



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MANOS ROBÓTICAS PARA LA GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS DEL ALFABETO DACTILOLÓGICO”

JORGE WASHINGTON AMANGANDI AGUILAR

Trabajo de titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba – Ecuador

Noviembre 2018



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, denominado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MANOS ROBÓTICAS PARA LA GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS DEL ALFABETO DACTILOLÓGICO”**, de responsabilidad del Ing. Jorge Washington Amangandi Aguilar, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Lic. Pepita Alarcón Parra; M.Sc.

PRESIDENTE

FIRMA

Ing. Eduardo García Cabezas; M.Sc.

DIRECTOR DE TESIS

FIRMA

Ing. Carlos Santillán Mariño; M.Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

FIRMA

Ing. Paul Vega Cortez; M.Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

FIRMA

Riobamba, Noviembre 2018

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Jorge Washington Amangandi Aguilar soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Ing. Jorge Washington Amangandi Aguilar

No. Cédula: 020187668-7

DERECHOS DE AUTOR COPYRIGHT

©2018, Jorge Washington Amangandi Aguilar

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Jorge Washington Amangandi Aguilar, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

Riobamba, Noviembre 2018

Ing. Jorge Washington Amangandi Aguilar

No. Cédula: 020187668-7

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado con mucho cariño a toda mi familia. Especialmente a mis padres Carlos y María por su apoyo incondicional en mi formación y que siempre me enfocaron a concluir con lo que comienzo.

A mis hermanos por brindarme todo su apoyo a lo largo de este camino.

A mi tutor y asesores que aportaron con sus conocimientos para poder culminar con este trabajo.

Jorge Washington

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a dios por brindarme la oportunidad para hacer posible esta meta.

A toda mi familia por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en los momentos más difíciles.

Mis más sinceros agradecimientos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por darme la oportunidad de obtener una profesión y ser una ayuda para la sociedad.

Jorge Washington

CONTENIDO

RESUMEN.....	xv
SUMMARY	xvi

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Situación problemática.....	1
1.2 Formulación del problema.....	3
1.3 Preguntas directrices	3
1.4 Justificación de la investigación	3
1.5 Objetivos.....	5
<i>1.5.1 Generales.....</i>	<i>5</i>
<i>1.5.2 Específicos.....</i>	<i>5</i>
1.6 Hipótesis	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes.....	6
2.2 Bases teóricas	7
<i>2.2.1 Métodos para enseñanza de personas con discapacidad auditiva.....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.1 Método oralismo.....</i>	<i>8</i>
<i>2.2.1.2 Método gestual</i>	<i>8</i>
<i>2.2.1.3 Método lecto-escritura</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Materiales para enseñanza de personas con discapacidad auditiva</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.1 Materiales impresos</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.2 Materiales gráficos.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.3 Materiales de audiovisual.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.4 Materiales permanentes</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.5 Materiales tecnológicos.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.3 Movimientos de la mano</i>	<i>11</i>
<i>2.2.4 Anatomía de la mano</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4.1 Carpo.....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4.2 Metacarpo.....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4.3 Falanges</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4.4 Tendones de la mano</i>	<i>14</i>

2.2.5	<i>Sistemas robóticos</i>	15
2.2.6	<i>Grados de libertad</i>	15
2.2.7	<i>Prótesis y tipos de robot</i>	16
2.2.7.1	<i>Prótesis</i>	16
2.2.7.2	<i>Tipos de robot</i>	20
2.2.7.3	<i>Modelado</i>	21
2.2.8	<i>Análisis cinemático y dinámico</i>	22
2.2.8.1	<i>Cinemática</i>	22
2.2.8.2	<i>Dinámica</i>	26
2.2.9	<i>Impresora 3D</i>	28
2.2.10	<i>Microcontroladores</i>	29
2.2.10.1	<i>Arduino</i>	30
2.2.10.2	<i>Servomotores</i>	32
2.2.11	<i>Interfaz gráfica de usuario</i>	33

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	35
3.1	Tipo y diseño de investigación	35

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1	Pruebas realizadas	37
4.2	Prueba de voltaje	37
4.3	Prueba de sistema de control	38
4.4	Prueba de movimientos del alfabeto dactilográfico	39
4.5	Evaluación de los métodos de enseñanza/aprendizaje para personas con discapacidad auditiva	50
4.6	Evaluación de materiales de enseñanza/aprendizaje para personas con discapacidad auditiva	50
4.7	Comprobación de la hipótesis	51
4.8	Análisis económico	51
4.8.1	<i>Costos directos</i>	51
4.8.2	<i>Costos indirectos</i>	52
4.8.3	<i>Costo total</i>	53

CAPÍTULO IV

5.	PROPUESTA	54
----	------------------------	----

5.1	Situación actual de enseñanza /aprendizaje del alfabeto dactilológico	54
5.2	Diseño Mecánico	54
5.2.1	Diseño de eslabones	55
5.2.1.1	Dedo pulgar	55
5.2.1.2	Dedo índice y medio	56
5.2.1.3	Dedo anular y meñique	56
5.2.1.4	Palma de la mano	56
5.2.2	Diseño de articulaciones	57
5.3	Modelamiento	58
5.3.1	Modelo cinemático directo	59
5.3.1.1	Obtención de la cinemática directa	62
5.3.2	Modelo cinemático inverso	65
5.3.2.1	Método geométrico	65
5.3.3	Modelo dinámico inverso	69
5.3.3.1	Obtención de la ecuación dinámica	72
5.3.3.2	Ecuación dinámica para el dedo pulgar	77
5.4	Selección de los componentes	78
5.4.1	Selección del material	78
5.4.2	Dimensionamiento de la fuente de alimentación	79
5.4.3	Selección del servomotor	80
5.4.4	Selección de la tarjeta de control	81
5.4.4.1	Drivers de servos USC 32	81
5.5	Impresión 3D del prototipo	82
5.5.1	Ensamble del prototipo	83
5.5.2	Diseño de interfaz gráfica de usuario	85
5.5.2.1	Pantalla de inicio	86
5.5.2.2	Pantalla principal	86
5.6	Diseño de sistema de control	87
5.6.1	Implementación del control para las manos robóticas	87
5.6.2	Algoritmo de control	88
5.6.2.1	Programación arduino	92
	CONCLUSIONES	94
	RECOMENDACIONES	96
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-4	Pruebas de movimientos del alfabeto dactilográfico	49
Tabla 2-4	Evaluación de métodos de enseñanza	50
Tabla 3-4	Evaluación de los materiales didácticos	51
Tabla 4-4	Costos directos de materiales.....	52
Tabla 5-4	Costos directos mano de obra y herramienta	52
Tabla 6-4	Costos indirectos.....	52
Tabla 7-4	Costo total del prototipo	53
Tabla 1-5	Longitud promedio de falanges	55
Tabla 2-5	Parámetros de D-H para el dedo índice	61
Tabla 3-5	Parámetros de D-H para el dedo medio	61
Tabla 4-5	Parámetros de D-H para el dedo anular	61
Tabla 5-5	Parámetros de D-H para el dedo meñique	62
Tabla 6-5	Parámetros de D-H para el dedo pulgar	62
Tabla 7-5	Propiedades mecánicas de los materiales ABS y PLA	79
Tabla 8-5	Torque de los dedos de la mano.....	80
Tabla 9-5	Posiciones iniciales de los servomotores	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2	Alfabeto dactilográfico.....	9
Figura 2-2	Flexión y extensión de la muñeca	11
Figura 3-2	Desviación radial y cubital de la muñeca.....	11
Figura 4-2	Arcos de movilidad de los dedos.....	12
Figura 5-2	Movimiento del dedo pulgar	12
Figura 6-2	Anatomía de la mano.....	14
Figura 7-2	Tendones de los dedos de la mano	14
Figura 8-2	Grados de libertad	16
Figura 9-2	Mano de Alt-Ruppin.....	17
Figura 10-2	Mano mecánica Ambroise.....	17
Figura 11-2	Prótesis de mano con pulgar móvil	18
Figura 12-2	Mano Robonaut- Hand.....	18
Figura 13-2	Mano TUAT-Karlsruhe Humanoide Hand.....	19
Figura 14-2	Mano Ultralight Anthropomorphic Hand.....	19
Figura 15-2	Robots móviles.....	20
Figura 16-2	Robots humanoide.....	20
Figura 17-2	Robots industriales	21
Figura 18-2	Entorno SOLIDWORKS	22
Figura 19-2	Diagrama de relación entre cinemática directa e inversa.	22
Figura 20-2	Interpretación geométrica de la matriz de transformación homogénea.....	24
Figura 21-2	Parámetros de D-H para un eslabón giratorio	25
Figura 22-2	Interpretación de la cinemática inversa	26
Figura 23-2	Impresora 3D.....	29
Figura 24-2	Microcontrolador ARDUINO	30
Figura 25-2	Elementos del microcontrolador	31
Figura 26-2	El Arduino IDE	31
Figura 27-2	Estructura del servomotor	32
Figura 28-2	Giro del servomotor	32
Figura 29-2	Colores comunes de los cables del servomotor.....	33
Figura 30-2	Ancho de pulsos del servomotor	33
Figura 31-2	Interfaz gráfica de usuario.....	34
Figura 1-3	Diagrama de metodología de diseño	35
Figura 1-4	Prueba de voltaje	37
Figura 2-4	Prueba de control desde Arduino	38

Figura 3-4	Prueba de control desde Labview.....	39
Figura 4-4	Prueba de la letra A.....	39
Figura 5-4	Prueba de la letra B.....	40
Figura 6-4	Prueba de la letra C.....	40
Figura 7-4	Prueba de la letra CH.....	40
Figura 8-4	Prueba de la letra D.....	40
Figura 9-4	Prueba de la letra E.....	41
Figura 10-4	Prueba de la letra F.....	41
Figura 11-4	Prueba de la letra G.....	41
Figura 12-4	Prueba de la letra H.....	42
Figura 13-4	Prueba de la letra I.....	42
Figura 14-4	Prueba de la letra J.....	42
Figura 15-4	Prueba de la letra K.....	43
Figura 16-4	Prueba de la letra L.....	43
Figura 17-4	Prueba de la letra LL.....	43
Figura 18-4	Prueba de la letra M.....	44
Figura 19-4	Prueba de la letra N.....	44
Figura 20-4	Prueba de la letra Ñ.....	44
Figura 21-4	Prueba de la letra O.....	45
Figura 22-4	Prueba de la letra P.....	45
Figura 23-4	Prueba de la letra Q.....	45
Figura 24-4	Prueba de la letra R.....	46
Figura 25-4	Prueba de la letra RR.....	46
Figura 26-4	Prueba de la letra S.....	46
Figura 27-4	Prueba de la letra T.....	47
Figura 28-4	Prueba de la letra U.....	47
Figura 29-4	Prueba de la letra V.....	47
Figura 30-4	Prueba de la letra W.....	47
Figura 31-4	Prueba de la letra X.....	48
Figura 32-4	Prueba de la letra Y.....	48
Figura 33-4	Prueba de la letra Z.....	48
Figura 1-5	Diseño del dedo pulgar.....	55
Figura 2-5	Diseño del dedo índice y medio.....	56
Figura 3-5	Diseño del dedo anular y meñique.....	56
Figura 4-5	Diseño de la palma.....	57
Figura 5-5	Articulación de los dedos.....	57
Figura 6-5	Articulación cilíndrica.....	58

Figura 7-5	Equivalente Biomecánico de la mano humana.....	58
Figura 8-5	Asignación de coordenadas del dedo	59
Figura 9-5	Esquema D-H para el dedo índice.....	59
Figura 10-5	Esquema D-H para el dedo medio.....	60
Figura 11-5	Esquema D-H para el dedo anular.....	60
Figura 12-5	Esquema D-H para el dedo meñique.....	60
Figura 13-5	Esquema D-H para el dedo pulgar	61
Figura 14-5	Cinemático inverso del dedo índice y medio	66
Figura 15-5	Cinemático inverso del dedo anular y meñique	67
Figura 16-5	Cinemático inverso del dedo pulgar.....	68
Figura 17-5	Eslabón con masa concentrada dedo índice y medio	69
Figura 18-5	Eslabón con masa concentrada dedo anular y meñique	75
Figura 19-5	Eslabón con masa concentrada dedo pulgar.....	76
Figura 20-5	Filamento ABS.....	78
Figura 21-5	Filamento PLA	79
Figura 22-5	Fuente de alimentación.....	80
Figura 23-5	Arduino Mega 2560	81
Figura 24-5	Drivers de servos USC 32	82
Figura 25-5	Software de impresión 3D.....	82
Figura 26-5	Impresión 3D palma de la mano.....	83
Figura 27-5	Ensamble de la mano.....	83
Figura 28-5	Ensamble del antebrazo.....	84
Figura 29-5	Templado de nylon en los servos	84
Figura 30-5	Ensamble de soporte del antebrazo	85
Figura 31-5	Pantalla de presentación	86
Figura 32-5	Pantalla principal.....	86
Figura 33-5	Diagrama de conexión.....	87
Figura 34-5	Diagrama de flujo del algoritmo de control	88
Figura 35-5	Bloque de configuración puerto de comunicación	89
Figura 36-5	Bloque de configuración velocidad de transmisión.....	89
Figura 37-5	Bloque de programación reinicio de las manos.....	90
Figura 38-5	Bloque reset de variables.....	90
Figura 39-5	Bloque de programación del alfabeto dactilográfico.....	91
Figura 40-5	Bloque despliegue de imágenes	91
Figura 41-5	Bloque para cerrar la comunicación.....	92
Figura 42-5	Diagrama de flujo programación arduino	92

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un prototipo de manos robóticas para la generación de movimientos del alfabeto dactilológico del diccionario oficial de lengua de señas ecuatoriano, que facilitarán el proceso de enseñanza/aprendizaje de personas con discapacidad auditiva con el fin de mejorar el sistema de educación que se imparte a dicha población con métodos tradicionales. El diseño parte del estudio de las medidas antropométricas de la mano humana, sus movimientos y articulaciones, para en una etapa posterior haciendo uso del software SOLIDWORKS originar un diseño inédito de piezas y ensamble que proporcionen un modelo de mano robótica para mecanizarlo haciendo uso de la tecnología de impresión 3D. Se realizó el análisis cinemático directo empleando el algoritmo de Denavit-Hartenberg y el cinemático inverso mediante el método geométrico para fijar las posiciones del efector final y las coordenadas articulares respectivamente. Mediante la formulación de Euler-Lagrange se planteó un modelo dinámico expresado en forma canónica del prototipo robótico. Empleando la plataforma de LabVIEW se desarrolló una interfaz gráfica como medio de interacción entre el usuario y el prototipo robótico. Un Arduino actúa como pasarela para control del tráfico de instrucciones a través de una interfaz serial desde la plataforma gráfica hacia los actuadores del prototipo. Se obtuvo un prototipo robótico con 20 grados de libertad, al cubrir un ciclo de pruebas se alcanzó un 89% de precisión en la generación de los movimientos del alfabeto dactilológico. La interfaz gráfica desarrollada conjuga los movimientos del actuador robótico con recursos gráficos que impacta en el usuario para ganar su atención. Para futuras investigaciones se recomendaría incrementar el número de grados de libertad para la generación de palabras.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <COMUNICACIÓN SERIAL>, <PROTOTIPO>, <ARDUINO>, <SERVOMOTORES>, <IMPRESIÓN 3D>, <ALFABETO DACTILOLÓGICO>, <ROBÓTICA>.

SUMMARY

The present work describes the design and implementation of a prototype robotic hands for the generation of movements of the alphabet dactilologic of the official dictionary of Ecuadorian sign language, which will facilitate the teaching/learning process of hearing impaired people in order to improve the system of education provided to this population with traditional methods. The design part of the study of anthropometric measurements of the human hand, their movements and joints, for at a later stage by making use of the SOLIDWORKS software to give rise to a design of parts and assembly to provide a model of robotic hand to mechanize by making use of the 3D printing technology. The kinematic analysis was performed using the algorithm of direct and inverse kinematic Denavit-Hartenberg using the geometric method to set the positions of the end effector and articular coordinates respectively. Using the Euler-Lagrange formulation of a dynamic model was raised as expressed in canonical form of robotic prototype. Using the LabVIEW Platform developed a graphical interface as a means of interaction between the user and the robotic prototype. An Arduino acts as a gateway for traffic control instructions through a serial interface from the graphics platform toward the actuators of the prototype. A robotic prototype was obtained with 20 degrees of freedom, to cover a test cycle is reached a 89% accuracy in the generation of the movements of the alphabet dactilologic. The graphical interface developed combines the movements of the robotic actuator with graphic resources that impacts the user to gain your attention. For future research would be recommended to increase the number of degrees of freedom for the generation of words.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <SERIAL COMMUNICATION>, <PROTOTYPE>, <ARDUINO>, <SERVOMOTORS>, <3D PRINTING>, <ALPHABET DACTILOLOGIC>, <ROBOTICS>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Situación problemática

Discapacidades sensoriales son lo más común, frecuente y variado que se presenta hoy en día a causa de malas formaciones congénitas o por efecto de algún accidente, varias de éstas no son notorias físicamente. Caso particular es la carencia del sentido auditivo, no podemos detectar una persona con esta discapacidad si no es hasta el momento de interactuar con el mismo.

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), más de 1.000 millones de personas, es decir aproximadamente el 15% de la población mundial tiene alguna discapacidad ya sea física, psicosocial, intelectual o sensorial, que incluye la visual y auditiva. De hecho, se considera que no es un fenómeno tan lejano o ajeno, pues en algún momento de nuestra vida eventualmente todos podríamos tener algún tipo de discapacidad. (CONADIS, 2017)

De acuerdo a los datos publicados en el diario el UNIVERSO Perú es el país con mayor porcentaje de discapacitados en América con un 18.5%, seguido de Estados Unidos con 15%. (EL UNIVERSO, 2009)

En nuestro país, de acuerdo al VI Censo de Población y V de Vivienda (INEC, 2001), el porcentaje de la población ecuatoriana que señala tener discapacidad fue de 4.7%, datos que en el transcurso de una década ascendió a 5.6%, según los datos del VII Censo de Población y VI Vivienda (INEC, 2010). Por otro lado, el estudio “Ecuador la discapacidad en cifras” (CONADIS - INEC, 2005), establece que el 12.14% de la población ecuatoriana tiene algún tipo de discapacidad. (A. Nacional, 2017)

Actualmente, en Ecuador existen alrededor 418.001 de personas que sufren de algún tipo de discapacidad según el CONADIS (Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades) (CONADIS 2017), clasificadas de la siguiente manera: (CONADIS, 2017)

- 12.81% personas con discapacidad auditiva
- 47.07% personas con discapacidad física
- 22.49% personas con discapacidad intelectual
- 1.34% personas con discapacidad de lenguaje
- 4.48% personas con discapacidad psicosocial
- 11.80% personas con discapacidad visual

En la provincia de Chimborazo existen 13.916 personas con discapacidades registradas, 0.038% de personas con discapacidad de lenguaje y 0.716% de personas con discapacidad de audición.

El gran problema que suscita para quienes padecen de carencia auditiva es la falta de conocimiento sobre un lenguaje normado para personas con la mencionada discapacidad, por lo que, en muchos de los casos esto obstaculiza la ejecución normal de sus actividades en su vivir cotidiano.

Centros especializados ofrecen la instrucción en lenguaje de señas dactilográfico o dactilológico con instructores capacitados, abierta para niños y adultos. La enseñanza específicamente para niños resulta más compleja, los métodos pedagógicos empleados actualmente no son lo suficientemente didácticos para ganar la atención del niño y éste pueda captar rápido y de mejor manera el conocimiento, en la web, Jorge Banet en su blog comparte una experiencia real en la que menciona que ha existido casos en que los niños piensan que la sordera sólo se tiene en la infancia, piensan que cuando crezcan y se hagan mayores desaparecerá lo que genera incluso el desinterés del niño en aprender.

Otro de los problemas que enfrentan las personas con discapacidad auditiva surge con la ausencia del instructor luego del periodo de capacitación cuando quedan vacíos que no son cubiertos por la limitación del tiempo, también se ve limitado el proceso de autoaprendizaje al no tener un modelo a seguir.

El presente proyecto busca mejorar el sistema de educación para personas con discapacidad auditiva, con el diseño e implementación de un equipo didáctico y atractivo para niños que facilite el proceso de enseñanza/aprendizaje dotando de una herramienta alternativa para que la persona con discapacidad auditiva pueda continuar instruyéndose o fortaleciendo sus conocimientos aun sin la presencia de un instructor complementando así el proceso de aprendizaje del alfabeto dactilológico. El sistema está formado por partes robóticas controladas, capaces de generar los movimientos normados en el diccionario oficial de lengua de señas ecuatoriano, además

dispondrá de una interfaz gráfica para la configuración y selección de movimientos relacionados paralelamente con imágenes visuales que representen el significado de la expresión dactilográfica efectuada por los actuadores robóticos.

1.2 Formulación del problema

¿La implementación de manos robóticas para la generación de movimientos del alfabeto dactilológico, permitirá mejorar el proceso de enseñanza/aprendizaje para niños y adultos con discapacidad auditiva?

1.3 Preguntas directrices

- ¿Cuáles son los métodos y herramientas utilizados para la enseñanza/aprendizaje de personas con discapacidad auditiva?
- ¿Qué herramienta se puede utilizar para el diseño de la estructura mecánica de las manos robóticas?
- ¿Se puede implementar el diseño de una mano robótica en 3D y realizar el control de la misma para la ejecución de movimientos definidos?
- ¿Cómo caracterizar los movimientos y las fuerzas que intervienen en el sistema robótico?
- ¿Cómo permitir la configuración y selección de movimientos de los actuadores robóticos en un entorno interactivo?
- ¿Es posible relacionar señales de control con animaciones visuales que representen el significado de los movimientos efectuados por las manos robóticas?

1.4 Justificación de la investigación

El Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 y el Plan Estratégico SENPLADES 2014-2017 (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo), hacen énfasis en mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad por lo que el presente proyecto busca aportar a la mejora del sistema de educación para personas con discapacidad auditiva, generando un equipo didáctico y atractivo para niños con esta discapacidad que facilite el proceso de enseñanza/aprendizaje, no obstante, la aplicación de este equipo no excluye a los adultos se convierte en una herramienta que busca que el aprender resulte “divertido”. El sistema estará formado por partes robóticas controladas consistente en estructuras impresas en 3D con alto grado de similitud a las manos reales de una persona, capaces de generar los movimientos normados en el diccionario oficial de lengua de señas ecuatoriano, además dispondrá de una interfaz gráfica para la configuración y

selección de movimientos relacionados paralelamente con imágenes visuales que representen el significado de la expresión dactilográfica efectuada por los actuadores robóticos.

Este proyecto de investigación tiene como propósito aportar al conocimiento existente sobre los sistemas de movimiento robótico y los métodos didácticos para la enseñanza del alfabeto dactilológico, dirigido a todas las personas con y sin discapacidad auditiva, cuyos resultados se reflejarán en una propuesta de diseño que incorpore los conocimientos de automatización y robótica que facilite la inclusión educativa de personas con esta discapacidad en especial niños, a través de una comunicación efectiva para el lenguaje de señas.

La implementación de manos robóticas para la generación del alfabeto dactilológico facilitará la adquisición de información, interpretación del entorno a través de modelos basados en un análisis cinemático y dinámico de sus partes, formulación y ejecución de algoritmos pre-programados, así como el control y/o supervisión de operaciones de sus componentes.

Como beneficiarios directos de esta implementación se considera a las personas con discapacidad auditiva e indirectamente beneficia también a instructores facilitadores del conocimiento sobre lenguaje dactilológico dotándoles de una herramienta para mejorar la metodología de enseñanza/aprendizaje.

Se pretende además contribuir con la mejora del diseño mecánico de las manos robóticas implementando movimientos lineales y rotacionales en articulaciones específicas, tras el antecedente de ineficiencias detectadas en sistemas ya implementados donde la ejecución de los movimientos es solamente lineal restando exactitud en la representación de los caracteres del alfabeto dactilológico, cabe mencionar el caso más frecuente de inexactitud la generación de la letra R.

Considerando que es un proyecto de implementación la metodología aplicada parte de la observación directa no participativa que permitirá identificar los procesos de enseñanza/aprendizaje de personas con discapacidad auditiva y la posible inserción de recursos tecnológicos para su mejora.

A partir del estudio del movimiento de la mano humana conjuntamente con los dedos, se determinan los grados de libertad que servirán para el diseño de un modelo CAD (Dibujo asistido por computadora) para el mecanizado de las piezas del sistema robótico utilizando impresoras 3D. El estudio de la cinemática y dinámica del sistema permitirá definir movimientos y puntos de posicionamiento así como también las fuerzas para efecto de los mismos. Además al resultar

importante la interacción de las personas con el sistema, se define una interfaz gráfica que permita manipular variables sobre el proceso desde un entorno gráfico con imágenes.

1.5 Objetivos

1.5.1 Generales

Implementar el diseño de manos robóticas para la generación de movimientos del alfabeto dactilológico.

1.5.2 Específicos

- Evaluar mediante un estudio descriptivo los métodos y herramientas empleados para el proceso de enseñanza/aprendizaje de personas con discapacidad auditiva.
- Diseñar un modelo CAD (Dibujo asistido por computador) de las manos robóticas usando el software SOLIDWORKS, determinando los grados de libertad necesarios para generar el alfabeto dactilográfico.
- Determinar el material adecuado para la impresión 3D de las piezas para el ensamble de las manos robóticas y el equipamiento necesario para el control y ejecución de movimientos.
- Realizar el análisis cinemático y dinámico de las piezas que conforman las manos robóticas.
- Implementar una interfaz gráfica que permita la configuración y selección de movimientos pre programados relacionados paralelamente con imágenes visuales que representen el significado de la expresión dactilográfica efectuada por los actuadores robóticos.
- Generar una base de datos con información que relacione el significado de una seña con parámetros de control para los actuadores que ejecutan el movimiento de las manos.
- Evaluar la implementación de las manos robóticas en base a la precisión de los movimientos.

1.6 Hipótesis

Las manos robóticas permitirá la reproducción del alfabeto dactilológico con una elevada precisión.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Para el Diseño e implementación de las manos robóticas, así como la generación de los movimientos del alfabeto dactilológico fue necesario revisar distintas fuentes bibliográficas en los cuales se encuentran inmersas investigaciones relacionadas con el tema a investigar.

Andrade, Diego y Zúñiga Daniel, (2011) en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, el presente proyecto de tesis trata sobre el Tema: "Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas"; este prototipo tiene como objetivo principal ayudar al aprendizaje de personas que tienen deficiencia auditiva, descrito de una mejor manera personas que siempre carecieron del sentido auditivo, mediante el diseño y la construcción de una mano robótica, capaz de realizar las señas del alfabeto dactilológico y que interactuó con la persona mediante el reconocimiento de señas capturadas por una cámara web, para su posterior procesamiento por visión artificial en la plataforma de desarrollo National Instruments Labview 2009 todo esto en tiempo real.

Daniel, Betancur, Mateo Vélez y Alejandro Peña, (2014) Universidad CES / Envigado, Colombia. Presenta la Revista Ingeniería Biomédica; "Traducción automática del lenguaje dactilológico de sordos y sordomudos mediante sistemas adaptativos"; con un objetivo general el desarrollo de un sistema integrado de hardware y software para el reconocimiento automático del lenguaje dactilológico de señas. El hardware está compuesto por un sistema inalámbrico adherido a un guante, el cual posee un conjunto de sensores que capturan una serie de señales generadas por los movimientos gestuales de la mano, y un modelo por adaptación basado en los principios de la computación neuronal, el cual permite su reconocimiento en términos de un lenguaje dactilológico en particular. Los resultados arrojados por el sistema integrado mostraron gran efectividad en el reconocimiento de las vocales que conforman el lenguaje dactilológico en español, esto gracias a la capacidad que posee el modelo de asociar un conjunto de señales de entrada, con un movimiento dactilológico en particular

Laura Jeanine Razo Gil, (2011) Instituto Politécnico Nacional. Presento su trabajo de titulación; “Sistema para el reconocimiento del alfabeto dactilológico “; con objetivo general desarrollar una herramienta computacional capaz de reconocer el alfabeto dactilológico sobre imágenes digitales. De esta manera permite concluir la importancia de saber que cada letra tiene forma única, estableció las bases para definir los prototipos de clase, asignando a cada segmento de región un valor de ponderación lo suficientemente útil para discriminar las letras del alfabeto.

Guzmán Arellano, D. A. (2017) en la Universidad Técnica de Ambato presento su trabajo de titulación; “Guante Electrónico para traducir de lenguaje de señas a caracteres con voz artificial y conexión inalámbrica a dispositivos móviles para personas con discapacidad auditiva y de lenguaje en la Universidad Técnica de Ambato”; a tecnología asistida permite a las personas con cualquier discapacidad involucrarse en actividades cotidianas mediante el uso de sistemas electrónicos. En el caso de personas con discapacidad auditiva la necesidad de comunicarse con otros individuos es esencial en su desenvolvimiento dentro de la sociedad. Por esta razón se ha desarrollado un guante electrónico que permite traducir el lenguaje de señas en caracteres y reproducirlos mediante un módulo de voz artificial y a su vez ofrece la posibilidad de intercambiar mensajes mediante tecnología bluetooth facilitando la comunicación de personas que padecen discapacidad auditiva. El sistema electrónico desarrollado cuenta con dos modos de traducción; el primero permite al usuario emitir la traducción mediante un sintetizador de voz artificial mientras que el segundo modo permite establecer una conexión bluetooth con un dispositivo móvil y de esta forma la persona discapacitada puede emitir y recibir mensajes que son visualizados en una pantalla ubicada en el guante electrónico. Como resultado las personas con discapacidad auditiva van a contar con una herramienta portable, ergonómica y eficaz que les permite comunicarse de manera fluida mejorando su desenvolvimiento dentro de la sociedad.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 *Métodos para enseñanza de personas con discapacidad auditiva*

El aprendizaje es un factor importante del ser humano que inicia desde los primeros días de vida mediante el cual se adquiere habilidades, destrezas, valores y experiencias.

A continuación se detalla los métodos más utilizados y conocidos para enseñanza de personas con discapacidad auditiva.

2.2.1.1 *Método oralismo*

El oralismo es un método de enseñanza/aprendizaje del habla aprovechando los restos auditivos, se utiliza en personas que no tienen afectado el aparato fono articulador. En este método no interviene el sistema gestual ni el dactilológico. Para adquirir el lenguaje a través de este sistema se requiere los recursos como gimnasia respiratoria, lectura labio facial y contar con aparatos electroacústicas. La lectura labio facial permite leer los labios de la personas cuando hablan, está es una cualidad que las personas con discapacidad auditiva desarrollan de una manera rápida y beneficiosa para su aprendizaje, ya que no solo se observa los labios sino los gestos faciales y las expresiones corporales. La técnica consiste en enseñar a hablar a la persona sorda, entender el significado de la palabra y aprender el idioma. (Suria, 1982)

2.2.1.2 *Método gestual*

- **Lenguaje de señas**

Un sordo, aunque viva en un medio de personas oyentes, aislado del contacto con otros sordos, desarrolla un sistema de comunicación basado en signos manuales espontáneos, lo que indica que todos, sordos y oyentes, nacemos con principios lingüísticos básicos, abstractos, que luego utilizamos deduciendo la lengua de nuestra comunidad. (Rodríguez, 1992)

El lenguaje de signo va surgiendo de manera natural cuando un sordo entra en contacto con otro u otros sordos. Puede decirse que las lenguas de signos gestuales existen desde que dos o más personas sordas tuvieron ocasión de comunicarse para lo cual utilizan expresiones faciales, mano y cuerpo. (Rodríguez, 1992)

Apenas se conoce referencias sobre el lenguaje gestual del sordo antes del siglo XVII. A excepción de San Agustín, los datos que se poseen tratan sobre todo de la educación del sordo y reflejan la injusticia desestima que han ellos padecido a lo largo de la historia. (Rodríguez, 1992)

El lenguaje de signos comprende al menos unas cincuenta lenguas prácticamente ininteligibles entre sí (por ejemplo la americana y la española), y números dialectos, algunos de los cuales coexisten dentro de una misma ciudad. Es una lengua viva que está en continua renovación, incorporándose neologismos a medida que se han ido necesitando. (Rodríguez, 1992)

- **La dactilología**

El alfabeto dactilográfico es la representación manual del abecedario en el espacio por diferentes posiciones y movimientos de los dedos de la mano. Se utiliza cuando se quiere expresar un pensamiento y cuando se necesita conocer la escritura correcta de alguna palabra. La palabra dactilología viene de la apalabra griego “daktilos” que quiere decir dedos y “logia” ciencia “ciencia de los dedos”. (Rodríguez, 1992)

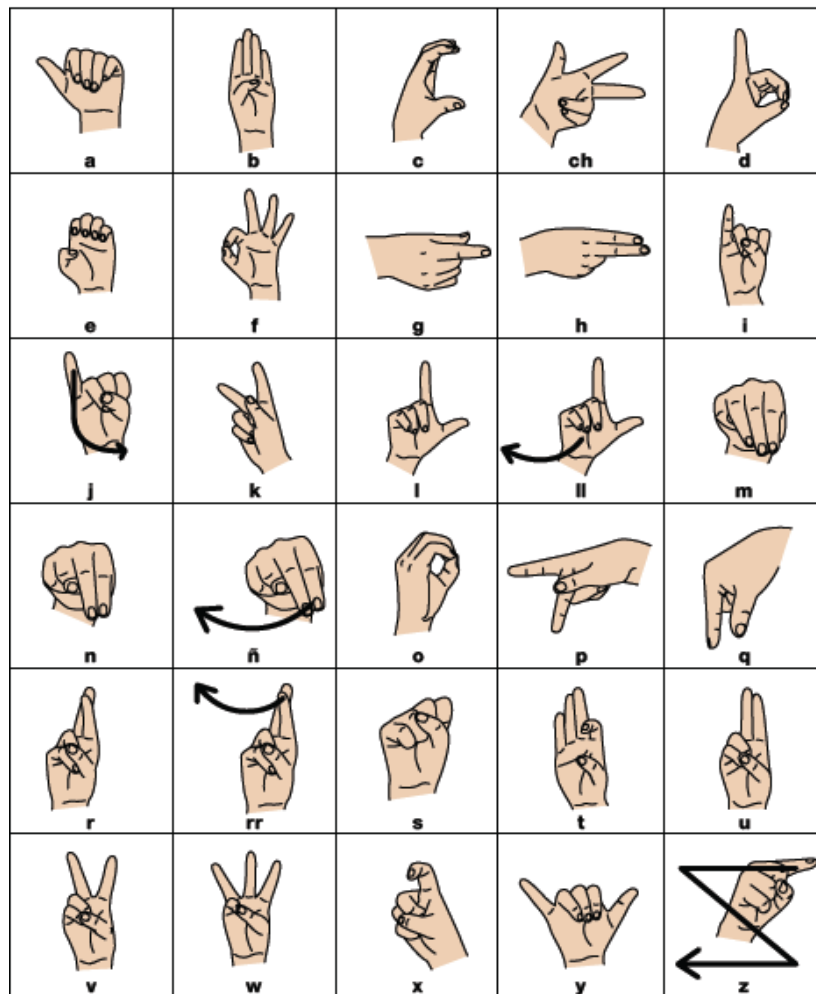


Figura 1-2. Alfabeto dactilográfico

Fuente: Glosario Básico de Lenguaje de Señas Ecuatoriana

2.2.1.3 Método lecto-escritura

Es un método de enseñanza de lectura y escritura para personas sordas que no ha tenido éxito, ya que la persona que está instruyendo este método solo escribirá o mostrará la imagen de una letra o vocal que no tendrá ningún significado para personas que tienen este problema auditivo ya que

ellos solo captarán la imagen pero no sabrán el sonido de la misma. Ya que los materiales didácticos utilizados en dicha enseñanza son los textos escritos y material impreso. (Alonso, 2006)

2.2.2 *Materiales para enseñanza de personas con discapacidad auditiva*

Los materiales es uno de los elementos importantes en el proceso de enseñanza y aprendizaje para personas con discapacidad auditiva, las mismas deben ser didácticas que puedan ser utilizados dentro y fuera de salón de clases para desarrollar sus conocimientos de la mejor manera.

2.2.2.1 *Materiales impresos*

Son aquellos que son producidos por algún medio de impresión se refieren a (libros, revistas, periódicos, enciclopedias, cuentos, fichas de actividades, libros de ilustración, etc.) que son medios para enseñanza/aprendizaje. (Andrade, 2013)

2.2.2.2 *Materiales gráficos*

Los materiales gráficos son herramientas que son utilizados en el proceso de enseñanza/aprendizaje que son un conjunto de palabras e imágenes que no necesitan de tecnología ni conocimientos técnicos para elaborar, que son plasmados a través de acetatos, carteles y rotafolios. (Andrade, 2013)

2.2.2.3 *Materiales de audiovisual*

Es un medio que se utiliza para comunicar un mensaje mediante la combinación de imagen y sonido con el fin de proveer los conocimientos sobre todo motivar el aprendizaje y actitudes, los medios audiovisuales son (diapositivas, televisión, radio, retroproyector y videos).

2.2.2.4 *Materiales permanentes*

Son aquellos que los docentes utilizan todos los días para la enseñanza como pizarra, tizas líquidas, reglas y cuaderno etc. (Andrade, 2013)

2.2.2.5 *Materiales tecnológicos*

Los materiales tecnológicos son las páginas web, buscadores y software educativo que es un punto de partida para innovar e incorporar nuevas tecnologías en el ámbito educativo.

2.2.3 Movimientos de la mano

Los movimientos fundamentales de la mano son flexión y extensión y desviación radial y ulnar. Presenta movimientos que están mediados por las articulaciones que forman radio y cubito con los huesos de la mano.

- Flexión-Extensión: el arco total es de 170° dividiéndose 80° para flexión y 90° para extensión.



Figura 2-2. Flexión y extensión de la muñeca
Fuente: Rene, C. 2006

- Desviación: está puede ser radial o cubital y describen un arco total de 50° dividiéndose 30° para la desviación cubital y 20° para la desviación radial. (Hoppenfeld, 1976)

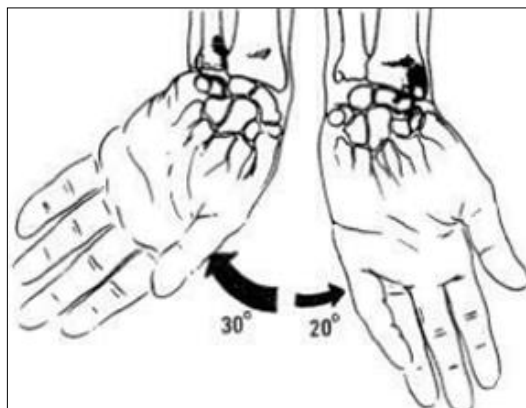


Figura 3-2. Desviación radial y cubital de la muñeca
Fuente: Hoppenfeld, S. 1976

Por tener los dedos y en especial del pulgar, la mano tiene numerosos movimientos en los cuales intervienen las articulaciones falángicas entre ellas y con los metacarpos.

- Flexión-Extensión metacarpofalángica: el arco total de movimiento es de 120° a 135° y está dividido en 90° para la flexión y 30° a 45° para la extensión.

- Flexión-Extensión Interfalángica proximal: un arco de movimiento total de 100° asociados únicamente para la flexión, en la normalidad no existe extensión de esta articulación.
- Flexión-Extensión Interfalángica distal: un arco de movimiento total de 90° a 100° dividido en 90° para extensión y 0° a 10° para la extensión. (Hoppenfeld, 1976)

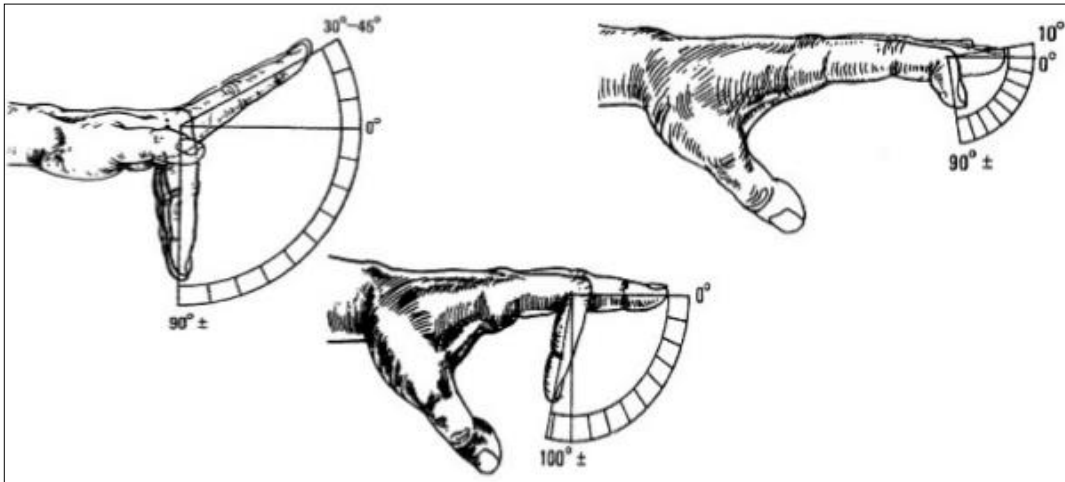


Figura 4-2. Arcos de movilidad de los dedos

Fuente: Hoppenfeld, S. 1976

- Flexión-extensión total del pulgar: En la normalidad, este movimiento será capaz de que toquemos la punta del meñique con la de nuestro pulgar si ambos están flexionados.
- Flexión-extensión metacarpofalángica del pulgar: Describe un arco de 50° en flexión sin haber ángulo de extensión.
- Flexión-extensión interfalángica de pulgar: Tiene un arco total de movimiento de 90° a 110° de movimiento dividiéndose en 90° para flexión y 0° a 20° para la extensión.
- Abducción-aducción palmar del pulgar: Rango total de movimiento de 70° solo en flexión. (Hoppenfeld, 1976)

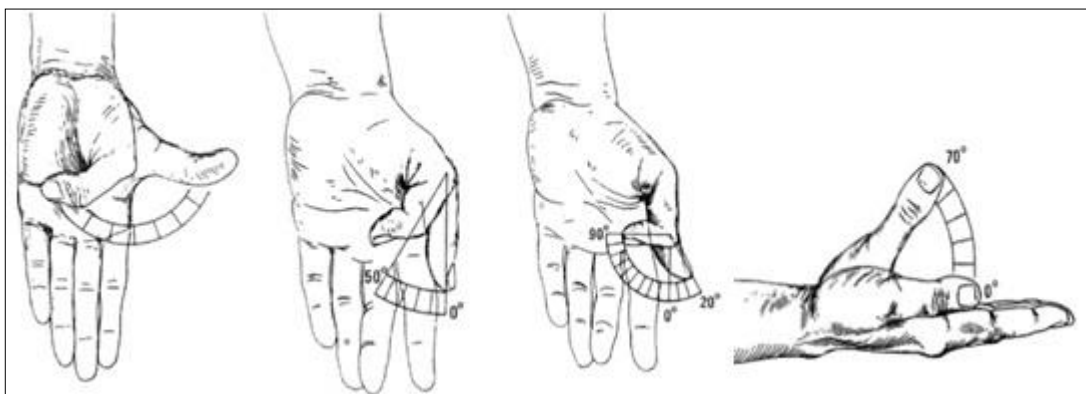


Figura 5-2. Movimiento del dedo pulgar

Fuente: Hoppenfeld, S. 1976

2.2.4 Anatomía de la mano

Las manos están a la vista de los demás. Los movimientos que se hacen con ellas dicen mucho de nuestra personalidad, y gracias a ellas se puede realizar infinidad de trabajo. Las manos son la extremidad más distal del miembro superior, adaptados para realizar infinidad de movimiento gracias a la acción de los numerosos músculos insertados a los huesos. (Quiroz, 1993)

El esqueleto de la mano está formado por 27 huesos diferenciados en tres zonas ocho huesos cortos, cuyo conjunto constituye el esqueleto de la muñeca o carpo, cinco huesos largos que forman el metacarpo, y por último, catorce huesos, también largos, llamados falanges, que constituye el esqueleto de los dedos. (Quiroz, 1993)

2.2.4.1 Carpo

Los ocho huesos que lo integran se hallan colocados en dos hileras superpuestas que, en conjunto, forman una masa, ósea convexa por su cara posterior y cóncava, transversalmente, por la anterior; está última constituye una especie de canal por donde pasan los tendones de los músculos flexores de los dedos. La hilera superior se halla formada, procediendo de afuera adentro, por los siguientes huesos: escafoides, semilunar, piramidal y pisiformes, en la hilera inferior, procediendo en el mismo orden, se encuentra los siguientes: trapecio, trapecoide, hueso grande y hueso ganchudo. (Pró, 2012)

2.2.4.2 Metacarpo

Se halla formado por cinco huesos largos o huesos metacarpianos, que se designa como primero, segundo, etc., de afuera adentro y forman el esqueleto de la palma de la mano. Se articulan por arriba con la segunda hilera de huesos del carpo y, por abajo, con las primeras falanges de los dedos. Presentan para su estudio caracteres comunes entre sí, y otros particulares, que dan personalidad propia a cada una. (Pró, 2012)

2.2.4.3 Falanges

Forman el esqueleto de los dedos, siendo en un número de dos para el pulgar (falange y falangeta) y de tres para los otros cuatro (falange, falangina y falangeta). Son, como los anteriores, huesos largos, provistos, por tanto, de un cuerpo y dos extremidades. (Pró, 2012)

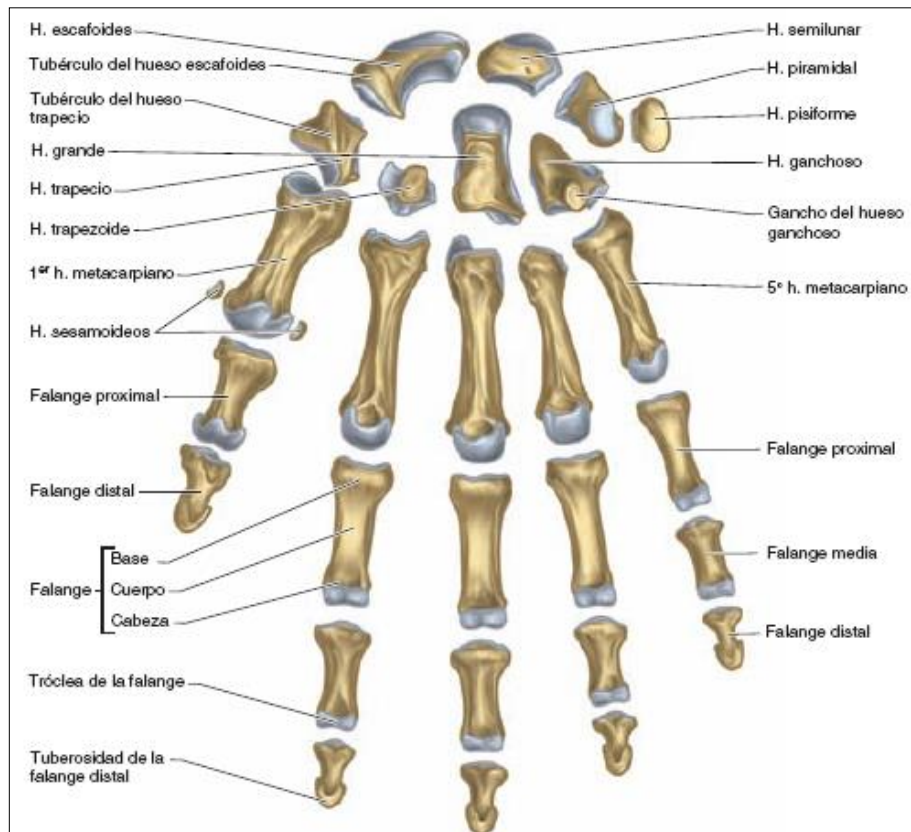


Figura 6-2. Anatomía de la mano
Fuente: Pró, E. 2012.

2.2.4.4 *Tendones de la mano*

Los tendones en las manos permiten el movimiento de la mano y dedos que se encuentran conectados directamente con los músculos de los brazos y se clasifican en tendones extensores y los flexores.

El tendón extensor permite a las articulaciones de los dedos enderezarse o extenderse como de la zona de la muñeca. Los tendones flexores permiten realizar los movimientos de flexión como hacer un puño, agarrar los objetos y doblar los dedos y los pulgares. (Cailliet, 2006)

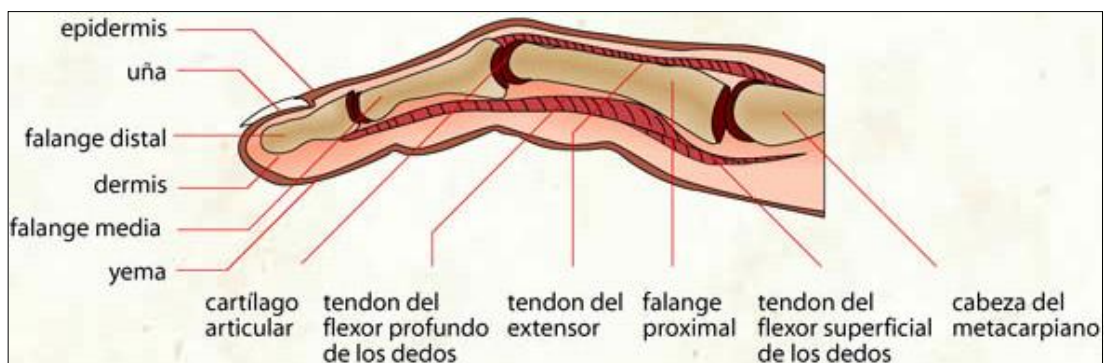


Figura 7-2. Tendones de los dedos de la mano
Fuente: <https://infovisual.info/es/cuerpo-humano/dedo>

2.2.5 *Sistemas robóticos*

En el término de robot confluyen las imágenes de máquinas para la realización de trabajos productivos y de imitación de movimientos y comportamiento de los seres vivos. Los robots actuales son obras de ingeniería y como tales concebidas para producir bienes y servicios o explorar recursos naturales.

En nuestro siglo el desarrollo de máquinas ha estado fuertemente influido por el progreso tecnológico. De esta forma las máquinas tienen como objetivo amplificar la potencia muscular del hombre, sustituir en su trabajo, como también capaces de procesar información o incluso sustituir al hombre en algunas actividades intelectuales. (Kelly & Santibáñez, 2003)

Un robot es esencialmente un sistema organizado de forma tal que responde con una acción inteligente a los estímulos que es capaz de percibir. Se puede considerar como la síntesis de varios subsistemas, entre los que destacan: (Blanco, Escribano, González, & Amor, 2004)

- El sistema de accionamiento, compuesto por los elementos actuadores (motores, por ejemplo) que permiten llevar a cabo las acciones programadas.
- La unidad de control, formada por los elementos computacionales y el software que regulan el comportamiento global del robot.

Además, a los anteriores hay que añadir:

- Los elementos estructurales, que confieren rigidez y estabilidad al robot.
- Los elementos de transmisión y conversión del movimiento. Cambios en el eje o la dirección de rotación, ampliación/reducción de velocidad, etc.
- Los elementos terminales, según la aplicación a la que se destine al robot (pinzas, electrodos de soldadura, inyectoros de pintura, etc.).
- Los dispositivos auxiliares de entrada/salida, que permiten la comunicación del usuario con la unidad de control.
- Los sistemas de alimentación, de tipo eléctrico, neumático o hidráulico.

2.2.6 *Grados de libertad*

El número de grados de libertad que posee un sistema mecánico es el número mínimo de coordenadas independientes requeridas para especificar las posiciones de todos sus elementos.

En otras palabras, un grado de libertad es la capacidad de moverse a lo largo de un eje (movimiento lineal) o de rotar a lo largo de un eje (movimiento rotacional).

El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de GDL de las articulaciones que lo componen. En general, es importante observar que, no es el número de masas o cualquier otra cantidad obvia la que conducirá siempre a una estimación correcta de número de grados de libertad. (Ollero, 2001)

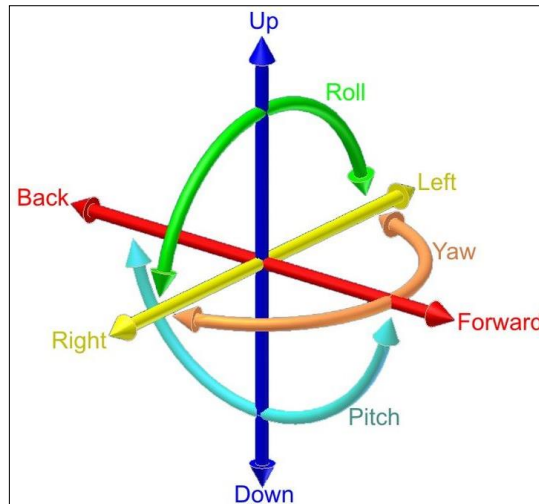


Figura 8-2. Grados de libertad

Fuente: http://help.solidworks.com/2016/spanish/SolidWorks/motionstudies/c_degrees_freedom_motion.htm

2.2.7 *Prótesis y tipos de robot*

2.2.7.1 *Prótesis*

El avance en el diseño las de prótesis ha estado ligado directamente con el avance en el manejo de los materiales empleados por el hombre, así como el desarrollo tecnológico y el entendimiento de la biomecánica del cuerpo humano.

En el año 1400 se fabrica la mano de Alt-Ruppin se construye en hierro, que constaba de un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles, los cuales eran flexionados pasivamente, éstos se podían fijar mediante un mecanismo de trinquete y además tenía una muñeca movable. (Dorador, 2004)



Figura 9-2. Mano de Alt-Ruppin
Fuente: Dorador, J. 2004

En el siglo XVI el médico militar francés Ambroise Paré, desarrolla el primer brazo artificial móvil al nivel de codo, llamado “Le petit Loraine” realizando un mecanismo sencillo, los dedos podían abrirse o cerrarse presionando o tracción, además constaba de una palanca, por medio de la cual, el brazo podía realizar la flexión o extensión a nivel de codo. (Dorador, 2004)

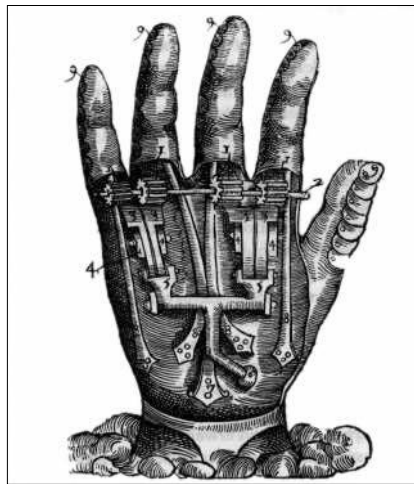


Figura 10-2. Mano mecánica Ambroise
Fuente: Dorador, J. 2004

En el siglo XIX se desarrolla la mano robótica que cumple con el cierre y la apertura de los dedos que va ser controlada por los movimientos del tronco y hombro contra lateral, dando origen a las prótesis autopropulsadas. La mano consta de un pulgar móvil utilizando un gancho dividido sagitalmente, parecido a los actuales ganchos Hook. (Dorador, 2004)

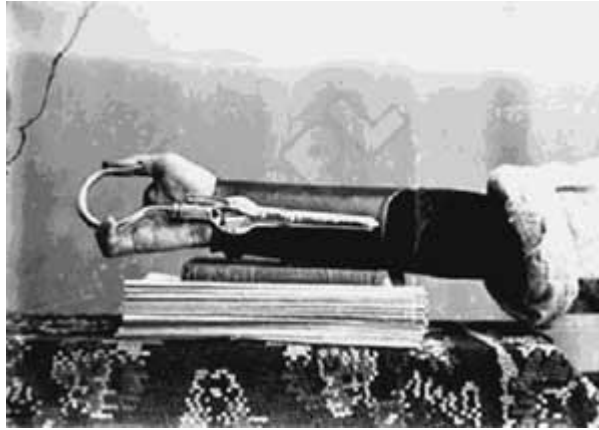


Figura 11-2. Prótesis de mano con pulgar móvil
Fuente: Dorador, J. 2004

La mano Robonaut Hand posee 22 grados de libertad, 20 en la mano y 2 en la muñeca que son accionados por motores sin escobillas la cual se aproxima en un alto porcentaje a la de la estructura de la mano humana, que tiene la propiedad de manipular herramientas. El conjunto está compuesto por dos dedos de 3 GDL (índice y central) y el pulgar mientras que el agarre consiste en dos dedos con 2 GDL (anular y meñique). También está compuesto por 42 sensores para posicionamiento de motores y articulaciones, sensores de tensión de los tendones. (Cabás, 2011)



Figura 12-2. Mano Robonaut-Hand
Fuente: <https://er.jsc.nasa.gov/seh/Robotics/index.html>

La TUAT-Karlsruhe Humanoide Hand tiene la habilidad de sujetar objetos de diferentes tamaños y forma. Posee cuatro dedos y un pulgar tiene 24 GDL todo esto es accionado por motores eléctrico que pueden ser montados dentro o alrededor de la mano este prototipo está concebido solo para tareas de agarre. El sistema sensorial para la posición del motor y un sistema de auto adaptación de formas debido al diseño de la estructura. (Cabás, 2011)

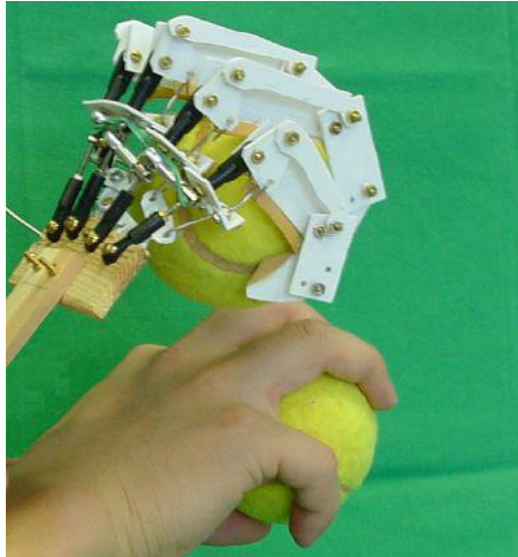


Figura 13-2. Mano TUAT-Karlsruhe Humanoide Hand
Fuente: Cabás, R. 2011

La mano Ultralight Anthropomorphic Hand cuenta con 5 dedos y 13 GDL que son movidos por 18 actuadores hidráulicos flexibles con una relación tamaño-fuerza favorable. Los actuadores están completamente integrados en los dedos que pueden realizar movimientos complejos y ligeros que puede ser utilizado como una prótesis de mano o como una mano de un robot humanoide que tiene la característica de bajo peso y semejantes a la mano humana. La mano tiene la habilidad de manipular objetos de diferentes tamaños y con una gran consistencia. (Cabás, 2011)



Figura 14-2. Mano Ultralight Anthropomorphic Hand
Fuente: Cabás, R. 2011

2.2.7.2 Tipos de robot

Actualmente existe una gran variedad de robots con diversas estructuras geométricas y mecánicas que definen su funcionalidad y se clasifican de la siguiente manera.

- **Robots móviles**

Los robots móviles son aquellos que se pueden desplazarse de un lugar a otro dependiendo de su aplicación es el tipo de estructura mecánica, ruedas y patas. Entre las cuales se puede mencionar como terrestre, aéreos y marinos. (Reyes, 2011)



Figura 15-2. Robots móviles

Fuente: <http://www.robotnik.es/robots-moviles/>

- **Robots humanoides**

También son conocidos como androides, los cuales son máquinas antropomórficas capaces de imitar las funciones básicas del ser humano tales como caminar, hablar, ver, recolectar, limpiar y trasladar objetos. (Reyes, 2011)



Figura 16-2. Robots humanoide

Fuente: <https://es.aliexpress.com/popular/humanoid-robots.html>

- **Robots industriales**

Los robots industriales son los más populares que existen debido a la que el sector industrial lo utilizan como una herramienta clave para la modernización de las empresas. En la actualidad los procesos industriales se realiza a través de robots y esto trae como consecuencia competitividad, productividad, eficiencia y rentabilidad de las empresas. Los robots industriales son conocidos como brazos mecánicos por su analogía con el brazo humano, y se componen de la base la cual pueden rotar 360° alrededor de su eje además poseen articulaciones para hombro y codo. El extremo final del codo tiene una parte mecánica denominada muñeca que le permite orientar a la herramienta final que determinara la aplicación a realizar. (Reyes, 2011)



Figura 17-2. Robots industriales

Fuente: <http://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/soldadura-por-arco/arcmate-100ic-12s>

2.2.7.3 *Modelado*

SOLIDWORKS es un software para diseño de un modelo CAD 3D (Dibujo asistido por computadora). Es una herramienta de fácil aprendizaje que hace posible a los diseñadores mecánicos modelar con rapidez sus ideas, experimentar con las operaciones, cotas y producir modelos y dibujos detallados de fácil fabricación.

Las principales características que hace de SolidWorks es una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variación y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Además utiliza el Gestor de diseño (FeatureManager) que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operación sin tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados. (Gómez, 2014)



Figura 18-2. Entorno SOLIDWORKS

Fuente: <http://sybprogramas.blogspot.com/2016/02/solidworks-premium-2015-64-bits.html>

2.2.8 Análisis cinemático y dinámico

2.2.8.1 Cinemática

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen. Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot; el segundo, denominado problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

Cinemática		
	Cinemática directa →→	
Valor de las coordenadas articulares (q_0, q_1, \dots, q_n)		Posición y orientación del extremo del robot ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$)
	←← Cinemática inversa	

Figura 19-2. Diagrama de relación entre cinemática directa e inversa.

Fuente: Barrientos, A. 2007

- **El problema cinemático directo**

La resolución del problema cinemático directo permite conocer cuál es la posición y orientación que adopta el extremo del robot cuando cada una de las variables que fijan la posición u orientación de sus articulaciones toma valores determinados la metodología que se aplica para

este apartado será a través de matrices de transformación homogéneo. Para representar la posición y orientación del extremo del robot la solución al problema de la cinemática directa vendrá dado por las relaciones: (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

$$\begin{aligned}
 x &= f_x(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\
 y &= f_y(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\
 z &= f_z(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\
 \alpha &= f_\alpha(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\
 \beta &= f_\beta(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\
 \gamma &= f_\gamma(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot. La matriz de transformaciones homogéneas tiene la siguiente estructura:

- Submatriz de rotación $R_{3 \times 3}$;
- Submatriz de traslación $p_{3 \times 1}$;
- Submatriz de perspectiva $f_{1 \times 3}$;
- Submatriz de escalado $w_{1 \times 1}$;

La submatriz de perspectiva en caso de la robótica es siempre 0 y la submatriz escalado en caso de la robótica es 1.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
 \tag{2}$$

$$T = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \tag{3}$$

Donde los vectores n , s , a , son vectores ortogonales unitarios y p es un vector que describe la posición x , y , z del origen del sistema actual respecto del sistema de referencia.

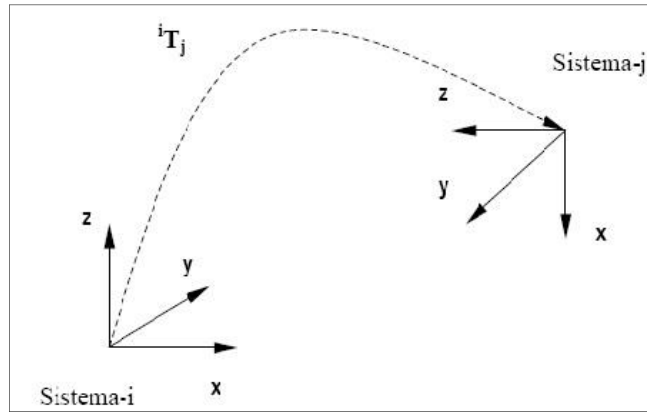


Figura 20-2. Interpretación geométrica de la matriz de transformación homogénea

Fuente: Craig, J. 2006

- **La representación de Denavit- Hartenberg**

Permite el paso de un eslabón al siguiente mediante 4 matrices de transformación básicas, que dependen exclusivamente de las características constructivas del robot. Estas 4 transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento $i-1$ con el sistema del elemento i son. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i ; vector d_i (0,0, d_i).
- Traslación a lo largo X_i una distancia a_i ; vector a_i (0,0, a_i).
- Rotación alrededor del eje X_i un ángulo α_i .

La matriz de transformación propuesto por D-H para la solución de este modelo se muestra a continuación.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i\sin\theta_i & \sin\alpha_i\sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i\cos\theta_i & -\sin\alpha_i\cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

- **Algoritmo de D-H**

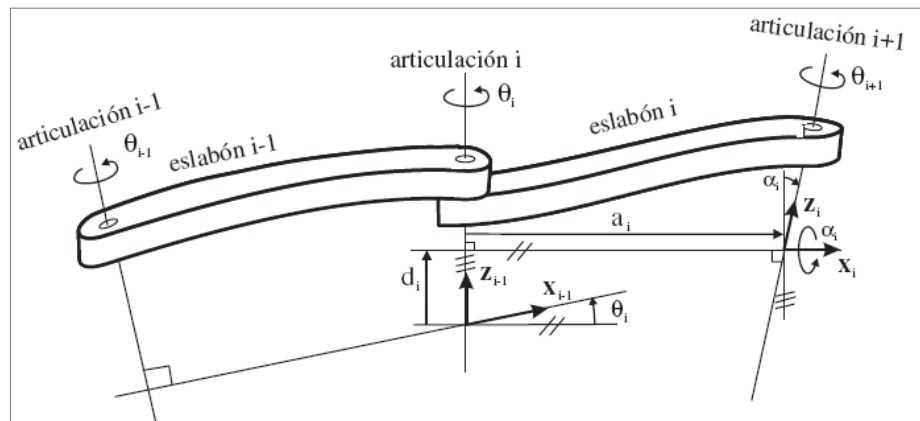


Figura 21-2. Parámetros de D-H para un eslabón giratorio

Fuente: Barrientos, A. 2007

1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numera como eslabón 0 a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n .
3. Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para i de 0 a $n-1$ situar el eje Z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.
5. Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje Z_0 . Los ejes X_0 e Y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 .
6. Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Z_i con la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i+1$.
7. Para i de 1 a $n-1$, situar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i .
8. Para i de 1 a $n-1$, situar Y_i de modo que formen un sistema dextrógiro con X_i y Z_i
9. Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que Z_n coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .
10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i queden paralelos.
11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo del eje Z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que X_i y X_{i-1} quedasen alineados.
12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de X_i , que ahora coincidiría con X_{i-1} , que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.
13. Obtener α_i como el ángulo que habría que girar en torno a X_i , que ahora coincidiría con X_{i-1} , para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$

14. Obtener las matrices de transformación A_i^{i-1} .
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_n^{n-1}$.
16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) de los extremos referidos a la base, en función de la n coordenada articulares.

- **El problema cinemático inversa**

El problema de la cinemática inversa consiste en encontrar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ para que su extremo se posicione y se oriente en una ubicación específica. Se utiliza el método geométrico para ello se utiliza las relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos y se recurrirá a la resolución de triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

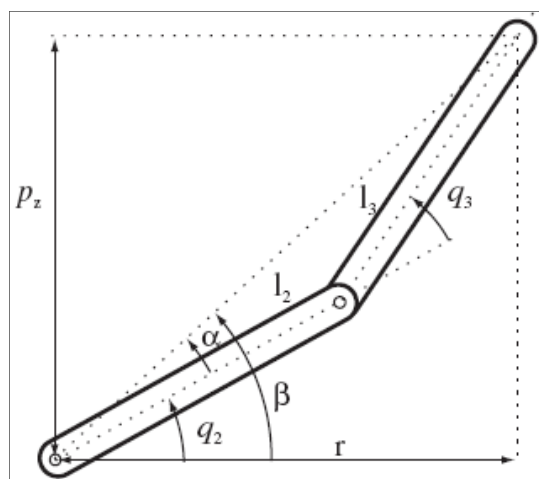


Figura 22-2. Interpretación de la cinemática inversa
Fuente: Barrientos, A. 2007

2.2.8.2 Dinámica

El modelo dinámico permite conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo. El modelo matemático establece la relación matemática entre: (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

1. La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
2. Las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones (o en el extremo del robot).
3. Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masas e inercias de sus elementos.

Para obtener el modelo dinámico de robots de uno o dos grados de libertad no es compleja, pero a medida que incrementa el número de grados de libertad, el modelo dinámico se complica considerablemente. Por esta razón no es siempre posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, es decir mediante ecuaciones diferenciales de segundo y cuya integración permita conocer qué movimiento surge al aplicar unas fuerzas o qué fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado. El modelo dinámico debe ser resuelto de manera iterativa mediante la utilización de un procedimiento numérico. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

El planteamiento del equilibrio de fuerzas y pares que intervienen sobre el robot se obtienen los denominados modelos dinámicos directo e inverso:

- **Modelo dinámico directo:** Expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.
- **Modelo dinámico inverso:** Determina las fuerzas y pares necesarios para conseguir una evolución de las coordenadas articulares determinada.

Para encontrar el modelo dinámico del robot se puede encontrar través de dos métodos Newton-Euler y Euler-Lagrange.

- **Método de Newton-Euler**

La obtención del modelo dinámico de un robot se basa fundamentalmente en el principio de equilibrio de fuerza establecida por la segunda ley de Newton, o su similar para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

$$\begin{aligned} \sum F &= m\dot{v} \\ \sum T &= I\dot{\omega} + \dot{\omega}(I\omega) \end{aligned} \tag{5}$$

Donde, m es la masa, \dot{v} es la aceleración, I es la inercia y ω la velocidad angular del mecanismo.

- **Método de Euler-Lagrange**

Un método para obtener el modelo dinámico del robot, se define como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

El método de Lagrange establece la siguiente ecuación:

$$L = E_c - E_p$$
$$T_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (6)$$

Donde:

L: Función Lagrangiana.

E_c : Energía cinética.

E_p : Energía potencial.

q_i : Coordenadas generalizadas (en este caso las articulares).

T_i : Fuerza o pares aplicado sobre el grado de libertad q_i .

$$E_c = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \dot{\theta}_i^2 \quad (7)$$

Donde, m_i es la masa del eslabón, v_i la velocidad lineal del centro de masas del eslabón, I es la inercia del eslabón y $\dot{\theta}$ es la velocidad angular.

$$E_p = m_i g h_i \quad (8)$$

Donde, m_i es la masa del eslabón, g es la aceleración de la gravedad y h_i la altura entre el origen y el centro de gravedad del eslabón.

2.2.9 Impresora 3D

Una impresora 3D es una máquina capaz de imprimir un objeto solido tridimensional (ejes x, y, z) a partir de un diseño creado por ordenador, mediante la adición de material. Nace con la idea de crear objetos reales o 3D a partir de un modelo CAD. La tecnología de la impresora 3D se está utilizando para la prefabricación de piezas en sectores como la arquitectura y el entorno de diseño/ingeniería.

En la actualidad la impresión 3D permite la fabricación de prótesis médicas, facilitando adaptar cada pieza fabricada a las necesidades del paciente.

La impresión 3D se define como el proceso de acumular material secuencialmente en una cama hasta formar un objeto con sus tres dimensiones (largo, ancho y alto) a través de diferentes métodos de fabricación como polimerización, inyección de aporte, inyección de aglutinante, extrusión de material, cama de polvo, laminación de metal y depósito metálico. (Lipson & Kurman, 2014)



Figura 23-2. Impresora 3D

Fuente: <http://www.personalizalo.net/impresora-3d-sais-delta/>

2.2.10 *Microcontroladores*

Un microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de ejecutar de forma autónoma una serie de instrucciones grabada en su memoria. Un microcontrolador en su parte interior está compuesto por tres elementos básicos: (Torrente, 2013)

- **CPU (Unidad Central de Proceso):** es la parte encargada de ejecutar cada instrucción y de controlar que dicha ejecución se realice correctamente. Normalmente, estas instrucciones hacen uso de datos disponibles previamente (los “datos de entrada”), y generan como resultado otros datos diferentes (los “datos de salida”), que podrán ser utilizados (o no) por la siguiente instrucción. (Torrente, 2013)
- **Memoria:** son en general las encargadas de alojar tanto las instrucciones como los diferentes datos que estas necesitan. De esta manera posibilitan que toda esta información (instrucciones y datos) este siempre disponible para que la CPU pueda acceder y trabajar con ella en cualquier momento. (Torrente, 2013)

- **Periféricos de (entrada/salida):** son las encargadas de comunicar el microcontrolador con el exterior. En las patillas de entrada del microcontrolador podremos conectar sensores para que este pueda recibir datos provenientes de su entorno, y en sus patillas de salida podremos conectar actuadores para que el microcontrolador pueda enviarles órdenes e así interactuar con el medio físico. (Torrente, 2013)

2.2.10.1 Arduino

El Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto, basada en una sencilla placa con entrada- salida y en un entorno de desarrollo IDE que implementa el lenguaje processing/WiringHardware. Arduino se puede usar para desarrollar objetos interactivos automáticos o conectarse a software en el ordenador (Pure Data, Flash, Processing; MaxMSP). (Torrente, 2013)

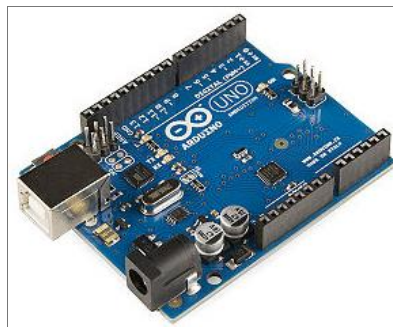


Figura 24-2. Microcontrolador ARDUINO

Fuente: <https://abc-rc.pl/Arduino-Uno-R3>

- **Hardware**

Elementos de la placa

La placa es una placa de circuito impreso donde va instalado el microprocesador, la memoria, las conexiones de entrada y salida y la conexión para el puerto USB.

Puerto USB: a través de él se cargan las instrucciones a ejecutar, el programa que es realizado en el entorno de programación de Arduino. Comunicación Arduino-Ordenador.

Microprocesador: realiza las instrucciones almacenadas en el programa de forma cíclica. Es un circuito integrado que contiene muchas de las mismas cualidades que una computadora. Escribe en los pines DS2-13 y lee en los DE2-13 AE0-5.

Pines de entrada y salida: Permiten conectar elemento que dan información y crean actuaciones.

Botón de reset: permite resetear el programa y permite cargar uno nuevo. (Garrido, 2005)

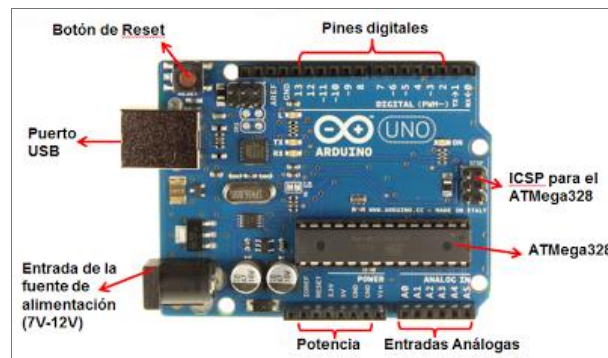


Figura 25-2. Elementos del microcontrolador

Fuente: <http://solorobótica.blogspot.com/2012/07/arduino-plataforma-electronica-abierta.html>

- **Software: el lenguaje y entorno de programación**

Para comunicar con el microcontrolador y cargarle los programas usamos IDE (Integrated Development Environment), sistema de desarrollo de Arduino, sirve para escribir programas, compilarlos y descargar los programas a la placa de Arduino. Un programa es una secuencia de instrucciones que son ejecutadas por una computadora o un microcontrolador, es una secuencia específica para realizar una tarea. Los programas son escritos en diferentes tipos de lenguajes, tales como “C”, Fortran o BASIC. El programa (lenguaje de alto nivel, “humano”) se compila (se transforma en 1 y 0) y se carga en el microprocesador que lo ejecuta de forma cíclica. Para programar el micro se utiliza el IDE de Arduino, en él se escribe un programa que se carga en el microprocesador mediante el puerto USB. (Garrido, 2005)

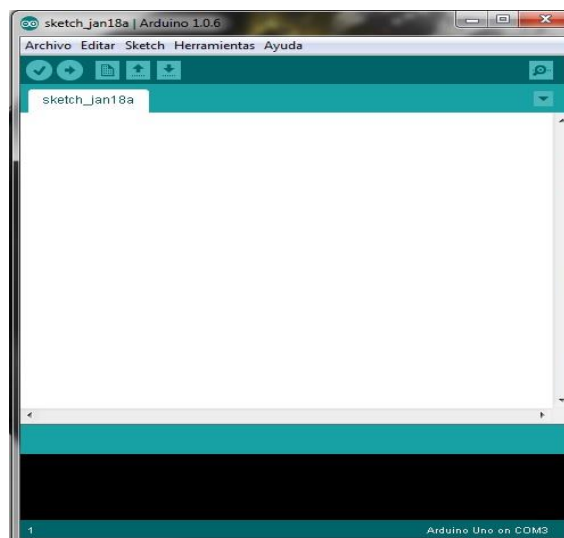


Figura 26-2. El Arduino IDE

Fuente: <https://openwebinars.net/blog/tutorial-arduino-ide-arduino/>

2.2.10.2 Servomotores

El servo es un motor de corriente continua que se encuentra acoplado por un sistema de transmisión o moto reductor que permite disminuir la velocidad y aumentar el torque. El circuito electrónico encargado a controlar la posición del motor. (Téllez & Dominguez, 2015)

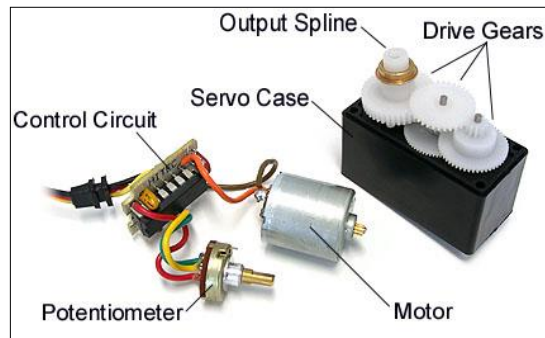


Figura 27-2. Estructura del servomotor

Fuente: <http://www.prometec.net/servos/>

- **Tipos de servomotores**

- Servomotores de CC.
- Servomotores de CA.
- Servomotores de imanes permanentes.

Los servomotores pueden realizar movimientos rotatorias entre 0° a 180° quedándose fijo en cualquiera de estos ángulos. Pero existen servomotores que pueden desplazarse 360° es decir una rotación completa como los motores comunes. (Téllez & Dominguez, 2015)

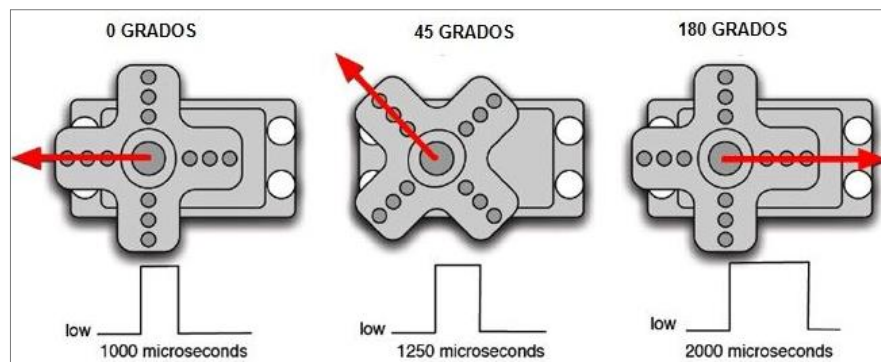


Figura 28-2. Giro del servomotor

Fuente: <http://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>

- **Funcionamiento del servomotor**

Los servomotores por lo general poseen tres cables a diferencia de los motores comunes que tienen dos cables. Estos tres cables tienen siempre los mismos colores que son fáciles de reconocer pero los colores del cable dependen del fabricante. (Téllez & Domínguez, 2015)

Voltaje positivo	Tierra (ground)	Señal de control

Figura 29-2. Colores comunes de los cables del servomotor

Fuente: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>

Para controlar un servomotor se valen de una señal de control PWM (Modulación por Ancho de Pulso), este tipo de señales tiene una onda cuadrada. El posicionamiento del servomotor depende del ancho del pulso y se logra 0°, 90° y 180° con anchos de pulso 0.5, 1.5 y 2.5 (ms) respectivamente. (Téllez & Domínguez, 2015)

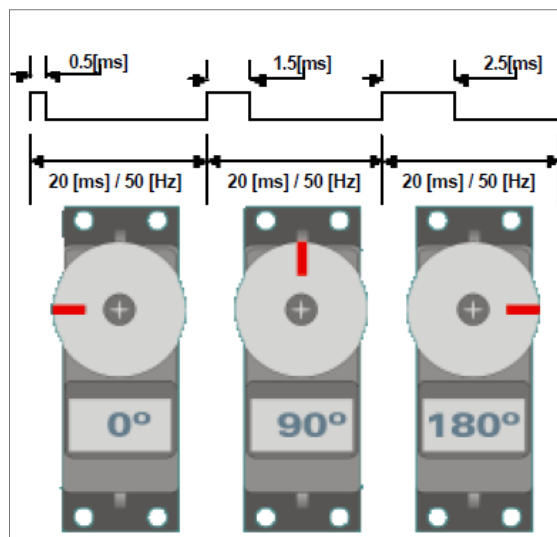


Figura 30-2. Ancho de pulsos del servomotor

Fuente: <http://panamahitek.com/wp-content/uploads/2015/02/giros.png>

2.2.11 Interfaz gráfica de usuario

Interfaz gráfica de usuario (En inglés Graphic User Interface, también conocido como GUI) que permite la elaboración de pantallas de usuario con múltiples combinaciones de imágenes (ventanas, botones, listas, cajas de diálogo) y/o textos facilitando la interacción entre el usuario y la computadora. Para que el usuario interactúe con la interfaz primero tendrá que diseñar la aplicación y programarla. (Rodríguez A. , 2007)

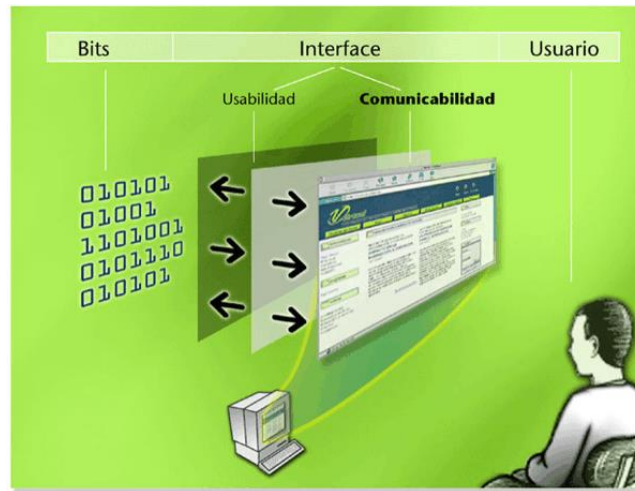


Figura 31-2. Interfaz gráfica de usuario

Fuente: <http://www.nosolousabilidad.com/articulos/comunicabilidad.htm>

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y diseño de investigación

El presente trabajo que se propone es de tipo experimental, se implementará manos robóticas para la generación de movimientos del alfabeto dactilográfico para enseñanza/aprendizaje de personas con discapacidad auditiva. El diseño que se aplica es longitudinal ya que permite observar como se ha desarrollado el sistema de enseñanza/aprendizaje en los últimos años para personas con discapacidad auditiva.

Para llevar a cabo esto se requiere que los dedos de la mano robótica se muevan de manera diferente, para ello se necesita diseñar mecanismos que permita dichos movimientos.

En la siguiente figura se describe la metodología a seguir para el diseño e implementación de manos robóticas.

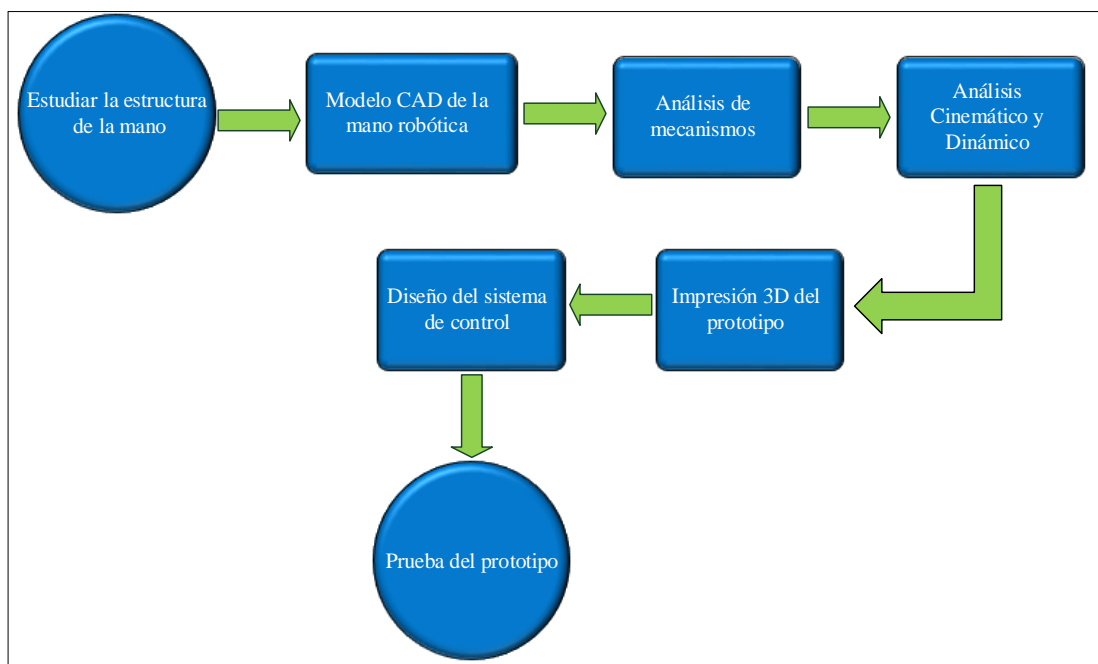


Figura 1-3. Diagrama de metodología de diseño
Realizado por: Amangandi, J. 2018

A continuación, se detalla la metodología propia adoptada para la implementación de las manos robóticas que consta de las siguientes fases.

Fase 1. Estudiar la estructura de la mano humana y sus movimientos para determinar los grados de libertad.

Fase 2. Se realiza el modelo CAD de cada una de las piezas de la mano robótica, posteriormente se realiza modificaciones y ensamblaje total con cada una de las piezas.

Fase 3. En base al modelo CAD previamente obtenido, se realizarán el análisis del mecanismo de la mano robótica.

Fase 4. Se realiza el análisis cinemático y dinámico de cada uno de los dedos de la mano robótica.

Fase 5. Construcción de cada una de las piezas del prototipo utilizando la impresora 3D y posteriormente se realiza el ensamblado de la mano robótica.

Fase 6. Realizar la programación correspondiente que permita obtener los diferentes movimientos que se requiere para realizar el alfabeto dactilológico.

Fase 7. Pruebas del funcionamiento de las manos robóticas.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Pruebas realizadas

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas que se realizaron a las manos robóticas para verificar su funcionamiento con respecto al voltaje, control y de movimientos del alfabeto dactilográfico.

4.2 Prueba de voltaje

La primera prueba que se realizó fue verificar el voltaje que proporciona la fuente que debe ser 5 voltios para el correcto funcionamiento del sistema electrónico de las manos robóticas a plena carga, las mediciones realizadas varían entre 4.7 V y 5 V cuando está realizando los movimientos del alfabeto dactilográfico lo cual es aceptable.



Figura 1-4. Prueba de voltaje
Realizado por: Amangandi, J. 2018

4.3 Prueba de sistema de control

El apartado de control es la parte fundamental del proyecto ya que a través de ella se controla los movimientos de los servomotores. El objetivo de esta prueba es comprobar el funcionamiento del sistema de control que se configuro para cada servo, así como la comunicación de Labview con Arduino, para ello conectamos nuestra placa arduino a la PC esperamos que exista el reconocimiento del puerto COM y finalmente compilamos el programa que previamente se ha elaborado para el control de los servos.

Una vez realizado el procedimiento mencionado se carga y compila el código, la comprobación del algoritmo programado se lo realizo abriendo el icono Monitor Serie y escribiendo el comando en la ventana de envío de datos, en nuestro caso los comandos de reinicio de las manos son (* para la mano izquierda) y (- para la mano derecha) es importante realizar esto antes de ejecutar cualquier movimiento para que todos los servomotores puedan estar en su posición inicial.

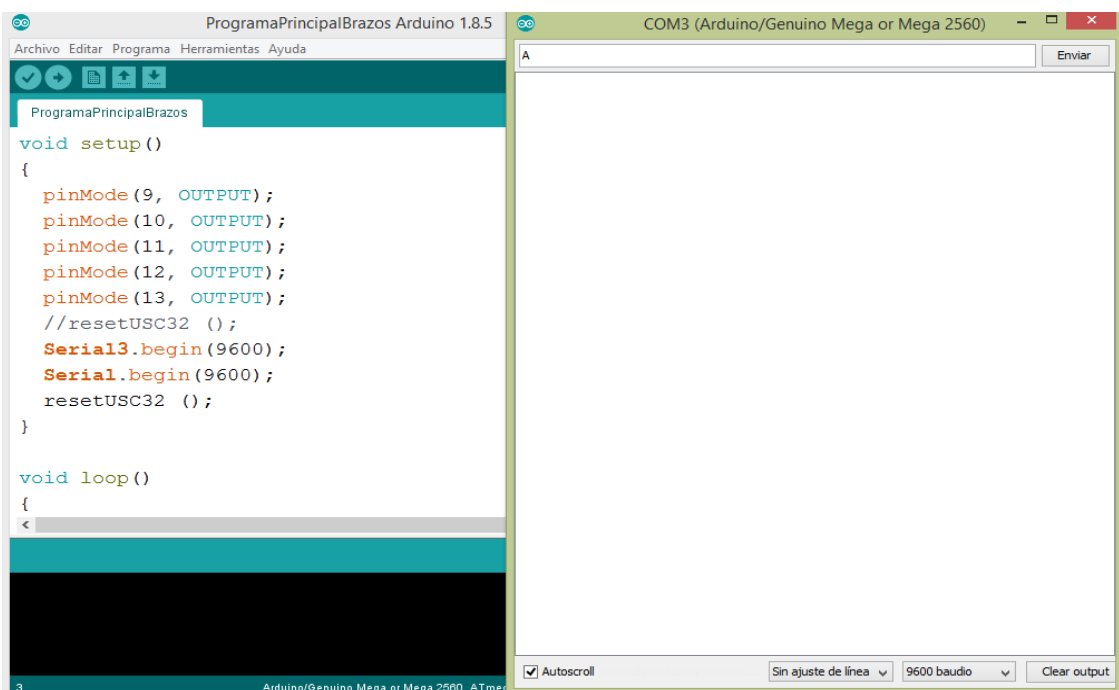


Figura 2-4. Prueba de control desde Arduino

Realizado por: Amangandi, J. 2018

Finalmente se prueba el sistema de control desde Labview iniciando la interfaz gráfica que está diseñada en el software mencionado anteriormente, se envía los datos desde Labview pulsando los botones del alfabeto dactilográfico los cuales se compararan con los algoritmos programados anteriormente en arduino y así comprobar los movimientos que deben realizar las manos para cada una de las letras.



Figura 3-4. Prueba de control desde Labview
Realizado por: Amangandi, J. 2018

Se verifica el funcionamiento del sistema de control el cual responde con éxito a todas las acciones realizadas.

4.4 Prueba de movimientos del alfabeto dactilográfico

En esta prueba se realizó los movimientos de cada una de las letras del alfabeto dactilográfico para evaluar su funcionamiento.

En las siguientes figuras se puede apreciar la ejecución de movimiento de cada uno de las letras del alfabeto dactilográfico por el prototipo y las desarrolladas por el lenguaje de señas ecuatorianas.

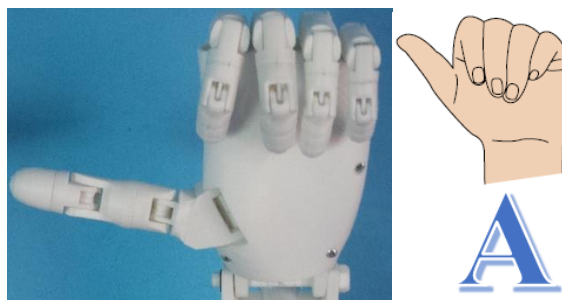


Figura 4-4. Prueba de la letra A
Realizado por: Amangandi, J. 2018

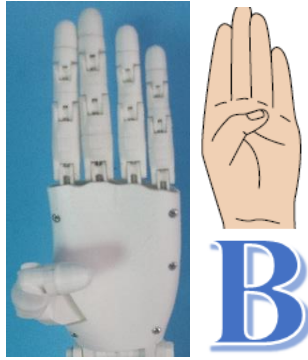


Figura 5-4. Prueba de la letra B
Realizado por: Amangandi, J. 2018

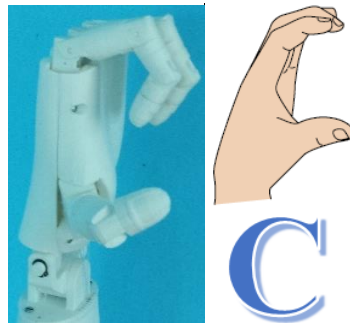


Figura 6-4. Prueba de la letra C
Realizado por: Amangandi, J. 2018

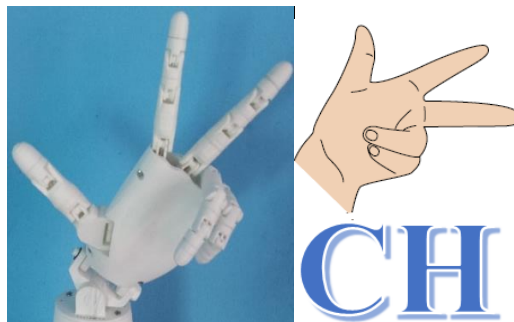


Figura 7-4. Prueba de la letra CH
Realizado por: Amangandi, J. 2018

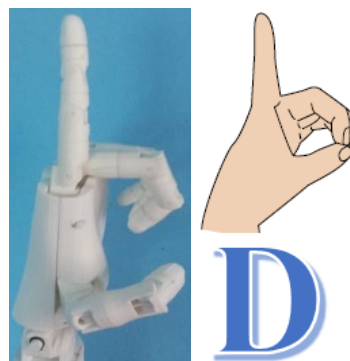


Figura 8-4. Prueba de la letra D
Realizado por: Amangandi, J. 2018

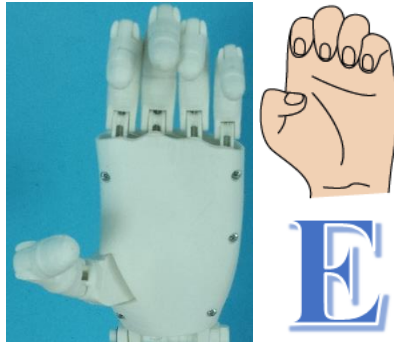


Figura 9-4. Prueba de la letra E
Realizado por: Amangandi, J. 2018

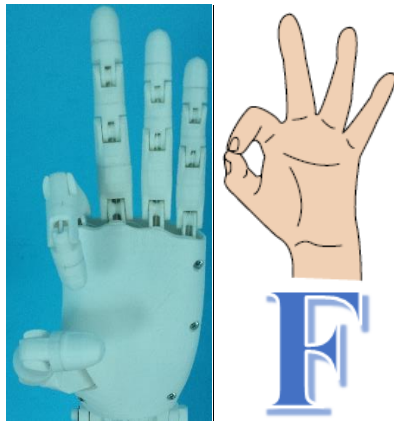


Figura 10-4. Prueba de la letra F
Realizado por: Amangandi, J. 2018

La limitación que tenemos para el movimiento de la letra G es que el servomotor ya completa su ángulo de giro el cual es 180° por está razón no se puede reproducir un giro similar al de la figura.

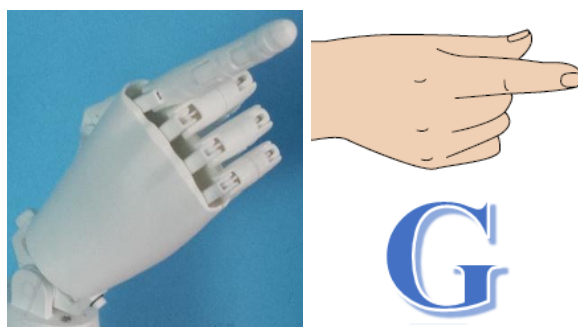


Figura 11-4. Prueba de la letra G
Realizado por: Amangandi, J. 2018

El mismo caso sucede con el movimiento de la letra H se limita su reproducción a que el servomotor ya giro 180° .

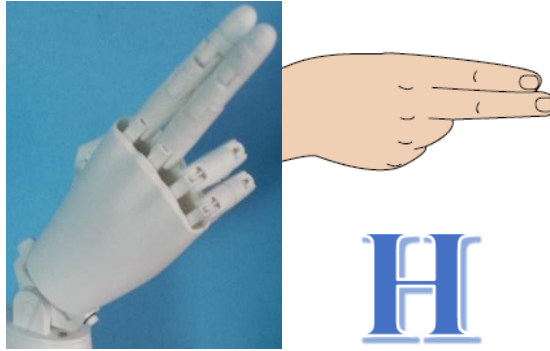


Figura 12-4. Prueba de la letra H
Realizado por: Amangandi, J. 2018

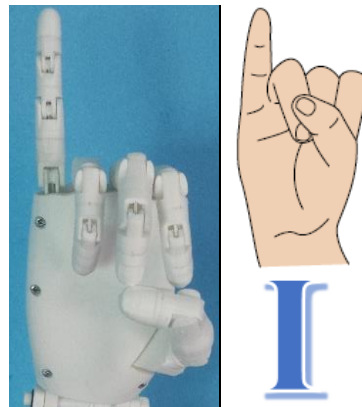


Figura 13-4. Prueba de la letra I
Realizado por: Amangandi, J. 2018

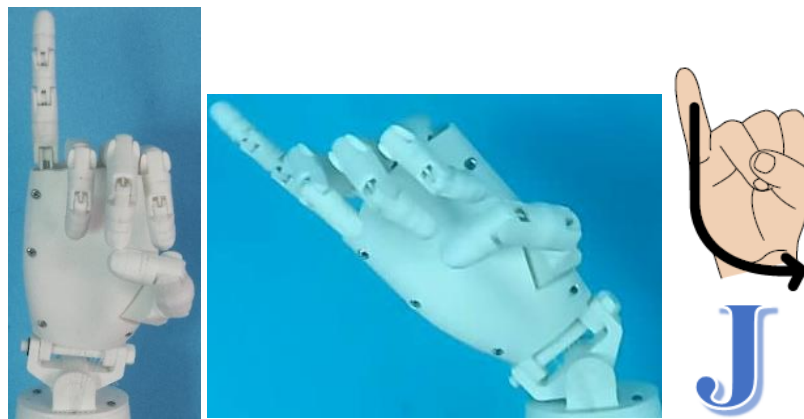


Figura 14-4. Prueba de la letra J
Realizado por: Amangandi, J. 2018

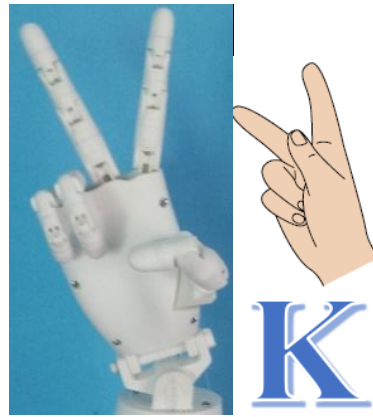


Figura 15-4. Prueba de la letra K
Realizado por: Amangandi, J. 2018

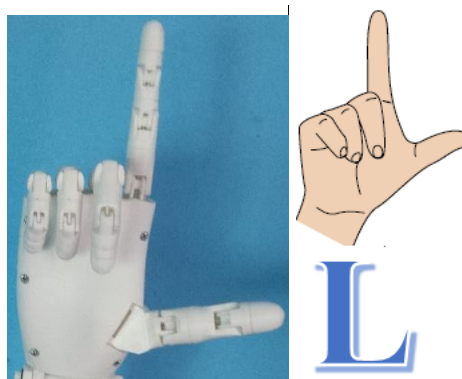


Figura 16-4. Prueba de la letra L
Realizado por: Amangandi, J. 2018

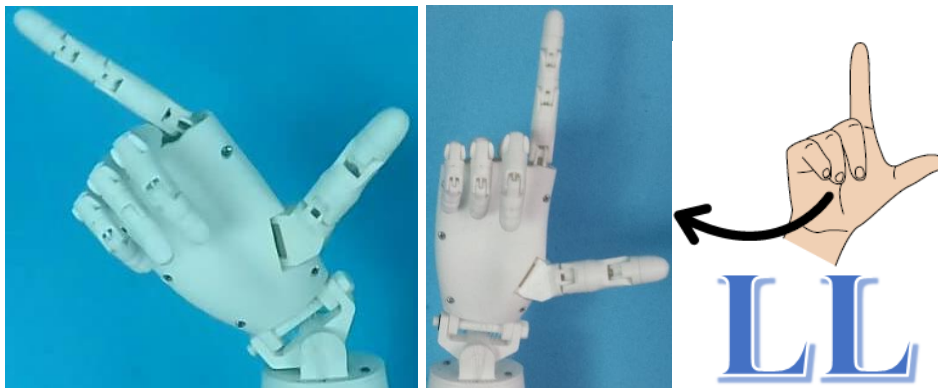


Figura 17-4. Prueba de la letra LL
Realizado por: Amangandi, J. 2018

Para la reproducción de la letra M se ha restringido un grado que es el de inclinación, debido a que dicho movimiento destiempla el nylon impidiendo así replicar el movimiento en su totalidad.

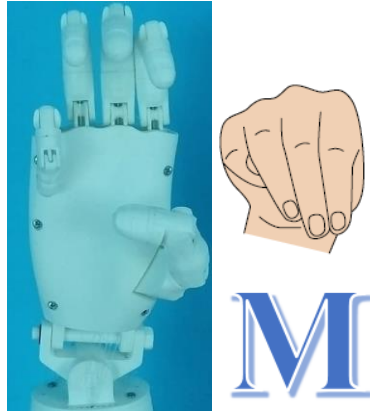


Figura 18-4. Prueba de la letra M
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

Para la reproducción de la letra N se ha restringido un grado que es el de inclinación, debido a que dicho movimiento destiempla el nylon impidiendo así replicar el movimiento en su totalidad.



Figura 19-4. Prueba de la letra N
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

Para la reproducción de la letra Ñ se ha restringido un grado que es el de inclinación, debido a que dicho movimiento destiempla el nylon impidiendo así replicar el movimiento en su totalidad.



Figura 20-4. Prueba de la letra Ñ
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

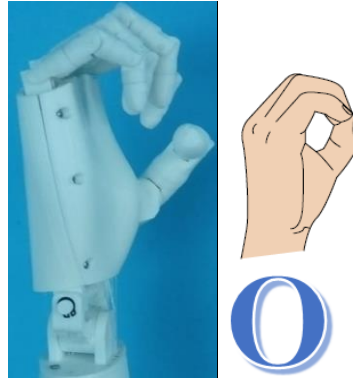


Figura 21-4. Prueba de la letra O
Realizado por: Amangandi, J. 2018

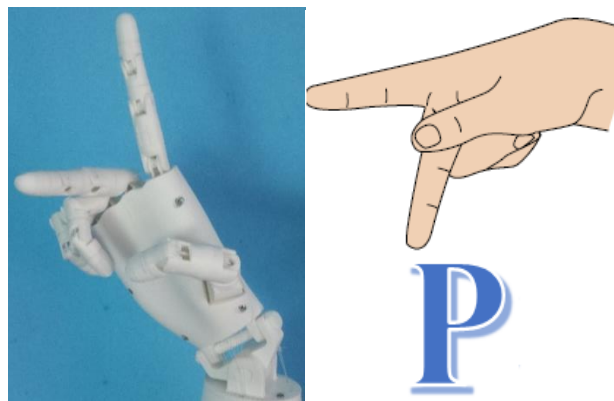


Figura 22-4. Prueba de la letra P
Realizado por: Amangandi, J. 2018

En la reproducción de la letra Q se ha restringido un grado que es el de inclinación, debido a que el movimiento destiempla el nylon impidiendo así replicar el movimiento en su totalidad.

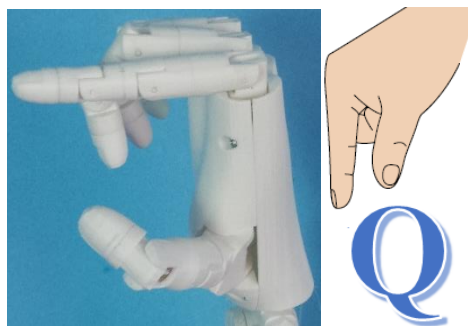


Figura 23-4. Prueba de la letra Q
Realizado por: Amangandi, J. 2018

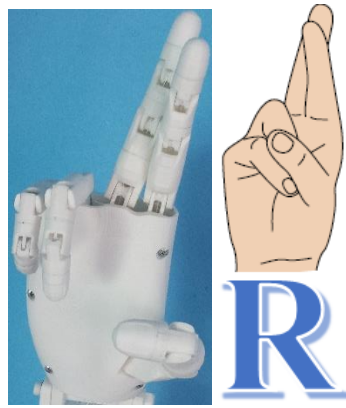


Figura 24-4. Prueba de la letra R
Realizado por: Amangandi, J. 2018



Figura 25-4. Prueba de la letra RR
Realizado por: Amangandi, J. 2018

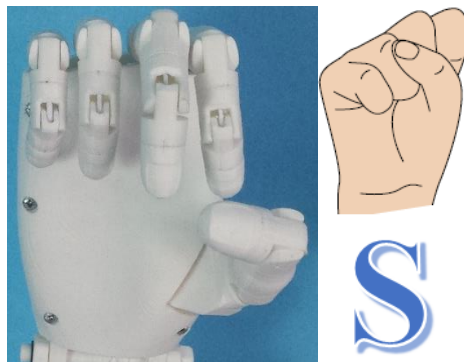


Figura 26-4. Prueba de la letra S
Realizado por: Amangandi, J. 2018

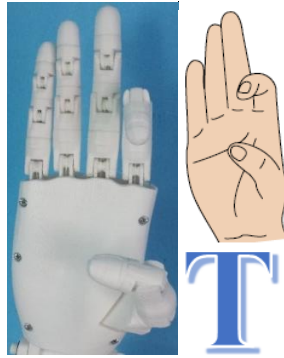


Figura 27-4. Prueba de la letra T
Realizado por: Amangandi, J. 2018

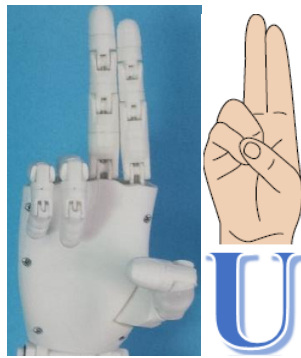


Figura 28-4. Prueba de la letra U
Realizado por: Amangandi, J. 2018

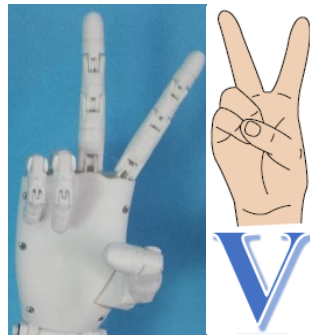


Figura 29-4. Prueba de la letra V
Realizado por: Amangandi, J. 2018

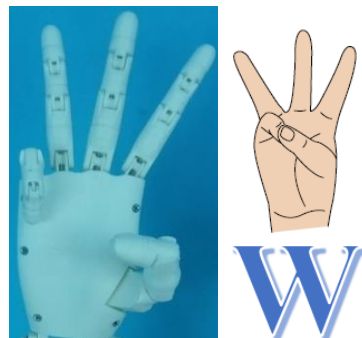


Figura 30-4. Prueba de la letra W
Realizado por: Amangandi, J. 2018

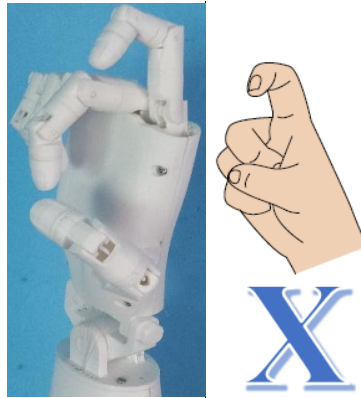


Figura 31-4. Prueba de la letra X
Realizado por: Amangandi, J. 2018

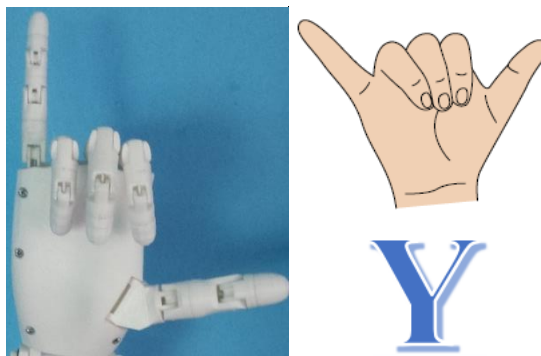


Figura 32-4. Prueba de la letra Y
Realizado por: Amangandi, J. 2018



Figura 33-4. Prueba de la letra Z
Realizado por: Amangandi, J. 2018

Las pruebas de funcionamiento se efectuaron mediante el cálculo de la efectividad que está dado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Efectividad} = \frac{\text{Pruebas Validos}}{\# \text{ Pruebas}} * 100 \quad (9)$$

A continuación se detalla el cálculo de efectividad de cada uno de los movimientos.

Tabla 1-4: Pruebas de movimientos del alfabeto dactilográfico

N°	Movimientos	# Pruebas	Pruebas validos	Pruebas fallidos	[%] efectividad
1	Letra A	5	5	0	100
2	Letra B	5	5	0	100
3	Letra C	5	5	0	100
4	Letra CH	5	4	1	80
5	Letra D	5	4	1	80
6	Letra E	5	5	0	100
7	Letra F	5	5	0	100
8	Letra G	5	4	1	80
9	Letra H	5	4	1	80
10	Letra I	5	5	0	100
11	Letra J	5	4	1	80
12	Letra K	5	5	0	100
13	Letra L	5	5	0	100
14	Letra LL	5	4	1	80
15	Letra M	5	4	1	80
16	Letra N	5	4	1	80
17	Letra Ñ	5	4	1	80
18	Letra O	5	4	1	80
19	Letra P	5	4	1	80
20	Letra Q	5	4	1	80
21	Letra R	5	5	0	100
22	Letra RR	5	4	1	80
23	Letra S	5	4	1	80
24	Letra T	5	5	0	100
25	Letra U	5	5	0	100
26	Letra V	5	5	0	100
27	Letra W	5	5	0	100
28	Letra X	5	5	0	100
29	Letra Y	5	5	0	100
30	Letra Z	5	3	2	60
Total					89

Realizado por: Jorge Amangandi

Los resultados de las pruebas realizadas a las manos robóticas determinan que el porcentaje promedio de efectividad es de 89% la cual demuestra un óptimo funcionamiento en cada uno de los movimientos del alfabeto dactilográfico.

4.5 Evaluación de los métodos de enseñanza/aprendizaje para personas con discapacidad auditiva.

Para evaluar los métodos de enseñanza/aprendizaje para personas con discapacidad auditiva se elabora una tabla de ponderación en la cual se califica en un rango del 1 al 10 a cada método en base a las características.

Tabla 2-4: Evaluación de métodos de enseñanza

CARACTERÍSTICAS	Métodos		
	Oralismo	Gestual	Lecto-Escritura
Integración de lenguaje de señas para la enseñanza.	0	10	2
Facilidad para aprendizaje del lenguaje.	10	9	1
Permite el desarrollo personal y social.	10	10	1
Facilita la comunicación con el entorno.	10	10	2
Facilita el acceso a las fuentes de información y cultura.	10	10	1
Total	40	49	7

Realizado por: Jorge Amangandi

Una vez que se realizó la evaluación de los métodos de enseñanza se obtiene una calificación de 49 puntos al método gestual uno de los sistemas más usado para establecer la comunicación y enseñar a las personas con discapacidad auditiva.

4.6 Evaluación de materiales de enseñanza/aprendizaje para personas con discapacidad auditiva.

La evaluación de los materiales de enseñanza /aprendizaje para personas con discapacidad auditiva se realizó una tabla de ponderación en la cual se califica en un rango del 1 al 10 a cada material considerando sus características.

El objetivo de la evaluación es adquirir una información importante para mejorar los materiales o hacer el uso de recursos tecnológicos.

Tabla 3-4: Evaluación de los materiales didácticos

CARACTERÍSTICA	Materiales				
	Impresos	Gráficos	Audiovisual	Permanente	Tecnológico
El material es de fácil manejo.	5	8	8	6	9
El material es didáctico y atractivo.	7	7	8	7	10
Se puede utilizar con personas de distintas edades.	8	8	8	7	9
Interacción con el usuario.	9	8	7	5	9
El material refuerza el aprendizaje de los usuarios.	7	7	8	6	10
Total	36	38	39	31	47

Realizado por: Jorge Amangandi

4.7 Comprobación de la hipótesis

La hipótesis planteada al inicio del presente proyecto es la siguiente: “Las manos robóticas permitirá la reproducción del alfabeto dactilológico con una elevada precisión.”

La comprobación de la hipótesis se realizó a través del cálculo de efectividad de los movimientos de cada una de las letras, en base a los datos obtenidos en la tabla 1-4 se determina el valor promedio de efectividad, por lo tanto, se comprueba que las manos robóticas permiten la reproducción del alfabeto dactilológico con una precisión del 89%, además indica el buen desempeño del prototipo.

4.8 Análisis económico

El análisis económico describe el valor total de la inversión del proyecto a continuación se detalla los gastos del prototipo.

4.8.1 Costos directos

Los costos directos vienen representados por: materiales, mano de obra y herramientas (impresora 3D), los cuales se detallaran en la siguiente tabla.

Tabla 4-4: Costos directos de materiales

No.	Rubro / Descripción	Cantidad	P.Unitario	P.Global
1	Servomotor HITEC HS-311	14.00	15.00	210.00
2	Servomotor HITEC HS-805BB	2.00	60.00	120.00
3	Servomotor TowerPro-SG90	4.00	5.00	20.00
4	Fuente de poder Mean Well 5V/10A	1.00	25.00	25.00
5	Arduino mega 2560	1.00	25.00	25.00
6	Controlador de servos UCS-32	1.00	60.00	60.00
7	Resortes	20.00	1.00	20.00
8	Tornillos	60.00	0.05	3.00
9	Pegamento UHU	1.00	6.00	6.00
10	Nylon	1.00	2.00	2.00
11	Rodamientos de bolas GR 6201	2.00	3.00	6.00
12	Cable UTP	1.00	3.00	3.00
Subtotal \$				500.00

Realizado por: Jorge Amangandi

Tabla 5-4: Costos directos mano de obra y herramienta

No.	Rubro / Descripción	Cantidad	P.Unitario	P.Global
1	Impresión 3D	-	-	800.00
2	Mano de obra	-	-	200.00
Subtotal \$				1000.00

Realizado por: Jorge Amangandi

4.8.2 Costos indirectos

Los costos indirectos se consideran a los gastos de ingeniería, como son el diseñador de manos robóticas y otros gastos generales que se detallan en la tabla.

Tabla 6-4: Costos indirectos

No.	Rubro / Descripción	Cantidad	P.Unitario	P.Global
1	Diseñador	1.00	600.00	600.00
2	Materiales y Bibliográficos	-	-	300.00
3	Internet	-	-	80.00
4	Edición e impresiones	8	50.00	400.00
5	Fotocopias	-	-	60.00
Subtotal \$				1440.00

Realizado por: Jorge Amangandi

4.8.3 Costo total

Finalmente se realiza la suma de los costos directos e indirectos, cabe mencionar que estos costos ya están incluido el 12% IVA vigente en nuestro país.

Tabla 7-4: Costo total del prototipo

Costo directos	1500.00
Costos indirectos	1440.00
Total	2940.00

Realizado por: Jorge Amangandi

El presupuesto para el proyecto “Diseño e implementación de manos robóticas para la generación de movimientos del alfabeto dactilológico” es de dos mil novecientos cuarenta dólares (\$ 2,940.00 USD).

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1 Situación actual de enseñanza /aprendizaje del alfabeto dactilológico

Para identificar los métodos de enseñanza/aprendizaje del alfabeto dactilográfico utilizados actualmente se realizó mediante una observación indirecta, se ha determinado que al presente cuentan con videos del abecedario, carteles e instructores capacitados de lengua de señas. (Andrade, 2013)

Al constatar que se carece de tecnología en el ámbito educativo para enseñanza del alfabeto dactilográfico para personas con discapacidad auditiva y que los pocos recursos disponibles no son lo suficientemente didácticos y atractivos para ganar la atención de dichas personas sobre todo niños afectados. Se propone el diseño e implementación de manos robóticas para la generación de movimientos del alfabeto dactilológico.

5.2 Diseño Mecánico

Para iniciar con el diseño de la mano robótica se debe considerar varios aspectos como los movimientos que debe desarrollar la mano, articulaciones y medidas antropométricas de la mano humana que se basara en la Norma DIN 33 402-2° parte que especifica las medidas estándar del cuerpo humano que es utilizado para diseño de herramientas, instrumentos y mandos que se encuentra en el Anexo A. Para el prototipo cada mano robótica tiene 20 grados de libertad para lograr las señas del alfabeto dactilológico.

Teniendo como base lo mencionado anteriormente se plantea un modelo CAD (Dibujo asistido por computadora) usando el software SOLIDWORKS considerando los grados de libertad con el fin de lograr un prototipo estético y funcional con un aspecto muy similar a la mano humana. El modelo CAD permite el diseño detallado de mecanismos para poder desarrollar piezas de fácil fabricación.

Posteriormente se inicia la simulación de los mecanismos en conjunto para realizar las modificaciones necesarias y proceder al ensamblaje final con cada una de las piezas y así poder tomar decisiones de los elementos que se deben usar para la transmisión del movimiento y de las articulaciones móviles que componen la estructura.

5.2.1 *Diseño de eslabones*

Los dedos están constituidos por falanges distal, media y proximal a excepción del dedo pulgar que no posee falange media son en total catorce huesos que son los encargados de realizar los movimientos del alfabeto dactilográfico. Teniendo claro lo mencionado se diseñan los eslabones que cumplirán la función de falanges distal, media y proximal a continuación en la siguiente tabla se muestra las longitudes de las falange promedios obtenidos de personas entre las estaturas de 1.63 y 1.90 metros con un percentil del 95%. (DIN, 1981)

Tabla 1-5: Longitud promedio de falanges

Falange	Distal (mm)	Medial (mm)	Proximal (mm)
Pulgar	40	-	36
Índice	23	25	35
Medio	20	30	42
Anular	22	30	34
Meñique	19	23	28

Fuente: Norma DIN 33 402. 2° parte. 1981

5.2.1.1 *Dedo pulgar*

Tomando en cuenta las longitudes de las falanges se inicia a generar las piezas con el fin de obtener el dedo similar al humano. El dedo pulgar está constituido por eslabones distal y proximal como se aprecia en la siguiente figura.

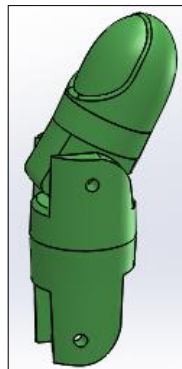


Figura 1-5. Diseño del dedo pulgar
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.2.1.2 *Dedo índice y medio*

El diseño del dedo índice y medio está formado por tres eslabones distal, medial y proximal como se observa en la siguiente figura.

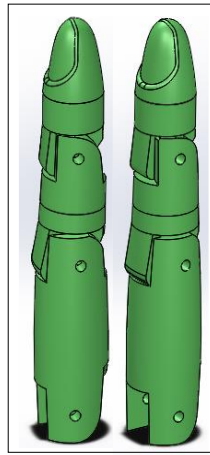


Figura 2-5. Diseño del dedo índice y medio
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.2.1.3 *Dedo anular y meñique*

Los dedos anular y meñique están formado por eslabones mencionados anteriormente la diferencia está en que varía en sus dimensiones.

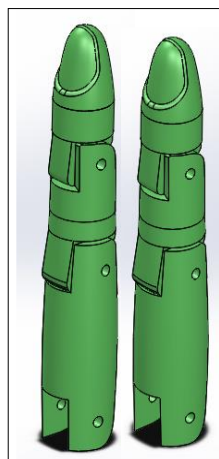


Figura 3-5. Diseño del dedo anular y meñique
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.2.1.4 *Palma de la mano*

Se diseña la palma para la conexión de los dedos en la cual se aloja hilos de nylon para cada uno de los dedos y elástico para mantener la estabilidad del dedo y regresar a la posición inicial que

permitirá el movimiento de los dedos que están dirigidos hacia la palma que describirá el alfabeto dactilológico.

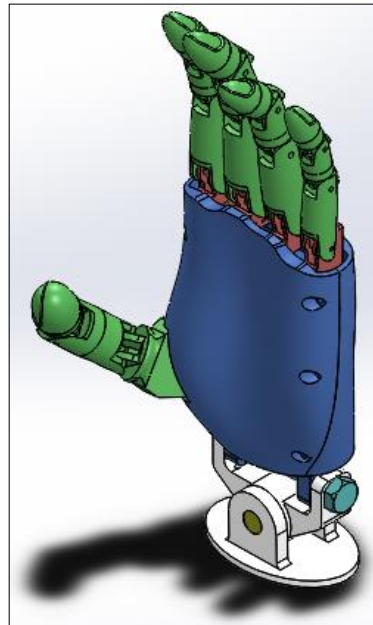


Figura 4-5. Diseño de la palma
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.2.2 *Diseño de articulaciones*

La articulación son las uniones entre los extremo de los eslabones o huesos que facilitan los movimiento mecánicos del cuerpo en diferentes planos y ángulos. (Kapandji, 2006)

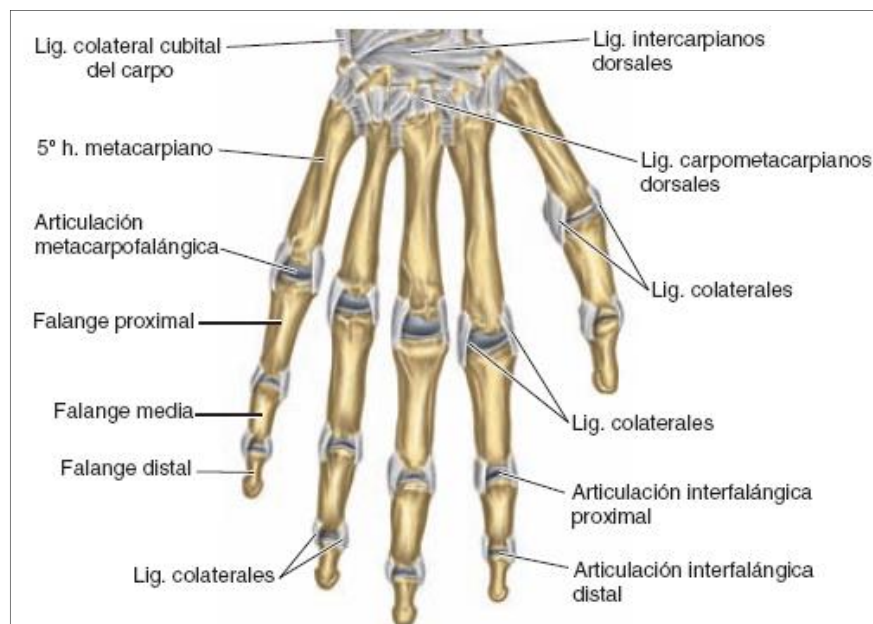


Figura 5-5. Articulación de los dedos
Fuente: Pró, E. 2012.

Para lograr movimientos rotacionales en los mecanismos de los dedos de la mano se requiere de una articulación cilíndrica que sea resistente a la fricción para lo cual se utilizara un polímero que es el PLA.

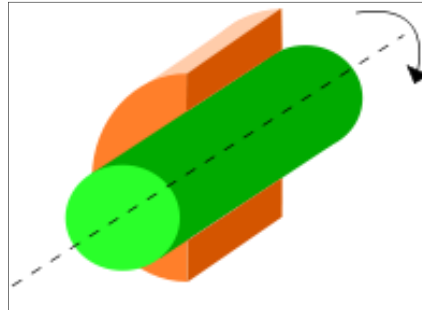


Figura 6-5. Articulación cilíndrica

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Articulaci%C3%B3n_mec%C3%A1nica

5.3 Modelamiento

Previamente antes de iniciar con la construcción de la mano robótica es necesario realizar el análisis del comportamiento del mismo considerando al dedo como una cadena cinemática abierta que está compuesto por articulaciones que permitirá el giro en torno al mismo. Para lo cual se parte del análisis morfológico del dedo índice que posee 4 grados de libertad y para los demás dedos se realizara el mismo análisis como se puede apreciar en la siguiente figura.

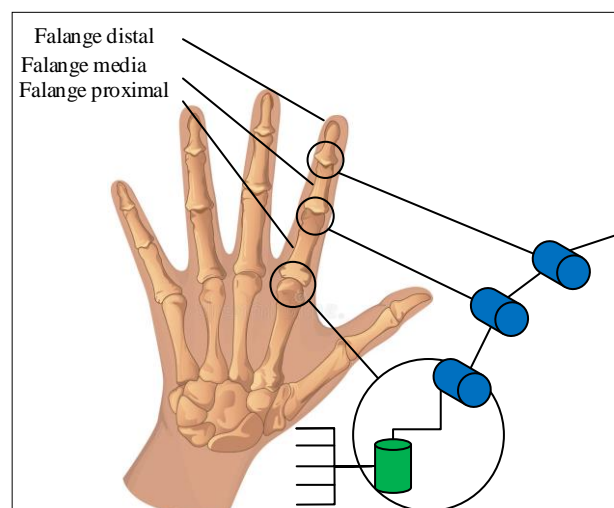


Figura 7-5. Equivalente Biomecánico de la mano humana

Fuente: Rene, C. 2006

5.3.1 Modelo cinemático directo

Una vez establecidas las dimensiones de los eslabones se realiza el análisis cinemático de la mano robótica para lo cual es necesario definir el sistema de coordenadas de cada una de las articulaciones como se establece en la figura.

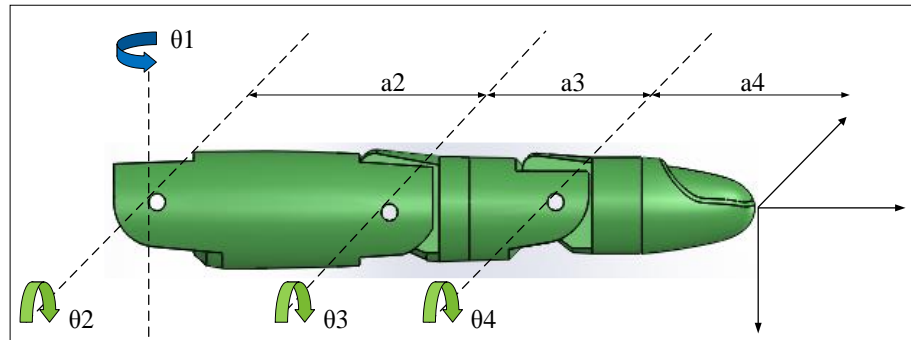


Figura 8-5. Asignación de coordenadas del dedo

Realizado por: Amangandí, J. 2018

Se recurre al algoritmo de Denavit-Hartenberg mencionado en el capítulo anterior para el parámetro de cada una de las articulaciones. Para la base se establece un sistema de referencia en 0 (X_0, Y_0, Z_0) donde el eje Z_0 está situado sobre el eje de rotación, el eje X_0 está situado sobre el eje paralelo del dedo y el eje Y_0 situado de manera que forme un sistema dextrógiro con X_0 y Z_0 y para las demás articulaciones cambiara los ejes de rotación. Las variables articulares del modelo son movimientos rotacionales que están definidas por $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ y θ_4 . Una vez completado con los pasos se determina los parámetros de D-H de cada dedo de la mano cómo se puede apreciar en la figura.

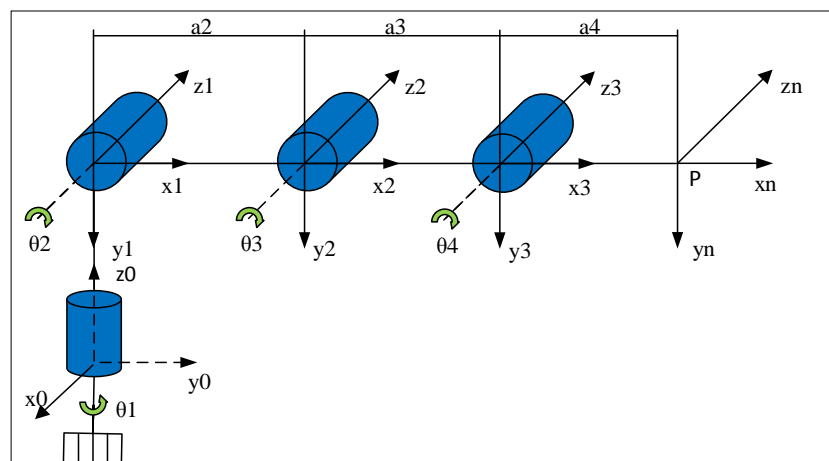


Figura 9-5. Esquema D-H para el dedo índice

Realizado por: Amangandí, J. 2018

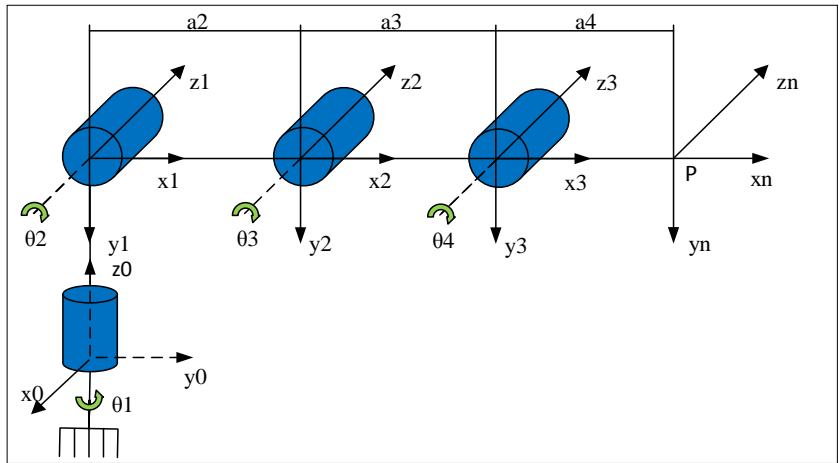


Figura 10-5. Esquema D-H para el dedo medio
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

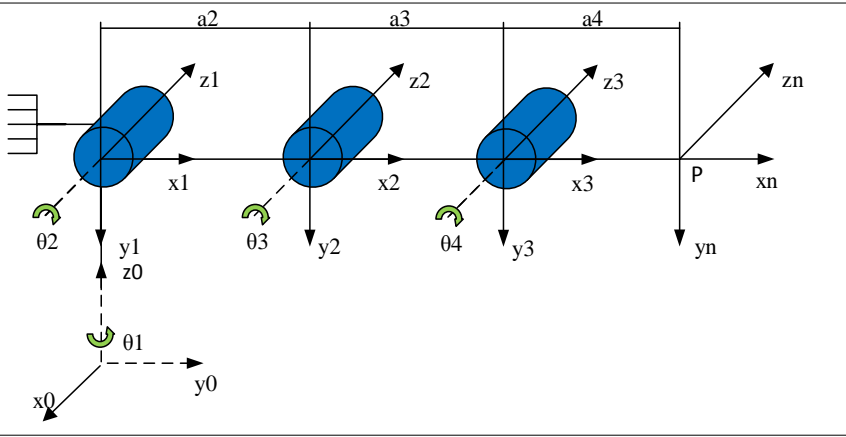


Figura 11-5. Esquema D-H para el dedo anular
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

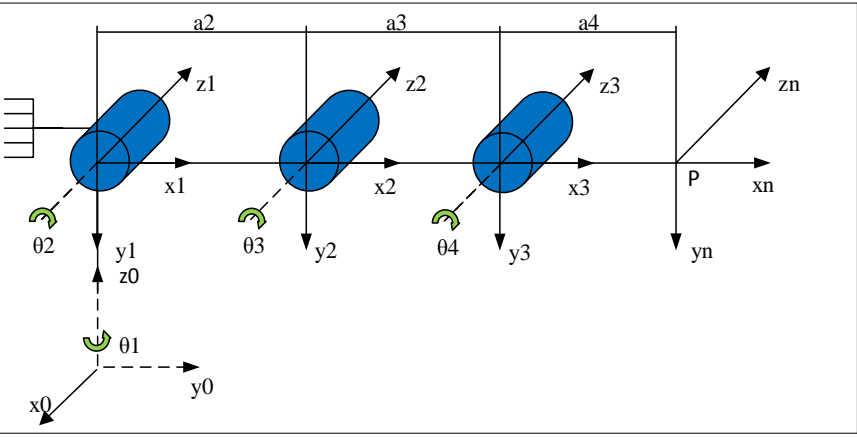


Figura 12-5. Esquema D-H para el dedo meñique
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

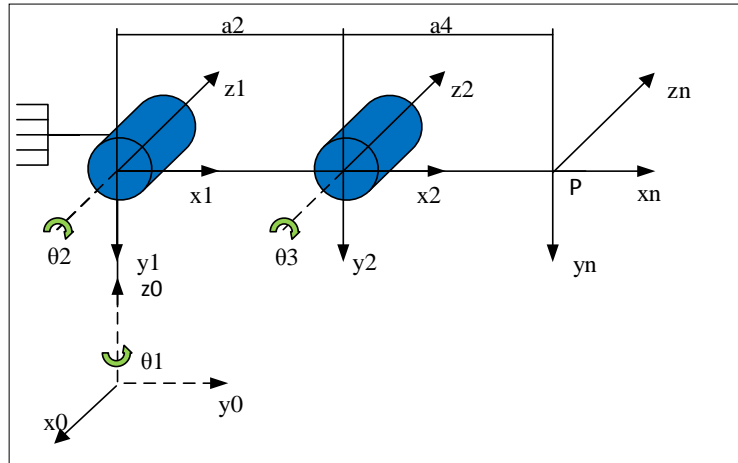


Figura 13-5. Esquema D-H para el dedo pulgar
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

A partir de las figuras presentadas anteriormente se obtiene los cuatro parámetros de D-H (θ , d , a , α) que depende solamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que los unen entre ellos.

Tabla 2-5: Parámetros de D-H para el dedo índice

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	0	0	-90°
2	0	0	a_2	0
3	0	0	a_3	0
4	0	0	a_4	0

Realizado por: Jorge Amangandi

Se realizó el mismo procedimiento para determinar los parámetros de D-H para los demás dedos que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 3-5: Parámetros de D-H para el dedo medio

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	0	0	-90°
2	0	0	a_2	0
3	0	0	a_3	0
4	0	0	a_4	0

Realizado por: Jorge Amangandi

Tabla 4-5: Parámetros de D-H para el dedo anular

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	0	0	-90°
2	0	0	a_2	0
3	0	0	a_3	0
4	0	0	a_4	0

Realizado por: Jorge Amangandi

Tabla 5-5: Parámetros de D-H para el dedo meñique

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	0	0	-90°
2	0	0	a2	0
3	0	0	a3	0
4	0	0	a4	0

Realizado por: Jorge Amangandi

Tabla 6-5: Parámetros de D-H para el dedo pulgar

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	0	0	-90°
2	0	0	a2	0
3	0	0	a4	0

Realizado por: Jorge Amangandi

5.3.1.1 Obtención de la cinemática directa

Con la sustitución de los parámetros D-H en la ecuación (4) obtenidos en la tabla anterior se obtiene las matrices A_i^{i-1} para cada articulación y al multiplicar las diferentes matrices se obtiene la matriz de transformación homogénea.

$$T = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \quad (10)$$

Una vez desarrollada la matriz para cada articulación del dedo índice las ecuaciones quedaran expresadas en función de $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ y θ_4 las cuales son las variables de la articulación, y para facilitar la notación se utilizará $C_i = \cos\theta_i$ y $S_i = \sin\theta_i$ entonces la matriz para cada eslabón serán la siguientes:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & -S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a2 * C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a2 * S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a3 * C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a3 * S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & a_4 * C\theta_4 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & a_4 * S\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Como se mencionó anteriormente se realizó la multiplicación de las matrices (11), (12), (13) y (14) para obtener la matriz de transformación homogénea para el dedo índice.

$$T = \begin{bmatrix} C_4C_1C_{23} - S_4C_1S_{23} & -C_4C_1S_{23} - S_4C_1C_{23} & -S_1 & a_2C_1C_2 + a_4C_1C_4C_{23} - a_4C_1S_4S_{23} + a_3C_1C_{23} \\ C_4S_1C_{23} - S_4S_1S_{23} & -C_4S_1S_{23} - S_4S_1C_{23} & C_1 & a_2S_1C_2 + a_4S_1C_4C_{23} - a_4S_1S_4S_{23} + a_3S_1C_{23} \\ -C_4S_{23} - S_4C_{23} & S_4S_{23} - C_4C_{23} & 0 & -a_2S_2 - a_3S_{23} - a_4C_4S_{23} - a_4S_4C_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

La columna 4 de la matriz T corresponde la posición del extremo final del dedo y se obtiene las siguientes ecuaciones para la cinemática directa.

$$P_x = a_2C_1C_2 + a_4C_1C_4C_{23} - a_4C_1S_4S_{23} + a_3C_1C_{23} \quad (16)$$

$$P_y = a_2S_1C_2 + a_4S_1C_4C_{23} - a_4S_1S_4S_{23} + a_3S_1C_{23} \quad (17)$$

$$P_z = -a_2S_2 - a_3C_1S_{23} - a_4C_4S_{23} - a_4S_4C_{23} \quad (18)$$

Las ecuaciones (16), (17) y (18) se reutilizaron para el dedo índice y medio ya que estos dos asemejan los mismos mecanismos para realizar sus movimientos, mediante las cuales se puede saber la posición del dedo únicamente cambiando las dimensiones de los eslabones.

Sustituyendo las longitudes de las falanges para el dedo índice $a_2=35\text{mm}$, $a_3=25\text{mm}$ y $a_4=23\text{mm}$ y las coordenadas angulares $\theta_1 = \pi/2$ y $\theta_2=\theta_3=\theta_4=0$ se obtiene que el efecto final del dedo está ubicada en las coordenadas $x=0$, $y=83$ y $z=0$.

Las longitudes de las falanges para el dedo medio $a_2=42$, $a_3=30$ y $a_4=20$ y las coordenadas angulares $\theta_1 = \pi/2$ y $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0$ por lo tanto el efecto final del dedo está ubicado en las coordenadas $x=0$, $y=92$ y $z=0$.

Se realizó el mismo procedimiento del apartado anterior para obtener la matriz de transformación homogénea del dedo anular y meñique, ya que los dos cuentan con la misma configuración con respecto a sus movimientos.

$$T = \begin{bmatrix} C_4 C_1 C_{23} - S_4 C_1 S_{23} & -C_4 C_1 S_{23} - S_4 C_1 C_{23} & -S_1 & a_2 C_1 C_2 + a_4 C_1 C_4 C_{23} - a_4 C_1 S_4 S_{23} + a_3 C_1 C_{23} \\ C_4 S_1 C_{23} - S_4 S_1 S_{23} & -C_4 S_1 S_{23} - S_4 S_1 C_{23} & C_1 & a_2 S_1 C_2 + a_4 S_1 C_4 C_{23} - a_4 S_1 S_4 S_{23} + a_3 S_1 C_{23} \\ -C_4 S_{23} - S_4 C_{23} & S_4 S_{23} - C_4 C_{23} & 0 & -a_2 S_2 - a_3 S_{23} - a_4 C_4 S_{23} - a_4 S_4 C_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Las ecuaciones para determinar la posición del dedo son:

$$P_x = a_2 C_1 C_2 + a_4 C_1 C_4 C_{23} - a_4 C_1 S_4 S_{23} + a_3 C_1 C_{23} \quad (20)$$

$$P_y = a_2 S_1 C_2 + a_4 S_1 C_4 C_{23} - a_4 S_1 S_4 S_{23} + a_3 S_1 C_{23} \quad (21)$$

$$P_z = -a_2 S_2 - a_3 C_1 S_{23} - a_4 C_4 S_{23} - a_4 S_4 C_{23} \quad (22)$$

Sustituyendo las respectivas longitudes de falanges para el dedo anular $a_2=34\text{mm}$, $a_3=30\text{mm}$ y $a_4=22\text{mm}$ y las coordenadas angulares $\theta_1 = \pi/2$ y $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0$ se obtiene que el efector final del dedo está ubicado en las coordenadas $x=0$, $y=86$ y $z=0$.

Para el dedo meñique las longitudes de las falanges son: $a_2=28$, $a_3=23$ y $a_4=19$ y las coordenadas angulares $\theta_1 = \pi/2$ y $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0$ el efecto final del dedo está ubicado en las coordenadas $x=0$, $y=70$ y $z=0$.

Para el dedo pulgar se realizó el mismo proceso del apartado anterior para obtener la matriz de transformación homogénea y su respectiva ecuación de posición.

$$T = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \quad (23)$$

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & -S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2 * C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2 * S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_4 * C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_4 * S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$T = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & -S_1 & C_1 (a_2 C_2 + a_4 C_{23}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & C_1 & S_1 (a_2 C_2 + a_4 C_{23}) \\ -S_{23} & -C_{23} & 0 & -a_2 S_2 - a_4 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Las ecuaciones para determinar la posición del dedo son:

$$P_x = C_1 (a_2 C_2 + a_4 C_{23}) \quad (28)$$

$$P_y = S_1 (a_2 C_2 + a_4 C_{23}) \quad (29)$$

$$P_z = -a_2 S_2 - a_4 S_{23} \quad (30)$$

Para el dedo pulgar las longitudes de falange son: $a_2=36$ y $a_4=40$ y las coordenadas angulares $\theta_1 = \pi/2$ y $\theta_2=\theta_3=0$ punta del dedo está ubicado en las coordenadas $x=0$, $y=76$ y $z=0$.

5.3.2 *Modelo cinemático inverso*

El procedimiento se basa en encontrar las coordenadas articulares que debe adoptar el robot una vez conocida la posición y orientación del efecto final.

5.3.2.1 *Método geométrico*

Este método es adecuado para robots de pocos grados de libertad. El procedimiento se basa en encontrar suficiente número de relaciones geométricas en las cuales intervienen las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos. (Barrientos, Aracil, Peñin, & Balaguer, 2007)

El método se utilizó para formar triángulos, rectángulos conocidos y aplicar la ley de los senos y cosenos.

Los datos de partida son las coordenadas (x, y, z) con respecto al eje de referencia en las que se quiere posicionar su extremo. El mecanismo se moverá en el plano XY con respecto al eje Z y también se moverá en el plano YZ con respecto al eje X.

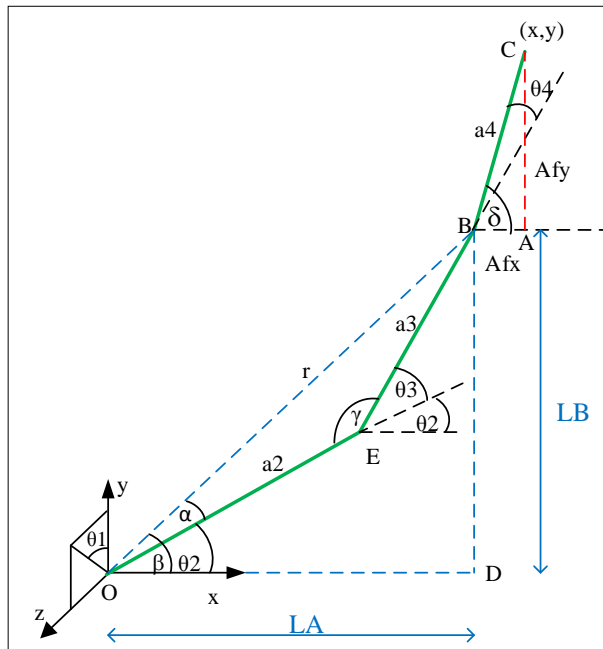


Figura 14-5. Cinemático inverso del dedo índice y medio
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

En el triángulo rectángulo ABC con el ángulo δ se aplica la función trigonométrica se obtiene:

$$\begin{aligned} Afx &= a_4 \cos(\delta) \\ Afy &= a_4 \sin(\delta) \end{aligned} \quad (31)$$

Los segmentos LA y LB están definidos por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} LA &= x - Afx \\ LB &= y - Afy \end{aligned} \quad (32)$$

En el triángulo rectángulo BOD aplicando teorema de pitágoras se obtiene:

$$r = \sqrt{LA^2 + LB^2} \quad (33)$$

Siendo:

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{LB}{LA}\right) \quad (34)$$

$$\alpha = \operatorname{acos}\left(\frac{r^2 + a_2^2 - a_3^2}{2ra_2}\right) \quad (35)$$

$$\gamma = \text{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - r^2}{2a_2a_3}\right) \quad (36)$$

Finalmente se obtiene los ángulos θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 de cada uno de los eslabones para el dedo índice y el dedo medio ya que tiene el mismo mecanismo para realizar sus movimientos.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{atan}\left(\frac{z}{y}\right) \\ \theta_2 &= \beta - \alpha \\ \theta_3 &= 180^\circ - \gamma \\ \theta_4 &= \delta - \theta_2 - \theta_3 \end{aligned} \quad (37)$$

Sustituyendo las ecuaciones (31), (32), (33), (34), (35) y (36) se obtiene:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{atan}\left(\frac{z}{y}\right) \\ \theta_2 &= \text{atan}\left(\frac{y - a_4 \sin(\delta)}{x - a_4 \cos(\delta)}\right) - \text{acos}\left(\frac{(x - a_4 \cos(\delta))^2 + (y - a_4 \sin(\delta))^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2 \sqrt{(x - a_4 \cos(\delta))^2 + (y - a_4 \sin(\delta))^2}}\right) \\ \theta_3 &= 180^\circ - \text{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - ((x - a_4 \cos(\delta))^2 + (y - a_4 \sin(\delta))^2)}{2a_2a_3}\right) \\ \theta_4 &= \delta - \theta_2 - \theta_3 \end{aligned} \quad (38)$$

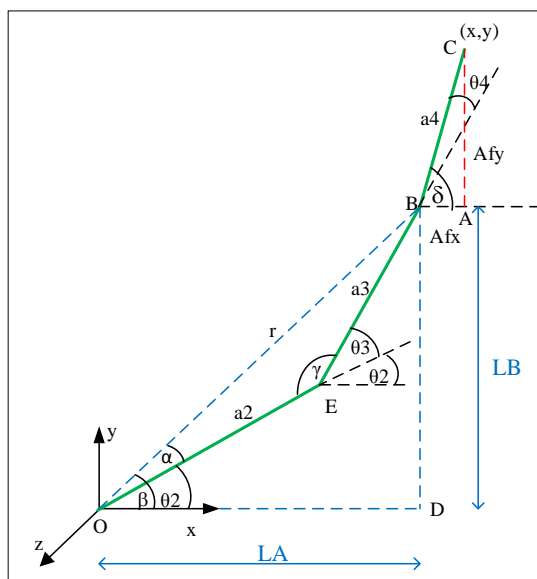


Figura 15-5. Cinemático inverso del dedo anular y meñique
Realizado por: Amangandi, J. 2018

Siguiendo el mismo procedimiento del apartado anterior se obtiene θ_2 , θ_3 y θ_4 para cada uno de los eslabones. Para el dedo anular y meñique que se moverá en el plano XY con respecto al eje Z se tiene.

$$\theta_2 = \operatorname{atan}\left(\frac{y - a_4 \sin(\delta)}{x - a_4 \cos(\delta)}\right) - \operatorname{acos}\left(\frac{(x - a_4 \cos(\delta))^2 + (y - a_4 \sin(\delta))^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2 \sqrt{(x - a_4 \cos(\delta))^2 + (y - a_4 \sin(\delta))^2}}\right) \quad (39)$$

$$\theta_3 = 180^\circ - \operatorname{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - ((x - a_4 \cos(\delta))^2 + (y - a_4 \sin(\delta))^2)}{2a_2 a_3}\right)$$

$$\theta_4 = \delta - \theta_2 - \theta_3$$

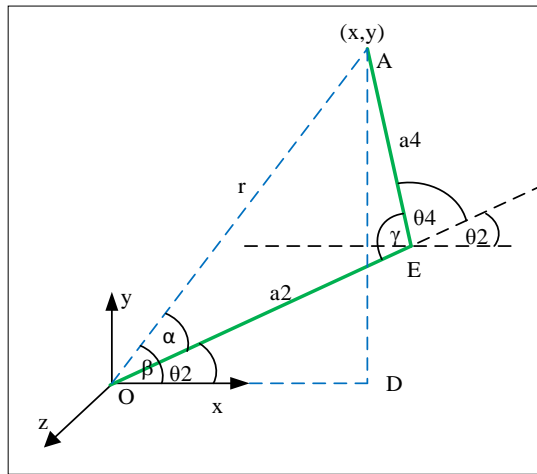


Figura 16-5. Cinemático inverso del dedo pulgar
Realizado por: Amangandi, J. 2018

En el triángulo rectángulo AOD se aplicó el teorema de pitágoras se tiene:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (40)$$

Donde:

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (41)$$

$$\alpha = \operatorname{acos}\left(\frac{r^2 + a_2^2 - a_4^2}{2ra_2}\right) \quad (42)$$

$$\gamma = \operatorname{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_4^2 - r^2}{2a_2 a_4}\right) \quad (43)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores se obtienen θ_2 y θ_4 para el dedo pulgar que se moverá en el plano XY respecto al eje Z:

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \beta - \alpha \\ \theta_2 &= \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) - \operatorname{acos}\left(\frac{x^2 + y^2 + a_2^2 - a_4^2}{2a_2\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \\ \theta_4 &= 180^\circ - \gamma \\ \theta_4 &= 180^\circ - \operatorname{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_4^2 - (x^2 + y^2)}{2a_2a_4}\right)\end{aligned}\quad (44)$$

5.3.3 Modelo dinámico inverso

Para la obtención del modelo dinámico inverso se usó la fórmula lagrangiana, basada en consideraciones energéticas que facilita la formulación de sistemas complejos en este caso los dedos de la mano robótica.

Las ecuaciones resultantes describen el movimiento en términos de variables articulares que se representa con θ alrededor de eje z el momento de inercia se denota por I y el centro de gravedad como a_c y la masa del eslabón como m.

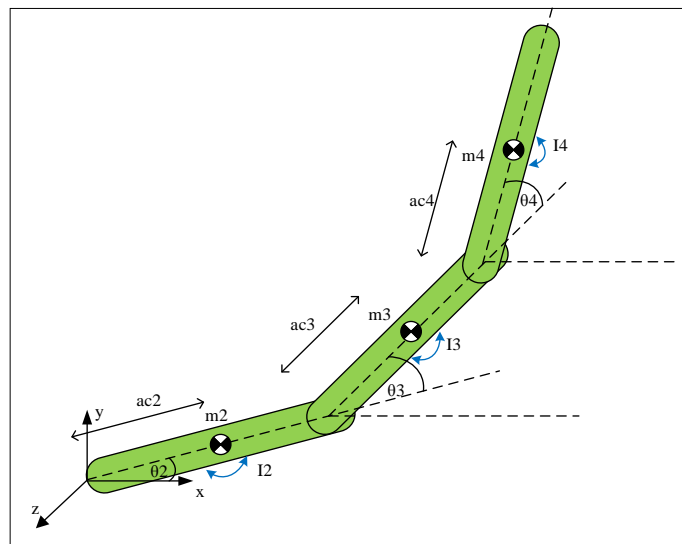


Figura 17-5. Eslabón con masa concentrada dedo índice y medio
Realizado por: Amangandi, J. 2018

- **Energía cinética**

Se define la posición (x, y) del centro de gravedad de los eslabones a través de trigonometría para la falange proximal de los dedos índice y medio se tiene.

$$x_2 = a_{c2} \cos(\theta_2) \quad (45)$$

$$y_2 = a_{c2} \sin(\theta_2) \quad (46)$$

La posición para la falange medial:

$$x_3 = a_2 \cos(\theta_2) + a_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (47)$$

$$y_3 = a_2 \sin(\theta_2) + a_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (48)$$

La posición para la falange distal:

$$x_4 = a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_{c4} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (49)$$

$$y_4 = a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_{c4} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (50)$$

Derivando la posición respecto al tiempo para la falange proximal se obtiene:

$$\dot{x}_2 = -a_{c2} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) \quad (51)$$

$$\dot{y}_2 = a_{c2} \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \quad (52)$$

Derivando la posición con respecto al tiempo para la falange medial las funciones seno y coseno se representan por S_2 y S_3 y la suma de ángulos seno $(\theta_2 + \theta_3)$ por S_{23} y se obtiene:

$$\dot{x}_3 = -a_2 \dot{\theta}_2 S_2 - a_{c3} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_{23} \quad (53)$$

$$\dot{y}_3 = a_2 \dot{\theta}_2 C_2 + a_{c3} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C_{23} \quad (54)$$

Derivada de la posición con respecto al tiempo para la falange distal:

$$\dot{x}_4 = -a_2\dot{\theta}_2S_2 - a_3(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)S_{23} - a_{c4}(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)S_{234} \quad (55)$$

$$\dot{y}_4 = a_2\dot{\theta}_2C_2 + a_3(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)C_{23} + a_{c4}(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)C_{234} \quad (56)$$

La energía cinética para los eslabones se reemplazó en la ecuación (7) la velocidad angular $\omega_2 = \dot{\theta}_2$ es:

$$E_{c2} = \frac{1}{2}m_2 \left[a_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 (\sin^2(\theta_2) + \cos^2(\theta_2)) \right] + \frac{1}{2}I_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (57)$$

$$E_{c2} = \frac{1}{2}m_2 a_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}I_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (58)$$

Se usó identidades trigonométricas como: la suma de cuadrados, suma de ángulos y mediante la agrupación de términos semejantes la energía cinética para la falange medio quede definida por:

$$E_{c3} = \frac{1}{2}m_3 \left[a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_{c3}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + 2a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C_3 \right] + \frac{1}{2}I_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \quad (59)$$

Donde la velocidad angular depende de los dos ángulos $\omega_3 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3$.

Se realizó el mismo proceso del apartado anterior la energía cinética para la falange distal es:

$$E_{c4} = \frac{1}{2}m_4 \left[a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 + 2a_2 a_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C_3 + 2a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) C_{34} + 2a_3 a_{c4} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) C_4 \right] + \frac{1}{2}I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 \quad (60)$$

Donde la velocidad angular depende de los tres ángulos $\omega_4 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4$.

- **Energía potencial**

La energía potencial está definida en función de las alturas del centro de masas de cada uno de los eslabones, reemplazando en la ecuación (8) para la falange proximal se tiene:

$$E_{p2} = m_2 g a_{c2} S_2 \quad (61)$$

La energía potencial para la falange medial depende de las alturas a_2 y a_{c3} se tiene:

$$E_{p3} = m_3 g (a_2 S_2 + a_{c3} S_{23}) \quad (62)$$

La energía potencial para la falange distal depende de las alturas a_2 , a_3 y a_{c4} de las cuales se tiene:

$$E_{p4} = m_4 g (a_2 S_2 + a_3 S_{23} + a_{c4} S_{234}) \quad (63)$$

5.3.3.1 Obtención de la ecuación dinámica

- Primera ecuación dinámica para T_1 .

Reemplazado las energías cinética y potencial en la ecuación (6) se obtiene la función lagrangiano y se define como:

$$L = E_{c2} + E_{c3} + E_{c4} - E_{p2} - E_{p3} - E_{p4} \quad (64)$$

$$L = \frac{1}{2} m_2 a_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 [a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_{c3}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + 2a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C_3] + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{2} m_4 [a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 + 2a_2 a_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C_3 + 2a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) C_{34} + 2a_3 a_{c4} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) C_4] + \frac{1}{2} I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 - m_2 g a_{c2} S_2 - m_3 g (a_2 S_2 + a_{c3} S_{23}) - m_4 g (a_2 S_2 + a_3 S_{23} + a_{c4} S_{234}) \quad (65)$$

Se derivó L con respecto a la posición articular de cada eslabón para el caso de falange proximal la variable articular es θ_2 primero se deriva respecto a $\dot{\theta}_2$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = & m_2 a_{c2}^2 \dot{\theta}_2 + I_2 \dot{\theta}_2 + m_3 [a_2^2 \dot{\theta}_2 + a_{c3}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)] \\ & + I_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + m_4 [a_2^2 \dot{\theta}_2 + a_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \\ & + a_2 a_3 C_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_2 a_{c4} C_{34} (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] \\ & + I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \end{aligned} \quad (66)$$

El resultado anterior se deriva con respecto al tiempo se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = & m_2 a_{c2}^2 \ddot{\theta}_2 + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_3 [a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_{c3}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - \\ & a_2 a_{c3} \dot{\theta}_3 S_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)] + I_3 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + m_4 [a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_3^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \\ & \ddot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - a_2 a_3 \dot{\theta}_3 S_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_2 a_{c4} C_{34} (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \\ & \ddot{\theta}_4) - a_2 a_{c4} S_{34} (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\ddot{\theta}_2 + 2\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - \\ & a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) \end{aligned} \quad (67)$$

Derivada parcial respecto a $\frac{\partial L}{\partial \theta_2}$ se tiene:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2 g a_{c2} C_2 - m_3 g (a_2 C_2 + a_{c3} C_{23}) - m_4 g (a_2 C_2 + a_3 C_{23} + a_{c4} C_{234}) \quad (68)$$

Reemplazando en la ecuación (6) se obtiene T_1 el torque producido para la primera ecuación de Euler-Lagrange:

$$T_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} T_1 = & m_2 a_{c2}^2 \ddot{\theta}_2 + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_3 [a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_{c3}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - \\ & a_2 a_{c3} \dot{\theta}_3 S_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)] + I_3 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + m_4 [a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_3^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \\ & \ddot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - a_2 a_3 \dot{\theta}_3 S_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_2 a_{c4} C_{34} (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \\ & \ddot{\theta}_4) - a_2 a_{c4} S_{34} (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\ddot{\theta}_2 + 2\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - \\ & a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + m_2 g a_{c2} C_2 + m_3 g (a_2 C_2 + \\ & a_{c3} C_{23}) + m_4 g (a_2 C_2 + a_3 C_{23} + a_{c4} C_{234}) \end{aligned} \quad (70)$$

- Segunda ecuación dinámica para T_2 .

Derivando la ecuación del lagrangiano con respecto $\dot{\theta}_3$ se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = & m_3 [a_{c3}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (\dot{\theta}_2)] + I_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + m_4 [a_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \\ & a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (\dot{\theta}_3) + a_2 a_{c4} C_{34} (\dot{\theta}_2) + a_3 a_{c4} C_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \\ & \dot{\theta}_4)] + I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \end{aligned} \quad (71)$$

La ecuación anterior se deriva respecto al tiempo:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) = & m_3 [a_{c3}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 S_3 (\dot{\theta}_3)] + I_3 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + \\ & m_4 [a_3^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_3 \dot{\theta}_2 S_3 (\dot{\theta}_3) + \\ & a_2 a_{c4} C_{34} (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} S_{34} (\dot{\theta}_2) (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\ddot{\theta}_2 + 2\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - \\ & a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) \end{aligned} \quad (72)$$

Derivada parcial respecto a $\frac{\partial L}{\partial \theta_3}$ se tiene:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_3} = -m_3 a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_3 - m_4 a_2 a_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_3 - m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) S_{34} - m_3 g a_{c3} C_{23} - m_4 g (a_3 C_{23} + a_{c4} C_{234}) \quad (73)$$

Se obtiene T_2 el torque producido para la segunda ecuación de Euler-Lagrange:

$$T_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} T_2 = & m_3 [a_{c3}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 S_3 (\dot{\theta}_3)] + I_3 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + \\ & m_4 [a_3^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_3 \dot{\theta}_2 S_3 (\dot{\theta}_3) + \\ & a_2 a_{c4} C_{34} (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} S_{34} (\dot{\theta}_2) (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\ddot{\theta}_2 + 2\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - \\ & a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + m_3 a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_3 + \\ & m_4 a_2 a_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_3 + m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) S_{34} + m_3 g a_{c3} C_{23} + \\ & m_4 g (a_3 C_{23} + a_{c4} C_{234}) \end{aligned} \quad (75)$$

- Tercera ecuación dinámica para T_3 .

Derivando la ecuación del lagrangiano con respecto $\dot{\theta}_4$ se obtiene:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_4} = m_4 [a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_2 a_{c4} C_{34} (\dot{\theta}_2) + a_3 a_{c4} C_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)] + I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \quad (76)$$

La ecuación anterior se deriva respecto al tiempo:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_4} \right) = m_4 [a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_{c4} C_{34} (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 S_{34} (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) \quad (77)$$

Derivada parcial respecto a $\frac{\partial L}{\partial \theta_4}$ se tiene:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_4} = -m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) - m_4 a_3 a_{c4} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) S_4 - m_4 g C_{234} \quad (78)$$

Se obtiene T_3 el torque producido para la tercera ecuación de Euler-Lagrange:

$$T_3 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_4} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_4} \quad (79)$$

$$T_3 = m_4 [a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_{c4} C_{34} (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 S_{34} (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + m_4 a_3 a_{c4} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) S_4 + m_4 g C_{234} \quad (80)$$

Se realizó el mismo proceso del apartado anterior obteniendo el torque para el dedo anular y meñique como se aprecia en la siguiente figura.

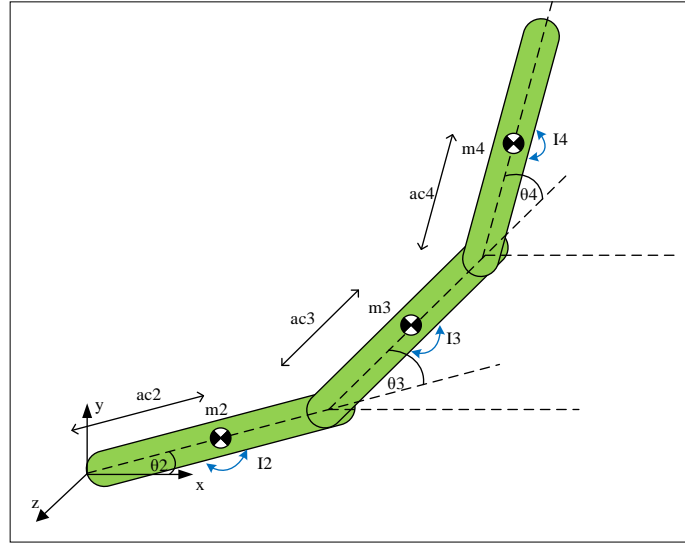


Figura 18-5. Eslabón con masa concentrada dedo anular y meñique
Realizado por: Amangandi, J. 2018

$$T_1 = m_2 a_{c2}^2 \ddot{\theta}_2 + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_3 [a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_{c3}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - a_2 a_{c3} \dot{\theta}_3 S_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)] + I_3 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + m_4 [a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_3^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - a_2 a_3 \dot{\theta}_3 S_3 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + a_2 a_{c4} C_{34} (2\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - a_2 a_{c4} S_{34} (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\ddot{\theta}_2 + 2\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + m_2 g a_{c2} C_2 + m_3 g (a_2 C_2 + a_{c3} C_{23}) + m_4 g (a_2 C_2 + a_3 C_{23} + a_{c4} C_{234}) \quad (81)$$

$$T_2 = m_3 [a_{c3}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_2 a_{c3} C_3 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 S_3 (\dot{\theta}_3)] + I_3 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + m_4 [a_3^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_3 C_3 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_3 \dot{\theta}_2 S_3 (\dot{\theta}_3) + a_2 a_{c4} C_{34} (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} S_{34} (\dot{\theta}_2) (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (2\ddot{\theta}_2 + 2\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + m_3 a_2 a_{c3} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_3 + m_4 a_2 a_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) S_3 + m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) S_{34} + m_3 g a_{c3} C_{23} + m_4 g (a_3 C_{23} + a_{c4} C_{234}) \quad (82)$$

$$T_3 = m_4 [a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_{c4} C_{34} (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 S_{34} (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + a_3 a_{c4} C_4 (\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) - a_3 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4) + m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) + m_4 a_3 a_{c4} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) S_4 + m_4 g C_{234} \quad (83)$$

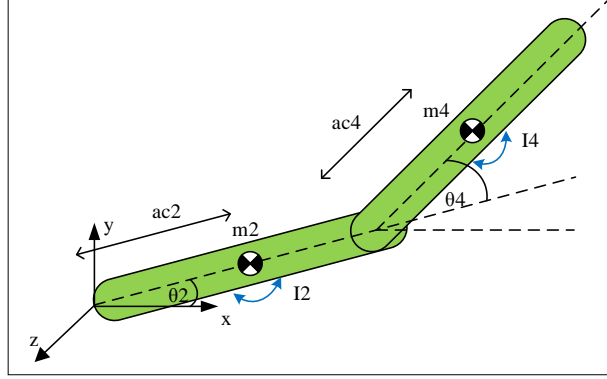


Figura 19-5. Eslabón con masa concentrada dedo pulgar
Realizado por: Amangandi, J. 2018

- **Energía cinética**

Para obtener la energía cinética del dedo pulgar se realizó el mismo procedimiento de los dedos anteriores, por la cual la velocidad angular queda definida por $\omega_2 = \dot{\theta}_2$ es:

$$E_{c2} = \frac{1}{2} m_2 [a_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 (\sin^2(\theta_2) + \cos^2(\theta_2))] + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (84)$$

$$E_{c2} = \frac{1}{2} m_2 a_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (85)$$

$$E_{c4} = \frac{1}{2} m_4 [a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2 + 2a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) C_4] + \frac{1}{2} I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2 \quad (86)$$

Donde la velocidad angular depende de los dos ángulos $\omega_4 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4$.

- **Energía potencial**

La energía potencial está en función de las alturas del centro de masas de cada uno de los eslabones reemplazándolos se tiene:

$$E_{p2} = m_2 g a_{c2} S_2 \quad (87)$$

La energía potencial para la falange distal depende de las alturas a_2 y a_{c4} se tiene:

$$E_{p4} = m_4 g (a_2 S_2 + a_{c4} S_{24}) \quad (88)$$

5.3.3.2 Ecuación dinámica para el dedo pulgar

- Primera ecuación dinámica para T_1 .

Reemplazando la energía cinética y potencial en la ecuación (6) se obtiene la función del lagrangiano el cual queda definido como:

$$L = E_{c2} + E_{c4} - E_{p2} - E_{p4} \quad (89)$$

$$L = \frac{1}{2} m_2 a_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_4 \left[a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_{c4}^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2 + 2 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) C_4 \right] + \frac{1}{2} I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2 - m_2 g a_{c2} S_2 - m_4 g (a_2 S_2 + a_{c4} S_{24}) \quad (90)$$

Realizando la derivada parcial de la ecuación (90) con respecto a coordenada articular se obtiene T_1 :

$$T_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \quad (91)$$

$$T_1 = m_2 a_{c2}^2 \ddot{\theta}_2 + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_4 \left[a_2^2 \ddot{\theta}_2 + a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_{c4} C_4 (2 \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) - a_2 a_{c4} \dot{\theta}_4 S_4 (2 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \right] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) + m_2 g a_{c2} C_2 + m_4 g (a_2 C_2 + a_{c4} C_{24}) \quad (92)$$

- Segunda ecuación dinámica para T_2 .

Se obtiene T_2 el torque producido para la segunda ecuación de Euler-Lagrange:

$$T_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_4} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_4} \quad (93)$$

$$T_2 = m_4 \left[a_{c4}^2 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) + a_2 a_{c4} C_4 (\ddot{\theta}_2) - a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 S_4 (\dot{\theta}_4) \right] + I_4 (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) + m_4 a_2 a_{c4} \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) S_4 + m_4 g a_{c4} C_{24} \quad (94)$$

5.4 Selección de los componentes

5.4.1 Selección del material

La selección de los materiales es uno de los puntos más importantes para el desarrollo de los elementos de la mano robótica, se realizó una revisión de todos los materiales existentes en el mercado verificando todas sus propiedades, dicho material tiene que ser resistente, liviano, amigable con el medio ambiente y fácil de manufacturar.

Existen dos tipos materiales comunes que se utilizan para la impresión 3D los cuales son: el ABS y PLA encontrándose estos con mayor facilidad en el mercado.

- **ABS:** Pertenece a la familia de los termoplásticos. El polímero está compuesto por tres grandes componentes acrilonitrilo, butadieno y estireno cada uno proporciona características distintas. El acrilonitrilo contribuye a la resistencia térmica, química y a la dureza: butadieno proporciona resistencia al impacto, y el estireno proporciona brillo superficial, rigidez y facilidad de procesado. La combinación de las propiedades hace que el material ABS tenga importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado. (Smith, 1998)



Figura 20-5. Filamento ABS

Fuente: <https://www.kaidee.com/product-133344406>

- **PLA:** Está hecho de poliácido láctico es un plástico biodegradable no contaminante que se deriva del almidón son fáciles de utilizar para imprimir por que funciona a temperaturas más bajas que el ABS resulta bastante frágil y también los objetos impresos tiene una superficie lisa. (Smith, 1998)



Figura 21-5. Filamento PLA

Fuente: <https://craftunique.com/category/filaments-pla>

Tabla 7-5: Propiedades mecánicas de los materiales ABS y PLA

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión x 1000 psi	Máxima Temperatura de uso °C
ABS	1.05-1.07	5.9	210-260
PLA	1.24	5.5	190-200

Fuente: Smith, W. 1998

Se puede observar en la tabla que existe una pequeña variación en las propiedades mecánicas de los materiales siendo el ABS el más resistente, pero por otro lado el PLA posee buenas propiedades de moldeo para la impresión ya que los acabados con este material son más finos y estéticos. Después de realizar el análisis de sus propiedades se concluye que el material apropiado para la impresión 3D de las manos robóticas es el PLA por su facilidad de impresión a baja temperatura y de alta calidad en acabados.

5.4.2 Dimensionamiento de la fuente de alimentación

Para el dimensionamiento de la fuente de alimentación se tomó en cuenta el valor máximo y mínimo de voltaje de consumo de cada uno de los elementos a utilizarse, a sabiendas de que todos los elementos trabajaran de manera óptima con 5[V] a plena carga, otro aspecto importante al momento de seleccionar dicha fuente es el consumo de corriente de todos los elementos en especial el de los servomotores ya que ellos consumirán gran parte de la corriente suministrada por la fuente, para tener un valor exacto de corriente consumida a plena carga se ha sumado la intensidades de los 20 servomotores dando como resultado un consumo de 7.75 [A]. Que al multiplicarlo por un coeficiente de seguridad de 1.25 (Kosow, 1993) dando como resultado una corriente de 9.68 [A] el cual ayuda a sobredimensionar dicho elemento en el caso de que se requiera de elementos extra que consuman más corriente. Con los datos obtenidos se optó por seleccionar una fuente de la marca Mean Well LRS-50-5 de 5 [V] a 10 [A], los datos técnicos se detallan en el Anexo B.



Figura 22-5. Fuente de alimentación
 Fuente: <http://www.fervicom.com/69-fuentes-mean-well>

5.4.3 Selección del servomotor

Para la selección del servomotor apropiado y lograr el movimiento de los dedos se considera el peso de cada uno de los ellos, también se considerarán las características técnicas del servomotor. A continuación, se realiza el cálculo del torque de cada uno de los dedos.

$$T = F * d = w * d \quad (95)$$

Tabla 8-5: Torque de los dedos de la mano

Falange	Peso (kgf)	Distancia (cm)	Torque (kgf-cm)
Pulgar	0.01521	7.6	0.115596
Índice	0.0148	8.3	0.12284
Medio	0.01812	9.2	0.166704
Anular	0.01177	8.6	0.101222
Meñique	0.00837	7	0.05859

Realizado por: Jorge Amangandi

Se observa en la tabla que el dedo medio tiene un torque mayor por tal motivo es tomado como base para seleccionar el servomotor adecuado para todos los dedos y al multiplicarlo por un coeficiente de seguridad se tendrá mayor confiabilidad en el elemento que se ha seleccionado.

$$T = 0.166704 * C_s \quad (96)$$

Por el movimiento que debe realizar y la distancia de ubicación de los servomotores en la mano robótica, se toma un coeficiente de seguridad de 18, el cual nos da un buen rango de seguridad. (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 2000)

$$T = 0.166704 * 18$$

$$T = 3\text{kgf} - \text{cm} \quad (97)$$

Una vez determinado el torque se procede a buscar en los respectivos DataSheet, un servomotor con características iguales o superiores a los que se han calculado anteriormente siendo este el Hitec HS-311 cuyas características técnicas se encuentra en el Anexo C con un torque de 3.02 kgf-cm que será utilizado para el movimiento de los dedos.

5.4.4 Selección de la tarjeta de control

En la etapa de control se utiliza la tarjeta Aduino Mega 2560, la misma que posee 54 salidas digitales de los cuales 15 son usados como salidas PWM, 16 entradas analógicas y 4 receptores/transmisores serie UART (Transmisor Receptor Asíncrono Universal) disponibles en los pines digitales (Rx) y (Tx) compartido con el USB siendo este tipo de comunicación la que necesitamos para nuestra aplicación. Seleccionándola como la mejor opción para este tipo de proyecto por su rapidez en procesamiento de información y su compatibilidad con la mayor parte de plataformas informáticas, acoplándose con facilidad a las especificaciones requeridas para nuestro proyecto. Sus características técnicas se encuentran el Anexo D.



Figura 23-5. Arduino Mega 2560

Fuente: [arduino.cl/arduino - mega - 2560/](http://arduino.cl/arduino-mega-2560/)

5.4.4.1 Drivers de servos USC 32

Es un controlador de servos que posee 32 canales que permite conectarse a un procesador en este caso a nuestro Arduino Mega 2560, se puede controlar hasta 32 servos al mismo tiempo. Además, cuenta con procesador ARM de 32 bits, la comunicación se realiza a través del protocolo UART (Transmisor Receptor Asíncrono Universal) que permite utilizar usb, wifi o bluetooth.

El USC-32 cuenta con una memoria ROM de 512K que se puede utilizar para almacenar comandos. El modulo facilita la conexión a través de los pines (Rx) y (Tx) a la tarjeta Arduino Mega 2560.

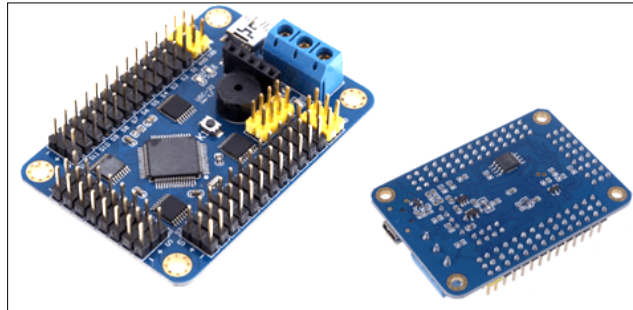


Figura 24-5. Drivers de servos USC 32

Fuente: <https://drobots.wixsite.com/drobots/product-page/driver-servomotor-32ch>

5.5 Impresión 3D del prototipo

Una vez establecido el modelo CAD se procederá a la construcción de las piezas utilizando la impresora 3D, todas las piezas deben estar en formato STL (Stereo Lithography) que es un formato estándar para las tecnologías de fabricación aditiva que utiliza triángulos cerrados para definir la forma del modelo.

Para obtener impresiones de alta calidad en las piezas se configura el software de impresión 3D de acuerdo a la necesidad y complejidad del modelo bajo los siguientes parámetros: temperatura, velocidad, tiempo y tipo de soporte, cabe recalcar que una impresión de alta o baja calidad depende directamente del tiempo y velocidad de impresión.

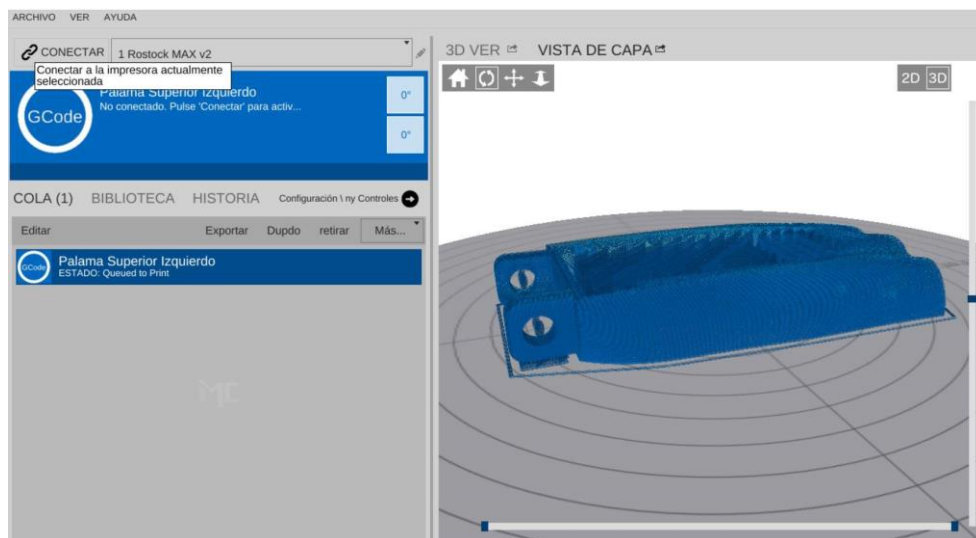


Figura 25-5. Software de impresión 3D

Realizado por: Amangandi, J. 2018

A continuación se aprecia el proceso de impresión de una de las piezas en la impresora 3D.

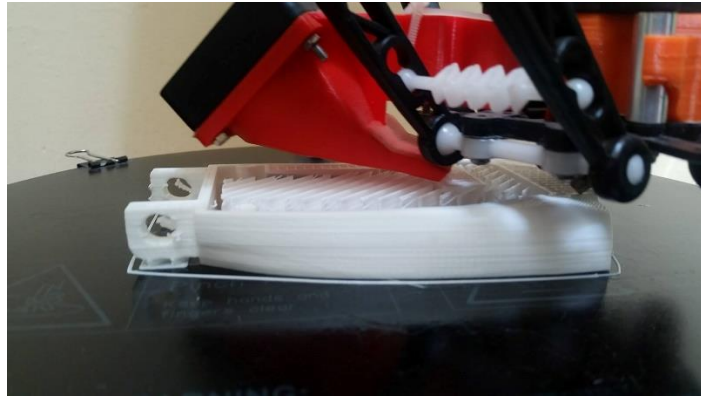


Figura 26-5. Impresión 3D palma de la mano
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.5.1 *Ensamble del prototipo*

Una vez que las piezas han sido impresas en base a los diseños planteados, se procede al ensamble de sus partes para formar un conjunto completo teniendo como resultado las manos robóticas.

Se inicia con el ensamble de la mano conjuntamente con los dedos donde sus eslabones están unidos a través de articulaciones cilíndricas siendo estas la parte fundamental para lograr el objetivo del proyecto y haciendo que los movimientos del alfabeto dactilográfico se realicen con gran efectividad. Se realizó las pruebas de ensamble para verificar que en los movimientos no exista fricción entre las piezas en caso de ocurrir se tendrá que limar las piezas afectadas para tener un ensamble adecuado. También en la mano se alojan hilos de nylon que tendrán la función de tendón de flexión, y elástico que hará la función de tendón extensor.



Figura 27-5. Ensamble de la mano
Realizado por: Amangandi, J. 2018

En el siguiente paso se realizó el ensamble del antebrazo el cual está conformado por tres partes con el objetivo de facilitar la impresión ya que las dimensiones de la mesa de impresión no se prestaban para imprimirlo en una sola pieza. Lo cual ayudo a tener una gran accesibilidad para la ubicación de los servomotores Hitec HS-311 y los servos Tower Pro SG90 los cuales realizaran el movimiento de cada uno de los dedos. También se acoplo la mano a la muñeca a través de pasadores los cuales realizaran los movimientos de flexión, extensión, desviación radial y ulnar.



Figura 28-5. Ensamble del antebrazo

Realizado por: Amangandi, J. 2018

Seguidamente se coloca el nylon en cada polea de los servomotores tomando en cuenta que el templado de los tendones se realizó desde los servomotores hacia los dedos, los cuales deben estar extendidos totalmente, para evitar que los tendones no se crucen en todo momento y así tener un correcto funcionamiento.



Figura 29-5. Templado de nylon en los servos

Realizado por: Amangandi, J. 2018

Finalmente se tiene el ensamble total con el soporte de los antebrazos dentro del cual se encuentra el servomotor Hitec HS-805BB que transmitirán el movimiento de todo el mecanismo del brazo a través de un sistema de engranajes, también dentro de esta base se encuentra ubicada la tarjeta

de control Arduino Mega 2560 en la cual se realizó las respectivas conexiones al driver de servos y posteriormente a los servomotores.



Figura 30-5. Ensamble de soporte del antebrazo
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.5.2 *Diseño de interfaz gráfica de usuario*

La interfaz de usuario se diseñó utilizando la plataforma del software LabVIEW por su facilidad que brinda en diseño de interfaces de usuario gráficas (GUIs) y a la vez amigable con el usuario.

La herramienta facilita la interacción del usuario con las manos robótica y por medio de la cual se dará órdenes para la ejecución de los movimientos del alfabeto dactilográfico, previamente programados en la aplicación.

Se ha considerado algunos aspectos para el diseño de la interfaz gráfica:

- Hacer un interfaz de fácil acceso para la interacción con el usuario. (Molina & Jiménez, 2010)
- La interfaz debe ser didáctica y atractiva para acaparar toda la atención del usuario sobre todo de los niños.
- Desarrollar una interfaz gráfica que sea rápida y eficiente, para que el usuario tenga una accesibilidad total a todas sus funciones.

5.5.2.1 Pantalla de inicio

Se diseña la interfaz para la presentación de la aplicación que incluirá información básica, como el nombre del proyecto, institución y el sello la cual proporcionará una mejor presentación. Luego de un tiempo determinado la aplicación accederá a una ventana principal, en el siguiente gráfico se aprecia la ventana de inicio.



Figura 31-5. Pantalla de presentación
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.5.2.2 Pantalla principal

En la ventana principal se implementó una pantalla que está constituida por botones que contienen las letras del abecedario que al accionar cualquiera de ellas las manos robóticas ejecutarán los movimientos del alfabeto dactilográfico visualizando en la pantalla principal las imágenes de la expresión de cada letra, además de una imagen correspondiente a la letra seleccionada.



Figura 32-5. Pantalla principal
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.6 Diseño de sistema de control

El sistema de control está constituido por un conjunto de elementos electrónicos, que permiten controlar el movimiento de las manos robóticas a partir de la interfaz gráfica, mediante una tarjeta de control.

5.6.1 Implementación del control para las manos robóticas

Las manos robóticas serán controladas mediante una aplicación desarrollada en LabVIEW la misma que a través del puerto Serial se comunica con el Arduino Mega 2560 y éstos en conjunto gestionarán los movimientos que realicen las estructuras robóticas por medio de sus actuadores eléctricos (servomotores).

Para realizar la comunicación debe estar instalado el software LabVIEW de National Instruments y su complemento NI-Visa que permite trabajar y habilitar los puertos de comunicación desde LabVIEW.

El controlador USC-32 tiene pines numerado desde S1 hasta S32 en donde se conectarán los 20 servomotores a utilizarse en las manos robóticas.

Para la comunicación se conecta los pines (Tx) y (Rx) del controlador cruzados a los pines (Tx) y (Rx) del Arduino Mega 2560 los cuales permitirán controlar en su totalidad los servomotores. El Arduino se alimenta por el canal de comunicación serial.

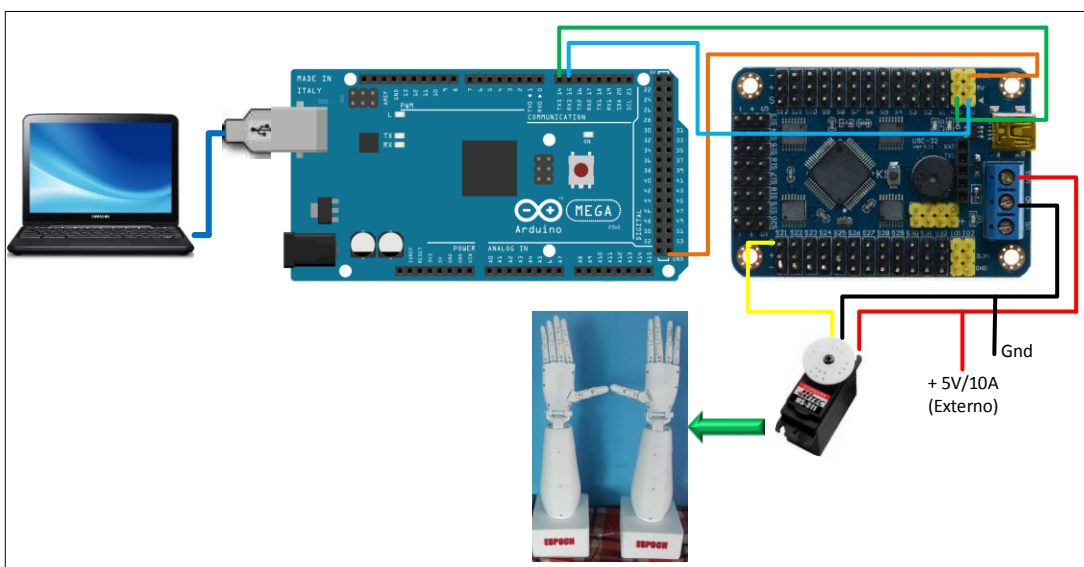


Figura 33-5. Diagrama de conexión

Realizado por: Amangandi, J. 2018

Los canales del controlador tienen pines de señal y alimentación de los servomotores. Por lo tanto, para la alimentación se optó en utilizar una fuente de alimentación externa de (5V/10A) que están conectados directamente a los servomotores que es un voltaje apropiado para mover los servos de las manos robóticas.

5.6.2 Algoritmo de control

En el siguiente diagrama de flujo general muestra de forma gráfica el algoritmo de control de las manos robóticas, en el siguiente apartado se describirá con detalle el proceso.

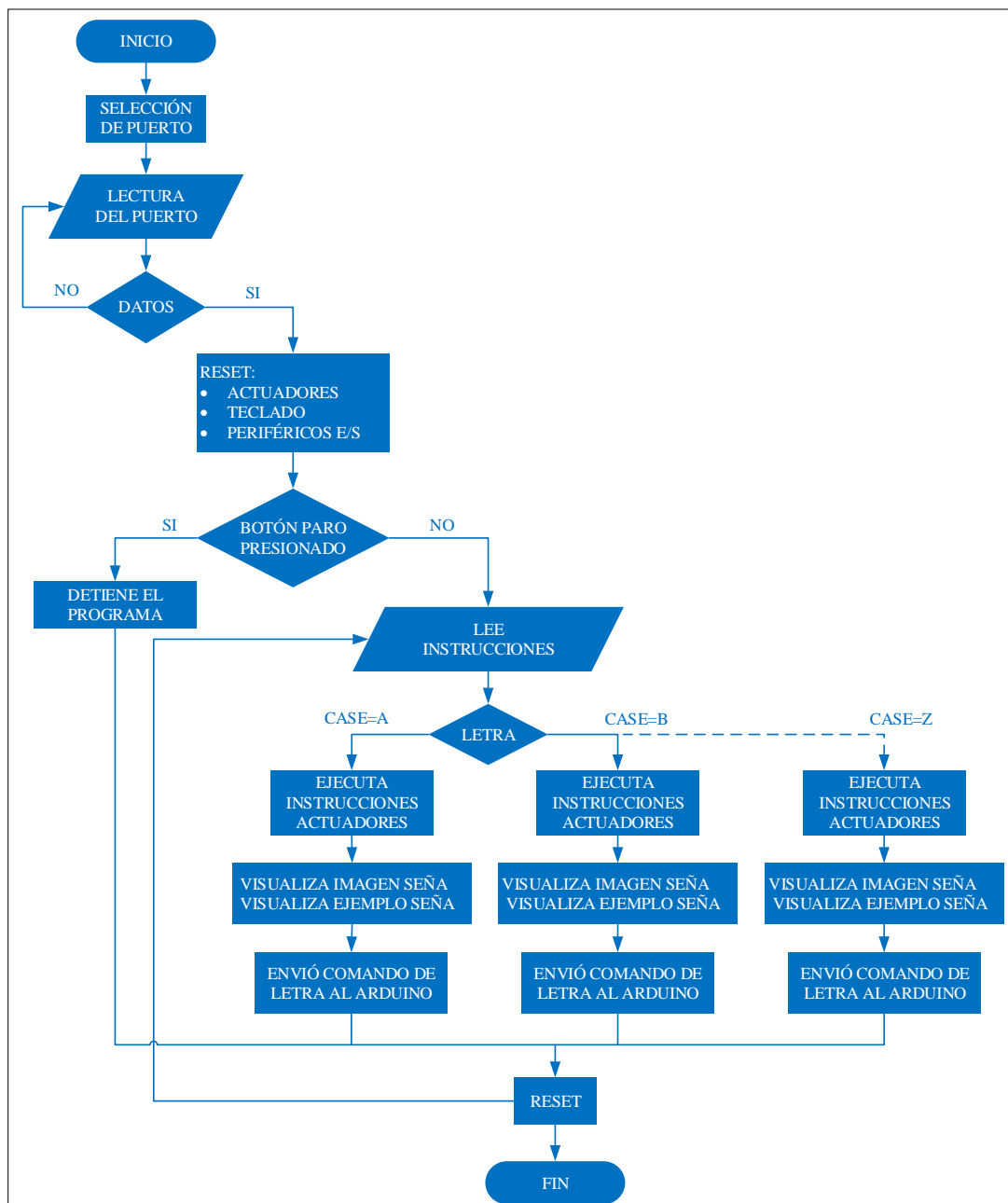


Figura 34-5. Diagrama de flujo del algoritmo de control
Realizado por: Amangandi, J. 2018

Se ha diseñado la interfaz en LabVIEW de manera que sea lo más amigable posible para el usuario. A continuación se describe los bloques de programación.

En el bloque se muestra la configuración de puerto de comunicación para eso se ha utilizado la estructura while en el caso de que no se haya seleccionado un puerto de comunicación, le notificara al usuario mediante un mensaje de error y el programa no continuará de está etapa.

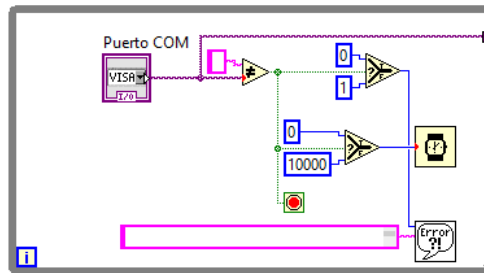


Figura 35-5. Bloque de configuración puerto de comunicación
Realizado por: Amangandi, J. 2018

1. **VISA Configure Serial Port:** Una vez seleccionado el puerto con VISA resource name se procede a configurar la velocidad de transmisión, el baut rate declara como una constante de 9600 baudios.
2. **VISA Open:** Abre el puerto VISA, es necesario establecer un tiempo de 2000 ms luego de abrir el puerto para que el arduino pueda inicializar la conexión sin problemas.

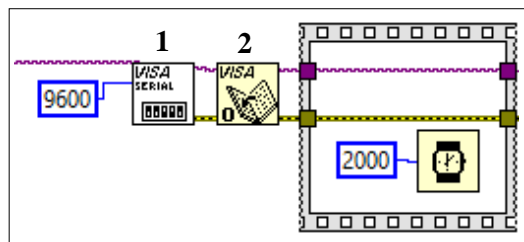


Figura 36-5. Bloque de configuración velocidad de transmisión
Realizado por: Amangandi, J. 2018

En el bloque se procede a llevar a la posición inicial a cada mano, ya que puede haber quedado en una posición no deseada en un uso previo, al igual que en el paso anterior, es necesario otorgar un tiempo de espera para que las manos puedan ejecutar las secuencias esperadas satisfactoriamente.

3. **VISA Write:** Escribe los datos desde buffer, se envía los caracteres “-” y “*” a través del puerto serial, que corresponden a la secuencia de inicio de cada mano.

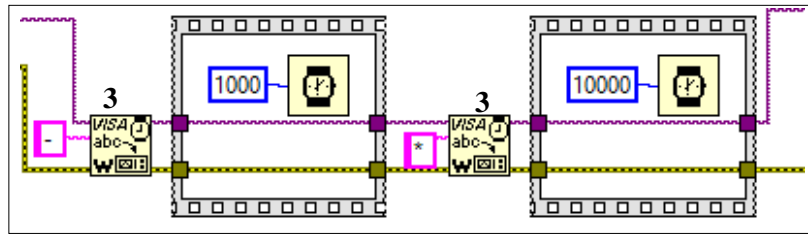


Figura 37-5. Bloque de programación reinicio de las manos
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

En el siguiente bloque de programación indica el reset de todas las variables es esencial, y se lo hace antes de que se ejecute el resto del programa. Es decir regresan a la posición inicial los botones que por alguna circunstancia quedó presionado.

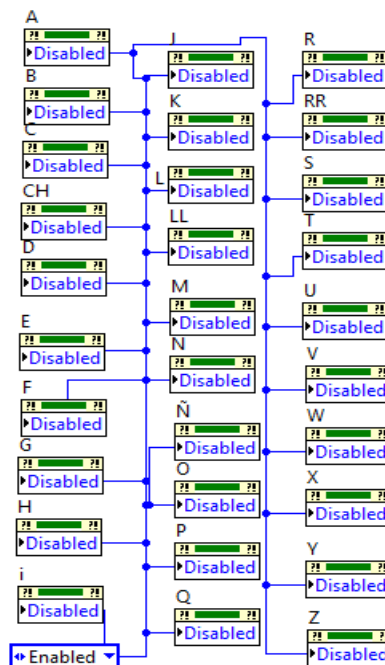


Figura 38-5. Bloque reset de variables
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

En el bloque se encuentra la programación para la ejecución de movimientos de las letras del alfabeto dactilográfico, en el ciclo While principal que es el que se va a estar ejecutando continuamente, se hace un barrido de todos los botones para saber cuál de ellos ha sido presionado y bloquear el resto. Se hace esto con el fin de que no se envíe otra secuencia al arduino y provocar conflictos.

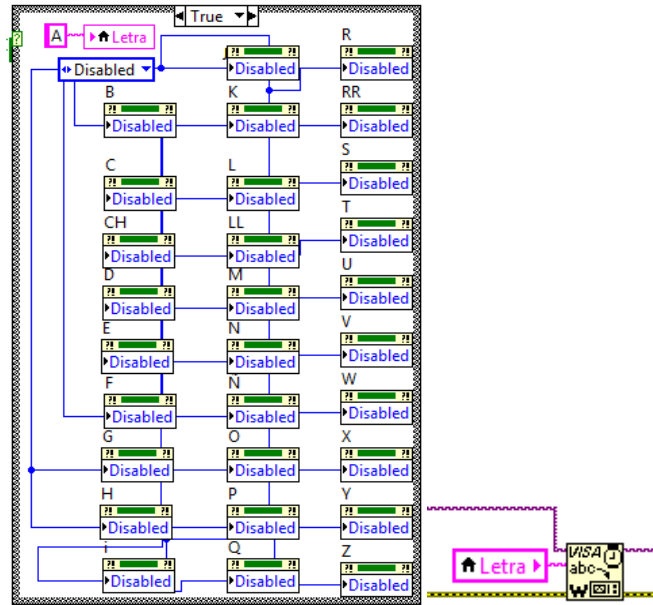


Figura 39-5. Bloque de programación del alfabeto dactilográfico
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

Como ejemplo se pone al botón de la letra “A”, en el caso de que este haya sido presionado se guarda en una variable de tipo string el carácter “A”, el mismo que se enviará por el puerto serial al arduino que ejecutará la secuencia de cada servo y así mostrar la señal de esta letra del alfabeto.

4. Draw Flattened Pixmap.vi: Muestra la imagen de la señal correspondiente a cada letra, y su respectivo ejemplo, es importante mencionar que las imágenes a mostrar deben estar en formato PNG, y deben estar guardadas en el mismo directorio del archivo principal.

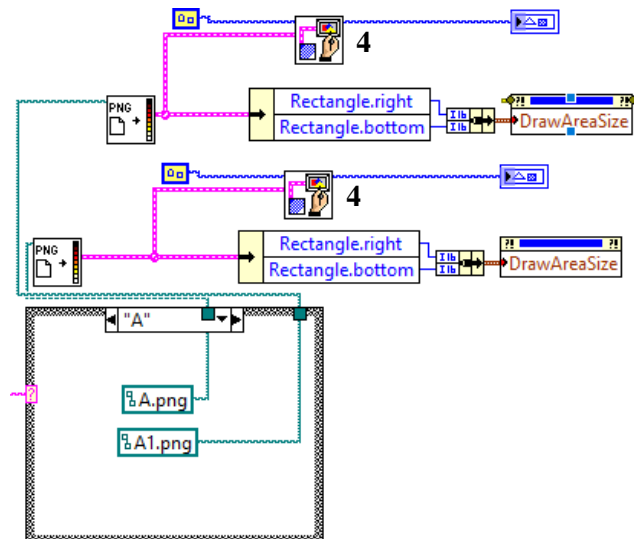


Figura 40-5. Bloque despliegue de imágenes
 Realizado por: Amangandi, J. 2018

Siendo el mismo proceso para todos los demás botones. Una vez que el botón vuelva a ser presionado (regresó a la posición inicial), se enviará el carácter correspondiente a la secuencia de inicio de cada brazo, para que este listo para ejecutar una nueva señal.

En el caso de que el botón de paro haya sido presionado, se detendrá el programa.

5. VISA Close: La estructura cierra la comunicación serial.

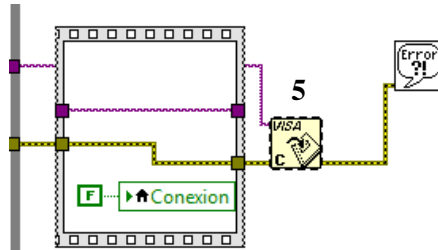


Figura 41-5. Bloque para cerrar la comunicación
Realizado por: Amangandi, J. 2018

5.6.2.1 Programación arduino

En la tarjeta de desarrollo arduino se ha implementado un programa complementario el mismo que se detalla a continuación en el flujograma.

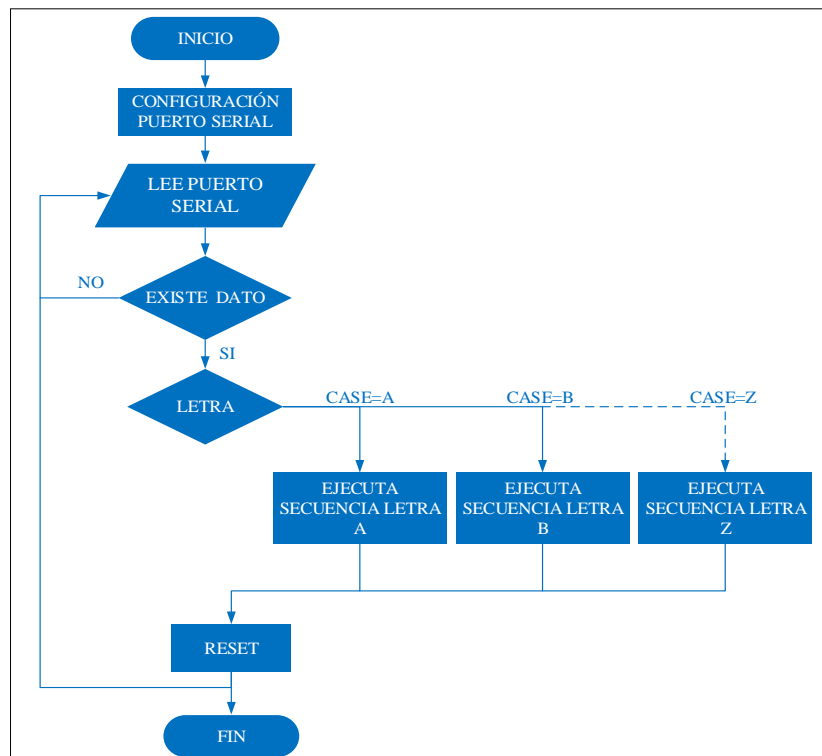


Figura 42-5. Diagrama de flujo programación arduino
Realizado por: Amangandi, J. 2018

Se configura el puerto de comunicación con la misma velocidad que en LabVIEW (9600 baudios). Busca si existe algún dato en el buffer de comunicación, en el caso de ser afirmativo, se lee este dato y se identifica a que letra corresponde.

Se ejecuta la secuencia de cada seña, posicionando cada servo dependiendo del caso. Este algoritmo se estará ejecutando continuamente mientras este conectado el arduino a la PC, se puede decir que la tarjeta de desarrollo se comporta como un dispositivo esclavo.

A continuación en la siguiente tabla se muestra la posición inicial y el ancho de pulso así como los ángulos equivalentes de cada servomotor para su respectiva programación en el Arduino.

Tabla 9-5: Posiciones iniciales de los servomotores

Movimiento	Servomotor	Posición Inicial (PWM)	Ángulo (°)	Extremidad
Muñeca lateral	1	2500	180	Derecha
Meñique	2	2500	180	Derecha
Anular	3	2500	180	Derecha
Pulgar	4	500	0	Derecha
Índice lateral	5	2500	180	Derecha
Medio lateral	6	500	0	Derecha
Muñeca abajo	7	500	0	Derecha
Medio	8	500	0	Derecha
Índice	9	500	0	Derecha
Base	10	1500	108	Derecha
Meñique	21	500	0	Izquierda
Anular	22	500	0	Izquierda
Muñeca abajo	23	2500	180	Izquierda
Medio lateral	24	2500	180	Izquierda
Índice lateral	25	500	0	Izquierda
Pulgar	26	500	0	Izquierda
Medio	27	2500	180	Izquierda
Índice	28	2500	180	Izquierda
Muñeca lateral	29	1500	108	Izquierda
Base	30	1500	108	Izquierda

Realizado por: Jorge Amangandi

CONCLUSIONES

- Se evaluó los métodos y herramientas empleados actualmente para la enseñanza/aprendizaje de personas con discapacidad auditiva, determinando que carecen de tecnología y no disponen recursos lo suficientemente didácticos y atractivos para conseguir la atención suficiente en el caso de pacientes especialmente niños, presentando un nivel bajo de eficiencia.
- Se realizó un diseño propio de las partes que constituyen las manos robóticas utilizando software SOLIDWORKS que facilitó modelar con rapidez las ideas para posteriormente ensamblar y simular los mecanismos garantizando el mecanizado de las piezas; el prototipo está formado por 20 grados de libertad que facilitan la generación de movimientos del alfabeto dactilológico proporcionando una herramienta tecnológica innovadora para el mejoramiento del proceso de enseñanza /aprendizaje de personas con discapacidad auditiva.
- Se seleccionó el material PLA como más adecuado para la impresión 3D por ser un polímero biodegradable creado a partir de recursos renovables, no emite gases nocivos, el filamento facilita la impresión de las piezas a baja temperatura y de buena calidad.
- Para el sistema de control se estableció el uso del sistema embebido de la gama “open source” Arduino modelo Mega 2560 y el shield USC-32 que en conjunto gobiernan el funcionamiento de los actuadores eléctricos, en este caso servomotores Hitec Hs-311 seleccionados como idóneos para la generación de los movimientos requeridos.
- Se realizó el análisis cinemático directo utilizando el método de D-H y el cinemático inverso mediante el método geométrico estableciendo la posición y orientación del extremo de cada uno de los dedos y mediante el método de Euler-Lagrange se planteó el modelo dinámico obteniendo como resultado en forma canónica la ecuación que modela al robot.
- Se implementó una interfaz gráfica de alto nivel que facilita la interacción con el usuario, proporcionando recursos gráficos que permiten la activación de los actuadores robóticos para la generación de movimientos que denotan expresiones dactilográfica, los mismos que están pre programados y relacionados con recursos visuales mostrados paralelamente en la interfaz.

- Para la implementación de la interfaz gráfica se empleó el software LabVIEW por sus amplios beneficios en programación gráfica al momento de diseñar HMIs utilizando un conjunto de herramientas y objetos, la facilidad en establecer la comunicación con el microcontrolador y la computadora de modo serial.
- Se generó una base de datos de elementos visuales coloridos y divertidos como recursos didácticos para la enseñanza/aprendizaje donde se relacionan las letras del alfabeto dactilográfico con los movimientos efectuados por el prototipo robótico.
- Las pruebas efectuadas al prototipo describen una eficiencia del 89% en la realización de los movimientos para la reproducción del alfabeto dactilográfico.

RECOMENDACIONES

- El tensado de los cables realizar desde el servomotor hacia los dedos para no tener dificultades al momento de la calibración de movimientos de las manos robóticas.
- No se debe forzar los movimientos de las manos robóticas mientras este en funcionamiento puesto que esto podría trabar o romper los mecanismos y causar daños a los elementos electrónicos.
- Para transportar de un lugar a otro se deberá llevar sujetando de la base en forma vertical, evitando golpes y movimientos bruscos.
- Con el fin de ampliar la utilidad del prototipo se podría pensar en adicionar un torso y cabeza al sistema que posibilite la enseñanza del lenguaje de señas, además se podría implementar una interfaz de comunicación inalámbrica (Wifi, Bluetooth) para la interacción de la interfaz con el actuador robótico.
- La facilidad está vez para el uso de Labview para el desarrollo de la aplicación es la existencia de la licencia del software en la Universidad, por lo que con el fin de disminuir el costo del uso de un software licenciado, para trabajos futuros se podría plantear la posibilidad de migrar la aplicación de la interfaz gráfica a software de acceso libre e incluso incursionar en el campo “open source”.

BIBLIOGRAFÍA

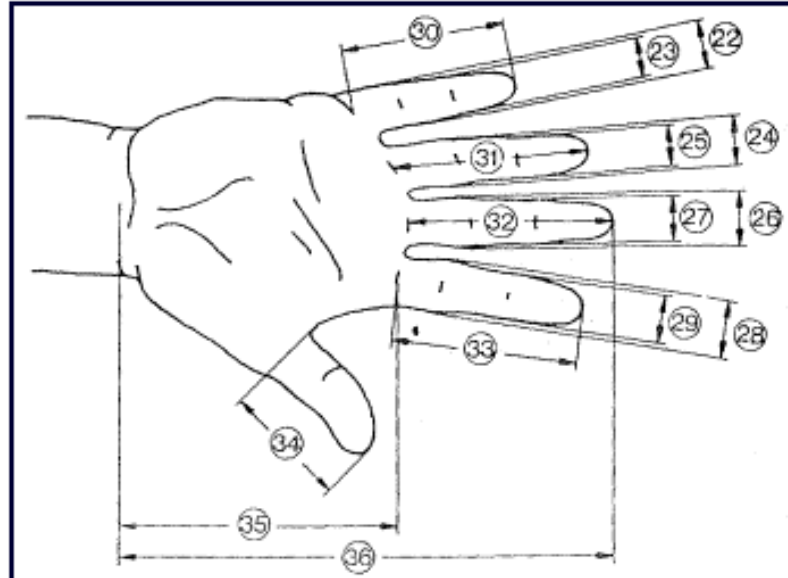
- Agencia Nacional para la Igualdad de Discapacidades.** (2017). *Porcentaje de población ecuatoriana que tiene discapacidades.* Recuperado de: <http://www.planificacion.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2014/09/Agenda-Nacional-para-Discapacidades.pdf>
- Alonso, M.** (2006). *Métodos de enseñanza de lectura y escritura en personas sordas.* Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Educación Elemental y Especial, Mendoza.
- Andrade, P.** (2013). *Elaboración de material didáctico multimedia de matemáticas para niños de 2do de básica del instituto de sordos de chimborazo.* Riobamba, Ecuador.
- Barrientos, A., Aracil, R., Peñin, L. F., & Balaguer, C.** (2007). *Fundamentos de robótica.* (Segunda ed.). Madrid: Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
- Blanco, S., Escribano, R., González, V., & Amor, S.** (2004). *Programación y control de procesos. En tecnologías de la información y de la comunicación (pág. 345).* Editorial Ra-Ma. 2004.
- Cabás, R.** (23 de Enero de 2011). *Metodología de diseño de manos robóticas basada en los estados de un sistema accionador.* Madrid.
- Cailliet, R.** (2006). *Anatomía funcional biomecánica.* (1 ed.). España: Marban Libros S.L.
- Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidad.** (Febrero de 2017). *Estadística personas con discapacidad.* Recuperado de: http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2016/02/estadisticas_discapacidad.pdf
- Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidad.** (Febrero de 2017). *Personas con discapacidad registrada según tipo de discapacidad.* Recuperado de: <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadistica/index.html>
- DIN.** (Junio de 1981). *Medidas antropométricas de la mano.* Según Norma DIN 33 402 2° parte.

- Dorador, G. J.** (18 de Enero de 2004). *Robótica y prótesis inteligentes*. Revista Digital Universitaria, 6(1), 15.
- EL UNIVERSO.** (2009). *Ecuador tiene 12,8% de discapacitados, según OEA*. Este contenido ha sido publicado originalmente por Diario El Universo en la siguiente dirección:<http://www.eluniverso.com/2009/01/22/1/1361/2D2EE8BA0D38471EB181ECC5BAF6FDA8.html>
- Garrido, P. J.** (2005). *Fundamentos de arduino*.
- Gómez, S.** (2014). *El gran libro de SolidWorks*. (Segunda ed.). Barcelona: ALFAOMEGA.
- Hamrock, B., Jacobson, B., & Schmid, S.** (2000). *Elementos de máquinas*. Primera, 926. (A. García, Trad.) México: MCGRAW-HILL.
- Hoppenfeld, S.** (1976). *Exploración física de la columna vertebral y de las extremidades*. (Primera ed.). (R. S. Sapiña, Trad.) México: El Manual Moderno, S.A. de C.V.
- Kapandji, A.** (2006). *Fisiología articular*. (Sexta ed., Vol. 1). (P. Articulare, Trad.) Madrid: MÉDICA PANAMERICA. S.A.
- Kelly, R., & Santibáñez, V.** (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. México: Editorial. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid.
- Kosow, I.** (1993). *Control de máquinas eléctricas*. Primera. Barcelona: REVERTÉ, S.A.
- Lipson, H., & Kurman, M.** (2014). *La revolución de la impresión 3D*. Primera, 368. ANAYA MULTIMEDIA.
- Molina, J., & Jiménez, M.** (08 de 06 de 2010). *Programación gráfica para ingenieros*. Primera, 252. (S. MARCOMBO, Ed.) Barcelona: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.
- Ollero, B. A.** (2001). *Robótica manipuladores y robots móviles*. España: Editorial S.A.MARCOMBO.
- Pró, E. A.** (2012). *Anatomía clínica*. (Primera ed.). Buenos Aires: Médica panamerica S.A.C.F.

- Quiroz, G. F.** (1993). *Anatomía humana*. (Primera ed., Vol. I). México: Porrúa.
- Reyes, F.** (2011). *Robótica. Control de robots manipuladores*. (Primera ed.). (S. d. Alfaomega Grupo Editor, Ed.) México: Alfaomega.
- Rodríguez, A.** (2007). *Sistemas SCADA*. (Segunda ed.). Barcelona, España: MARCOMBO, S.A.
- Rodríguez, G. M.** (1992). *Lenguaje de signos*. Madrid: Barcelona, Confederación Nacional de Sordos de España-Fundacion ONCE.
- Smith, W.** (1998). *Fundamento de la ciencia e ingeniería de materiales*. (Tercera Edición ed., Vol. 3). (C. F. Madrid, Ed., & P. O. ENGINEERING, Trad.) España: Mc Graw-Hill.
- Suria, D.** (1982). *Guia para padres de niños sordos*. Barcelona: HERDER.
- Téllez, J., & Dominguez, F.** (2015). *Todo sobre mini-robótica*. (D. H. Vallejo, Ed.) Argentina: QUARK SRL.
- Torrente, A. Ó.** (2013). *Arduino Curso práctico de formación*. (Primera, Ed.) Madrid, España: Alfa omega Grupo Editor, S.A. de C.V., México ISBN: 978-607-707-648-3.
- Vázquez, C., Castro, M., & Rodríguez, J.** (2017). *Una taxonomía de materiales didácticos para la inclusión de alumnado con diversidad funcional auditiva*. 24.

ANEXOS

Anexo A: Medida antropométrica de la mano



Dimensiones En cm.	PERCENTIL					
	Hombres			Mujeres		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
22 Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23 Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24 Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25 Ancho del dedeo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26 Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27 Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28 Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29 Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30 Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31 Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32 Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33 Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34 Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35 Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36 Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

Dimensiones En cm.	PERCENTIL					
	Hombres			Mujeres		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
37 Ancho del dedo pulgar	2,0	2,3	2,5	1,6	1,9	2,1
38 Grosor de la mano	2,4	2,8	3,2	2,1	2,6	3,1

Anexo B: Especificación técnica de la fuente de alimentación



50W Single Output Switching Power Supply

LRS-50 series

SPECIFICATION

MODEL	LRS-50-3.3	LRS-50-5	LRS-50-12	LRS-50-15	LRS-50-24	LRS-50-36	LRS-50-48	
OUTPUT	DC VOLTAGE	3.3V	5V	12V	15V	24V	36V	48V
	RATED CURRENT	10A	10A	4.2A	3.4A	2.2A	1.45A	1.1A
	CURRENT RANGE	0 ~ 10A	0 ~ 10A	0 ~ 4.2A	0 ~ 3.4A	0 ~ 2.2A	0 ~ 1.45A	0 ~ 1.1A
	RATED POWER	33W	50W	50.4W	51W	52.8W	52.2W	52.8W
	RIPPLE & NOISE (max.) <small>Note.2</small>	80mVp-p	80mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	150mVp-p	200mVp-p	200mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	2.97 ~ 3.6V	4.5 ~ 5.5V	10.2 ~ 13.8V	13.5 ~ 18V	21.6 ~ 28.8V	32.4 ~ 39.6V	43.2 ~ 52.8V
	VOLTAGE TOLERANCE <small>Note.3</small>	±3.0%	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION <small>Note.4</small>	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION <small>Note.5</small>	±2.0%	±1.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	1000ms, 30ms/230VAC 2000ms, 30ms/115VAC at full load						
HOLD UP TIME (Typ.)	30ms/230VAC 12ms/115VAC at full load							
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 264VAC 120 ~ 373VDC						
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz						
	EFFICIENCY (Typ.)	80%	83%	86%	88%	88%	89%	90%
	AC CURRENT (Typ.)	0.95A/115VAC 0.56A/230VAC						
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 45A/230VAC						
	LEAKAGE CURRENT	<0.75mA / 240VAC						
PROTECTION	OVER LOAD	110 ~ 150% rated output power Protection type : Hiccup mode, recovers automatically after fault condition is removed						
	OVER VOLTAGE	3.8 ~ 4.45V	5.9~ 7.3V	13.8 ~ 16.2V	18.75 ~ 21.75V	28.8 ~ 33.6V	41.4 ~ 48.6V	55.2 ~ 64.8V
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-30 ~ +70°C (Refer to "Derating Curve")						
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing						
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH non-condensing						
	TEMP. COEFFICIENT	± 0.03%/°C (0 ~ 50°C)						
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 5G 10min./1cycle, 60min. each along X, Y, Z axes						
	OVER VOLTAGE CATEGORY	III; Compliance to EN61558, EN50178, EN60664-1, EN62477-1; altitude up to 2000 meters						
SAFETY & EMC (Note 9)	SAFETY STANDARDS	UL60950-1, TUV EN60950-1, EN60335-1, EN61558-1/-2-16, CCC GB4943.1, BSMI CNS 14336-1, EAC TP TC 004, AS/NZS 60950.1 (by CB) approved						
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:4KVAC I/P-FG:2KVAC O/P-FG:1.25KVAC						
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH						
	EMC EMISSION	Compliance to EN55032 (CISPR32) Class B, EN55014, EN61000-3-2,-3, GB/T 9254, BSMI CNS13438, EAC TP TC 020						
	EMC IMMUNITY	Compliance to EN61000-4-2, 3.4, 5.6, 8, 11, EN61000-6-2 (EN50082-2), heavy industry level, criteria A, EAC TP TC 020						
OTHERS	MTBF	645K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)						
	DIMENSION	99*82*30mm (L*W*H)						
	PACKING	0.23Kg, 60pcs/14.8Kg/0.88CUFT						
NOTE	<ol style="list-style-type: none"> All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uF & 47uF parallel capacitor. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. Line regulation is measured from low line to high line at rated load. Load regulation is measured from 0% to 100% rated load. Length of set up time is measured at cold first start. Turning ON/OFF the power supply very quickly may lead to increase of the set up time. 3.3V, 5V when the load factor 0-50%, the switching power loss is reduced by burst operation, which will cause ripple and ripple noise to go beyond the specifications. The ambient temperature derating of 5°C/1000m is needed for operating altitude greater than 2000m(6500ft). The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. All the EMC tests are executed by mounting the unit on a 360mm*360mm metal plate with 1mm of thickness. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 							


Anexo C: Especificación técnica del servomotor

Hitec HS-311 - Standard Economy Servo

Specifications

Modulation:	Analog
Torque:	4.8V: 42.00 oz-in (3.02 kg-cm) 6.0V: 49.00 oz-in (3.53 kg-cm)
Speed:	4.8V: 0.19 sec/60° 6.0V: 0.15 sec/60°
Weight:	1.51 oz (42.8 g)
Dimensions:	Length: 1.57 in (39.9 mm) Width: 0.78 in (19.8 mm) Height: 1.43 in (36.3 mm)
Motor Type:	3-pole
Gear Type:	Plastic
Rotation/Support:	Bushing
Rotational Range:	180°
Pulse Cycle:	20 ms
Pulse Width:	900-2100 μ s
Connector Type:	Universal



Brand:	HITEC
Product Number:	31311S
Typical Price:	12.95 USD
Compare:	view 

Anexo D: Especificación técnica del arduino mega 2560

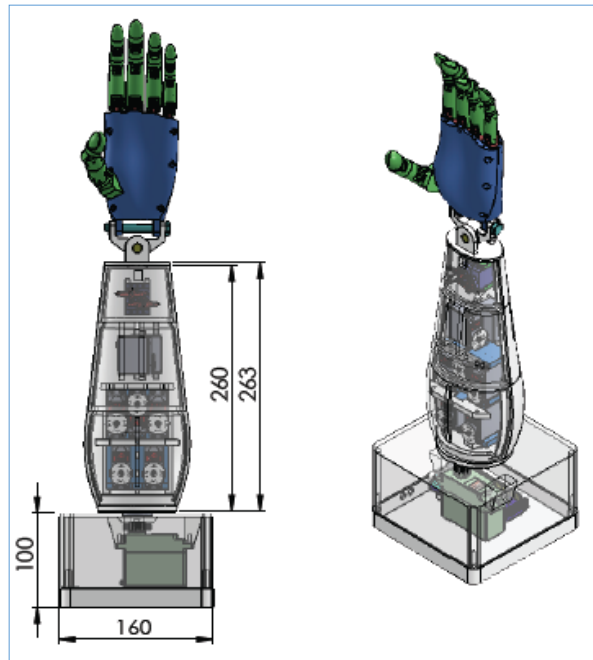


Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de trabajo	5V
Tensión de entrada (recomendada)	7-12V
Tensión de entrada (límite)	6-20V
Pines Digitales I/O	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entradas Analógicas	16
DC Corriente por Pin I/O	20 mA
DC Corriente por Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de los cuales 8 KB se usan por el bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Largo	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

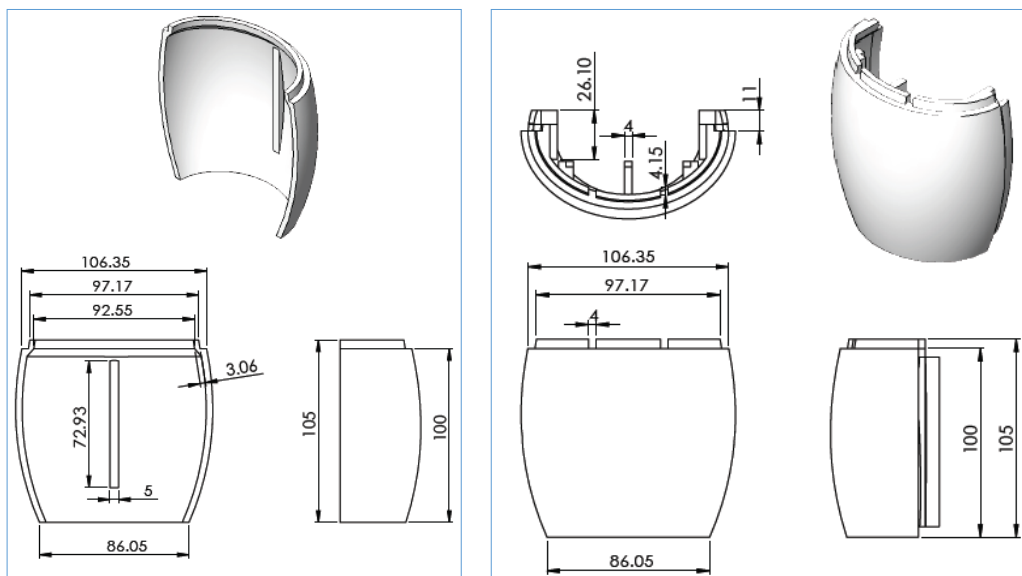
Anexo E: Planos CAD de las manos robóticas

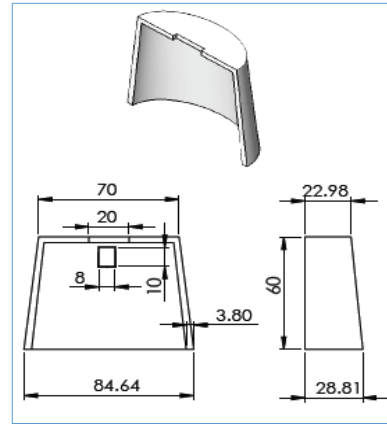
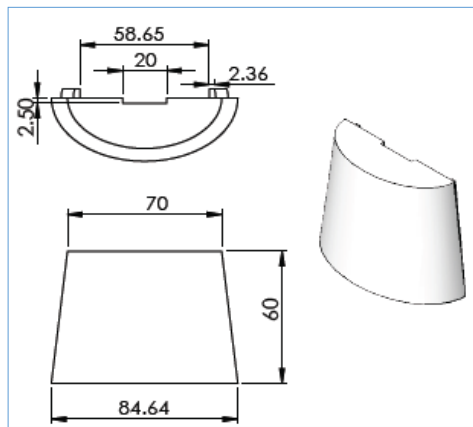
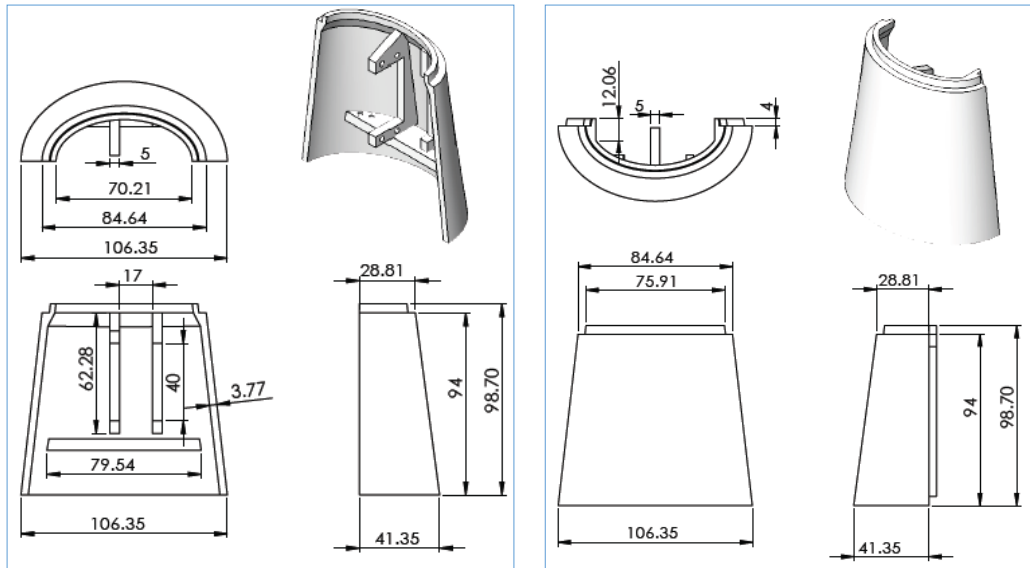
Todas las dimensiones se indican en milímetros.

Vista isométrica de las manos robóticas

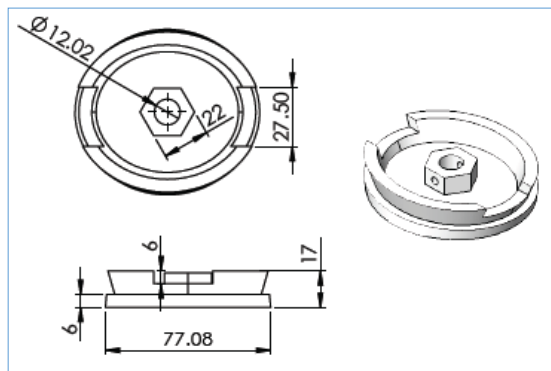


Estructuras del antebrazo



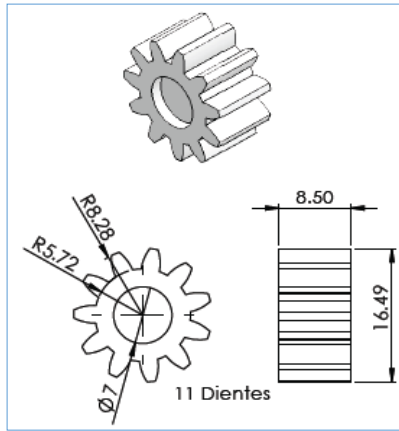


Base del antebrazo

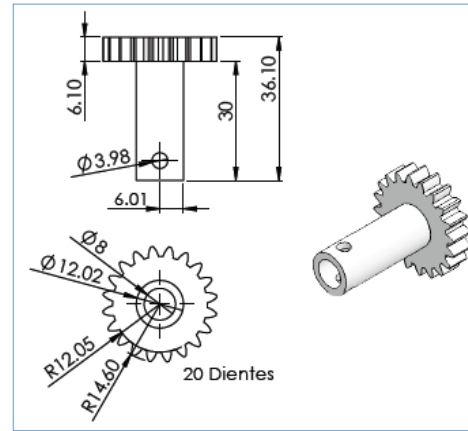


Piñones

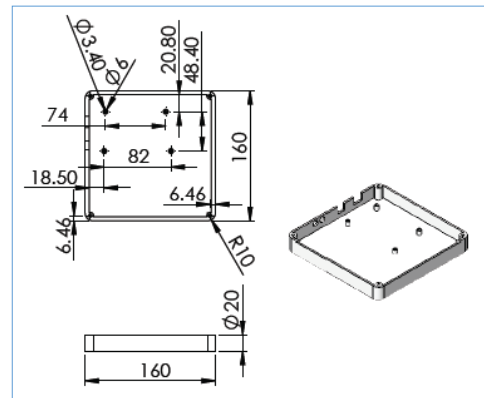
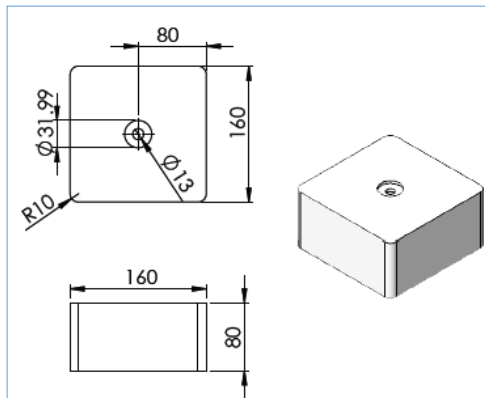
Conductora



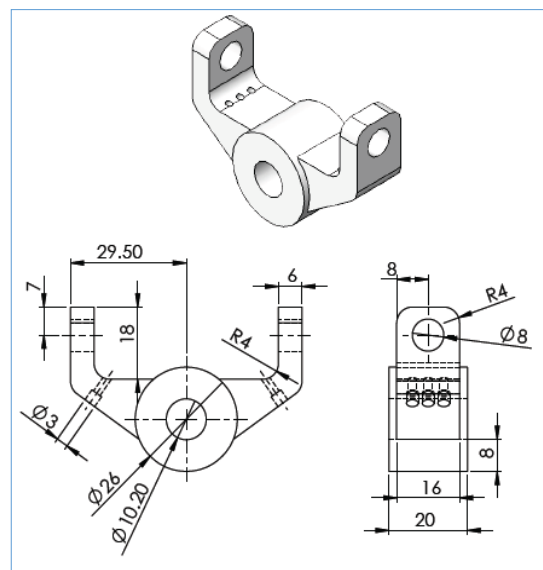
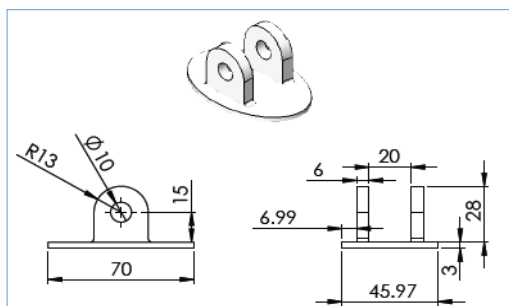
Conducida



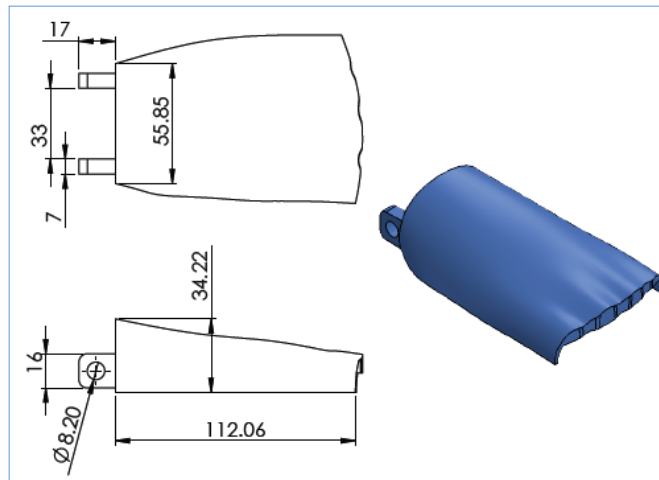
Soporte del antebrazo



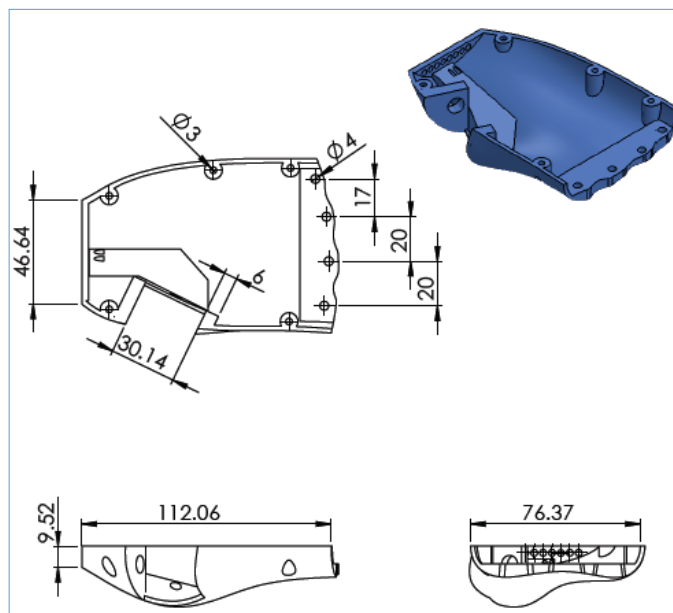
Base de la muñeca



Palma superior

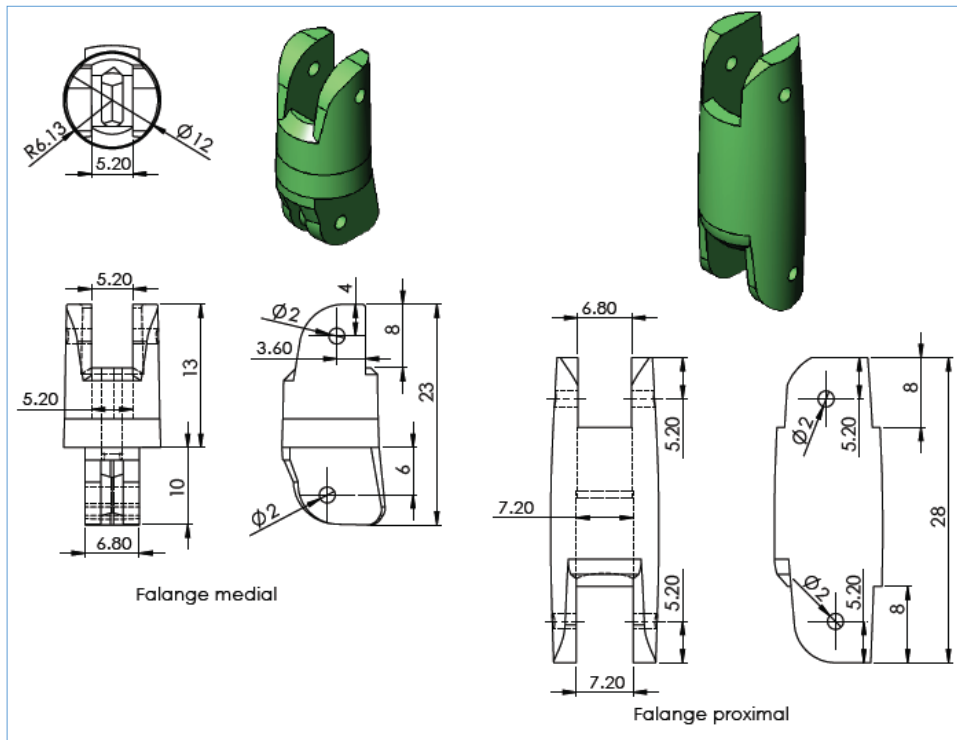
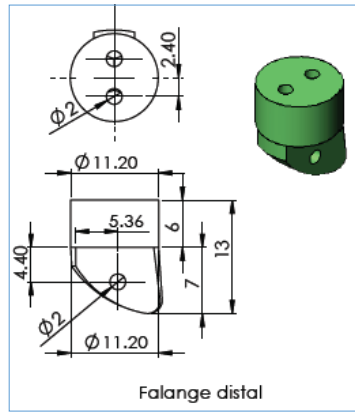


Palma inferior

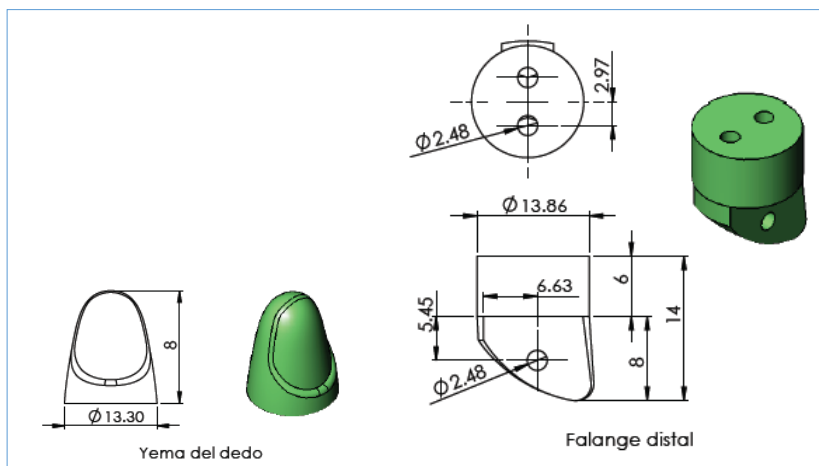


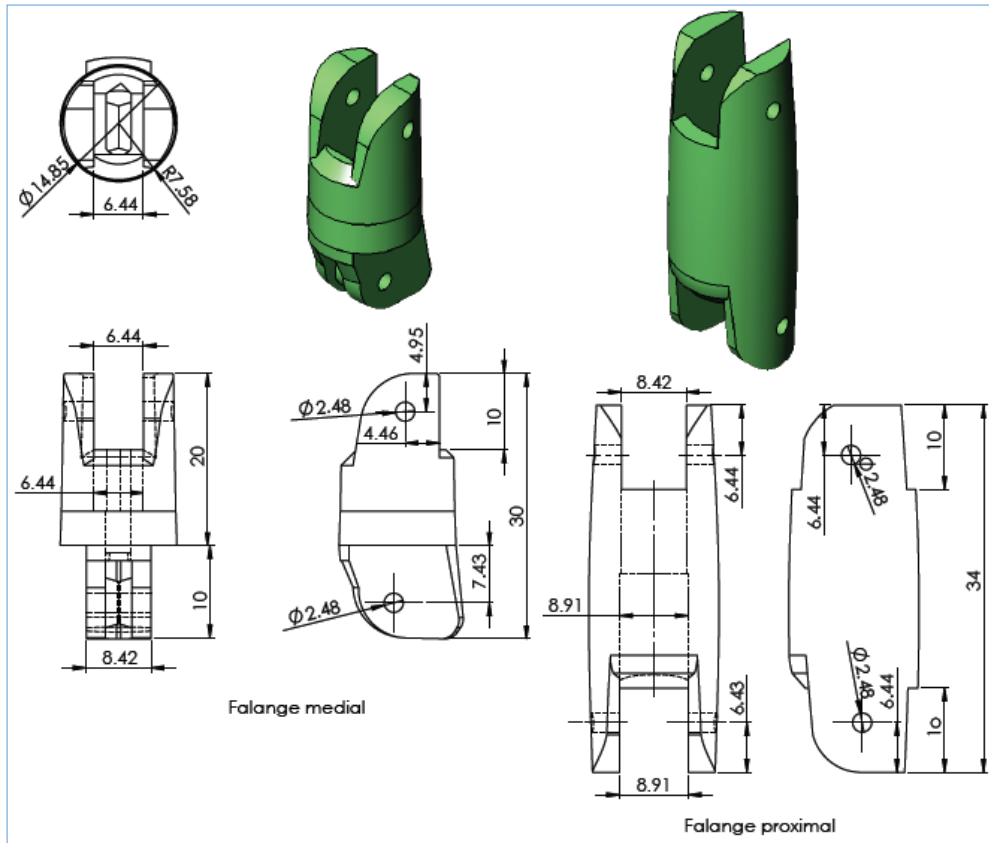
Plano dedo meñique



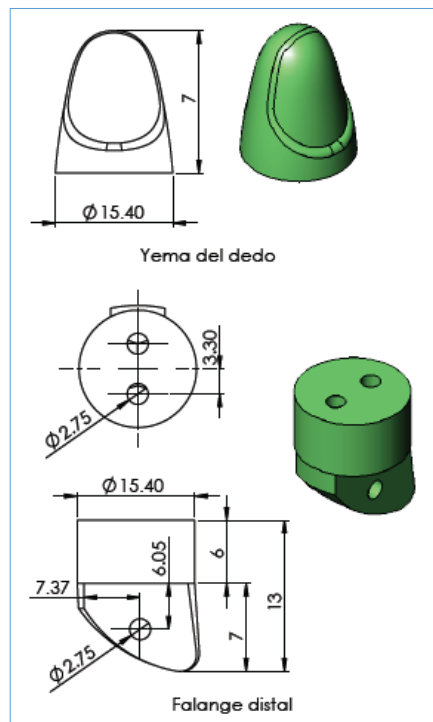


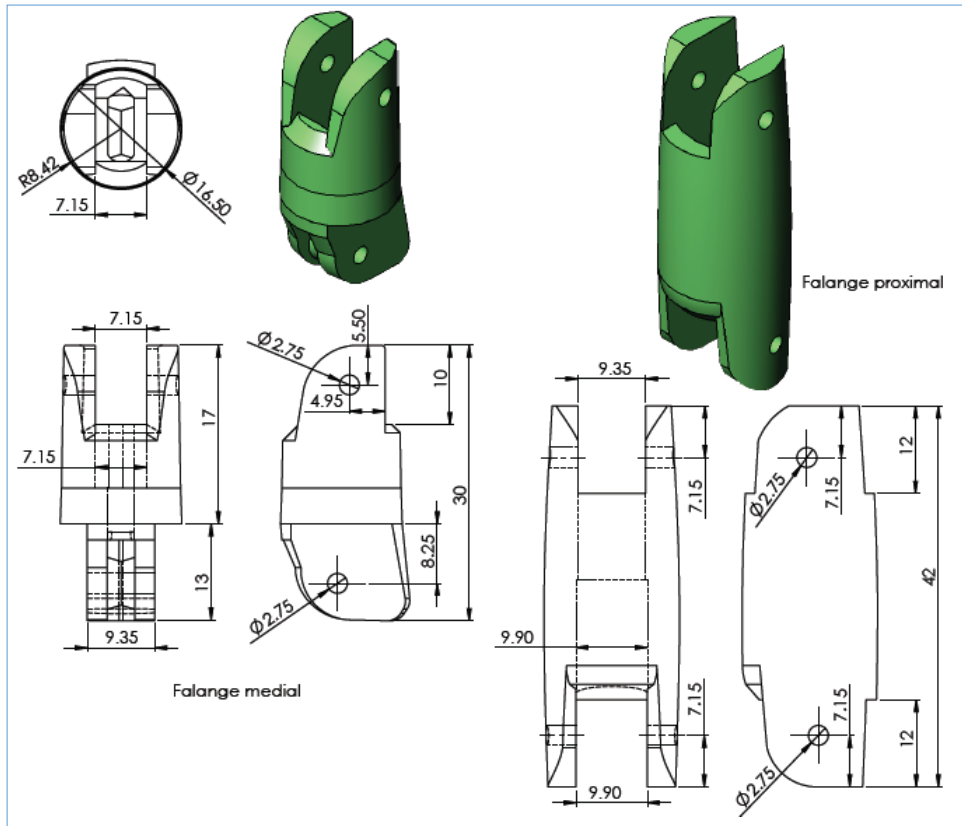
Plano dedo anular



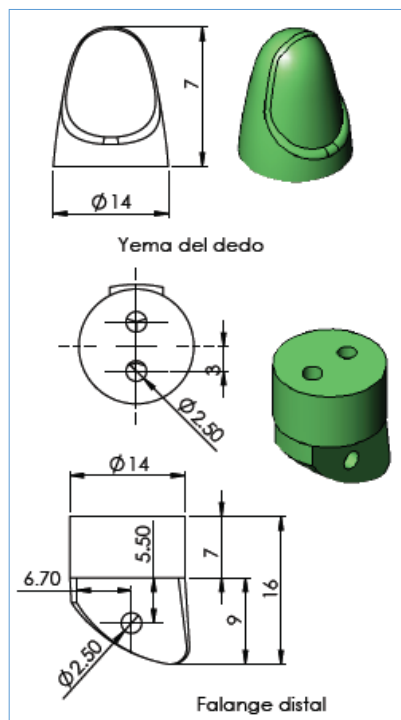


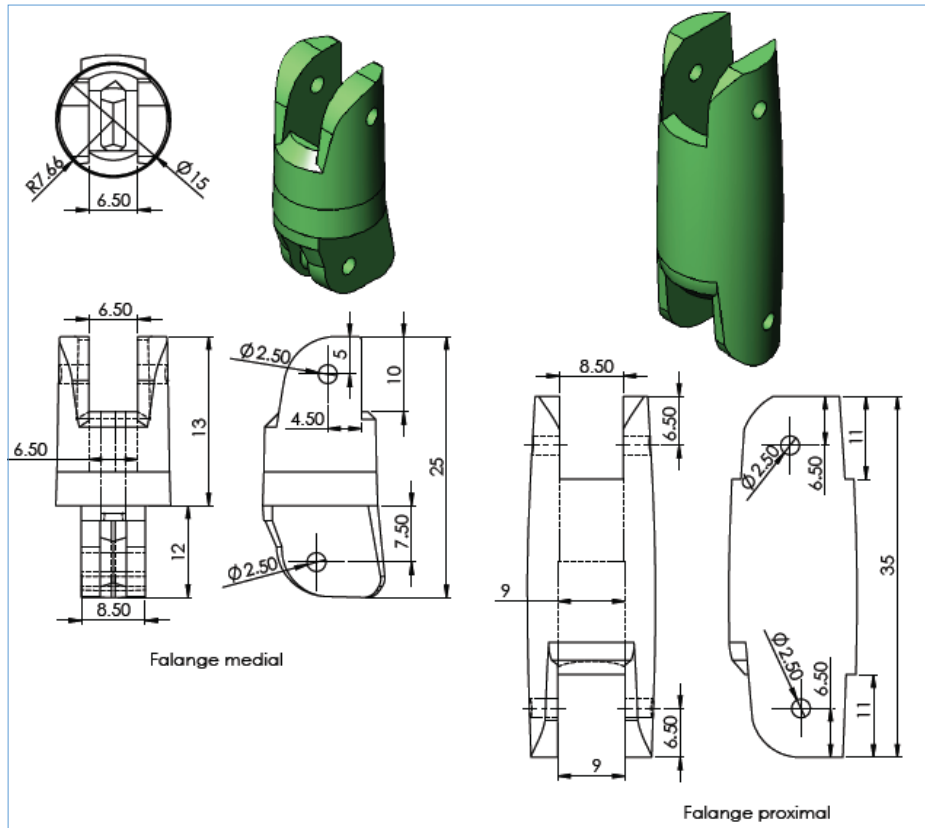
Plano dedo medio



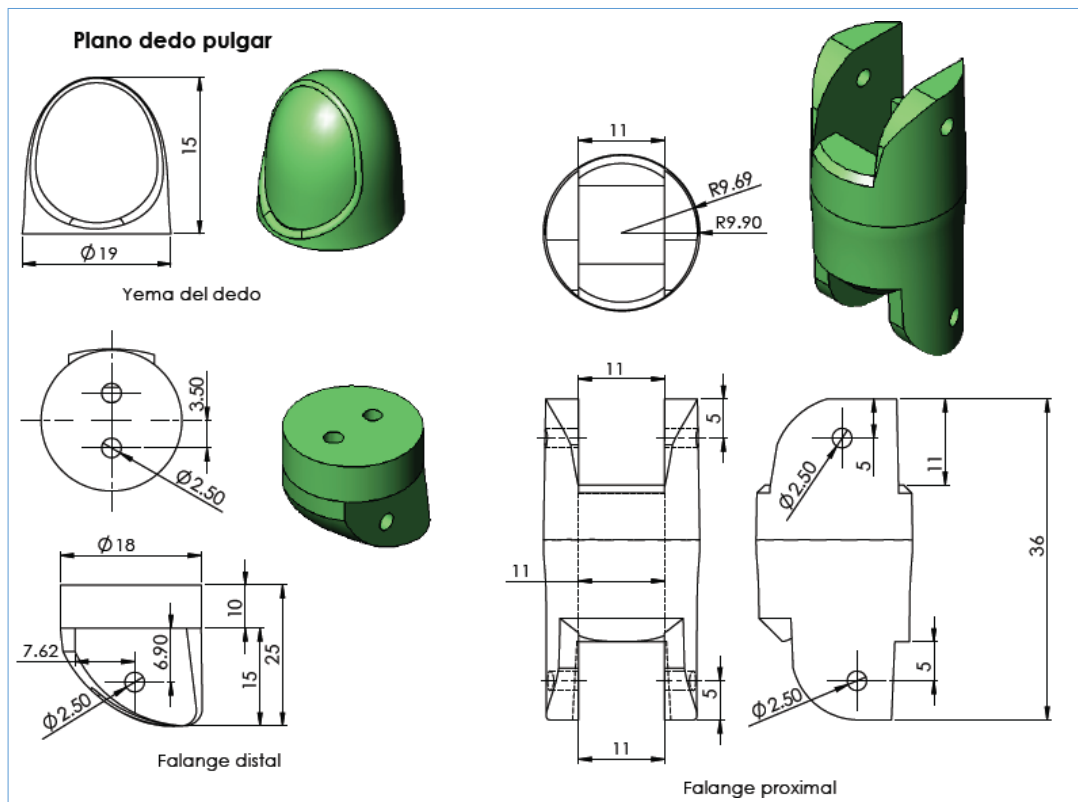


Plano dedo índice





Plano dedo pulgar



Chasis para servomotores

