J_w(\theta_1, \theta_2) * \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix}$$

(Ec. 3.89)

Donde $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ son las velocidades de las articulaciones en este caso del hombro y antebrazo y J_w el jacobiano de velocidad angular.

$$J_w(\theta_1, \theta_2) = [Z_0 \quad Z_1]$$

(Ec. 3.90)

Donde Z_0 es igual al vector unitario k y Z_1 la tercera columna de la matriz homogénea H^0_1

$$Z_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = k_0$$

(Ec. 3.91)

$$Z^0_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

(Ec. 3.92)

De esta manera tenemos el jacobiano:

$$J_w(\theta_1, \theta_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

(Ec. 3.93)

Por ultimo para encontrar la velocidad angular en la muñeca tenemos lo siguiente:

$$\vec{\omega}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{pmatrix}$$

(Ec. 3.94)

3.5. Simulación de la mano inalámbrica

Primero de todo se empieza una sesión nueva de V-REP. El simulador muestra una escena vacía por defecto. V-REP distingue dos tipos de geometrías, las puras y las no puras.

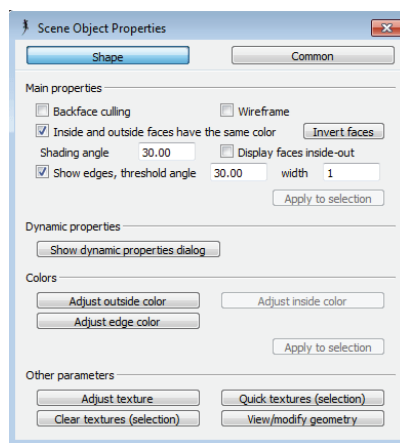


Figura 3.51. Propiedades del objeto

(Fuente: Propia)

Las geometrías puras son primitivas tipo esferas, cilindros, prismas, etc, que permiten el cálculo rápido de colisiones por lo que son ideales para simular efectos que no necesariamente se tienen que renderizar. Por contrario, las geometrías no puras suelen

tener un coste computacional muy elevado de cálculo de colisiones, ya que están compuestas por facetas. Sin embargo, las tarjetas gráficas están preparadas para este propósito ya que disponen de hardware especializado que permite trabajar con geometrías muy diversas y renderizarlas, que serán ideales para la visualización. Por lo tanto, normalmente las geometrías no puras se utilizarán sólo para renderizado (lo que el usuario ve), mientras que las geometrías puras se utilizan para poder ejecutar rutinas propias del simulador (colisiones, dinámica, etc.) que el usuario no tiene por qué ver.

V-REP dispone de un conjunto de dieciséis capas (estructuradas en dos filas de ocho capas cada una) en las que se ubica cada uno de los objetos que se crea. Por defecto las ocho primeras capas son visibles (la primera fila) y por conveniencia para hacer un objeto no visible se pasa a su capa equivalente en la segunda fila (capas de la nueve a la dieciséis). Un objeto puede estar en varias capas simultáneamente. Las capas en las que un objeto es visible pueden modificarse dentro de las propiedades comunes del objeto, haciendo doble-clic sobre el icono del objeto y pulsando el botón "Common".

Para generar geometrías no puras podemos importar o crear. La mano inalámbrica se importa las geometrías a partir de los ficheros STL que se utilizan para imprimir la Mano en los ficheros:

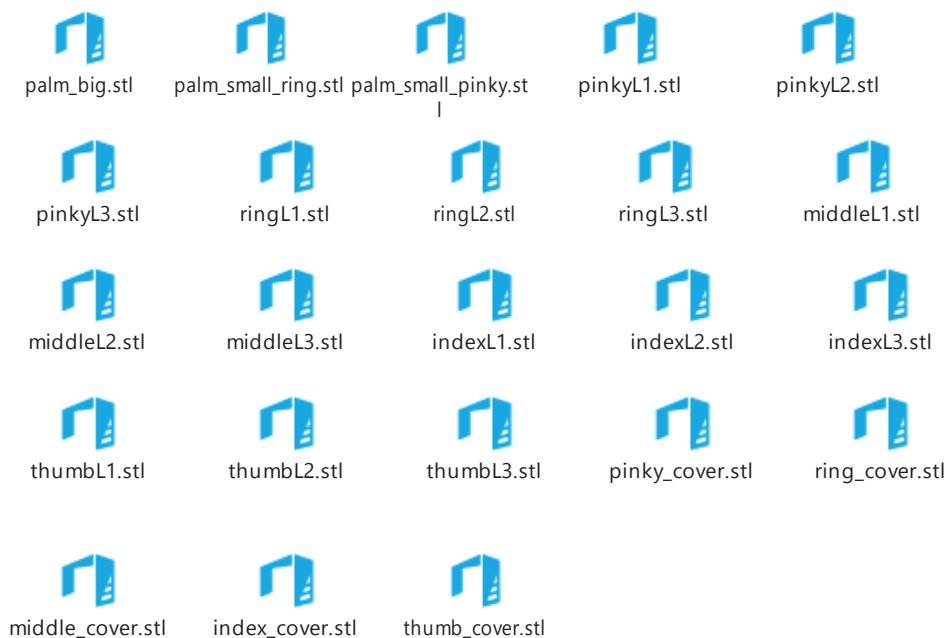


Figura 3.52. Piezas a ensamblar
(Fuente: Propia)

Las unidades de importación son en milímetros (mm) y el vector Z apunta hacia arriba.

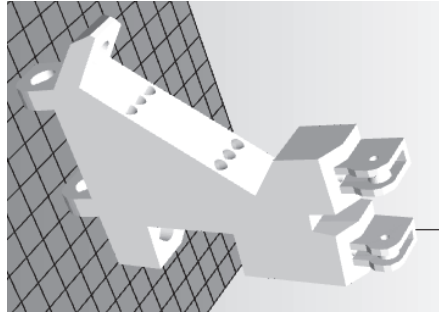



Figura 3.53. Palma de la mano inalámbrica

(Fuente: Propia)

A cada pieza importada se le cambia el nombre para poder identificarla adecuadamente, para ello, en la ventana "Scene hierarchy", se observa un objeto con nombre "STL_Imported", se da doble clic sobre el nombre para cambiarlo, para posicionar/orientar el objeto en el entorno de simulación se selecciona y luego se pulsar los iconos "object/item

shift" o "object/item rotate" , que se encuentra en el menú de iconos de la barra superior.

Importar las piezas anteriormente mencionadas con la posición y orientación que se indican en la Tabla que se detalla a continuación. En principio, las piezas están correctamente posicionadas, mientras que la orientación depende de la propia geometría de la pieza, por conveniencia, tras importar cada una de las piezas, accederemos al menú [Edit, Reorient bounding box, with reference of world], de esta forma la orientación de las piezas será en la configuración que se denota como *HOME*, siempre cero, se asegura que la opción *dynamic* está activada, según se especifica en la Tabla siguiente. Para ello, se accede dentro de las propiedades dinámicas del objeto tras pulsar el botón *Show dynamic properties dialog* dentro del cuadro de diálogo *Scene Object Properties*.

Los objetos estáticos no pueden ser directamente actuados a través de articulaciones controladas por par/fuerza, si no que su posición y orientación dependerá de la posición y orientación de otros objetos. No tienen dinámica, es decir, ni masa ni inercia y por lo general se usa para objetos de geometría no puras, si bien puede haber otros casos, en las que se desee una geometría pura sin propiedades dinámicas, si una articulación tuviera que mover un objeto dinámico, entonces deberá estar en modo par/fuerza o tener la casilla de modo híbrido activada que por el momento no son necesarios

Se asegura que la posición y orientación coincida con las indicadas en la Tabla siguiente.

Para la creación de wristL, se accede al menú [Add, Primitive shape, Cylinder], como dimensiones x=0.05 y z=0.02

Tabla III.15. Posiciones, orientaciones y propiedades dinámicas de la mano

Objeto	Posición (mm)			Orientación (°)			Estática
	X	Y	Z	ALPHA	BETA	GAMMA	
wristL	+0.028000	+0.117000	+0.010000	+90.000	-9.1972e-08	+2.0427e-06	No
Palm_big	+0.024618	+0.046490	+0.011011	-90.037	+4.694400	-90.0000	No
indexL1	-0.013908	-0.022155	+0.012584	-89.488	+5.477200	-84.4640	No
Index_cover	-0.013908	-0.014155	+0.022584	+89.488	-4.000000	+89.9300	No
indexL2	-0.016661	-0.051988	+0.013436	-86.565	+5.155300	-28.5720	No
indexL3	-0.018830	-0.076929	+0.012993	+91.838	-4.217500	+40.8170	No
middleL1	+0.014874	-0.027832	+0.011833	+89.457	+0.011212	+89.8510	No
middle_cover	+0.014874	-0.018000	0.020000	+89.457	-0.180000	+0.0200	No
middleL2	+0.014987	-0.059781	+0.011822	-85.900	-0.076902	-84.1620	No
middleL3	+0.014741	-0.086655	+0.012247	+89.543	-2.282200	+15.4490	No
thumbL1	-0.021587	+0.056754	+0.011613	+95.471	-87.113000	+92.1270	No
thumb_cover	-0.027492	+0.053106	+0.025300	+89.994	-56.028	+89.994	No
thumbL2	-0.051507	+0.035532	+0.012026	+83.595	-53.121000	+87.3350	No
thumbL3	-0.074782	+0.018785	+0.010844	+96.614	-52.433000	+19.4180	No
Cover_palm_pinky							No
Palm_small_pinky	+0.061943	+0.042686	+0.012827	+84.345	+37.654000	+94.6510	No
pinkyL1	+0.073048	+0.001464	+0.015898	-93.150	-15.727000	-177.9300	No
pinky_cover	+0.072000	+0.001464	+0.024000	-93.150	-15.727000	-90.9230	No
pinkyL2	+0.076515	-0.026237	+0.018192	-89.445	-15.567000	-176.9300	No
pinkyL3	+0.084756	-0.047088	+0.093480	+88.840	+12.429000	+154.7600	No
Cover_palm_ring							No
Palm_small_ring	+0.035622	+0.021425	+0.010821	-89.295	-29.902000	+90.4820	No
ringL1	+0.046647	-0.017040	+0.011201	-92.442	-4.153800	-9.4258	No
ring_cover	+0.046647	-1.000000	+2.000000	-90.442	-4.153800	-90.9240	No
ringL2	+0.049192	-0.045380	+0.013489	-88.824	-4.366800	-9.0367	No
ringL3	+0.015250	-0.069083	+0.014390	-89.009	-5.712200	-20.957	No

(Fuente: Propia)

Es necesario que los sólidos importados sean reconocidos por V-REP para ello, una vez colocados los nombres y ubicados los sólidos importados se debe generar mallas a cada componente; dando clic derecho sobre el objeto, add, convex hull of selection, aparece un nuevo icono con nombre SHAPE, es recomendable nombrar conforme se van creando estas piezas.

Una vez creados las mallas individuales se ubica en crear grupos de mallas a conforme es el movimiento de la mano, seleccionando las mallas necesarias, clic derecho, edit, Grouping/merging, group select shapes.

3.6. Articulaciones de la mano inalámbrica

Las articulaciones pueden ser del tipo revolución, prismáticas o esféricas. En este caso, todas las articulaciones del robot son del tipo revolución. Para crear una articulación accedemos al [Menu Add, Joint, Revolute], se renombra las articulaciones recién creadas e introduce los nombres que se muestran a continuación:

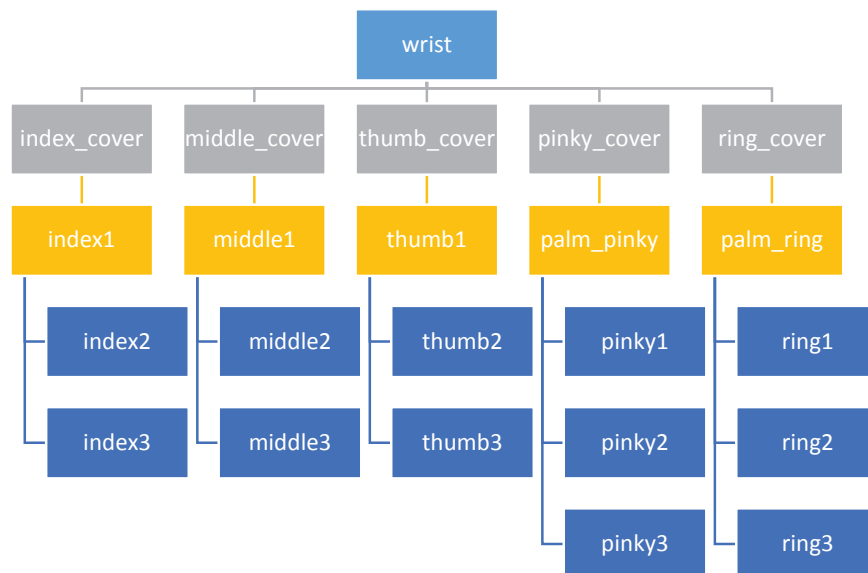


Figura 3.54. Articulaciones de la mano inalámbrica

(Fuente: Propia)

La siguiente figura muestra la aclaración al respecto del nombre asignado a cada una de las articulaciones de la mano inalámbrica.

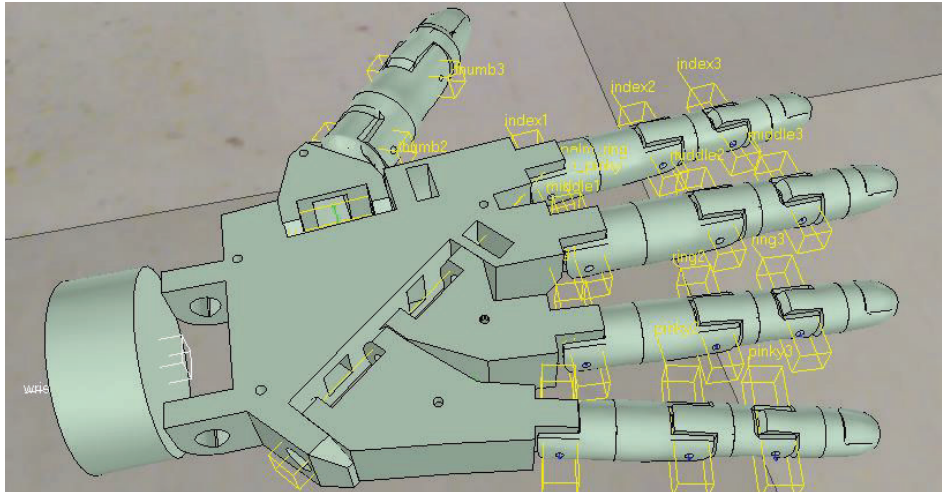


Figura 3.55. Ubicación de los puntos de articulaciones.

(Fuente. Propia)

Por defecto, las articulaciones están en el modo joint is in force/torque mode, sin embargo, utilizaremos esta opción solo para todas las articulaciones y de esta manera se pueda realizar un sinnúmero de movimientos de la mano.

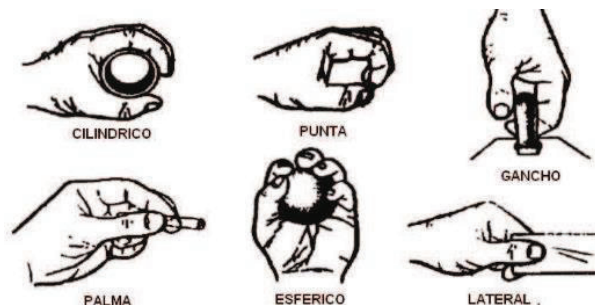


Figura 3.56. Movimientos de la mano

(Fuente: TAYLOR G.L, The anatomy and mechanics of the human hand)

En las propiedades de cada articulación, cuadro de diálogo *Scene Object Properties* se puede modificar el aspecto que tiene a partir de los parámetros *Joint Length* y *Joint diameter*, establecer dichos valores según se especifica en la tabla siguiente. Por defecto las articulaciones aparecen en la capa dos (en el apartado de las propiedades comunes), si bien por conveniencia, las pasaremos a la capa diez (justo la de abajo).

La tabla 3.17 muestra las propiedades que debe tener cada articulación mientras que la tabla 3.18 muestra su posición y orientación, las propiedades de las articulaciones se localiza en el cuadro de diálogo *Scene Object Properties*, siendo las articulaciones cíclicas, la casilla *Position is cyclic* debe estar activada. A excepción de la articulación *wrist*).

Tabla III.16. Propiedades de las articulaciones.

OBJETO	Position is cyclic	MODO	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	por. Min. (°)	Rango (°)
wrist	no	Torque/forcé mode	0.030	0.008	0	180
index1	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
index2	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
index3	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
middle1	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
middle2	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
middle3	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
thumb1	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
thumb2	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
thumb3	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
palm_pinky	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
pinky1	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
pinky2	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
pinky3	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
palm_ring	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
ring1	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
ring2	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-
ring3	si	Torque/forcé mode	0.030	0.008	-	-

(Fuente: Propia)

Tabla III.17. Posiciones y orientaciones de las articulaciones.

Objeto	Motor properties			Control properties		
	enabled	Deg/s	N*m	deg	Deg/s	PID proportional parameter
wrist	si	-	11	0	160	0.1
index1	si	-	8	0	160	0.1
index2	si	-	8	0	160	0.1
index3	si	-	8	0	160	0.1
middle1	si	-	8	0	160	0.1
middle2	si	-	8	0	160	0.1
middle3	si	-	8	0	160	0.1
thumb1	si	-	8	0	160	0.1

thumb2	si	-	8	0	160	0.1
thumb3	si	-	8	0	160	0.1
palm_pinky	si	-	8	0	160	0.1
pinky1	si	-	8	0	160	0.1
pinky2	si	-	8	0	160	0.1
pinky3	si	-	8	0	160	0.1
palm_ring	si	-	8	0	160	0.1
ring1	si	-	8	0	160	0.1
ring2	si	-	8	0	160	0.1
ring3	si	-	8	0	160	0.1

(Fuente: Propia)

Tabla III.18. Propiedades de las juntas dinámicas

Objeto	Posición (m)			Orientación (°)		
	X	Y	Z	ALPHA	BETA	GAMMA
wrist	+0.028000	+0.117000	+0.010000	+90.000	-9.1972e-08	+2.0427e-06
index1	-0.013908	-0.022155	+0.012584	-89.488	+5.477200	-84.4640
index2	-0.016661	-0.051988	+0.013436	-86.565	+5.155300	-28.5720
index3	-0.018830	-0.076929	+0.012993	+91.838	-4.217500	+40.8170
middle1	+0.014874	-0.027832	+0.011833	+89.457	+0.011212	+89.8510
middle2	+0.014987	-0.059781	+0.011822	-85.900	-0.076902	-84.1620
middle3	+0.014741	-0.086655	+0.012247	+89.543	-2.282200	+15.4490
thumb1	-0.021587	+0.056754	+0.011613	+95.471	-87.113000	+92.1270
thumb2	-0.051507	+0.035532	+0.012026	+83.595	-53.121000	+87.3350
thumb3	-0.074782	+0.018785	+0.010844	+96.614	-52.433000	+19.4180
palm_pinky	+0.061943	+0.042686	+0.012827	+84.345	+37.654000	+94.6510
pinky1	+0.073048	+0.001464	+0.015898	-93.150	-15.727000	-177.9300
pinky2	+0.076515	-0.026237	+0.018192	-89.445	-15.567000	-176.9300
pinky3	+0.084756	-0.047088	+0.093480	+88.840	+12.429000	+154.7600
palm_ring	+0.035622	+0.021425	+0.010821	-89.295	-29.902000	+90.4820
ring1	+0.046647	-0.017040	+0.011201	-92.442	-4.153800	-9.4258
ring2	+0.049192	-0.045380	+0.013489	-88.824	-4.366800	-9.0367
ring3	+0.015250	-0.069083	+0.014390	-89.009	-5.712200	-20.957

(Fuente: Propia)


Además de las articulaciones, hará falta crear objetos del tipo *dummy*. Son objetos cuyo fin no es otro que el de poder posicionar o relacionar determinados objetos entre sí. Típicamente se utiliza para calcular la cinemática inversa del robot, creando un objeto del

tipo *dummy* y las posiciones en la parte inferior de la palma accediendo a [Menu Add, Dummy]. Renombrando los objetos de forma que se llamen "XYZ Camera Proxy". Dentro del Dummy se inserta 6 cámaras cuyos nombres se presentan a continuación.

Tabla III.19. Relación de la mano.

CAMARA	TILTING	ALONG OWN X-AXIS	ALONG OWN Y-AXIS	ALONG OWN Z-AXIS	ANGLE (DEG)	ORTHO SIZE (M)
NX	NO	SI	SI	NO	60.0	2.09e-01
NY	NO	SI	SI	NO	60.0	2.09e-01
NZ	SI	SI	SI	NO	60.0	2.09e-01
X	NO	SI	SI	NO	60.0	2.09e-01
Y	NO	SI	SI	NO	60.0	2.09e-01
Z	SI	SI	SI	NO	60.0	2.09e-01

(Fuente: Propia)

V-REP permite copiar propiedades de un objeto desde otro objeto, por ejemplo, seleccionar "dummy" y, manteniendo el botón SHIFT pulsado, seleccionar el objeto "articulación" (se copian las propiedades). Después, para copiar la propiedad de la posición, accedemos al cuadro de diálogo "Object/Item position/orientation" pinchando sobre el icono rotación  y pulsando el botón "Apply to selection", tal y como se muestra en la siguiente Figura.

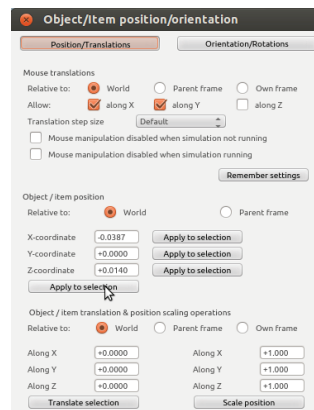


Figura 3.57. Propiedades de los elementos.

(Fuente: Software V-RED PRO Educacional)

3.7. Relaciones de parentesco

Ahora es el momento de establecer la relación adecuada entre las articulaciones y el resto de objetos de la simulación. El objeto base será *wristL*, se activa la opción *Object is model base* en las propiedades comunes del cuadro de diálogo *Scene Object Properties*. Se observa que aparece un punto justo a la izquierda del icono en los objetos que son modelos base tras ser activado. Esto permitirá tratar a toda la mano como un único objeto (para facilitar la copia entre diferentes escenas). La siguiente figura muestra las relaciones de parentesco entre los diferentes objetos. Para hacer un objeto *hijo* de otro objeto (*padre*), simplemente se selecciona el objeto *hijo* sobre su icono, arrastrando hasta el objeto *padre* y soltar. Para deshacer la relación de parentesco, repetir la operación, pero soltando el objeto sobre la escena principal.

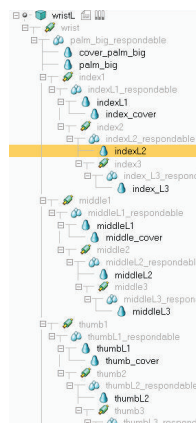


Figura 3.58. Relaciones de parentesco.

(Fuente: Software V-RED-PRO Educacional)

La programación se asociará al objeto en WRIST a un SCRIPT para ello se da click derecho al conjunto ya formado de *wrist*, *add*, *associated* *chid* *script*, *threaded*. Apareciendo seguidamente dos iconos al lado del objeto.

La programación que se realiza para el movimiento de cada una de las articulaciones de la mano inalámbrica, considerando los aspectos anteriores como es el caso de tablas, grados y posiciones es la siguiente.

-- Following few lines automatically added by V-REP to guarantee compatibility

-- with V-REP 3.1.3 and later:

```
if (sim_call_type==sim_childscriptcall_initialization) then          sim SetScriptAttribute  
(sim_handle_self,sim_childscriptattribute_automaticcascadingcalls,false)
```

```

end

if (sim_call_type==sim_childscriptcall_cleanup) then

    end

if (sim_call_type==sim_childscriptcall_sensing) then

simHandleChildScripts(sim_call_type)

end

if (sim_call_type==sim_childscriptcall_actuation) then

if not firstTimeHere93846738 then

firstTimeHere93846738=0

end

simSetScriptAttribute(sim_handle_self,sim_scriptattribute_executioncount,firstTimeHere9
3846738)

firstTimeHere93846738=firstTimeHere93846738+1

-----

function setTarget(wrist,thumbgroup,indexgroup,middlegroup,ringgroup,pinkygroup)

simSetUISlider(ui,8,thumbgroup)

simSetUISlider(ui,9,indexgroup)

simSetUISlider(ui,10,middlegroup)

simSetUISlider(ui,11,ringgroup)

simSetUISlider(ui,12,pinkygroup)

actuate(wrist,thumbgroup,indexgroup,middlegroup,ringgroup,pinkygroup)

end

function actuate(wrist,pos1,pos2,pos3,pos4,pos5) -- set each individual sliders according
to groups

local pos={wrist,pos1,pos2,pos3,pos4,pos5}

local str="

```

```

if wrist~=nil then
simSetUISlider(ui,7,wrist)
str=str..string.format(' wrist %d',wrist)
end

if pos1~=nil then
simSetUISlider(ui,10001, pos1 )
simSetUISlider(ui,10002, pos1 )
simSetUISlider(ui,10003, pos1 )
str=str..string.format(' thumb %d',pos1)
end

if pos2~=nil then
simSetUISlider(ui,11001, pos2 )
simSetUISlider(ui,11002, pos2 )
simSetUISlider(ui,11003, pos2 )
str=str..string.format(' index %d',pos2)
end

if pos3~=nil then
simSetUISlider(ui,12001, pos3 )
simSetUISlider(ui,12002, pos3 )
simSetUISlider(ui,12003, pos3 )
str=str..string.format(' middle %d',pos3)
end

if pos4~=nil then
simSetUISlider(ui,13001, pos4 )
simSetUISlider(ui,13002, pos4 )

```



```

simSetUISlider(ui,13003, pos4 )
str=str..string.format(' ring %d',pos4)
end

if pos5~=nil then
simSetUISlider(ui,14001, pos5 )
simSetUISlider(ui,14002, pos5 )
simSetUISlider(ui,14003, pos5 )
str=str..string.format(' pinky %d',pos5)
end

--[ if pos3~=nil then
for i=1,3 do --for j=1,3 do
--simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +j, pos )
--end
simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +1, pos3 )
simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +2, pos3 )
simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +3, pos3 )
end
str=str..string.format(' others %d',pos3)
end

--]] for i=1,6 do
if pos[i]~=nil then simSetUISlider(ui,i+6,pos[i]) end
end

simAddStatusBarMessage('in actuate()..str)
end

function actuateEachFingerJoints() -- actuate each fingers joints depending on their
individual slider

```

```

thumb[1]=(-(simGetUISlider(ui,10001)/1000*90))*deg2rad --0 to 90 deg
thumb[2]=(-(simGetUISlider(ui,10002)/1000*110))*deg2rad
thumb[3]=(-(simGetUISlider(ui,10003)/1000*90))*deg2rad
index[1]=(-(simGetUISlider(ui,11001)/1000*90))*deg2rad
index[2]=(-(simGetUISlider(ui,11002)/1000*110))*deg2rad
index[3]=(-(simGetUISlider(ui,11003)/1000*80))*deg2rad
middle[1]=(-(simGetUISlider(ui,12001)/1000*90))*deg2rad
middle[2]=(-(simGetUISlider(ui,12002)/1000*110))*deg2rad
middle[3]=(-(simGetUISlider(ui,12003)/1000*80))*deg2rad
palmring= -(simGetUISlider(ui,13000)/1000*30))*deg2rad
ring[1]= -(simGetUISlider(ui,13001)/1000*90))*deg2rad
ring[2]= -(simGetUISlider(ui,13002)/1000*110))*deg2rad
ring[3]= -(simGetUISlider(ui,13003)/1000*80))*deg2rad
palmpinky=-(simGetUISlider(ui,14000)/1000*30))*deg2rad
pinky[1]=(-(simGetUISlider(ui,14001)/1000*90))*deg2rad
pinky[2]=(-(simGetUISlider(ui,14002)/1000*110))*deg2rad
pinky[3]=(-(simGetUISlider(ui,14003)/1000*80))*deg2rad
simSetJointTargetPosition(hpalmring,palmring)
simSetJointTargetPosition(hpalmpinky,palmpinky)
for i=1,3 do
--simAddStatusBarMessage(string.format("thumb[%d]: %f",i,thumb[i]*rad2deg))
simSetJointTargetPosition(hthumb[i],thumb[i])
simSetJointTargetPosition(hindex[i],index[i])
simSetJointTargetPosition(hmiddle[i],middle[i])
simSetJointTargetPosition(hring[i],ring[i])

```

```

simSetJointTargetPosition(hpinky[i],pinky[i])

end end

if (simGetScriptExecutionCount()==0) then

deg2rad=math.pi/180

rad2deg=180/math.pi

ui=simGetUIHandle("UI")

hwrist=simGetObjectHandle("wrist")

wrist= 0 * deg2rad

--hoppothumb=simGetObjectHandle("thumb0")

--oppothumb= 0 * deg2rad

hpalmring=simGetObjectHandle("palm_ring")

hpalmpinky=simGetObjectHandle("palm_pinky")

hthumb={}

hthumb[1]=simGetObjectHandle("thumb1")

hthumb[2]=simGetObjectHandle("thumb2")

hthumb[3]=simGetObjectHandle("thumb3")

thumb={}

thumb[1]= 45*deg2rad

thumb[2]= 45*deg2rad

thumb[3]= 45*deg2rad

hindex={}

hindex[1]=simGetObjectHandle("index1")

hindex[2]=simGetObjectHandle("index2")

hindex[3]=simGetObjectHandle("index3")

index={}

```

```
index[1]=45*deg2rad
index[2]=45*deg2rad
index[3]=45*deg2rad
hmiddle={}
hmiddle[1]=simGetObjectHandle("middle1")
hmiddle[2]=simGetObjectHandle("middle2")
hmiddle[3]=simGetObjectHandle("middle3")
middle={}
middle[1]=45*deg2rad
middle[2]=45*deg2rad
middle[3]=45*deg2rad
hring={}
hring[1]=simGetObjectHandle("ring1")
hring[2]=simGetObjectHandle("ring2")
hring[3]=simGetObjectHandle("ring3")
ring={}
ring[1]=45*deg2rad
ring[2]=45*deg2rad
ring[3]=45*deg2rad
hpinky={}
hpinky[1]=simGetObjectHandle("pinky1")
hpinky[2]=simGetObjectHandle("pinky2")
hpinky[3]=simGetObjectHandle("pinky3")
pinky={}
pinky[1]=45*deg2rad
```

```

pinky[2]=45*deg2rad

pinky[3]=45*deg2rad

predefMotion=false

end

simHandleChildScripts(sim_call_type)

buttonID=simGetUIEventButton(ui)

--print(buttonID)

if buttonID==8 or buttonID==9 or buttonID==10 or buttonID==11 or buttonID==12 then --5
main groups

pos=simGetUISlider(ui,buttonID)

if buttonID== 8 then --thumb

-simSetUISlider(ui,10000, pos )

--[ simSetUISlider(ui,10001, pos )

simSetUISlider(ui,10002, pos )

simSetUISlider(ui,10003, pos )

--]] actuate(nil,pos,nil,nil,nil,nil)

end

if buttonID== 9 then --index

--[ simSetUISlider(ui,11001, pos )

simSetUISlider(ui,11002, pos )

simSetUISlider(ui,11003, pos )

--]] actuate(nil,nil,pos,nil,nil,nil)

end

if buttonID== 10 then --index

actuate(nil,nil,nil,pos,nil,nil)

end

```

```

if buttonID== 11 then --index
actuate(nil,nil,nil,nil,pos,nil)
end

if buttonID== 12 then --index
actuate(nil,nil,nil,nil,nil,pos)
end

--[ if buttonID== 10 then --middle, ring pinky
for i=1,3 do --for j=1,3 do
--  simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +j, pos )
--end

simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +1, pos)
simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +2, pos )
simSetUISlider(ui,(11+i)*1000 +3, pos )
end end

--]]      predefMotion=false
end

wrist=simGetUISlider(ui,7)

simSetJointTargetPosition(hwrist,(((wrist/1000)*180))*deg2rad)

--oppothumb=simGetUISlider(ui,10000) /1000 *80*deg2rad --0 to 90 deg
--simAddStatusBarMessage(string.format('oppothumb slide:%f',oppothumb))
--simSetJointTargetPosition(hoppothumb,oppothumb)

thumbgroup=simGetUISlider(ui,8)
indexgroup=simGetUISlider(ui,9)
middlegroup=simGetUISlider(ui,10)
ringgroup=simGetUISlider(ui,11)

```

```

pinkygroup=simGetUISlider(ui,12)

--simAddStatusBarMessage(string.format("twrist=%d      tthumb=%d      tindex=%d
tother=%d",wrist,thumbgroup,indexgroup,othergroup))

--checking if there is a command from TCP_server script
cmd=simGetStringSignal('cmdSignal')

if (buttonID >=20000 and buttonID<=20020)or cmd~=nil then

predefMotion=true

simClearStringSignal('cmdSignal')

else

predefMotion=false

end

----- predefined position definition

if buttonID==20000 or cmd=='point' then --pointing

--twrist=1000 tthumb=416 tindex=234 tother=973

twrist=1000 tthumb=416 tindex=100 tmiddle=973 tring=973 tpinky=973

simAddStatusBarMessage(string.format("%d twrist=%d tthumb=%d tindex=%d tmiddle=%d
tring=%d      tpinky=%d",simGetSimulationTime(),
wrist,thumbgroup,indexgroup,tmiddle,tring,tpinky))

end

if buttonID==20001 or cmd=='close'then --active index grip

twrist=500 tthumb=416 tindex=600 tmiddle=973 tring=973 tpinky=973

end

if buttonID==20007 or cmd=='open' then --open palm grip

twrist=1000 tthumb=0 tindex=0 tmiddle=0 tring=0 tpinky=0

end

-- independent finger position triggering with parameter

```

```

local token

local val={}

cpt=0

--to remove (test voice commande main sliders with parameter)
--[ if simGetSimulationTime()<18 then cmd='pinky 500' end
if simGetSimulationTime()<15 then cmd='ring,500' end
if simGetSimulationTime()<12 then cmd='middle%500' end
if simGetSimulationTime()<9 then cmd='index{500' end
if simGetSimulationTime()<6 then cmd='thumb 500' end
if simGetSimulationTime()<3 then cmd='wrist&{#$1000' end
--]] --end to remove

if cmd~= nil then

for token in string.gmatch(cmd, "%w+") do

cpt=cpt+1

val[cpt]=token

print(cpt,val[cpt])

end

if val[2]~=nil then

local value=tonumber(val[2])

local slid={}

if val[1]== 'wrist' then

slid[1]=value

end

if val[1]== 'thumb' then

slid[2]=value

```



```

end

if val[1]== 'index' then

slid[3]=value

end

if val[1]== 'middle' then

slid[4]=value

end

if val[1]== 'ring' then

slid[5]=value

end

if val[1]== 'pinky' then

slid[6]=value

end

actuate(slid[1],slid[2],slid[3],slid[4],slid[5],slid[6])

end end

cmd="

-----

if predefMotion==true then

setTarget(twrist,tthumb,tindex,tmiddle,tring,tpinky)

simAddStatusBarMessage(string.format("%d twist=%d tthumb=%d tindex=%d tmiddle=%d

tring=%d

tpinky=%d",simGetSimulationTime(), wrist,thumbgroup,indexgroup,tmiddle,tring,tpinky))

else

actuateEachFingerJoints()

end

```

```

if (simGetSimulationState()==sim_simulation_advancing_lastbeforestop) then
actuate(0,0,0,0,0,0)  end

```

-- Following few lines automatically added by V-REP to guarantee compatibility

-- with V-REP 3.1.3 and later:

End

Una vez programado se coloca en play para realizar las simulaciones del ensamble correspondiente.

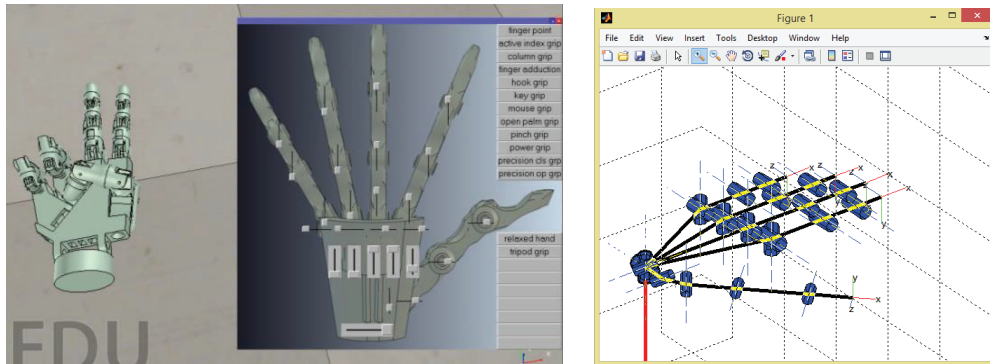


Figura 3.59. Simulación del ensamble de los dedos de la mano.

(Fuente: Propia)

La simulación de la mano inalámbrica muestra algunas facetas de movimientos.

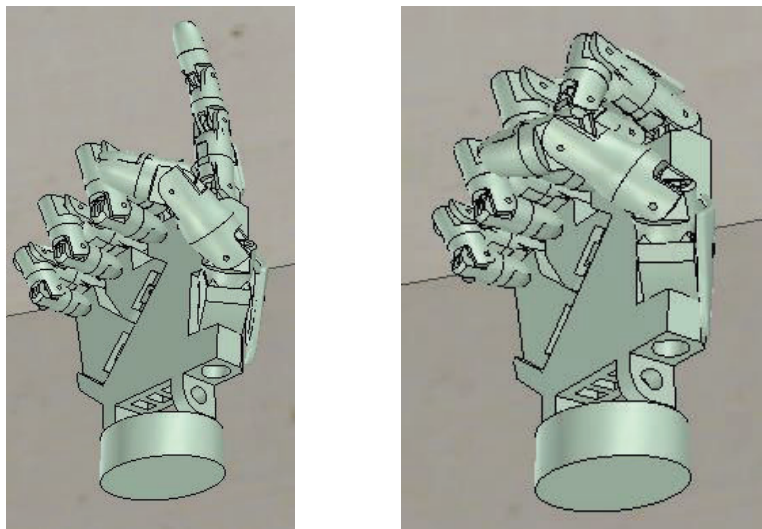


Figura 3.60. Verificación de la simulación en modo indicación y en puño.

(Fuente: Propia)

3.8. Impresión de las piezas

La impresora 3D ubica a los elementos en formato stl, obteniendo 25 elementos, determinándose además el cálculo del centro de masas, efectos inerciales, selección del material, cálculo de espesor de la carcasa, fuerzas centrípetas, par gravitacional y de fricción, análisis estático y el relleno para cada parte de la mano; esto por cuanto resulta más práctico que utilizar ecuaciones del movimiento de Euler Lagrange.



Figura 3.61. Impresoras 3 D

(Fuente: Propia)

Cada una de las piezas se configuran en el software de impresion 3D para poder ensamblar cada una de las partes.

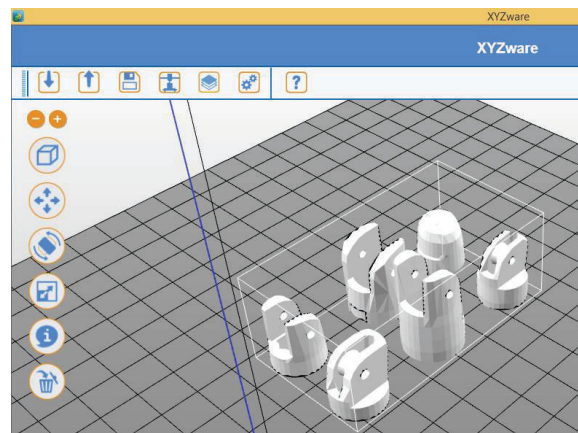


Figura 3.62. Impresión del dedo anular.

(Fuente: Propia)

Se selecciona el tipo de relleno y acabado, esto depende de cuanto material se tiene para la impresión de la mano inalambrica, en este caso es un relleno exagonal con un acabado de primera.

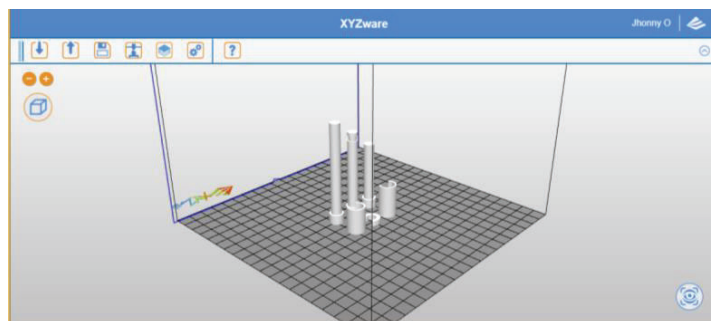


Figura 3.63. Reconocimiento de las piezas de unión.

(Fuente: Propia)

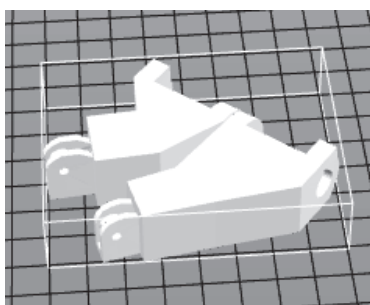


Figura 3.64. Palma en el software de impresion 3D

(Fuente: Propia)

3.9. Programación y conexiones de Arduinos para la mano inalámbrica

Las programaciones de los arduinos se realizan por medio de open source o software libre que se puede descargar de cualquier plataforma afin a la placa electrónica arduino, configurando cada pin de entrada y salida de los componentes físicos que se van a conectar.

```

mov_dedos Arduino 1.6.9
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
mov_dedos
#include<Servo.h> //cargar libreria Servo.h contiene métodos para trabajar con servos

Servo myservo1; //crea un objeto servo para controlar el servomotor
Servo myservo2; //muñeca
int potpin = 0; // pin analogico usado para conectar el potenciómetro
int potpin = 1;
int val1; // variable para leer el valor del pin analogico
int val2;

void setup() {
  myservo.attach(6); // asocia el servo al pin 6
  myservo.attach(7);
}

void loop() {
  val1 = analogRead(potpin1); // lee el valor del potenciómetro ( valor
  val2 = analogRead(potpin2); //entre y 1023)
  val1 = map(val,0,900,0,85); //escala el valor para usarlo con el servo
  val2 = map(val,0,900,180,0); // (valor entre 0 y 180 se lo cambia a 180, 0 invertimos su giro )
  myservo1.write(val1); // fija la posición del servo de acuerdo
  myservo2.write(val2); //al valor escalado
  delay(15); //espera a que elservo se posicione
}

```

Figura 3.65. Programación de los movimientos de los dedos en un software libre

(Fuente: Propia)

Para el giro de la muñeca se tiene el siguiente diagrama de flujo.

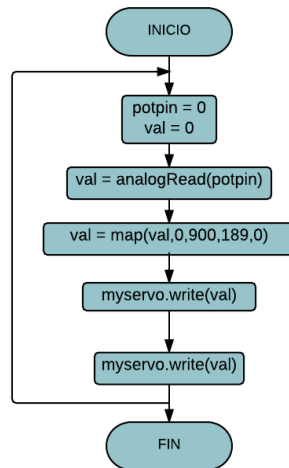


Figura 3.66. Diagrama de flujo para la programación en el giro de la muñeca
(Fuente: Propia)

La programación para tener el mando inalámbrico por el guante sensorial es la siguiente:

```
#include<SoftwareSerial.h>

#include<Servo.h>

Servo ser1; Servo ser2; Servo ser3; Servo ser4; Servo ser5;

#define rxPin 10

#define txPin 11

SoftwareSerial miPuertoSerie = SoftwareSerial(rxPin,txPin);

int pos1,pos2,pos3,pos4,pos5; char dato; void setup() {

ser.attach(2); ser.attach(7); ser.attach(3); ser.attach(4); ser.attach(5);

mi PuertoSerie.begin(9600); Serial,begin(9600);

} void loop() { leer ();

if (dato=='a')

{ miPuertoSerie.write("a");

leer ();

ser1.write((dato-16)*5);
```

```

} if (dato=='b') {
miPuertoSerie.write("b");

leer ();

ser2.write(180-(dato-16)*5);
} if (dato=='d')
{ miPuertoSerie.write("d");
leer (); ser4.write(180-(dato-16)*5);
} if (dato=='e')
{ miPuertoSerie.write("e");
leer (); ser5.write(-(dato-16)*5);
} } void leer()
{ dato=-1;
while(dato<0)
{ dato= miPuertoSerie.read(); } }

```

3.9.1. Conexiones y programación de un servo con una galga

Las conexiones y simulación de cada uno de los componentes se realizan en Autodesk Circuits que es un simulador en línea, en el caso que se puede observar se muestra la conexión y programación de un servo motor con la señal de envió que es el potenciómetro cumpliendo la misma función que una galga flexo métrica que se utiliza en la mano inalámbrica.

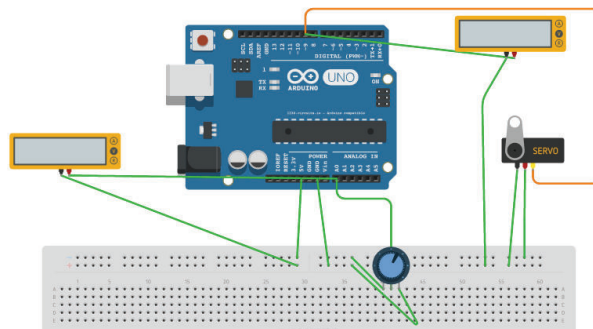


Figura 3.67. Conexión de un servo motor
(Fuente: Propia)

Las conexiones realizadas en el potenciómetro, que es la misma de una galga flexo métrica viene dada por las tres terminales, la primera a fase, la segunda da la señal de ingreso a las entradas analógicas que tiene la tarjeta y por último el terminal sobrante a neutro de esta manera consigo energizar la galga y enviar una señal según el rango programado para el movimiento del servomotor.

El servomotor al ser un consumidor por lo general se caracteriza por recibir una señal de las salidas de la tarjeta electrónica dependiendo de la programación, de la misma manera los servomotores se componen de tres terminales, dos de ellos son los que energizan en fase y neutro y el otro recibe la señal para el movimiento deseado.

La programación para este caso tenemos la siguiente que se considera como el giro de la muñeca:

```
#include<Servo.h> //  
  
Servo myservo; //crea un objeto servo para controlar el servomotor  
  
int potenciometro = A0; // pin analógico usado para conectar el potenciómetro o galga  
  
int pos=0; // variable para leer el valor del pin analógico  
  
int lectura=0; void setup() {  
  
myservo.attach(9); // asocia el servo al pin 9  
  
}  
  
void loop() {  
  
lectura=analogRead(potenciometro); // lee el valor del potenciómetro  
  
pos=map(lectura,0,1023,0,180); //escala el valor para usarlo con el servo //(valor entre 0 y  
180 se lo cambia a 180, 0 invertimos su giro)  
  
myservo.write(pos); // fija la posición del servo de acuerdo al valor escalado  
  
delay(10); //espera a que el servo se posicione  
  
}
```

La simulación de los movimientos según la variable del potenciómetro se detalla a continuación:

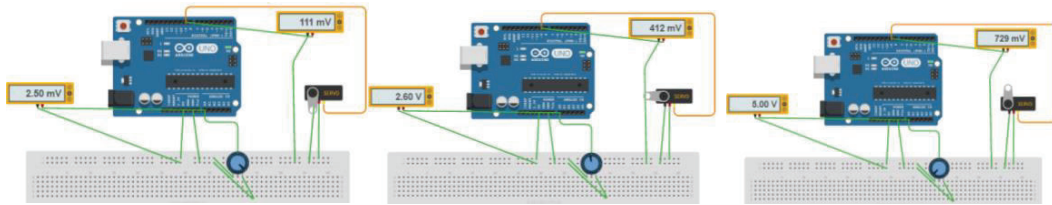


Figura 3.68. Movimientos del servomotor según la señal analógica

(Fuente: Propia)

Como se puede observar en la figura anterior se observa el movimiento del servomotor según el desplazamiento del potenciómetro que para el caso de la mano inalámbrica varía según la flexión de una galga flexo métrica.

3.9.2. Programación de la tarjeta y conexiones de los cinco dedos junto a las galgas flexo métricas

La ubicación de los servomotores y de las galgas flexo métricas parten de un punto inicial o punto cero que se llama, de esta manera se ubican los elementos de control que darán el movimiento a cada uno de los dedos, se debe considerar que en este caso se tiene como punto de partida la mano abierta que de ahí en adelante se conseguirá el cierre de la mano con las pruebas de movimiento en cada uno de los dedos.

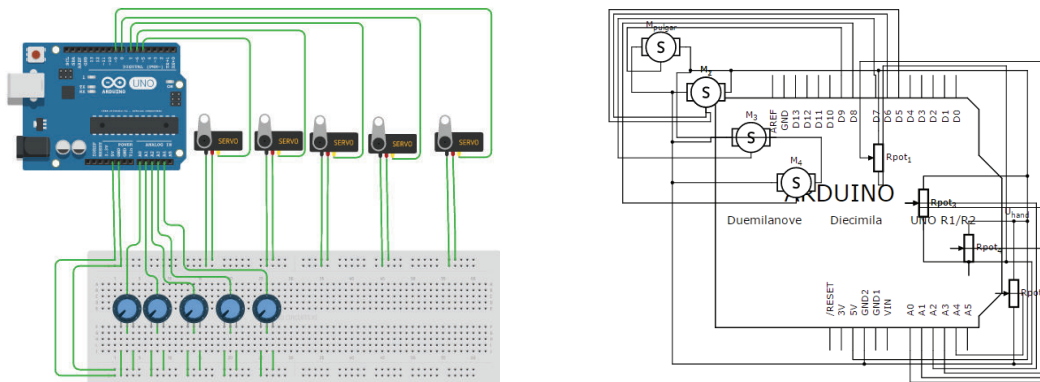


Figura 3.69. Componentes electrónicos para el movimiento de la mano

(Fuente: Propia)

Cada dedo es independiente, por esta razón se ubica 5 elementos de control y 5 elementos de acción que darán el movimiento a cada uno de los dedos, una vez ubicado los elementos en los pines de entrada, salida y debidamente energizados se procede a realizar la programación para cargar a la tarjeta y de esta manera obtener los movimientos deseados.

La programación que se tiene para el movimiento de los dedos es la siguiente:

```
#include<Servo.h> //cargar libreria Servo.h
```



```

Servo myservo1; //DEDO 1
Servo myservo2; //DEDO 2
Servo myservo3; //DEDO 3
Servo myservo4; //DEDO 4
Servo myservo5; //DEDO 5

int potpin0 = 0; // pin analógico usado para conectar el potenciómetro
int potpin = 1;
int potpin1 = 1;
int potpin2 = 2;
int potpin3 = 3;
int potpin4 = 4;

int val1; // variable para leer el valor del pin analógico
int val2;
int val3;
int val4;
int val5;

void setup() {
myservo1.attach(5);
myservo2.attach(6);
myservo3.attach(7);
myservo4.attach(8);
myservo5.attach(9);
}

void loop()
{
val1 = analogRead(potpin0); // lee el valor del potenciómetro
val2 = analogRead(potpin1);
val3 = analogRead(potpin2);
val4 = analogRead(potpin3);
val5 = analogRead(potpin4);
val1 = map(val1,0,1023,0,180); //escala el valor para usarlo con el servo

```

```

val2 = map(val2,0,1023,0,180);//(valor entre 0 y 180 se lo cambia a 180, 0 se invierte el
giro) )

val3 = map(val3,0,1023,0,180);
val4 = map(val4,0,1023,0,180);
val5 = map(val5,0,1023,0,180);

myservo1.write(val1);      // fija la posición del servo de acuerdo
myservo2.write(val2);      //al valor escalado
myservo3.write(val3);
myservo4.write(val4);
myservo5.write(val5);

delay(15);                //espera a que el servo se posicione
}

```

Una vez realizada la programación se procede a simular cada uno de los dedos en este caso cada servomotor que nos dará los movimientos en la práctica real.

3.9.3. Pruebas de puño cerrado

La verificación de la programación se realiza mediante el movimiento de cada uno de los potenciómetros y estos a su vez me crean el movimiento por medio de los servomotores de cada uno de los dedos.

En este caso como se puede observar en la figura siguiente los servos motores se encuentran hacia abajo, esto permite tener todos los dedos cerrados considerando que su posición inicial son los servomotores hacia arriba.

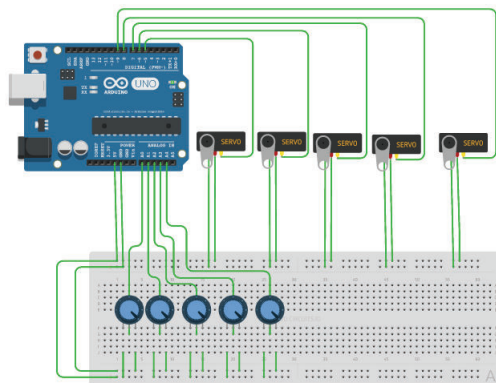


Figura 3.70. Simulación de la mano en efecto del puño cerrado
(Fuente: Propia)

Pruebas del pulgar abierto

La distribución de los movimientos de cada uno de los servomotores en referencia a los dedos se distribuye de izquierda a derecha como el dedo meñique, anular, medio, índice y pulgar.

En la figura a continuación se muestra a los dedos cerrados excepto el dedo pulgar que se encuentra abierto, de la misma manera el potenciómetro se encuentra hacia el otro sentido de los demás lo que me indica que cada uno de los dedos esta funcionando independientemente siendo exitosa la programación de la tarjeta.

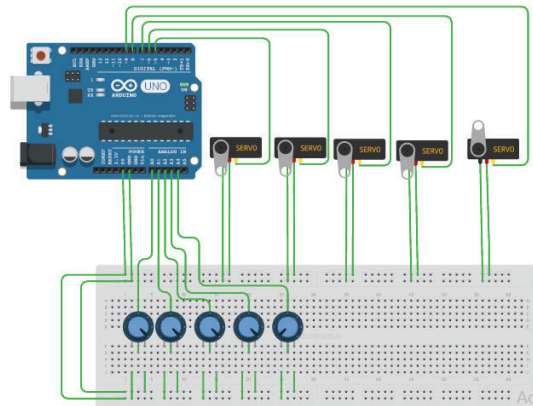


Figura 3.71. Pruebas de funcionamiento, pulgar abierto

(Fuente: Propia)

3.9.4. Pruebas de Señalización

Las pruebas de señalización se realizan mediante el movimiento del dedo índice y los demás dedos cerrados, de esta manera comprobamos la versatilidad que muestra la programación y las conexiones de la mano inalámbrica.

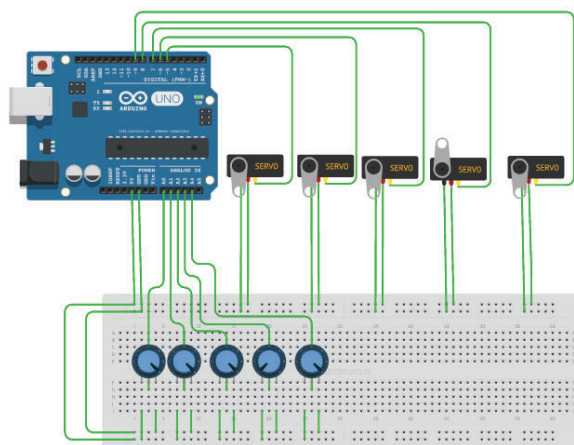


Figura 3.72. Pruebas de funcionamiento "Dedo índice"

(Fuente: Propia)

Prueba de los tres dedos cerrados

Los movimientos deseados según la programación se pueden verificar que cada uno de los dedos actúa independientemente sin tener error y complicaciones debido a su buena ubicación de los pines de salida y entrada en la tarjeta electrónica.

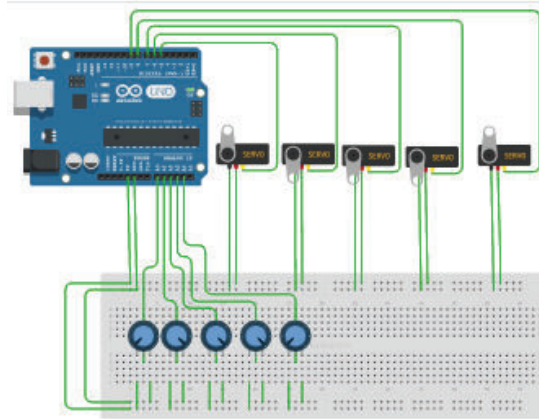


Figura 3.73. Pruebas de funcionamiento, Tres dedos

(Fuente: Propia)

3.9.5. Conexión inalámbrica

La conexión inalámbrica se realiza por medio de dos placas electrónicas arduino en condición master – esclavo, esto quiere decir que la una placa envía señales a la otra por medio de un dispositivo adicional llamado Bluetooth HC05 en cada una de las tarjetas de esta manera se logra tener la señal emisor – receptor que se necesita para el mando inalámbrico de la mano por medio de un guante sensorial ubicado a una distancia prudencial caso experimental de 15 a 20 metros de los elementos tóxicos.

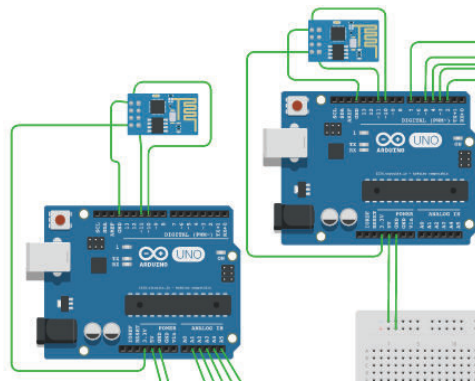


Figura 3.74. Conexiones del bluetooth para el mando inalámbrico

(Fuente: Propia)

La conexión del bluetooth en la placa electrónica viene dada por una energización de 3.3 V que el mismo arduino nos proporciona además del cierre del circuito a neutro, de esta manera enviamos señales para que reconozca la tarjeta tanto del emisor como del receptor.

La programación para conseguir que las placas electrónicas se comuniquen es:

```
#include<SoftwareSerial.h>
#include<Servo.h>

Servo ser1;
Servo ser2;
Servo ser3;
Servo ser4;
Servo ser5;

#define rxPin 10
#define txPin 11

SoftwareSerial miPuertoSerie = SoftwareSerial(rxPin,txPin);
int pos1,pos2,pos3,pos4,pos5;
char dato;

void setup() {
ser1.attach(2);
ser2.attach(7);
ser3.attach(3);
ser4.attach(4);
ser5.attach(5);
miPuertoSerie.begin(9600);
Serial.begin(9600);
} void loop() {
leer ();
if (dato=='a')
{ miPuertoSerie.write("a");
leer ();
ser1.write(((dato-16)*5); }
}
```

```

if (dato=='b')
{ miPuertoSerie.write("b");
leer ();
ser2.write(180-(dato-16)*5); }
if (dato=='c')
{
miPuertoSerie.write("c");
leer ();
ser3.write(180-(dato-16)*5);
}
if (dato=='d')
{
miPuertoSerie.write("d");
leer ();
ser4.write(180-(dato-16)*5);
}
if (dato=='e')
{
miPuertoSerie.write("e");
leer ();
ser5.write(-(dato-16)*5);
} }
void leer()
{
dato=-1;
while(dato<0)
{ dato=miPuertoSerie.read(); } }

```

3.9.6. Conexión completa

La conexión de todos los componentes se realiza mediante las especificaciones anteriores dadas, donde consta de los cinco servomotores para cada uno de los dedos el bluetooth y la placa electrónica esclavo, para el mando a distancia se tiene de cinco galgas flexo

métricas, el bluetooth la tarjeta master debidamente programadas ya que actúan de forma simultanea las dos placas, la una que recibe información, procesa y envía la señal a la otra tarjeta que recepta la información , procesa y ejecuta la acción de mover cada uno de los dedos de la mano inalámbrica en cuanto a la muñeca también se tiene la movilidad por medio de una galga y un servomotor independiente a esta tarjeta para evitar problemas de corrientes parasitas.

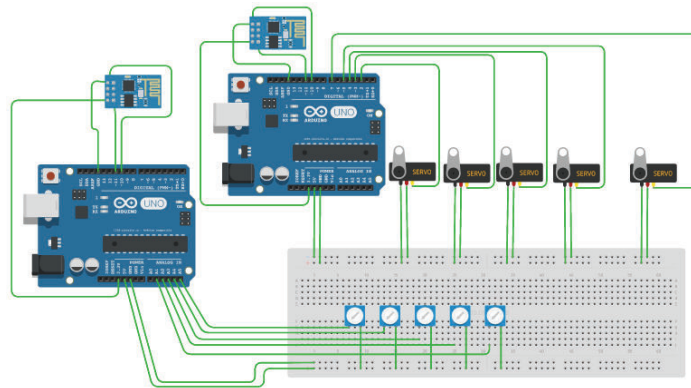


Figura 3.75. Conexiones completas de la mano inalámbrica
(Fuente: Propia)

La programación que se ubica es la recopilación de las programaciones anteriores previamente citadas, cabe mencionar que se ubican en las dos tarjetas arduinos debido a que el protocolo bluetooth relaciona a las dos tarjetas para que trabaje como una sola a una distancia determinada.

Una vez realizada la programación con las simulaciones pertinentes se procede a cargar las tarjetas reales, considerando una tarjeta adicional con canales de comunicación que se refiere a una tarjeta independiente para que la unión de los pines de entrada con el guante sensorial sea mas fácil y eficiente de la misma manera la unión de cada uno de los pines en los servomotores.

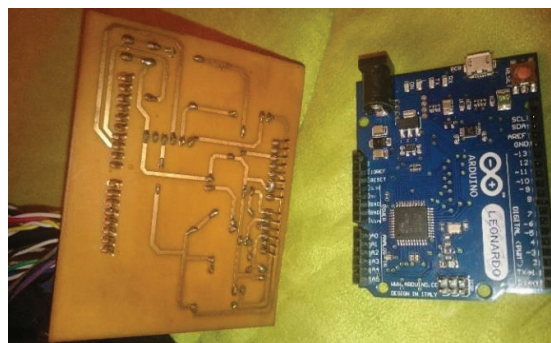


Figura 3.76. Tarjeta arduino con la tarjeta de los canales de comunicación.
(Fuente: Propia)

Las galgas flexo métricas van conectadas en cada uno de los dedos con los respectivos pines de energización y de envío de señal a la tarjeta electrónica, esta procesa los datos y envía la señal por medio del bluetooth a la mano inalámbrica que se encuentra a una distancia de 15 a 20 metros.

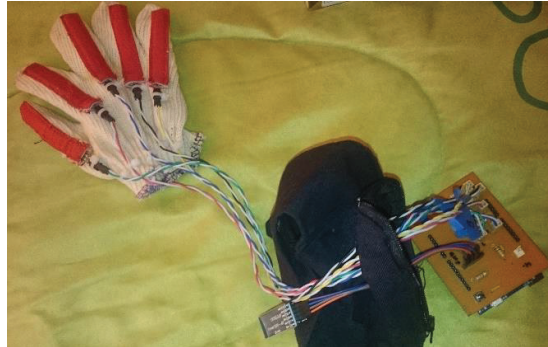


Figura 3.77. Conexión del guante sensorial con el bluetooth y la tarjeta electrónica.

(Fuente: Propia)

Las conexiones y programación que se registran en la placa electrónica de la mano inalámbrica son de iguales características que las del guante sensorial de esta forma es más fácil descifrar los pines de entrada y salida de cada uno de los elementos electrónicos.

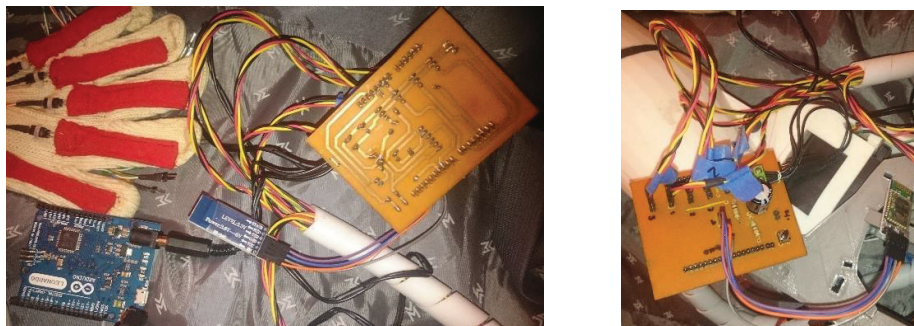


Figura 3.78. Conexión a la mano inalámbrica con el bluetooth y la tarjeta electrónica.

(Fuente: Propia)

3.10. Ensamble y pruebas de manipulación de la mano inalámbrica en el manejo de sustancias tóxicas

Cada una de las piezas se reconoce en el software de impresión XYZ ware donde se ubican las formas de relleno exagonal y la calidad alta de impresión en cada pieza, la impresión de la mano se realizó en un tiempo de 86 horas.

Para ensamblar los dedos se debe considerar la señalización de cada pieza de esta manera se evita la confusión en el momento de unir los dedos.

Una vez definidas todas las piezas, se hará una prueba de ensamble sin pegamento para verificar todos los movimientos y ubicar los puntos rotacionales en cada una de las articulaciones.



Figura 3.79. Dedos impresos
(Fuente. Propia)

Se debe considerar la unión de los eslabones con las articulaciones para su correcto funcionamiento.

Se corta 10 pedazos de nylon de pescar de 75 cm de largo, estos cables harán la función de los tendones en nuestra mano robótica. En el elemento más grande de la muñeca existen varios agujeros, estos cables traspasan para conectarse posteriormente con los dedos y dar la movilidad en apertura y cierre de la mano inalámbrica.



Figura 3.80. Ensamble y transmisión de los dedos de la mano.
(Fuente: Propia)

La siguiente etapa es colocar correctamente los cables de pescar en las poleas de los servomotores. Se debe tomar en cuenta el evitar torcer los cables (tendones), todos los dedos deben estar extendidos en su totalidad para marcar el punto de origen, el cable se coloca desde un lado del servo motor pasando por el dedo y llegando al otro lado del mismo pasando por los agujeros correspondientes y llegando a ensamblar los servomotores en el antebrazo, la fuerza de los servomotores es de 11 kg obtenida mediante la ecuación de $Fuerza = \frac{Torque}{distancia}$ considerando un torque de 5,5 kg-cm y la ubicado del tendón a una distancia de 0,5 cm.

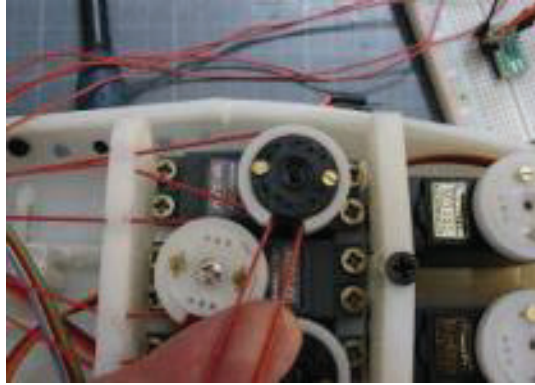


Figura 3.81. Ubicación de los tendones

(Fuente: Propia)

La reproducción de movimientos de la mano inalámbrica es idéntica a una real en apertura y cierre de la misma.



Figura 3.82. Mano impresa terminada y ensamblada.

(Fuente: Propia)

La fuerza de sujeción de la mano está de acuerdo a los cálculos antropométricos de una persona trabajadora ecuatoriana promedio, esto permite justificar el diseño de la transmisión y los servomotores seleccionados como el Servos HITEC HS-805BB de 12 y 24,7 kg*cm.

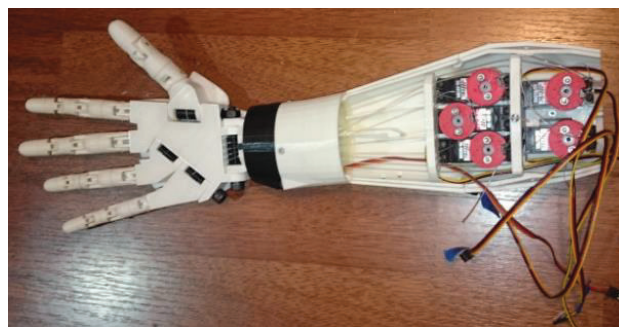


Figura 3.83. Ensamble de los motores de la mano inalámbrica

(Fuente: Propia)

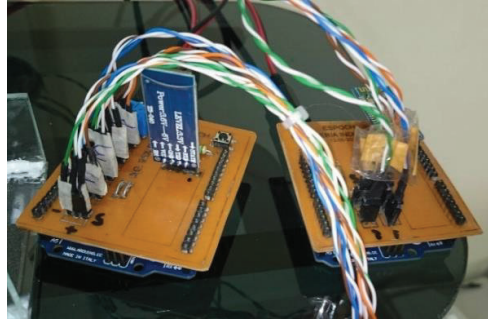


Figura 3.84. Comunicación de las tarjetas arduino
(Fuente: Propia)

Una fuente de 6V genera independencia y movilidad a una distancia adecuada de utilización, el guante sensorial en cambio tiene una fuente de baterías AA que se ubican en la persona que va a manipular y enviar señales desde el guante a una distancia de 15 a 20 metros.

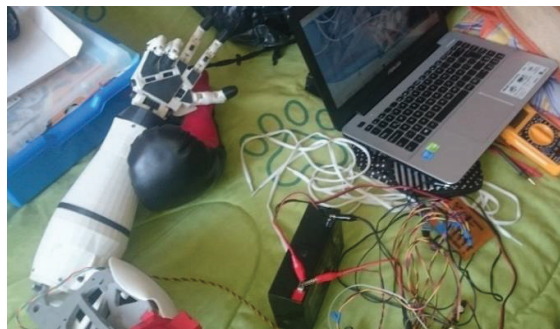


Figura 3.85. Fuente de 6 voltios junto a la mano inalámbrica
(Fuente: Propia)

Todos los dispositivos utilizados en la mano inalámbrica y en el guante sensorial se sincronizan para realizar las primeras pruebas de comunicación entre la persona que manipula a una distancia de 15 metros versus la mano impresa en contacto con los compuestos químicos.



Figura 3.86. Pruebas de funcionamiento del guante sensorial con la mano inalámbrica
(Fuente: Propia)

Las pruebas de funcionamiento se hacen en base a un estudio comparativo entre los movimientos de una mano real versus la mano inalámbrica en el manejo de sustancias tóxicas, de esta manera comparamos los movimientos, ángulos y estados de agarre de algunos objetos.

Los grados de movilidad de cada uno de los dedos en el caso de estudio se muestra con las siguientes siglas:

MCP: Metacarpofalángica

PIP: Interfalángica proximal

DIP: Interfalángica distal

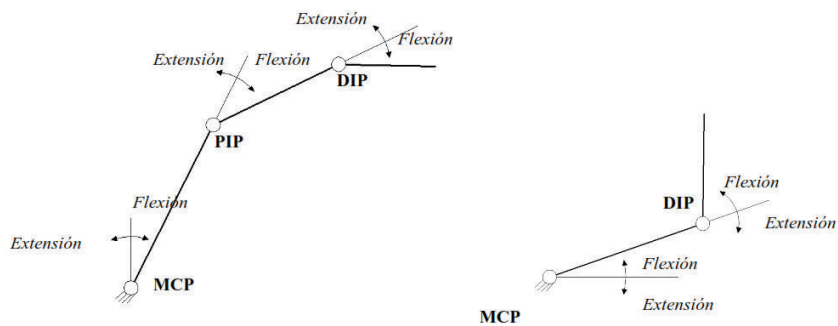


Figura 3.87. Movimientos de un dedo de la mano

(Fuente: Propia)

El estudio de movilidad de cada uno de los dedos es necesario para relacionar los grados de apertura y cierre, de esta manera permite sujetar e interactuar con las sustancias tóxicas en cuanto al agarre y manipulación.

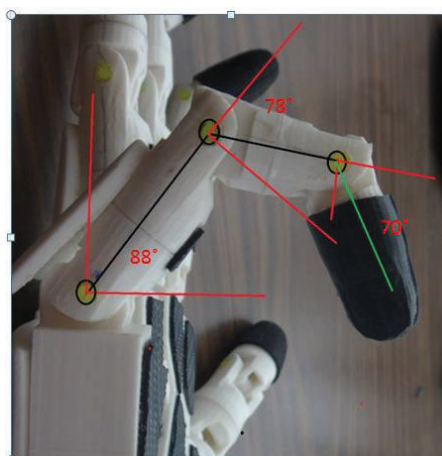


Figura 3.88. Ángulos de giro de los dedos

(Fuente: Propia)

La tabla siguiente detalla cada grado de movilidad de los dedos de la mano inalámbrica.

Tabla III.20. Rango de movimientos angulares en las articulaciones de cada dedo

Dedo	Articulación	Flexión °	Extensión °
Pulgar	Interfalangica distal (DIP)	55	0
	Metacarpofalangaica (MCP)	40	0
Índice	Interfalangica distal (DIP)	70	10
	Interfalangica proximal (PIP)	78	8
	Metacarpofalangaica (MCP)	88	7
Medio	Interfalangica distal (DIP)	60	10
	Interfalangica proximal (PIP)	75	7
	Metacarpofalangaica (MCP)	85	9
Anular	Interfalangica distal (DIP)	60	12
	Interfalangica proximal (PIP)	70	12
	Metacarpofalangaica (MCP)	80	10
Meñique	Interfalangica distal (DIP)	60	10
	Interfalangica proximal (PIP)	73	10
	Metacarpofalangaica (MCP)	80	10

(Fuente: Propia)

La tabla detallada muestra que los ángulos son muy similares a la mano humana de esta manera permite interactuar con los elementos que se vaya a manipular.

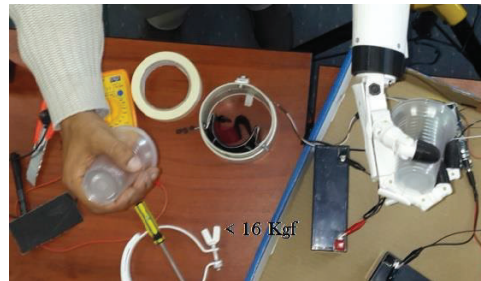


Figura 3.89. Comparación de movimiento entre la mano real y la mano inalámbrica

(Fuente: Propia)

Las pruebas de funcionamiento de la mano en primera instancia vienen dadas por la efectividad que realiza en cierto tipo de tareas que permite avanzar en el manejo de las sustancias tóxicas.

$$\% \text{ Efectividad} = \frac{\# \text{ de intentos exitosos}}{\# \text{ de intentos totales}} \times 100$$

(Ec. 3.95)

El porcentaje de efectividad se detalla en la siguiente tabla con cada acción realizada.

Tabla III.21. Pruebas de manipulación de la mano inalámbrica.

Prueba	Descripción	Intentos Exitosos	Intentos Fallidos	Núm. de Intentos	Efectividad [%]
1	Cerrar la mano	10	0	10	100
2	Abrir la mano	10	0	10	100
3	Girar muñeca	10	0	10	100
4	Tomar una manzana	8	2	10	80
5	Tomar una esfera	8	2	10	80
6	Tomar un bolígrafo	8	2	10	80
7	Tomar una tarjeta	8	2	10	80
8	Tomar una caja pequeña (caja de fosforo) o similar	8	2	10	80
9	Tomar una botella y tubos de ensayo	8	2	10	80
10	Tomar una botella, girar muñeca y soltar	8	2	10	80
11	Tomar un vaso, girar muñeca y soltar	8	2	10	80
12	Tomar un vaso, abrir la mano y soltar	8	2	10	80

(Fuente: Propia)

El porcentaje del promedio de efectividad en las pruebas realizadas es de un 85 % de un total de manipulación multitareas de la mano, cabe mencionar que este valor mejora con el adiestramiento de las personas en el manejo o interacción del guante sensorial.

Tabla III.22. Tiempo de respuesta de movimientos.

Tiempo de Movimientos	Mano real (seg)	Mano inalámbrica (seg)
Dedo pulgar	0:00.6	0:00.7
Dedo índice	0:00.7	0:00.8
Dedo medio	0:00.6	0:00.7
Dedo anular	0:00.6	0:00.7
Dedo meñique	0:00.7	0:00.8

Muñeca	0:00.7	0:00.8
--------	--------	--------

(Fuente: Propia)

El estudio de tiempos en consideración con la mano real tiene una diferencia de una décima de segundo que en algunos casos no se puede ver por el ojo humano.

El soporte de la mano para el manejo de sustancias tóxicas se realiza por medio de un operario evitando el contacto directo o a su vez por medio de un soporte mecánico instalado en el lugar del manejo de las sustancias.



Figura 3.90. Pruebas de funcionamiento en manejo de sustancias tóxicas.

(Fuente: Propia)

La manipulación de sustancias tóxicas se realiza por medio de una persona adiestrada en la interacción del guante sensorial con la mano, en este caso se maneja con cuidado las sustancias tóxicas considerando un incremento de efectividad y mejora en la manipulación de la mayoría de elementos tóxicos.

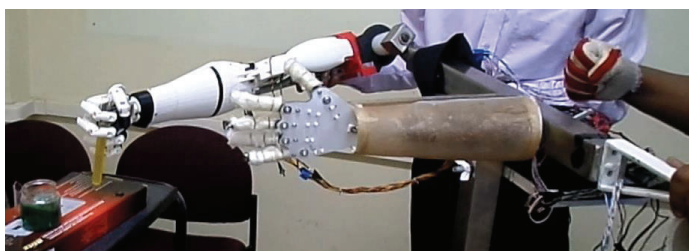


Figura 3.91. Manejo de sustancias tóxicas en tubos de ensayo.

(Fuente: Propia)

El manejo de sustancias tóxicas precautelando la integridad de las personas es un éxito llegando a interactuar con tubos de ensayo sin romperlos y teniendo control desde el guante sensorial a una distancia de 20 metros.

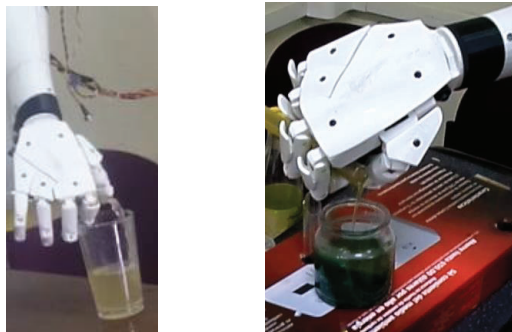


Figura 3.92. Giro de muñeca en verter sustancias tóxicas en recipientes.

(Fuente: Propia)

Las sustancias tóxicas descritas en la tabla anterior y los ácidos mencionados se manejan con normalidad, en el manejo de los ácidos se tiene una decoloración por contacto directo sin desintegrar el material, cabe mencionar que las piezas son impresas de esta manera se puede realizar la reposición inmediata de las mismas.

Tabla III.23. Manejo de las sustancias tóxicas

LETRA CÓDIGO	PRODUCTO QUÍMICO	Mano real	Mano Inalámbrica	Movimientos de la mano en sujeción	Giro de la muñeca	Reposición de piezas
A	Metanol	100%	98%	98%	98%	0
B	Acetona	100%	98%	98%	98%	0
C	Acetonitrilo	100%	98%	98%	98%	0
D	Diclorometano	100%	98%	98%	98%	0
E	Sulfuro de carbono	100%	98%	98%	98%	1
F	Tolueno	100%	98%	98%	98%	0
G	Dietilamina	100%	98%	98%	98%	0
H	Tetrahidrofura no	100%	98%	98%	98%	0
I	Acetato de etilo	100%	98%	98%	98%	0
J	n-Heptano	100%	98%	98%	98%	0
K	Hidróxido sódico 40%	100%	98%	98%	98%	1
Ácidos	Sulfúrico	100%	98%	98%	98%	2
	Fosfórico	100%	98%	98%	98%	2

	Acético	100%	98%	98%	98%	1
	Clorhídrico	100%	98%	98%	98%	0
	Cítrico	100%	98%	98%	98%	0
Fertilizantes	Sintéticos	100%	98%	98%	98%	0
	Tintas y colorantes	100%	98%	98%	98%	0

(Fuente: Propia)

El manejo de las sustancias tóxicas por medio de la mano inalámbrica a una distancia de 20 metros es del 100%, considerando la manipulación de ácidos que provocan serios daños a la salud humana evitando el contacto y la inhalación.

4. DISCUSIÓN

La mano inalámbrica es de gran utilidad dentro de la industria ecuatoriana especialmente en lugares donde se maneje sustancias peligrosas y ambientes hostiles para las personas, al controlar los movimientos sustituye las programaciones de orden repetitivo en situaciones donde resulten respuestas de acción - reacción altamente complejas.

La mano inalámbrica permite tener como temas alternos la inserción de esta tecnología en prótesis robóticas, en la mejora de la calidad de vida en personas con discapacidades físicas, la impresión 3D permite sustituir los componentes y a la vez incrementar o disminuir el tamaño según la necesidad, considerando este parámetro se puede trabajar en la inserción de esta tecnología en niños con manos robóticas.

La comunicación y mando inalámbrico se aplica en muchos de los procesos industriales con el uso de sistemas scada, robóticas y androides, la tecnología de comunicación permite tener el control y supervisión de movimientos en todas las áreas aplicando sistemas sensoriales a través de señales electromiográficas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La mano inalámbrica para manejo de sustancias tóxicas tiene las siguientes conclusiones

- Los resultados muestran una efectividad promedio de manipulación en un 85% mejorando este índice con adiestramiento al operador de la mano inalámbrica.
- El manejo de sustancias tóxicas a una distancia de 15 a 20 metros es del 100%, considerando que no se trabajó con ácidos al 100% de pureza.
- Las pruebas experimentales muestran que con el manejo inalámbrico se precautela la integridad de las personas evitando problemas de contacto e inhalación de las sustancias tóxicas, consiguiendo ser aplicado en muchos sistemas automatizados.
- Las reposiciones de las piezas de la mano inalámbrica son inmediatas debido a que se cuenta con una base de datos del diseño listos para imprimir en 3D.
- El circuito electrónico de la mano robótica maneja voltajes muy bajos entre 5 y 6 voltios que no representan un problema para la persona que manipule el guante sensorial.
- Se puede incrementar nuevos sistemas sensoriales a través de señales electromiográficas para el manejo de la mano inalámbrica.

5.2. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de la mano inalámbrica son las siguientes:

- Los componentes electrónicos son frágiles y una mala manipulación puede causar daño y poner en riesgo el funcionamiento adecuado del prototipo.
- El operador del guante sensorial debe tener una capacitación previa y adiestramiento en la manipulación de la mano inalámbrica especialmente si va a manejar sustancias tóxicas como en el caso de ácidos.
- La efectividad incrementa si el operador del guante sensorial tiene más horas de trabajo con estos equipos.
- Se recomienda futuras investigaciones en el uso de la mano impresa para prótesis para personas con discapacidades físicas.
- El sistema sensorial se puede modificar con el uso de señales electromiográficas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Reyes Cortés José Fernando, “Robótica, Control de robots manipuladores” 1era Edición Alfa omega, México 2011
- [2] Reyes José, Cid Monjaraz Jaime, Vargas Emilio, “Mecatrónica, Control y Automatización”, Alfa omega México 2013.
- [3] Miranda Roger, “Cinemática y dinámica de robots manipuladores”, 1era edición MARCOMBO S.A, 2014
- [4] Barrientos Antonio, “Fundamentos de Robótica”, 2da edición S.A. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007
- [5] A. A. H. Sallam, W. M. F. Abouzaid “NXT* SCARA Model Based Design Controlled by Neural Network”, International Journal of Control Science and Engineering, p-ISSN: 2168-4952 e-ISSN: 2168-4960
- [6] C.S. Lovchik and M.A. Diftler. The robonaut hand: A dextrous robot hand for space. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2:907-912, 1999; Publication: IEEE Intelligent systems, IEEE EDucational Activities Department Piscataway, NJ, USA ISSN: 1541- 1672
- [7] Y.K. Lee and I. Shimoyama. A skeletal framework artificial hand actuated by pneumatic arti_cial muscles. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2:926-931, 1999.
- [8] S. Schultz, C. Pylatiuk, and G. Bretthauer. A new ultralight anthropomorphic hand. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3:2437- 2441, 2001.
- [9] N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, and R. Dillman. Design of the tuat/karlsruhe humanoid hand. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3:1754-1759, 2000.
- [10] J.L. Pons, E. Recon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, and W. Van Moorleghe. The manus-hand dextrous robotics upper limb prosthesis – mechanical and manipulation aspects. Autonomous Robots, 16:143{163, 2004.

- [11] T. Mouri, H. Kawasaki, and K. Umebayashi. Developments of new anthropomorphic robot hand and its master slave system. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 3225-3230, 2005.
- [12] F. Lotti and G. Vassura. A novel approach to mechanical design of articulated fingers for robotic hands. IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, 2:1687-1692, 2002
- [13] R. Walker. Design of a dextrous hand for advanced clawar applications. CLAWAR International Conference on Climbing and Walking Robots, 2003.
- [14] M. Reichel and The Shadow Robot Company. Transformation of shadow dextrous hand and shadow _nger test unit from prototype to product for intelligent manipulation and grasping. International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping, 2004.
- [15] Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. “Norma NTP 748” Ministerio de trabajo asuntos sociales España. España 2009. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/701a750/ntp_748.pdf
- [16] Atexga, 2016, Vías de entrada de los contaminantes en el organismo, http://www.atexga.com/prevencion/es/estudio-sustancias-nocivas/2_vias_de_entrada.php
- [17] Escobar C, 2013, “El material de impresión ABS y sus características”, <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102832135-el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas>
- [18] Cruz G. J Alberto, “Ergonomía Aplicada”, Starbook Editorial, 2011, ISBN: 9788492650873
- [19] Universidad Politécnica de Valencia, 2015, REBA, <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php>
- [20] Landa Cosio Nicolás Arrioja, “Robótica Avanzada” Construcción y programación de robots, descargado en línea, <http://www.freelibros.org/manual/robotica-avanzada-users.html>
- [21] Muller Nathau, “Tecnología bluetooth”, McGraw-Hill Interamericana de España S.L. 1ª ed., 1ª imp. 2002 408 páginas; ISBN: 8448135938 ISBN-13: 9788448135935
- [22] Carletti, E.J. Servos, “Características Básicas”. 2007, Recuperado de: http://robots-argentina.com.ar/MotorServo_basico.htm.

- [23] D. Alba, M. Armada, and R. Ponticelli. An introductory revision to humanoid robot hands. Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 7th International Conference CLAWAR 2004, Parte IV:701-712, 2005.
- [24] L. Birglen, T. Laliberte, and C. Gosselin. Underactuated Robotic Hand. Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), 2008.
- [25] Cabás Ramiro Director: Dr. Carlos Balaguer Bernaldo de Quiros, "Metodología de diseño de manos robóticas basada en los estados de su sistema accionador", TESIS DOCTORAL, Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Departamento de Sistemas y Automática, 2011, Recuperado de: file:///C:/Users/USUARIO/Desktop/Tesis_Ramiro_Cabas_Ormaechea.pdf
- [26] T. Iberall. The nature of human prehension: Three dextrous hands in one. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4: 396-401, 1987
- [27] T. Iberall. Human prehension and dextrous robot hands. The International Journal of Robotics Research, 16:285-299, 1997
- [28] A.M. Okamura, N. Smaby, and M.R. Cutkosky. An overview of dextrous manipulation. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1:255-262, 2000.
- [29] D. Alba, M. Armada, and R. Ponticelli. An introductory revision to humanoid robot hands. Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 7th International Conference CLAWAR 2004, Parte IV:701-712, 2005.
- [30] Orozco Jhonny, Santillán Carlos, "Brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo". Revista indexada de Avances en Ciencia e Ingeniería. Artículo científico. Ecuador. Diciembre 2015. http://www.usfq.edu.ec/publicaciones/avances/archivo_de_contenidos/Documents/volumen_7_numero_2/C138-7-2-2015.pdf
- [31] CORKE P.; Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB. Consultado en: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-20144-8>

ANEXOS

Anexo 1: Informe del método REBA

Introducción

Este texto no corresponde a una evaluación real:

La evaluación ergonómica tiene por objeto detectar el nivel de presencia, en los puestos evaluados, de factores de riesgo para la aparición, en los trabajadores que los ocupan, de problemas de salud de tipo disergonómico. Existen diversos estudios que relacionan estos problemas de salud de origen laboral con la presencia, en un determinado nivel, de dichos factores de riesgo. Es por lo tanto necesario llevar a cabo evaluaciones ergonómicas de los puestos para detectar el nivel de dichos factores de riesgo. Aunque las legislaciones de cada país son más o menos exigentes, es obligación de las empresas identificar la existencia de peligros derivados de la presencia de elevados riesgos ergonómicos en sus puestos de trabajo. ^[28]

Nivel Básico

La identificación inicial de riesgos (nivel de análisis básico) permite la detección de factores de riesgo en los puestos. En caso de ser estos detectados se procederá con el nivel avanzado.

Buenos indicadores de la presencia de riesgos son, por ejemplo: la presencia de lesiones agudas (lumbalgias, fatiga física, hernias discales, ciáticas...), lesiones crónicas (epicondilitis, síndrome del túnel carpiano...), o enfermedades profesionales entre los trabajadores de un determinado puesto. Los análisis estadísticos de los registros médicos de la empresa pueden ser de gran ayuda para esta detección inicial de riesgos.

Para llevar a cabo la identificación inicial de riesgos es conveniente el empleo de listas de identificación de riesgos como la "Lista de comprobación ergonómica" o el "Manual para la evaluación y prevención de riesgos

ergonómicos y psicosociales en la PYME del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España". La aplicación de las listas de identificación inicial de riesgos parte de la agrupación de los puestos de la empresa que tengan características similares en cuanto a tareas realizadas, diseño del puesto y condiciones ambientales. En una segunda fase se aplica la lista de identificación de riesgos a cada puesto o a cada tipo de puestos si han sido agrupados.

Nivel Avanzado

En el nivel avanzado de análisis se evalúan la amplitud de los factores de riesgo detectados (mediante la evaluación inicial de riesgos si se ha realizado previamente). Para evaluar el nivel de riesgo asociado a un determinado factor de riesgo existen diversos métodos para apoyar al evaluador. Cada factor de riesgo puede estar presente en un puesto en diferentes niveles. Así, por ejemplo, debe evaluarse si la repetitividad de movimientos, que es un factor de riesgo para la aparición de Transtornos Músculo-Esqueléticos (TMEs) en la zona cuello-hombros, presenta un nivel suficiente en el puesto evaluado como para considerar necesaria una actuación ergonómica.

Informe de Evaluación Ergonómica, Datos generales

Datos del puesto

Identificador del puesto DA-12
Descripción Descarga de piezas paletizadas
Empresa ergonautas.com
Departamento/ Área Recepción
Sección A1

Datos de la evaluación

11/07/2015 18:47
Nombre del evaluador
Fecha de la evaluación
Nombre del trabajador
Sexo
Edad
Antigüedad en el puesto
Tiempo que ocupa el puesto por jornada
Duración de la jornada laboral

7 años
29
Hombre
8 horas
8 horas

Datos del trabajador

Observaciones

Informe de demostración de Ergonautas.

Este informe no corresponde a una evaluación real.

Su propósito es mostrar las capacidades de la generación de informes de evaluación ergonómica de puestos de trabajo empleando la plataforma online Ergonautas.

Informe de Evaluación Ergonómica

Imágenes

Puedes introducir aquí imágenes del puesto evaluado

Imagen 1

Imagen 2

Puedes introducir aquí imágenes del puesto evaluado

Informe de Evaluación Ergonómica

Imagen 3

Puedes introducir aquí imágenes del puesto evaluado

Imagen 4

Puedes introducir aquí imágenes del puesto evaluado

Informe de Evaluación Ergonómica

➤ Posición del tronco

Posición del tronco del trabajador:

El tronco está entre 20 y 60 grados de flexión o más de 20 grados de extensión.

Grupo A: Cuello, tronco y extremidades inferiores

Características de la postura evaluada para la aplicación del método Reba

Grupo B: Cuello, tronco y extremidades inferiores Posición del cuello

Posición del cuello del trabajador:

El cuello está extendido o flexionado más de 20 grados.

1 Existe torsión o inclinación lateral del cuello.

➤ **Posición de las piernas**

Posición de las piernas del trabajador:

Soporte unilateral, soporte ligero o postura inestable.

➤ **Posición del brazo**

El brazo está entre 46 y 90 grados de flexión.

Ángulo de flexión del brazo del trabajador:

Grupo B: Extremidades superiores de la zona DERECHA del cuerpo

➤ **Posición del antebrazo**

Posición del antebrazo del trabajador:

El antebrazo está flexionado por debajo de 60 grados o por encima de 100 grados.

➤ **Posición de la muñeca**

Posición de la muñeca del trabajador:

La muñeca está entre 0 y 15 grados de flexión o extensión.

➤ **Posición del brazo**

El brazo está entre 20 grados de flexión o 20 grados de extensión.

Ángulo de flexión del brazo del trabajador:

Grupo B: Extremidades superiores de la zona IZQUIERDA del cuerpo.

El hombro está elevado.

➤ **Posición del antebrazo**

Posición del antebrazo del trabajador:

El antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión.

➤ **Posición de la muñeca**

Posición de la muñeca del trabajador:

La muñeca está entre 0 y 15 grados de flexión o extensión.

Existe torsión o desviación lateral de la muñeca.

Informe de Evaluación Ergonómica, Tipo de actividad muscular y fuerzas ejercidas.

➤ **Fuerzas ejercidas**

Fuerzas ejercidas por el trabajador

La carga o fuerza es menor de 5 kg.

Fuerzas ejercidas, tipo de agarre y tipo de actividad muscular

➤ **Actividad muscular y fuerzas ejercidas.**

Tipo de agarre de la carga manejada.

Agarre Regular (el agarre con la mano es aceptable pero no ideal o el agarre es aceptable utilizando otras partes del cuerpo).

➤ **Actividad muscular.**

Tipo de actividad muscular realizada por el trabajador.

Una o más partes del cuerpo permanecen estáticas, por ejemplo, soportadas durante más de 1 m i n u t o.

Informe de Evaluación Ergonómica zona derecha

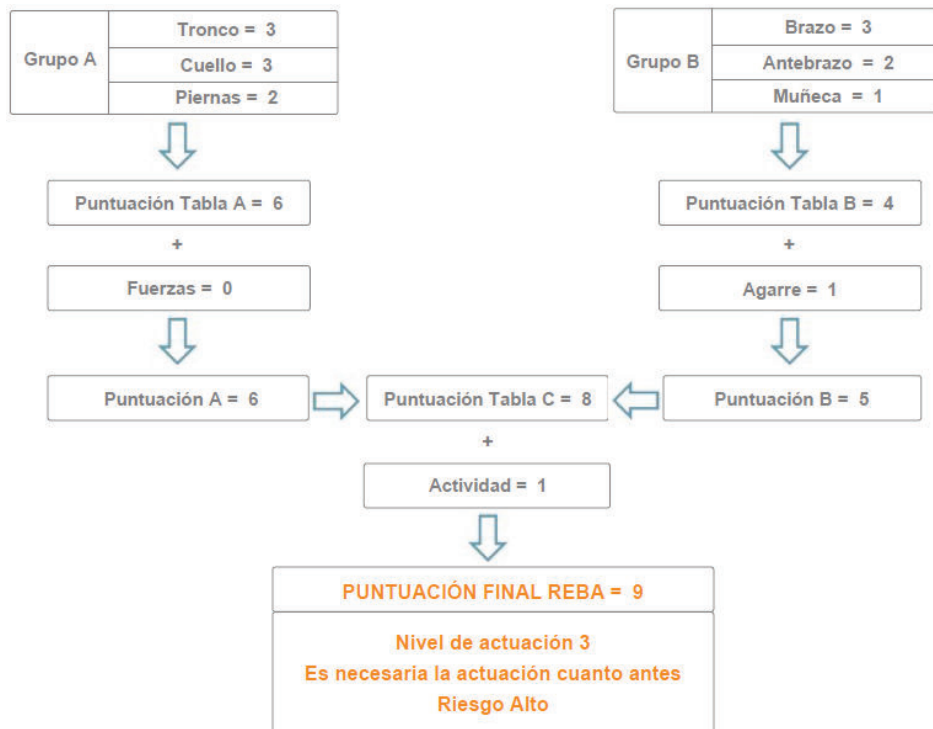


Figura A.1 Evaluación ergonómica del lado derecho
(Fuente. Ergonautas.com/ Método REBA)

PUNTUACIÓN FINAL REBA = 9

Es necesaria la actuación cuanto antes Riesgo Alto

Informe de Evaluación Ergonómica zona izquierda

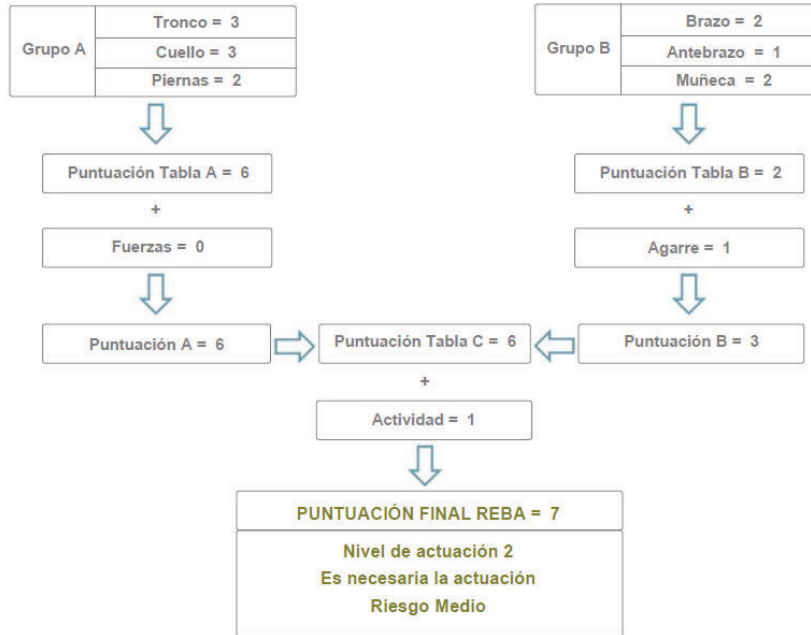


Figura A.2. Evaluación ergonómica del lado izquierdo

(Fuente. Ergonautas.com/ Método REBA)

Las siguientes tablas muestran el resumen de las diferentes puntuaciones obtenidas para la zona derecha e izquierda del cuerpo del trabajador/a, así como las puntuaciones finales y niveles de actuación y riesgo propuestos por el método para cada lado del cuerpo.

Grupo A					
Tronco	Cuello	Piernas	Puntuación Tabla A	Fuerzas	Puntuación A
3	3	2	6	0	6

Grupo B					
Brazo	Antebrazo	Muñeca	Puntuación Tabla B	Agarre	Puntuación B
3	2	1	4	1	5

Puntuación C	Actividad
8	1

Puntuación FINAL	Nivel de Actuación	Nivel de riesgo
9	Nivel de actuación 3 Es necesaria la actuación cuanto antes	Riesgo Alto

Figura A.3. Resumen de la evaluación ergonómica del lado derecho

(Fuente. Ergonautas.com/ Método REBA)

Como se puede observar el lado derecho tiene un alto grado de riesgo por lo que la actuación debe ser inmediata y de esta manera dar soluciones al movimiento o remplazo de este tipo de movimiento.

Grupo A					
Tronco	Cuello	Piernas	Puntuación Tabla A	Fuerzas	Puntuación A
3	3	2	6	0	6

Grupo B					
Brazo	Antebrazo	Muñeca	Puntuación Tabla B	Agarre	Puntuación B
2	1	2	2	1	3

Puntuación C	Actividad
6	1

Puntuación FINAL	Nivel de Actuación	Nivel de riesgo
7	Nivel de actuación 2 Es necesaria la actuación	Riesgo Medio

Figura A.4. Resumen de la evaluación ergonómica del lado izquierdo

(Fuente. Ergonautas.com/ Método REBA)

Conclusiones

Este texto no corresponde a una evaluación real:

La evaluación ergonómica tiene por objeto detectar el nivel de presencia, en los puestos evaluados, de factores de riesgo para la aparición, en los trabajadores que los ocupan, de problemas de salud de tipo disergonómico. Existen diversos estudios que relacionan estos problemas de salud de origen laboral con la presencia, en un determinado nivel, de dichos factores de riesgo. Es por lo tanto necesario llevar a cabo evaluaciones ergonómicas de los puestos para detectar el nivel de dichos factores de riesgo. Aunque las legislaciones de cada país son más o menos exigentes, es obligación de las empresas identificar la existencia de peligros derivados de la presencia de elevados riesgos ergonómicos en sus puestos de trabajo.

➤ Nivel Básico

La identificación inicial de riesgos (nivel de análisis básico) permite la detección de factores de riesgo en los puestos. En caso de ser estos detectados se procederá con el nivel avanzado.

Buenos indicadores de la presencia de riesgos son, por ejemplo: la presencia de lesiones agudas (lumbalgias, fatiga física, hernias discales, ciáticas...), lesiones crónicas (epicondilitis, síndrome del túnel carpiano...), o enfermedades profesionales entre los trabajadores de un determinado puesto. El análisis estadístico de los registros médicos de la empresa puede ser de gran ayuda para esta detección inicial de riesgos.

Para llevar a cabo la identificación inicial de riesgos es conveniente el empleo de listas de identificación de riesgos como la "Lista de comprobación ergonómica" o el "Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en la PYME del Instituto

Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España". La aplicación de las listas de identificación inicial de riesgos parte de la agrupación de los puestos de la empresa que tengan características similares en cuanto a tareas realizadas, diseño del puesto y condiciones ambientales. En una segunda fase se aplica la lista de identificación de riesgos a cada puesto o a cada tipo de puestos si han sido agrupados.

➤ **Nivel Avanzado**

En el nivel avanzado de análisis se evalúan la amplitud de los factores de riesgo detectados (mediante la evaluación inicial de riesgos si se ha realizado previamente). Para evaluar el nivel de riesgo asociado a un determinado factor de riesgo existen diversos métodos para apoyar al evaluador. Cada factor de riesgo puede estar presente en un puesto en diferentes niveles. Así, por ejemplo, debe evaluarse si la repetitividad de movimientos, que es un factor de riesgo para la aparición de Transtornos Músculo-Esqueléticos (TMEs) en la zona cuello-hombros, presenta un nivel suficiente en el puesto evaluado como para considerar necesaria una actuación ergonómica.

Anexo 2

CINEMATICA INVERSA

Las pruebas de trayectoria se realizan por medio de una transformación homogénea que indica la posición del efector final, generando un número de puntos intermedios en este caso por la variable n, utilizando la función jtraj (q1, q2, n)

```
%SIMULACION DEDO INDICE
% PRUEBA DE TRAYECTORIA
% Peter I. Corke
clear L
% Alpha a Theta d
L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2} = link([pi/2 1.13 0 .17 0], 'standard');
L{3} = link([0 .436 0 0 0], 'standard');
L{4} = link([0 .256 0 0 0], 'standard');
L{5} = link([0 .248 0 0 0], 'standard');
qz = [0 -pi/2 0 0 0]
qr = [0 pi/2 0 0 0]
qstretch = [0 0 0 0 0]
indice = robot(L, 'Dedo Índice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'Dedo Índice';
indice.manuf = 'Unimation';
drivebot(indice);
q1=[0 -pi/2 0 0 0]
q2=[pi/4 pi/4 pi/4 pi/4 pi/4]
T=fkine(indice,q1)
[q,qd,qdd] = jtraj(q1, q2, 20)
T = jtraj(q1, q2, 100)
plot(indice,T)
title ('Diagrama del dedo índice de la mano impresa en 3 D "Cinemática Inversa"')
```

qz =

```
0 -1.5708 0 0 0
```

qr =

```
0 1.5708 0 0 0
```

qstretch =

```
0 0 0 0 0
```

q1 =

```
0 -1.5708 0 0 0
```

q2 =

```
0.7854 0.7854 0.7854 0.7854 0.7854
```

T =

0.0000	0.0000	-1.0000	0.0000
-0.0000	1.0000	0.0000	0.1700
1.0000	0.0000	0.0000	2.0700
0	0	0	1.0000

q =

0	-1.5708	0	0	0
0.0011	-1.5676	0.0011	0.0011	0.0011
0.0078	-1.5475	0.0078	0.0078	0.0078
0.0241	-1.4986	0.0241	0.0241	0.0241
0.0521	-1.4145	0.0521	0.0521	0.0521
0.0926	-1.2931	0.0926	0.0926	0.0926
0.1450	-1.1359	0.1450	0.1450	0.1450
0.2077	-0.9477	0.2077	0.2077	0.2077
0.2784	-0.7357	0.2784	0.2784	0.2784
0.3540	-0.5087	0.3540	0.3540	0.3540
0.4314	-0.2767	0.4314	0.4314	0.4314
0.5070	-0.0497	0.5070	0.5070	0.5070
0.5777	0.1623	0.5777	0.5777	0.5777
0.6404	0.3505	0.6404	0.6404	0.6404
0.6928	0.5077	0.6928	0.6928	0.6928
0.7333	0.6291	0.7333	0.7333	0.7333
0.7613	0.7132	0.7613	0.7613	0.7613
0.7776	0.7621	0.7776	0.7776	0.7776
0.7843	0.7822	0.7843	0.7843	0.7843
0.7854	0.7854	0.7854	0.7854	0.7854

qd =

0	0	0	0	0
0.0586	0.1757	0.0586	0.0586	0.0586
0.2090	0.6270	0.2090	0.2090	0.2090
0.4166	1.2497	0.4166	0.4166	0.4166
0.6509	1.9526	0.6509	0.6509	0.6509
0.8859	2.6577	0.8859	0.8859	0.8859

1.1000	3.2999	1.1000	1.1000	1.1000
1.2757	3.8272	1.2757	1.2757	1.2757
1.4001	4.2003	1.4001	1.4001	1.4001
1.4645	4.3934	1.4645	1.4645	1.4645
1.4645	4.3934	1.4645	1.4645	1.4645
1.4001	4.2003	1.4001	1.4001	1.4001
1.2757	3.8272	1.2757	1.2757	1.2757
1.1000	3.2999	1.1000	1.1000	1.1000
0.8859	2.6577	0.8859	0.8859	0.8859
0.6509	1.9526	0.6509	0.6509	0.6509
0.4166	1.2497	0.4166	0.4166	0.4166
0.2090	0.6270	0.2090	0.2090	0.2090
0.0586	0.1757	0.0586	0.0586	0.0586
0	-0.0000	0	0	0

qdd =

0	0	0	0	0
2.1023	6.3070	2.1023	2.1023	2.1023
3.5039	10.5117	3.5039	3.5039	3.5039
4.2871	12.8613	4.2871	4.2871	4.2871
4.5344	13.6033	4.5344	4.5344	4.5344
4.3283	12.9850	4.3283	4.3283	4.3283
3.7512	11.2537	3.7512	3.7512	3.7512
2.8856	8.6567	2.8856	2.8856	2.8856
1.8138	5.4413	1.8138	1.8138	1.8138
0.6183	1.8550	0.6183	0.6183	0.6183
-0.6183	-1.8550	-0.6183	-0.6183	-0.6183
-1.8138	-5.4413	-1.8138	-1.8138	-1.8138
-2.8856	-8.6567	-2.8856	-2.8856	-2.8856
-3.7512	-11.2537	-3.7512	-3.7512	-3.7512
-4.3283	-12.9850	-4.3283	-4.3283	-4.3283
-4.5344	-13.6033	-4.5344	-4.5344	-4.5344
-4.2871	-12.8613	-4.2871	-4.2871	-4.2871

-3.5039	-10.5117	-3.5039	-3.5039	-3.5039
-2.1023	-6.3070	-2.1023	-2.1023	-2.1023
0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

T =

0	-1.5708	0	0	0
0.0000	-1.5708	0.0000	0.0000	0.0000
0.0001	-1.5706	0.0001	0.0001	0.0001
0.0002	-1.5702	0.0002	0.0002	0.0002
0.0005	-1.5693	0.0005	0.0005	0.0005
0.0009	-1.5680	0.0009	0.0009	0.0009
0.0016	-1.5660	0.0016	0.0016	0.0016
0.0025	-1.5633	0.0025	0.0025	0.0025
0.0037	-1.5598	0.0037	0.0037	0.0037
0.0051	-1.5554	0.0051	0.0051	0.0051
0.0069	-1.5500	0.0069	0.0069	0.0069
0.0091	-1.5436	0.0091	0.0091	0.0091
0.0116	-1.5361	0.0116	0.0116	0.0116
0.0145	-1.5274	0.0145	0.0145	0.0145
0.0178	-1.5175	0.0178	0.0178	0.0178
0.0215	-1.5063	0.0215	0.0215	0.0215
0.0256	-1.4939	0.0256	0.0256	0.0256
0.0302	-1.4801	0.0302	0.0302	0.0302
0.0353	-1.4650	0.0353	0.0353	0.0353
0.0408	-1.4485	0.0408	0.0408	0.0408
0.0467	-1.4306	0.0467	0.0467	0.0467
0.0531	-1.4114	0.0531	0.0531	0.0531
0.0600	-1.3908	0.0600	0.0600	0.0600
0.0674	-1.3687	0.0674	0.0674	0.0674
0.0752	-1.3453	0.0752	0.0752	0.0752
0.0834	-1.3206	0.0834	0.0834	0.0834
0.0921	-1.2945	0.0921	0.0921	0.0921
0.1013	-1.2670	0.1013	0.1013	0.1013

0.1108	-1.2383	0.1108	0.1108	0.1108
0.1208	-1.2083	0.1208	0.1208	0.1208
0.1312	-1.1770	0.1312	0.1312	0.1312
0.1421	-1.1446	0.1421	0.1421	0.1421
0.1533	-1.1110	0.1533	0.1533	0.1533
0.1648	-1.0763	0.1648	0.1648	0.1648
0.1768	-1.0405	0.1768	0.1768	0.1768
0.1890	-1.0037	0.1890	0.1890	0.1890
0.2016	-0.9659	0.2016	0.2016	0.2016
0.2145	-0.9272	0.2145	0.2145	0.2145
0.2277	-0.8877	0.2277	0.2277	0.2277
0.2411	-0.8474	0.2411	0.2411	0.2411
0.2548	-0.8063	0.2548	0.2548	0.2548
0.2687	-0.7646	0.2687	0.2687	0.2687
0.2828	-0.7223	0.2828	0.2828	0.2828
0.2971	-0.6794	0.2971	0.2971	0.2971
0.3116	-0.6361	0.3116	0.3116	0.3116
0.3261	-0.5924	0.3261	0.3261	0.3261
0.3408	-0.5484	0.3408	0.3408	0.3408
0.3556	-0.5041	0.3556	0.3556	0.3556
0.3704	-0.4596	0.3704	0.3704	0.3704
0.3853	-0.4150	0.3853	0.3853	0.3853
0.4001	-0.3704	0.4001	0.4001	0.4001
0.4150	-0.3258	0.4150	0.4150	0.4150
0.4298	-0.2813	0.4298	0.4298	0.4298
0.4446	-0.2370	0.4446	0.4446	0.4446
0.4593	-0.1930	0.4593	0.4593	0.4593
0.4738	-0.1493	0.4738	0.4738	0.4738
0.4883	-0.1060	0.4883	0.4883	0.4883
0.5026	-0.0631	0.5026	0.5026	0.5026
0.5167	-0.0208	0.5167	0.5167	0.5167
0.5306	0.0209	0.5306	0.5306	0.5306

0.5443	0.0620	0.5443	0.5443	0.5443
0.5577	0.1023	0.5577	0.5577	0.5577
0.5709	0.1419	0.5709	0.5709	0.5709
0.5838	0.1805	0.5838	0.5838	0.5838
0.5964	0.2183	0.5964	0.5964	0.5964
0.6086	0.2551	0.6086	0.6086	0.6086
0.6206	0.2909	0.6206	0.6206	0.6206
0.6321	0.3256	0.6321	0.6321	0.6321
0.6433	0.3592	0.6433	0.6433	0.6433
0.6541	0.3916	0.6541	0.6541	0.6541
0.6646	0.4229	0.6646	0.6646	0.6646
0.6746	0.4529	0.6746	0.6746	0.6746
0.6841	0.4816	0.6841	0.6841	0.6841
0.6933	0.5091	0.6933	0.6933	0.6933
0.7020	0.5352	0.7020	0.7020	0.7020
0.7102	0.5599	0.7102	0.7102	0.7102
0.7180	0.5833	0.7180	0.7180	0.7180
0.7254	0.6054	0.7254	0.7254	0.7254
0.7323	0.6260	0.7323	0.7323	0.7323
0.7387	0.6452	0.7387	0.7387	0.7387
0.7446	0.6631	0.7446	0.7446	0.7446
0.7501	0.6796	0.7501	0.7501	0.7501
0.7552	0.6947	0.7552	0.7552	0.7552
0.7598	0.7085	0.7598	0.7598	0.7598
0.7639	0.7209	0.7639	0.7639	0.7639
0.7676	0.7321	0.7676	0.7676	0.7676
0.7709	0.7420	0.7709	0.7709	0.7709
0.7738	0.7507	0.7738	0.7738	0.7738
0.7763	0.7582	0.7763	0.7763	0.7763
0.7785	0.7646	0.7785	0.7785	0.7785
0.7803	0.7700	0.7803	0.7803	0.7803
0.7817	0.7744	0.7817	0.7817	0.7817

0.7829	0.7779	0.7829	0.7829	0.7829
0.7838	0.7806	0.7838	0.7838	0.7838
0.7845	0.7826	0.7845	0.7845	0.7845
0.7849	0.7839	0.7849	0.7849	0.7849
0.7852	0.7848	0.7852	0.7852	0.7852
0.7853	0.7852	0.7853	0.7853	0.7853
0.7854	0.7854	0.7854	0.7854	0.7854
0.7854	0.7854	0.7854	0.7854	0.7854

Los cálculos dependen del valor de n que se ubique en los primeros casos de 20 y en análisis de T de 100

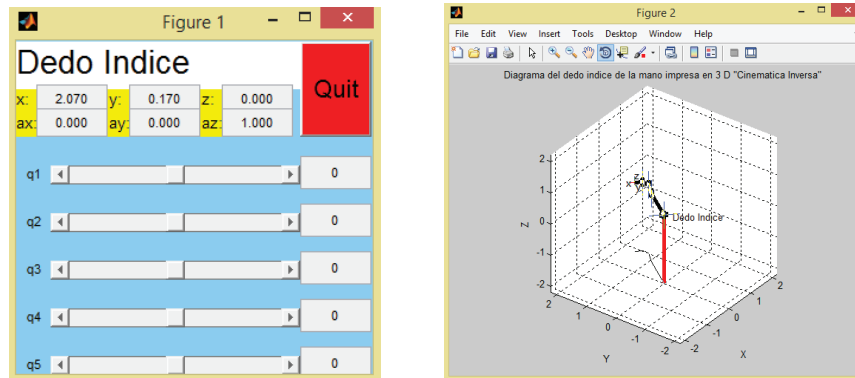


Figura A.5 Simulación del dedo indice por medio de cinemática inversa

(Fuente: Propia)

Al manipular los q3, q4, q5 se observa en posición de agarre considerando los parametros reales como el angulo de 72 grados en movilidad de la falange, falangina y falangeta.

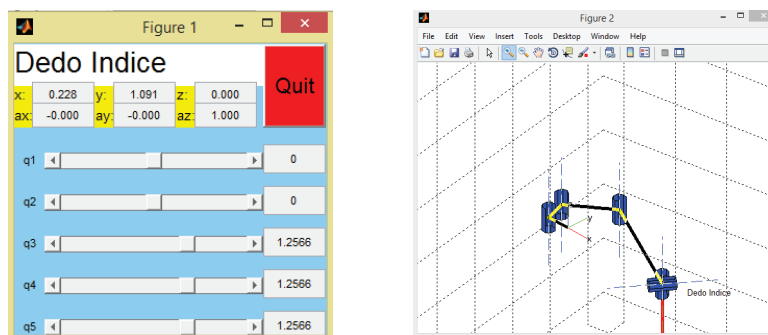


Figura A.6. Desplazamientos angulares del dedo indice por medio de cinemática inversa

(Fuente: Propia)

ANEXO 3

PLANOS DE LA MANO IMPRESA EN 3D