



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Rediseño y repotenciación de un prototipo robótico rehabilitador de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA), controlado a lazo cerrado e implementado en software libre**

Quinga Acosta, Luis Israel y Sarzosa García, Darwin Santiago

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Torres Muñoz, Guido Rafael

27 de agosto del 2021

Latacunga



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "REDISEÑO Y REPOTENCIACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO REHABILITADOR DE LOS DEDOS DE LAS MANOS PARA PERSONAS CON DAÑO CEREBRAL ADQUIRIDO (DCA), CONTROLADO A LAZO CERRADO E IMPLEMENTADO EN SOFTWARE LIBRE" fue realizado por los señores Quinga Acosta, Luis Israel y Sarzoza García, Darwin Santiago el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 26 de agosto del 2021



.....  
GUIDO RAFAEL  
TORRES MUÑOZ

Ing. Torres Muñoz, Guido Rafael

C. C. 1801624332

**DIRECTOR**



### Document Information

Analyzed document	TESIS QUINGA SARZOSA.pdf (0111683188)
Submitted	8/25/2021 10:01:00 PM
Submitted by	Lorena Ibarra
Submitter email	lorebarra@yahoo.es
Similarity	9%
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.arkundl.com

### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/24347/1/T-ESPEL-MEC-0211.pdf">http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/24347/1/T-ESPEL-MEC-0211.pdf</a> Fetched: 5/26/2021 9:11:07 PM		1
<b>SA</b>	TESIS QUINATOA_ERIKA_GUANO_EDUARDO (1).pdf Document TESIS QUINATOA_ERIKA_GUANO_EDUARDO (1).pdf (098830764)		4
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14483/1/T-ESPEL-MEC-0134.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14483/1/T-ESPEL-MEC-0134.pdf</a> Fetched: 3/25/2020 5:18:50 AM		22
<b>W</b>	URL: <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14483">http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14483</a> Fetched: 8/25/2021 10:01:00 PM		8
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10187/1/T-ESPEL-MEC-0061.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10187/1/T-ESPEL-MEC-0061.pdf</a> Fetched: 2/7/2020 7:10:10 AM		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/37801312-Protocolo-de-exoesqueleto-para-la-rehabilitacion-motora-de-los-dedos-de-la-mano-humana.html">https://docplayer.es/37801312-Protocolo-de-exoesqueleto-para-la-rehabilitacion-motora-de-los-dedos-de-la-mano-humana.html</a> Fetched: 12/10/2019 9:18:25 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15646">http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15646</a> Fetched: 8/25/2021 10:01:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="http://www.mecamex.net/Libros/2017-Libro-InnovacionesEnMecatronica.pdf">http://www.mecamex.net/Libros/2017-Libro-InnovacionesEnMecatronica.pdf</a> Fetched: 12/14/2020 7:23:46 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4710575&amp;info=resumen&amp;idioma=ENG">http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4710575&amp;info=resumen&amp;idioma=ENG</a> Fetched: 8/25/2021 10:01:00 PM		1



Ing. Gueldo Rafael  
Torres Muñoz

Ing. Torres Muñoz, Gueldo Rafael  
C.C.: 1801624352  
Director



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Nosotros, **Quinga Acosta, Luis Israel**, con cédula de ciudadanía N° 172245730-4 y **Sarzosa Garcia, Darwin Santiago** con cédula de ciudadanía N° 050406496-5 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"REDISEÑO Y REPOTENCIACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO REHABILITADOR DE LOS DEDOS DE LAS MANOS PARA PERSONAS CON DAÑO CEREBRAL ADQUIRIDO (DCA), CONTROLADO A LAZO CERRADO E IMPLEMENTADO EN SOFTWARE LIBRE"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Latacunga, 25 de agosto del 2021**



**Quinga Acosta, Luis Israel**

C.C.: 172245730-4



**Sarzosa Garcia, Darwin Santiago**

C.C.: 050406496-5



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros, **Quinga Acosta, Luis Israel**, con cédula de ciudadanía N° 172245730-4 y **Sarzosa García, Darwin Santiago** con cédula de ciudadanía N° 050406496-5, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"REDISEÑO Y REPOTENCIACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO REHABILITADOR DE LOS DEDOS DE LAS MANOS PARA PERSONAS CON DAÑO CEREBRAL ADQUIRIDO (DCA), CONTROLADO A LAZO CERRADO E IMPLEMENTADO EN SOFTWARE LIBRE"**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Latacunga, 25 de agosto del 2021**

  
.....  
**Quinga Acosta, Luis Israel**

C.C.: 172245730-4

  
.....  
**Sarzosa García, Darwin Santiago**

C.C.: 050406496-5

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de titulación lo dedico a mi familia quienes han sabido apoyarme y aconsejarme durante este periodo de mi vida.

A mi madre Sandra Acosta y mi padre Luis Quinga quienes son las personas más importantes en mi vida ya que siempre confían en mí y me apoyan incondicionalmente.

A mis hermanas Tatiana y Yesenia y a mi sobrino Carlos quienes de manera inconsciente me brindaron apoyo y razones para continuar en este camino.

Quiero dar mi agradecimiento a mis amigos quienes con sus diferentes personalidades hicieron de la etapa universitaria una de las experiencias más memorables en mi vida brindándome alegrías y anécdotas de aprendizaje.

Quiero extender mi agradecimiento a mi compañero de tesis por el apoyo durante el desarrollo de la tesis.

**Luis Quinga**

Este trabajo se lo dedico a mi familia y amigos que compartieron este camino conmigo

A mi padre Franklin y a mi madre Isabel los cuales siempre confiaron en mi sin importar las caídas que tuve y gracias al apoyo de ellos en todo momento siempre pude contar con ellos.

Y quiero agradecer a mi compañero de tesis el cual supo entenderme cualquier inconveniente que tuve en desarrollo de la misma y a su familia por brindarme un espacio seguro durante lo último del desarrollo de la tesis.

**Darwin Sarzosa**

## **Agradecimiento**

Extiendo un agradecimiento al Ing. Guido Torres quien es mi tutor de tesis por ayudarme con su conocimiento para poder realizar la tesis y de esta manera poder finalizar.

Quiero extender mi agradecimiento a mi familia por la compañía por la compañía brindada, a Cinthya quien durante la etapa final de la carrera supo apoyarme y motivarme para así poder culminar una de las metas más importantes en mi vida.

Quiero agradecer eternamente a mi abuela Rosa Piltaxi por haberme dado un ejemplo de vida y de lucha constante demostrando que siempre hay un camino correcto a seguir.

**Luis Quinga**

Quiero agradecer a la vida por darme la oportunidad de haber cumplido una meta.

Quiero agradecer a mi familia por siempre confiar en mi aun cuando en ocasiones yo no lo hacía. También quiero agradecer a mi tutor por orientarnos en el desarrollo de la tesis y el apoyo de mi compañero Luis para el desarrollo del proyecto.

**Darwin Sarzosa**

**Tabla de contenido**

<b>Carátula</b> .....	1
<b>Certificación</b> .....	2
<b>Resultados de análisis de Urkund</b> .....	3
<b>Responsabilidad de autoría</b> .....	4
<b>Autorización de publicación</b> .....	5
<b>Dedicatoria</b> .....	6
<b>Agradecimiento</b> .....	7
<b>Índice de contenido</b> .....	8
<b>Índice de tablas</b> .....	14
<b>Índice de figuras</b> .....	17
<b>Resumen</b> .....	25
<b>Abstract</b> .....	26
<b>Generalidades</b> .....	27
<b>Antecedentes</b> .....	27
<b>Planteamiento del problema</b> .....	29
<b>Justificación e importancia</b> .....	30
<b>Objetivos</b> .....	31
<b>Objetivo General</b> .....	31
<b>Objetivos Específicos</b> .....	31

<b>Hipótesis</b> .....	32
<b>VARIABLES DE INVESTIGACIÓN</b> .....	32
<i>Dependiente</i> .....	32
<i>Independiente</i> .....	32
<b>Metodología de desarrollo</b> .....	33
<i>Rediseño de la máquina</i> .....	33
<i>Pruebas de funcionamiento</i> .....	34
<i>Análisis de resultados</i> .....	34
<b>Marco teórico</b> .....	35
<b>Introducción</b> .....	35
<b>Cerebro</b> .....	35
<b>Daño cerebral adquirido (DCA)</b> .....	37
<i>Traumatismo craneoencefálico (TCE)</i> .....	37
<i>Accidente cerebrovascular (ACV)</i> .....	38
<b>Secuelas en pacientes con DCA</b> .....	40
<i>Secuelas a nivel motriz</i> .....	40
<i>Secuelas de personalidad y emocionales</i> .....	41
<i>Secuelas a nivel cognitivo</i> .....	41
<i>Secuelas de comunicación</i> .....	42
<i>Secuelas sensoriales y sensitivas</i> .....	42
<i>Secuelas en las actividades diarias</i> .....	43

Rehabilitación para pacientes con DCA.....	43
Terapia ocupacional .....	43
<i>Fases de la terapia ocupacional</i> .....	44
Antropometría de la mano humana .....	45
<i>La mano humana</i> .....	45
<i>Longitud de la mano</i> .....	46
<i>Fuerza de la mano</i> .....	49
Análisis del robot AMADEO.....	50
<i>Programas que tiene el robot AMADEO</i> .....	51
Componentes del equipo.....	52
<i>Arduino Nano</i> .....	52
<i>Java</i> .....	54
<i>Servomotores</i> .....	54
<i>Guías lineales</i> .....	55
Características de las guías lineales MGN .....	56
Montaje de una guía lineal.....	57
Rediseño y reconstrucción de los componentes.....	58
Introducción.....	58
Diseño de los elementos mecánicos.....	58
<i>Análisis estático del mecanismo manivela-biela-corredera</i> .....	58
<i>Análisis dinámico del mecanismo manivela-biela-corredera</i> .....	64

<b>Análisis de la posición .....</b>	<b>65</b>
<b>Análisis de la velocidad .....</b>	<b>67</b>
<b>Análisis de la aceleración .....</b>	<b>68</b>
<b><i>Análisis por software del mecanismo manivela-biela-corredera .....</i></b>	<b>69</b>
<b>Código en Matlab para análisis de parámetros .....</b>	<b>70</b>
<b><i>Análisis de esfuerzos por software de los elementos mecánicos .....</i></b>	<b>74</b>
<b>Análisis de esfuerzos de la manivela .....</b>	<b>74</b>
<b>Análisis de esfuerzos de la biela .....</b>	<b>77</b>
<b>Análisis de esfuerzos del soporte de dedos .....</b>	<b>80</b>
<b><i>Análisis de movimiento del mecanismo manivela-biela-corredera .....</i></b>	<b>83</b>
<b>Diseño eléctrico del control .....</b>	<b>86</b>
<b>Diseño mediante computador del sistema de control .....</b>	<b>88</b>
<b><i>Organización de los datos .....</i></b>	<b>88</b>
<b><i>Comunicación Serial y lógica del microcontrolador .....</i></b>	<b>96</b>
<b>Descripción del software .....</b>	<b>99</b>
<b>Construcción y montaje del equipo rehabilitador .....</b>	<b>110</b>
<b><i>Construcción de la estructura base .....</i></b>	<b>110</b>
<b><i>Construcción de la plantilla de mano .....</i></b>	<b>113</b>
<b><i>Construcción de la cubierta de la estructura .....</i></b>	<b>113</b>
<b><i>Construcción del mecanismo manivela-biela-corredera .....</i></b>	<b>114</b>
<b><i>Construcción del soporte de la mano .....</i></b>	<b>118</b>

<i>Construcción del apoyo del antebrazo</i> .....	121
<i>Construcción del sistema eléctrico</i> .....	122
<b>Ensamble del equipo rehabilitador de dedos</b> .....	127
<i>Ensamble del mecanismo manivela-biela-corredera</i> .....	127
<i>Acoplamiento del soporte del pulgar e imanes</i> .....	130
<i>Montaje de la estructura base y cubierta en la mesa de trabajo</i> .....	132
<i>Ensamble del soporte de la mano</i> .....	133
<b>Ensamble final</b> .....	137
<i>Ensamble del sistema eléctrico</i> .....	138
<b>Costos de producción</b> .....	140
<b>Pruebas y resultados</b> .....	146
<b>Evaluación del funcionamiento del equipo respecto a los parámetros de desplazamiento, velocidad y repeticiones de ejercicios de los dedos</b> .....	146
<i>Datos Personales</i> .....	146
<b>Análisis de resultados de los ejercicios</b> .....	148
<b>Desplazamiento manual de los dedos (ejercicio 1)</b> .....	148
<b>Desplazamiento automático de los dedos (ejercicio 2)</b> .....	155
<b>Semi-recorrido de extensión y contracción (ejercicio 3)</b> .....	161
<b>Selección específica para extracción y contracción individual de los dedos (ejercicio 4)</b> .....	167
<b>Repeticiones automáticas de selección aleatoria para extensión y contracción individual (ejercicio 5)</b> .....	172

<b>Validación de la hipótesis .....</b>	<b>179</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>181</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>181</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>185</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>187</b>
<b>Anexos .....</b>	<b><u>191</u></b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano dominante del hombre.....</i>	47
<b>Tabla 2</b> <i>Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano no dominante del hombre.....</i>	48
<b>Tabla 3</b> <i>Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano dominante de la mujer.....</i>	48
<b>Tabla 4</b> <i>Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano no dominante de la mujer.....</i>	49
<b>Tabla 5</b> <i>Características técnicas del Arduino Nano.....</i>	53
<b>Tabla 6</b> <i>Características técnicas del servomotor SunFounder 20Kg SF3218MG .....</i>	55
<b>Tabla 7</b> <i>Propiedades de la poliamida.....</i>	75
<b>Tabla 8</b> <i>Propiedades del acero ASTM A36 .....</i>	81
<b>Tabla 9</b> <i>Dedo correspondiente al pin del servocontrolador Pololu.....</i>	87
<b>Tabla 10</b> <i>Hoja de procesos de la estructura base .....</i>	110
<b>Tabla 11</b> <i>Hoja de procesos del mecanismo manivela-biela-corredera.....</i>	114
<b>Tabla 12</b> <i>Hoja de procesos del soporte de muñeca.....</i>	118
<b>Tabla 13</b> <i>Hoja de procesos del sistema eléctrico del rehabilitador.....</i>	122
<b>Tabla 14</b> <i>Costo de materiales del rehabilitador de dedos.....</i>	140

<b>Tabla 15</b>	<i>Costo de procedimientos para el montaje del rehabilitador de dedos.....</i>	143
<b>Tabla 16</b>	<i>Gasto total del rehabilitador de dedos.....</i>	145
<b>Tabla 17</b>	<i>Desplazamiento de los dedos del paciente.....</i>	147
<b>Tabla 18</b>	<i>Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 1 .....</i>	149
<b>Tabla 19</b>	<i>Velocidad de desplazamiento de los dedos del ejercicio 1.....</i>	151
<b>Tabla 20</b>	<i>Fuerza por sesiones del ejercicio 1 .....</i>	153
<b>Tabla 21</b>	<i>Número de repeticiones del ejercicio 1 .....</i>	155
<b>Tabla 22</b>	<i>Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 2 .....</i>	156
<b>Tabla 23</b>	<i>Velocidad por sesiones de los dedos del ejercicio 2.....</i>	158
<b>Tabla 24</b>	<i>Fuerzas por sesiones del ejercicio 2 .....</i>	159
<b>Tabla 25</b>	<i>Número de repeticiones del ejercicio 2 .....</i>	161
<b>Tabla 26</b>	<i>Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 3 .....</i>	162
<b>Tabla 27</b>	<i>Velocidad por sesiones de los dedos del ejercicio 3.....</i>	164
<b>Tabla 28</b>	<i>Fuerzas por sesiones del ejercicio 3 .....</i>	165
<b>Tabla 29</b>	<i>Número de repeticiones del ejercicio 3 .....</i>	167
<b>Tabla 30</b>	<i>Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 4 .....</i>	168
<b>Tabla 31</b>	<i>Velocidad por sesiones de los dedos del ejercicio 4.....</i>	169

<b>Tabla 32</b> <i>Fuerza por sesiones del ejercicio 4</i> .....	170
<b>Tabla 33</b> <i>Número de repeticiones del ejercicio 4</i> .....	171
<b>Tabla 34</b> <i>Desplazamiento de las sesiones de los dedos del ejercicio 5</i> .....	173
<b>Tabla 35</b> <i>Velocidad por sesiones de desplazamiento de los dedos del ejercicio 5</i> .....	175
<b>Tabla 36</b> <i>Fuerza por sesiones del ejercicio 5</i> .....	176
<b>Tabla 37</b> <i>Número de repeticiones del ejercicio 5</i> .....	178

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Lóbulos del cerebro</i> .....	37
<b>Figura 2</b> <i>Ictus isquémico</i> .....	39
<b>Figura 3</b> <i>Ictus hemorrágico</i> .....	40
<b>Figura 4</b> <i>Sistema óseo, tendones, ligamentos y sistema articular de la mano</i> .....	46
<b>Figura 5</b> <i>Ajustabilidad del robot AMADEO</i> .....	50
<b>Figura 6</b> <i>Arduino Nano</i> .....	53
<b>Figura 7</b> <i>Sistemas operativos para la ejecución de Java</i> .....	54
<b>Figura 8</b> <i>Partes de la guía lineal MGN</i> .....	57
<b>Figura 9</b> <i>Método de montaje para evitar la vibración</i> .....	57
<b>Figura 10</b> <i>Mecanismo biela-manivela-corredera</i> .....	59
<b>Figura 11</b> <i>Diagrama de cuerpo libre en el nodo A</i> .....	59
<b>Figura 12</b> <i>Ángulos del mecanismo cuando el motor genera más fuerza</i> .....	61
<b>Figura 13</b> <i>Diagrama de cuerpo libre en el nodo B</i> .....	61
<b>Figura 14</b> <i>Diagrama de cuerpo libre en el nodo B con la proyección de la fuerza máxima</i> .....	62
<b>Figura 15</b> <i>Diagrama de cuerpo libre en el nodo C</i> .....	63
<b>Figura 16</b> <i>Eslabones y ángulos para el análisis dinámico del mecanismo</i> .....	65

<b>Figura 17</b>	<i>Análisis vectorial del mecanismo manivela-biela-corredera.....</i>	66
<b>Figura 18</b>	<i>Dimensiones del mecanismo .....</i>	69
<b>Figura 19</b>	<i>Desplazamiento de los ángulos del mecanismo.....</i>	71
<b>Figura 20</b>	<i>Posición del mecanismo vs ángulo de la manivela .....</i>	72
<b>Figura 21</b>	<i>Velocidad del mecanismo vs ángulo de la manivela.....</i>	73
<b>Figura 22</b>	<i>Ángulo del mecanismo vs ángulo de la manivela.....</i>	73
<b>Figura 23</b>	<i>Esfuerzos presentes en la manivela .....</i>	74
<b>Figura 24</b>	<i>Análisis de tensión de la manivela.....</i>	75
<b>Figura 25</b>	<i>Análisis de desplazamientos de la manivela .....</i>	76
<b>Figura 26</b>	<i>Factor de seguridad de la manivela.....</i>	77
<b>Figura 27</b>	<i>Esfuerzos presentes en la biela.....</i>	77
<b>Figura 28</b>	<i>Análisis de tensión de la biela.....</i>	78
<b>Figura 29</b>	<i>Análisis de desplazamiento de la biela .....</i>	79
<b>Figura 30</b>	<i>Análisis del factor de seguridad de la biela .....</i>	80
<b>Figura 31</b>	<i>Esfuerzos presentes en el soporte de dedos .....</i>	80
<b>Figura 32</b>	<i>Análisis de tensión del soporte de dedos .....</i>	82
<b>Figura 33</b>	<i>Análisis de desplazamiento del soporte de dedos.....</i>	82

<b>Figura 34</b> <i>Análisis del factor de seguridad del soporte de dedos</i> .....	83
<b>Figura 35</b> <i>Mecanismo manivela-biela-corredera ensamblado</i> .....	84
<b>Figura 36</b> <i>Desplazamiento lineal del patín sobre el riel</i> .....	84
<b>Figura 37</b> <i>Velocidad lineal del patín sobre el riel</i> .....	85
<b>Figura 38</b> <i>Aceleración del patín sobre el riel</i> .....	86
<b>Figura 39</b> <i>Diagrama esquemático de conexión</i> .....	86
<b>Figura 40</b> <i>Flujograma de la función escribir</i> .....	89
<b>Figura 41</b> <i>Flujograma de la función leer</i> .....	90
<b>Figura 42</b> <i>Flujograma de la función editar</i> .....	91
<b>Figura 43</b> <i>Flujograma de la función editar</i> .....	92
<b>Figura 44</b> <i>HMI del ingreso de datos del paciente</i> .....	93
<b>Figura 45</b> <i>Anuncio de falta de ingreso de datos</i> .....	93
<b>Figura 46</b> <i>Flujograma del ingreso de datos del paciente</i> .....	94
<b>Figura 47</b> <i>Ventana de selección del paciente</i> .....	95
<b>Figura 48</b> <i>Ventana de anuncio de eliminación del paciente</i> .....	95
<b>Figura 49</b> <i>Flujograma de selección, eliminación e ingreso del paciente</i> .....	96
<b>Figura 50</b> <i>Flujograma de comunicación serial y microcontrolador</i> .....	98

<b>Figura 51</b> <i>Flujograma de selección de puertos</i> .....	99
<b>Figura 52</b> <i>Pantalla de inicio</i> .....	100
<b>Figura 53</b> <i>No detección del puerto de comunicación</i> .....	100
<b>Figura 54</b> <i>Mensaje de alerta de error de conexión</i> .....	101
<b>Figura 55</b> <i>Ventana del listado de pacientes</i> .....	101
<b>Figura 56</b> <i>Mensaje de advertencia de no creación de pacientes</i> .....	102
<b>Figura 57</b> <i>Ventana para el ingreso de datos del paciente</i> .....	102
<b>Figura 58</b> <i>Mensaje de que faltan datos por llenar</i> .....	103
<b>Figura 59</b> <i>Ventana para configurar posición de los dedos</i> .....	103
<b>Figura 60</b> <i>Ventana con el listado de pacientes creados</i> .....	104
<b>Figura 61</b> <i>Ventana de edición de datos del paciente</i> .....	104
<b>Figura 62</b> <i>Mensaje de alerta de selección del paciente</i> .....	105
<b>Figura 63</b> <i>Ventana de selección de ejercicio a realizar</i> .....	106
<b>Figura 64</b> <i>Ventana del ejercicio 1</i> .....	107
<b>Figura 65</b> <i>Ventana del ejercicio 2</i> .....	107
<b>Figura 66</b> <i>Ventana del ejercicio 3</i> .....	108
<b>Figura 67</b> <i>Ventana del ejercicio 4</i> .....	109

<b>Figura 68</b> <i>Ventana del ejercicio 5</i> .....	109
<b>Figura 69</b> <i>Base de la estructura</i> .....	112
<b>Figura 70</b> <i>Estructura de soporte</i> .....	112
<b>Figura 71</b> <i>Plantilla de mano</i> .....	113
<b>Figura 72</b> <i>Cubierta de la estructura</i> .....	114
<b>Figura 73</b> <i>Manivela</i> .....	116
<b>Figura 74</b> <i>Biela</i> .....	116
<b>Figura 75</b> <i>Soporte de dedos</i> .....	117
<b>Figura 76</b> <i>Guía Lineal MGN 12H</i> .....	117
<b>Figura 77</b> <i>Base principal</i> .....	119
<b>Figura 78</b> <i>Base secundaria</i> .....	120
<b>Figura 79</b> <i>Base auxiliar</i> .....	120
<b>Figura 80</b> <i>Base de la muñeca</i> .....	121
<b>Figura 81</b> <i>Lengüeta</i> .....	121
<b>Figura 82</b> <i>Extensores del antebrazo</i> .....	122
<b>Figura 83</b> <i>Arduino Nano</i> .....	124
<b>Figura 84</b> <i>Servocontrolador Mini Maestro 12 de Pololu</i> .....	125

<b>Figura 85</b> <i>Servomotor SunFounder SF3218MG</i> .....	125
<b>Figura 86</b> <i>Paro de emergencia</i> .....	126
<b>Figura 87</b> <i>Fuente de poder MCH-K305D</i> .....	126
<b>Figura 88</b> <i>Resistencias eléctricas</i> .....	127
<b>Figura 89</b> <i>Acoplamiento de los servomotores a la base</i> .....	128
<b>Figura 90</b> <i>Ensamble de soporte para dedos y patines</i> .....	128
<b>Figura 91</b> <i>Unión de las guías lineales y soporte de dedos a la estructura base</i> .....	129
<b>Figura 92</b> <i>Unión manivela-biela</i> .....	129
<b>Figura 93</b> <i>Unión de la manivela al servomotor</i> .....	130
<b>Figura 94</b> <i>Unión de la biela al soporte de dedos</i> .....	130
<b>Figura 95</b> <i>Unión del soporte del pulgar al servomotor</i> .....	131
<b>Figura 96</b> <i>Acoplamiento de la plantilla de mano</i> .....	131
<b>Figura 97</b> <i>Acople de los imanes de neodimio en los soportes de dedos</i> .....	132
<b>Figura 98</b> <i>Montaje de la estructura base y cubierta en la mesa de trabajo</i> .....	132
<b>Figura 99</b> <i>Soportes primarios y secundarios</i> .....	133
<b>Figura 100</b> <i>Base principal y guías lineales</i> .....	133
<b>Figura 101</b> <i>Base secundaria y patín</i> .....	134

<b>Figura 102</b> <i>Base principal y secundaria</i> .....	134
<b>Figura 103</b> <i>Base auxiliar y lengüeta</i> .....	135
<b>Figura 104</b> <i>Base auxiliar y secundaria</i> .....	135
<b>Figura 105</b> <i>Acople de las bases</i> .....	136
<b>Figura 106</b> <i>Ensamble del soporte de muñeca y el soporte del antebrazo</i> .....	137
<b>Figura 107</b> <i>Ensamble final de la parte mecánica</i> .....	137
<b>Figura 108</b> <i>Colocación del paro de emergencia</i> .....	138
<b>Figura 109</b> <i>Conexión de los servomotores al Mini Maestro Pololu</i> .....	139
<b>Figura 110</b> <i>Soldadura del divisor del voltaje y Arduino nano</i> .....	139
<b>Figura 111</b> <i>Conexión final del sistema eléctrico</i> .....	140
<b>Figura 112</b> <i>Pantalla Inicial de guardado de datos iniciales del paciente</i> .....	147
<b>Figura 113</b> <i>Interfaz gráfica del ejercicio 1</i> .....	149
<b>Figura 114</b> <i>Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 1</i> .....	150
<b>Figura 115</b> <i>Velocidad vs sesiones del ejercicio 1</i> .....	152
<b>Figura 116</b> <i>Fuerza vs sesiones del ejercicio 1</i> .....	154
<b>Figura 117</b> <i>Interfaz gráfica del ejercicio 2</i> .....	156
<b>Figura 118</b> <i>Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 2</i> .....	157

<b>Figura 119</b>	<i>Velocidad vs sesiones del ejercicio 2</i> .....	159
<b>Figura 120</b>	<i>Fuerza vs sesiones del ejercicio 2</i> .....	160
<b>Figura 121</b>	<i>Interfaz gráfica del ejercicio 3</i> .....	162
<b>Figura 122</b>	<i>Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 3</i> .....	163
<b>Figura 123</b>	<i>Velocidad vs sesiones del ejercicio 3</i> .....	165
<b>Figura 124</b>	<i>Fuerza vs sesiones del ejercicio 3</i> .....	166
<b>Figura 125</b>	<i>Interfaz gráfica del ejercicio 4</i> .....	168
<b>Figura 126</b>	<i>Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 4</i> .....	169
<b>Figura 127</b>	<i>Velocidad vs sesiones del ejercicio 4</i> .....	170
<b>Figura 128</b>	<i>Fuerza vs sesiones del ejercicio 4</i> .....	171
<b>Figura 129</b>	<i>Interfaz gráfica del ejercicio 5</i> .....	173
<b>Figura 130</b>	<i>Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 5</i> .....	174
<b>Figura 131</b>	<i>Velocidad vs sesiones del ejercicio 5</i> .....	176
<b>Figura 132</b>	<i>Fuerza vs sesiones del ejercicio 5</i> .....	177

## Resumen

El presente trabajo de titulación está orientado al rediseño y repotenciación de una máquina para la rehabilitación para los dedos de las manos de las personas que han sido afectadas por un daño cerebral adquirido (DCA), con el objetivo de mejorar la movilidad afectada la máquina fue diseñada para la rehabilitación alternada de los dedos de las manos, esta máquina puede intervenir desde la fase 2 de la terapia ocupacional bajo la supervisión del terapeuta, permitiendo así un control del avance del tratamiento y determinar la recuperación del paciente, esto promueve el uso y desarrollo de tecnologías en el área de la salud. La máquina de rehabilitación relaciona las áreas de la mecatrónica y la salud ya que la máquina cuenta con elementos eléctricos, mecánicos y de control para poder desarrollar ejercicios de manera autónoma y estos puedan ayudar a la rehabilitación de un paciente, previamente al desarrollo de los ejercicios un terapeuta deberá intervenir teniendo conocimiento de la máquina y del programa que lo controla, el terapeuta deberá ingresar los datos del paciente, la longitud de desplazamiento máximo de los dedos, finalizada esta etapa de preparación se procede a la selección del ejercicio de los 5 tipos que ofrece la programación, colocación de velocidad de movimiento y número de repeticiones del ejercicio que el terapeuta considere necesario que realice el paciente acorde a sus condiciones de movilidad limitada.

Palabras clave:

- **MANOS - REHABILITACIÓN**
- **DAÑO CEREBRAL ADQUIRIDO**
- **ROBOT AMADEO**

## **Abstract**

This degree work is oriented to the redesign and repowering of a machine for the rehabilitation of the fingers of the hands of people who have been affected by an acquired brain injury (DCA), with the aim of improving the affected mobility the machine was designed for the alternate rehabilitation of the fingers of the hands, this machine can intervene from phase 2 of occupational therapy under the supervision of the therapist, thus allowing a control of the progress of treatment and determine the patient's recovery, this promotes the use and development of technologies in the area of health. The rehabilitation machine relates the areas of mechatronics and health as the machine has electrical, mechanical and control elements to develop exercises autonomously and these can help the rehabilitation of a patient, prior to the development of the exercises a therapist must intervene having knowledge of the machine and the program that controls it, Once this preparation stage is completed, the therapist must enter the patient's data, the maximum displacement length of the fingers, the selection of the exercise from the 5 types offered by the programming, the speed of movement and the number of repetitions of the exercise that the therapist considers necessary for the patient to perform according to his limited mobility conditions.

Key words:

- **HANDS - REHABILITATION**
- **ACQUIRED BRAIN INJURY**
- **AMADEO ROBOT**

## Capítulo I

### 1. Generalidades

#### 1.1. Antecedentes

En el mundo actualmente existe un enfoque de la robótica para ayudar a mejorar la calidad de vida de pacientes con la ayuda de la ciencia y la tecnología es por ende que existen varios equipos de rehabilitación en el mercado internacional para la recuperación motriz de los miembros superiores de personas con daño cerebral adquirido, en el Ecuador son pocos los centros fisioterapéuticos que cuentan con equipos robóticos pese a que desde el 2010 el país cuenta con reformas políticas que permiten iniciar un cambio en el proceso de rehabilitación aplicando tecnologías las cuales presentan una gran ventaja primero permitiendo almacenar información del paciente junto con su avance en el proceso de rehabilitación y el de brindar un soporte visual que motiva y promueve el desarrollo de la terapia mejorando la eficiencia de la misma, además permite acceder al proceso de rehabilitación en el menor tiempo posible evitando que el paso del tiempo afecte el proceso limitando una rehabilitación.

Es por ello que en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga se han realizado trabajos de titulación relacionados a la rehabilitación de las capacidades motrices de las personas con daño cerebral adquirido dando en especial de las partes superiores del cuerpo además de las manos y dedos de personas con algún tipo de dificultad brindando así una opción tecnológica e innovadora para los centros de rehabilitación permitiendo que más personas puedan acceder a una rehabilitación temprana y oportuna además de brindar el acceso a personas que no poseen los recursos económicos necesarios para hacerse atender en un centro privado, por ello este trabajo está orientado al rediseño y repotenciación de la máquina con control a lazo cerrado e implementación de un software libre que ayude a la terapia de

rehabilitación para recuperar la motricidad de los dedos de las manos de pacientes que presenten daño cerebral lo cual se planteó en el proyecto “Diseño y construcción de un dispositivo robótico para la terapia de los dedos de la mano asistido por computador, para paciente con daño cerebral adquirido (DCA)” realizado por Guido Torres y Andrés Hidrovo. Este trabajo sirve como base al presente proyecto ya que presentó una máquina para la rehabilitación de los dedos de la mano izquierda para pacientes con daño cerebral adquirido lo cual presenta un mecanismo biela manivela además presentar un software privativo en la cual está realizado la interfaz gráfica para pueda utilizar el terapeuta. (Hidrovo Llor & Torres Llerena, 2018)

Para el diseño y construcción de una máquina para la rehabilitación de los dedos de las manos de las personas con daño cerebral adquirido hay factores importantes en tener en cuenta como lo es la portabilidad de la máquina así como la utilización de un software libre que funcione con ella, que el material de los mecanismos sea lo suficiente resistente para realizar su trabajo, el tipo de motores que se vayan usar tienen que ser precisos y sirvan para realizar un control del desplazamiento y un factor importante en la máquina es que tenga una buena ergonomía que brinde la suficiente comodidad y confianza a los pacientes que vayan usar la máquina.

Según (Avila, 2019) el objetivo de la creación de una máquina para rehabilitación de los dedos de una mano es que la persona recupere la motricidad fina pudiéndose valer por sí misma haciendo que esta no pierda su independencia además que esta debe ayudar a que el paciente recupere la motricidad parcial y si es posible total, además de evitar a futuro deformaciones por la falta de movilidad, sin embargo el rehabilitador debe brindar de comodidad al paciente y esto se logra si su diseño es adaptable y seguro.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga sí registran trabajos realizados con respecto a rehabilitadores de los dedos de una mano como lo son el de (Avila, 2019) el realizó la investigación de las causas de cuál es la principal causante para que una persona tenga un daño cerebral adquirido y este afecte a la motricidad de una persona además de aportar con los tipos de rehabilitación existentes y el de (Hidrovo Llor & Torres Llerena, 2018) el cual realizó el diseño y fabricación de una rehabilitador de los dedos de la mano izquierda con un control de software no libre como los es LABVIEW para pacientes que tienen daño cerebral adquirido (DCA) y lograr una rehabilitación más completa para que este pueda operar la máquina mientras que el proyecto de (Avila, 2019) utiliza un tipo de rehabilitador diferente y lo hace a través de robótica blanda creando un prototipo de poco peso y suave arquitectura robótica.

## **1.2. Planteamiento del problema**

En el mundo de la rehabilitación autónoma, la tecnología ha desarrollado un gran avance. Pero actualmente dispositivos especializados para diferentes terapias son extremadamente caros y ni siquiera asequibles para centros de rehabilitación o centros de salud por lo específico de la máquina al tratamiento enfocado y no haber la suficiente competencia en el mercado para tales máquinas. Se puede declarar la no existencia de un equipo en los centros especializados para tratar la terapia muscular de los dedos de la mano, producido por el ictus, el cual abarca la zona sierra centro del país respecto al DCA.

En el país existe el deseo de avanzar tecnológicamente con grandes deseos de superación además de encontrar independencia en el campo fundamentalmente en el sector de la salud, pues es primordial garantizar una buena calidad de vida, al menor

costo posible. Desafortunadamente por diversas situaciones económicas a muchos pacientes no les ha sido posible solventar tal necesidad. A pesar de tales inconvenientes las personas con discapacidades motrices necesitan rehabilitación. La recuperación es esencial además requiere adaptación a las necesidades de cada persona. A pesar de existir profesionales en el campo de la rehabilitación los instrumentos no están a la altura de la calidad de los tratamientos.

En el proyecto “Diseño y construcción de un dispositivo robótico para la terapia de los dedos de la mano asistido por computador, para paciente con daño cerebral adquirido (DCA)” desarrollado por Guido Torres y Andrés Hidrovo, la máquina está construida para la rehabilitación a la mano izquierda de pacientes con DCA por lo que es necesario la construcción de un rehabilitador de las dos manos para que los pacientes puedan acceder a una rehabilitación complementaria, el proyecto utilizó para el control un software privativo para su funcionamiento el cual necesita la adquisición de una licencia paga anual a National Instruments.

### **1.3. Justificación e importancia**

El proyecto está enfocado a ayudar en las terapias de rehabilitación física motriz, a personas que con daño cerebral adquirido. Para mejorar su habilidad sensorial y motriz, siempre y cuando esta se realice de forma continua. Se empleará un sistema robotizado para realizar la maniobrabilidad de los dedos de la mano a través del equipo, considerando las tolerancias que deben existir sobre la flexibilidad de las falanges, ejecutados por sensores y actuadores los mismos que son controladas y monitoreadas por un computador. Se puede establecer que no existen centros que ofrezcan rehabilitación de la terapia muscular de los dedos de la mano de forma autónoma, enfatizando que esto es un equipo mecatrónico que debe tener la capacidad de

flexionar las falanges de los dedos a mediante un control electrónico, razón indispensable para generar una investigación relacionada sobre este tema.

Un sistema para la rehabilitación de las manos de un paciente sin la restricción de que sea solo para una mano o sin la posibilidad de intercambiar de mano, además de mejorar el alcance del público objetivo adiciona más importancia al desarrollo de la máquina de rehabilitación ya que pacientes con problemas de moviidades en la mano derecha o problemas en las dos manos, se veían limitados.

El alcance de un software libre es muy diverso y favorable, ya que al no tener costo de licencia reduce el precio del producto y lo hace más llamativo a los interesados en el proyecto. Además de no poseer restricciones en su distribución, con lo cual su portabilidad hace que cualquier persona con el conocimiento requerido pueda utilizar el software en cualquier computadora. Una fácil instalación y distribución da confianza a los usuarios, además no tener la necesidad de pagar suscripciones por el uso de licencias de software privativos.

#### **1.4. Objetivos**

##### ***1.4.1. Objetivo General***

- Rediseño y repotenciación de un prototipo robótico rehabilitador de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA), controlado a lazo cerrado e implementado en software libre.

##### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Entender el funcionamiento y determinar las mejoras a realizar en el modelo base.

- Rediseñar el prototipo robótico para la terapia de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA).
- Rediseñar el sistema de control a lazo cerrado del prototipo robótico para la rehabilitación de los dedos de las manos.
- Implementar un HMI en software libre para el manejo del dispositivo robótico para la rehabilitación de los dedos de las manos.
- Realizar pruebas de funcionamiento del dispositivo robótico para la terapia de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA).

## **1.5. Hipótesis**

¿El rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA), controlado a lazo cerrado e implementado en software libre, ayudará a la rehabilitación de los pacientes con dificultades de motricidad en las manos?

## **1.6. Variables de investigación**

### **1.6.1. Dependiente**

Rehabilitación de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA).

### **1.6.2. Independiente**

Prototipo robótico rehabilitador controlado a lazo cerrado e implementado en software libre.

## **1.7. Metodología de desarrollo**

Para la realización del trabajo se empleó una investigación bibliográfica del proceso de rehabilitación de las manos en pacientes con daño cerebral adquirido y que tipo de terapia física emplean en la rehabilitación, se evidencio que no hay máquinas de rehabilitación que realicen el movimiento autónomo de los dedos de las manos de una manera alternada y que ayuden a pacientes con daño cerebral adquirido.

### **1.7.1. Rediseño de la máquina**

A partir del diseño de la máquina de rehabilitación de los dedos de la mano izquierda se procede a realizar un análisis mecánico del funcionamiento de la máquina dando como resultado el rediseño de los elementos mecánicos, mesa de trabajo y cubiertas protectoras para lo cual se emplea un software CAD para el diseño y análisis de los elementos.

Al terminar la parte mecánica se procese a la parte eléctrica la cual ira ensamblada en el espacio inferior de la mesa de trabajo para lo cual se realiza pruebas de conexiones y de funcionamiento previa a su instalación en el compartimiento de instalaciones eléctricas de la mesa de trabajo.

La elaboración del programa ejecutable se realiza en java obteniendo una interfaz gráfica amigable con el operador el cual deberá ingresar la información personal del paciente seguido de la configuración del desplazamiento de los dedos y después se procede a la selección para la ejecución de un ejercicio de los cinco que ofrece el programa acorde al criterio del operario los cuales permiten variar el porcentaje de desplazamiento y la velocidad de movimiento.

### **1.7.2. Pruebas de funcionamiento**

Para realizar un ejercicio de la programación se debe colocar previamente la información personal del paciente y configurar la extensión máxima de los dedos y la contracción mínima, luego de esto se procede a la selección del ejercicio entre los cuales tenemos: pliegue y despliegue manual de los dedos, pliegue y despliegue automático de los dedos, pliegue y despliegue de los dedos desde la posición media, pliegue y despliegue aleatorio de los dedos, pliegue y despliegue de los dedos seleccionados. A continuación, se determina el porcentaje de desplazamiento de los dedos y la velocidad de desplazamiento, en el caso de unos ejercicios se coloca el número de repeticiones a realizar. La interfaz gráfica muestra de manera dinámica mediante indicadores visuales el desplazamiento de los dedos en tiempo real, así como la fuerza con la que estos se están desplazando, terminada la sesión de terapia se realiza el envío del reporte de los ejercicios que el paciente realizó.

### **1.7.3. Análisis de resultados**

Tras la obtención de los datos de desplazamiento, velocidad y repeticiones se realizan diagramas lineales de las variables antes mencionadas respecto a los días de terapia a los cuales asistió el paciente, para evaluar el progreso de la movilidad del paciente se evalúan las gráficas de desplazamiento de los dedos notando de esta manera que el paciente ha tenido una mejoría tras el transcurso de los días ya que el porcentaje de desplazamiento ha aumentado, la agilidad de los dedos del paciente se determina mediante la velocidad de desplazamiento de los dedos respecto al transcurso de los días ya que conforme avanzan los días la velocidad aumenta aunque en cantidades pequeñas.

## Capítulo II

### 2. Marco teórico

#### 2.1. Introducción

El presente capítulo presenta una investigación bibliográfica comenzando por el significado del cerebro y sus partes, seguido a esto tenemos el significado de daño cerebral adquirido así como las causas y circunstancias más comunes en las que se presenta, además se habla de los efectos que el daño cerebral adquirido produce en una persona, también se habla sobre la rehabilitación y terapia que se puede dar a las personas con daño cerebral adquirido finalmente se estudia el modelo del robot AMADEO mencionando sus características y funciones que este robot de rehabilitación brinda.

#### 2.2. Cerebro

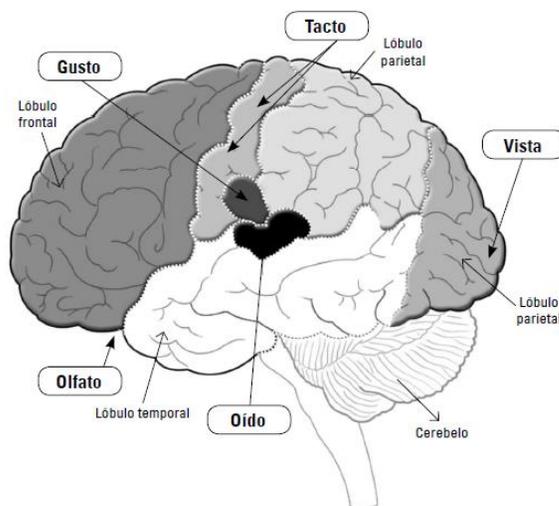
El cerebro es el órgano del cuerpo humano más complejo e importante ya que está relacionado con las funciones vitales de las personas como lo son la respiración, la circulación sanguínea, la temperatura corporal. Además, tiene otras funciones importantes como lo son el hablar, pensar, razonar e interactuar a través de los sentidos con el mundo exterior recopilando información y procesándola a la vez. (Triglia, 2020)

El cerebro se encuentra dentro del cráneo protegida por unas membranas que se llaman meninges que lo rodean y se encuentra flotando en el líquido cefalorraquídeo que es un líquido transparente. (Triglia, 2020)

El cerebro está dividido en dos hemisferios como son el hemisferio izquierdo y el hemisferio derecho que se encargan de controlar sus partes opuestas del cuerpo es decir que el hemisferio derecho controla la parte izquierda del cuerpo mientras que el

hemisferio izquierdo controla la parte derecha del cuerpo, cada hemisferio del cerebro a su vez se encuentra dividido en cuatro lóbulos como se puede ver en la figura 1 y estos lóbulos que cumplen con funciones específicas: (Triglia, 2020)

- Lóbulo frontal. – Es el lóbulo más grande y se encarga de la articulación del lenguaje, así como el de planificar y poner en ejecución la conducta recibida por las demás regiones del cerebro. (Triglia, 2020)
- Lóbulo parietal. – Este lóbulo es el encargado de procesar mediante el tacto información sensorial que llega desde cualquier parte del cuerpo. (Triglia, 2020)
- Lóbulo occipital. – Es el lóbulo más pequeño y es el encargado de procesar mediante los ojos la información visual. (Triglia, 2020)
- Lóbulo temporal. – Este lóbulo tiene dos funciones importantes y son el de reconocimiento de patrones y el de la memoria, lo que permite a las personas realizar un reconocimiento facial y el reconocimiento de palabras ya que trabaja sobre los sentidos de la vista y el oído. (Triglia, 2020)

**Figura 1***Lóbulos del cerebro*

*Nota.* Tomado de Como funciona cerebro DUMMIES (p. 15), por N. Braidot, 2016.

### **2.3. Daño cerebral adquirido (DCA)**

El daño cerebral adquirido es una lesión que se da en el cerebro de una persona afectando la salud, independencia y calidad de vida de la persona y de las que forman parte de su entorno familiar. La persona que sufre un DCA presentan los siguientes problemas: físicos con limitaciones motrices, cognitivos, emocionales y sensoriales. (Rios-lago et al., 2011)

El DCA se produce de las siguientes de las dos más comunes son la de un traumatismo craneoencefálico (TCE) y la de un accidente cerebrovascular (ACV), en tanto las demás maneras por las que se puede presentar son las de falta de oxígeno al cerebro (anoxia), tumor, accidentes de tránsito. (Sánchez Cabeza, 2005)

#### **2.3.1. Traumatismo craneoencefálico (TCE)**

Esta se refiere cuando una fuerza externa es la causante de una lesión cerebral que puede dañar los vasos sanguíneos o el tejido cerebral, esto causa en la persona

que presente daño neurológico, fractura del cráneo, amnesia entre las más comunes. Las lesiones de traumatismo craneoencefálico por lo general se dan en su mayoría por accidentes de tránsito, otras maneras cuando se presentan son cuando una persona se ve envuelta en un hecho violento de agresión física o cuando sufre una caída desde una altura considerable. (Charry et al., 2017)

### **2.3.2. Accidente cerebrovascular (ACV)**

Un accidente cerebrovascular o conocido como ictus se da cuando se ve afectado el suministro de la sangre al cerebro por parte de los vasos sanguíneos, esta afectación se puede presentar en dos cosas como son un ictus isquémico o un ictus hemorrágico. (Giuria, 2010)

Ictus isquémico (figura 2) se da cuando existe un bloqueo de las arterias cerebrales a las cuales se denominan trombosis si el coágulo se produjo en la arteria y embolia si lo que produce la obstrucción de la arteria viene de otro lado mediante el torrente sanguíneo. El ictus isquémico se puede presentar de dos formas como son el ataque isquémico transitorio (AIT) que tiene una duración menor a 24 horas y el infarto cerebral que se cuándo pasa de 24 horas y presenta ya graves daños a nivel neurológico. (Solana, 2014)

**Figura 2**

*Ictus isquémico*

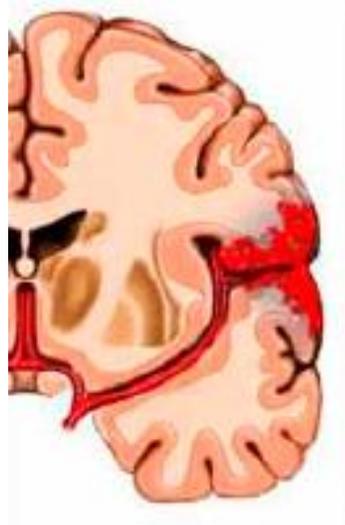


*Nota.* Tomado de Causas determinantes del Accidente Cerebrovascular (p. 17), por M. Giuria, 2010.

Ictus hemorrágico (figura 3) se produce cuando existe una ruptura de una arteria del cerebro que se puede dar por una malformación arterial o un aneurisma cerebral, además de la hipertensión arterial que es la causa más frecuente de una hemorragia cerebral. (Solana, 2014)

**Figura 3**

*Ictus hemorrágico*



*Nota.* Tomado de Causas determinantes del Accidente Cerebrovascular (p. 18), por M. Giuria, 2010.

**2.4. Secuelas en pacientes con DCA**

Debido al DCA y su impacto en el cerebro y sus diferentes áreas un paciente puede presentar diversas secuelas como: en el área emocional y de personalidad, a nivel motriz, en el área cognitiva, en el área de comunicación, en la área sensorial y sensitiva, en las actividades diarias. (Asensi, 2019)

**2.4.1. Secuelas a nivel motriz**

Tras sufrir DCA es muy común sufrir de un problema físico y este puede presentarse de las siguientes maneras: hemiparesias que es la pérdida de la fuerza del paciente en su cuerpo, hemiplejía que es una parálisis que se da en la mitad del cuerpo del paciente, espasticidad que es la contracción de los músculos de manera continua generando dolor en el paciente, disfagia que es la dificultad de ingerir alimentos líquidos

o sólidos ya que dificulta al momento de tragar y si se complica esto puede terminar atragantándose la persona. (Asensi, 2019)

#### **2.4.2. Secuelas de personalidad y emocionales**

Debido a la afectación de varias partes del cerebro varias personas con DCA presentan cambios en su conducta considerables como: labilidad emocional que hace que la persona no pueda manifestar emociones o que las emociones se presenten no acordes al contexto en que se esté llevando una acción ya sea por la intensidad o la duración, apatía que puede causar que la persona no presente interés al momento de hacer las tareas aun si esta antes del DCA le causara interés, la ansiedad y depresión, desinhibición conductual que hace que las personas responda a sus estímulos sin medir la consecuencias que estos podrían generar y que pueden ser no tolerados por la sociedad, irritabilidad y agresividad siendo este uno de los más difíciles de controlar debido a que se presentan de manera física hacia personas u objetos dificultando que la persona puede entrar en un grupo social o laboral. (Asensi, 2019)

#### **2.4.3. Secuelas a nivel cognitivo**

Estas secuelas afectan al razonamiento que nos ayuda a aprender, tomar decisiones y reflexionar. Este tipo de secuelas pueden pasar desapercibida por la persona que sufrió un DCA o ya sea por las personas que están alrededor ya que se pueden ver presentes en las cosas que se hace de manera diaria como lo es la memoria ya que la persona luego de haber sufrido un DCA no en todos los casos alcanza a recuperar condición habitual, esto hace que el paciente presente momentos en los cuales se sienta desorientado o confuso, además de poder presentar alucinaciones. Una de las afecciones cognitivas más preocupantes es que el paciente

puede llegar a ponerse en peligro ya que este puede no estar consciente de sus límites y se vea involucrado solo en actos donde necesite alguna ayuda o apoyo. (Asensi, 2019)

#### **2.4.4. Secuelas de comunicación**

Tras el DCA la forma en que una persona se comunica puede llegar a encontrarse afectada de las siguientes maneras: alexia que se refiere a que la persona no puede leer, agrafia que hace referencia a que la persona no pueda escribir. En los problemas de comunicación tras el DCA existe la afasia que presenta dificultades al paciente a entender las cosas así como el tener una conversación o poder leer y escribir, sin embargo esta se puede categorizar de diferentes maneras según las limitaciones que el paciente presente así tenemos lo que es: afasia global que es aquella que no permite que el paciente entienda lo que escucha y apenas pueda producir escasas palabras, afasia sensitiva que es aquella en donde el paciente puede hablar pero no posee la capacidad de entender las cosas, afasia de broca en la cual el paciente presenta dificultad para hablar pudiendo así tras un gran esfuerzo pronunciar frases de 3 o 4 palabras, afasia mixta que presenta los mismos problemas que la afasia de broca pero además el paciente no puede entender lo que se le dice. (Asensi, 2019)

#### **2.4.5. Secuelas sensoriales y sensitivas**

Estas secuelas afectan a los cinco sentidos presentando así dificultades a la vista como la pérdida de la visión, perder la sensación para captar e identificar sabores u olores, perder la parte de la audición que esta lleva a que la persona puede presentar problemas de mantener el equilibrio, perder el tacto provocando que este no pueda sentir dolor y tampoco pueda reconocer cambios de temperatura que se den en su cuerpo. Estas secuelas hacen que la persona pierda su autonomía además de ponerlas en peligro al tener que relacionarse con el entorno. (Asensi, 2019)

#### **2.4.6. Secuelas en las actividades diarias**

Al hablar de actividades diarias hablamos sobre las actividades que hacemos todos los días y estas se pueden dividir en dos grupos como son las básicas y las instrumentales. Al realizar estas actividades las personas podemos vivir con una gran autonomía y es ahí donde las personas con DCA presentan problemas de autonomía ya que no pueden realizar estas actividades por sí solas como el alimentarse, asearse, vestirse, ir al baño, o realizar tareas del hogar. Esta falta de autonomía hace que los pacientes empiecen a depender de familiares o de tercer para poder a realizar cualquier actividad básica y necesiten de ayuda para salir de casa a cumplir sus labores diarias. (Asensi, 2019)

#### **2.5. Rehabilitación para pacientes con DCA**

Al hablar de rehabilitación médica la Real Academia Española nos dice que tiene la finalidad de recuperar una función o actividad reducida o perdida ya sea por una enfermedad o traumatismo mediante, esta recuperación se hace mediante un conjunto de acciones o métodos. (Real Academia Española, 2014)

#### **2.6. Terapia ocupacional**

La terapia ocupacional (TO) es la encargada de atender la parte cognitiva, física, sensorial, entre otras que intervienen en las actividades de la vida diaria (AVD) y pongan en riesgo el bienestar y la salud de las personas. La terapia ocupacional se desarrolla con el propósito de mejorar la salud y calidad de vida de las personas que tienen una discapacidad, enfermedad, lesión que están afectando la participación y actividades de las personas en un entorno social ya sea este en el hogar, centro de estudio, trabajo entre otros. (Torres Ávila, 2014)

### **2.6.1. Fases de la terapia ocupacional**

En la rehabilitación hay diversas fases que por lo general se divide en tres las cuales son la fase crónica, subaguda y aguda. Sin embargo, para la consideración y aplicaciones en pacientes con DCA se considera una cuarta fase la cual permite una respuesta más eficiente al aplicar un tratamiento. (Trullenque, 2012)

- Fase aguda. – En esta fase la persona se encuentra hospitalizada y con vigilancia ya que existe la posibilidad de complicaciones graves y hasta se puede llegar a un riesgo vital considerable, es por ende que en esta fase el propósito es estabilizar y prevenir complicaciones al paciente. (Trullenque, 2012)
- Fase subaguda. – Para esta fase los pacientes se encuentran estabilizados y es trasladada a un lugar de rehabilitación en donde interviene el equipo médico de rehabilitación procurando así hacer que el paciente pueda tener el nivel mayor de autonomía y se pueda poner fin a la hospitalización. (Trullenque, 2012)
- Fase postaguda. – En esta fase el paciente ya no requiere de cuidados médicos continuos y continua su rehabilitación desde la casa en donde los familiares asumen y ayudan al cuidado del paciente llevándolo todos los días al centro de rehabilitación, además en esta fase también se ayuda a que el paciente y sus familiares cercanos que le ayudaran con la rehabilitación se adapten de la mejor manera al estilo de vida de la persona. (Trullenque, 2012)
- Fase crónica. – Para esta fase el paciente ya se encuentra estable sin embargo la persona puede seguirse beneficiando de la rehabilitación en algunas de las funciones y actividades que esté presente una dificultad al momento de realizar limitando así su autonomía, la prolongación del tiempo de rehabilitación se lo puede hacer siempre que ayude a mejorar o evitar el deterioro de actividades o

funciones que vayan a limitar la autonomía del paciente llegando incluso así a que el paciente deba recibir un tratamiento de por vida. (Trullenque, 2012)

## **2.7. Antropometría de la mano humana**

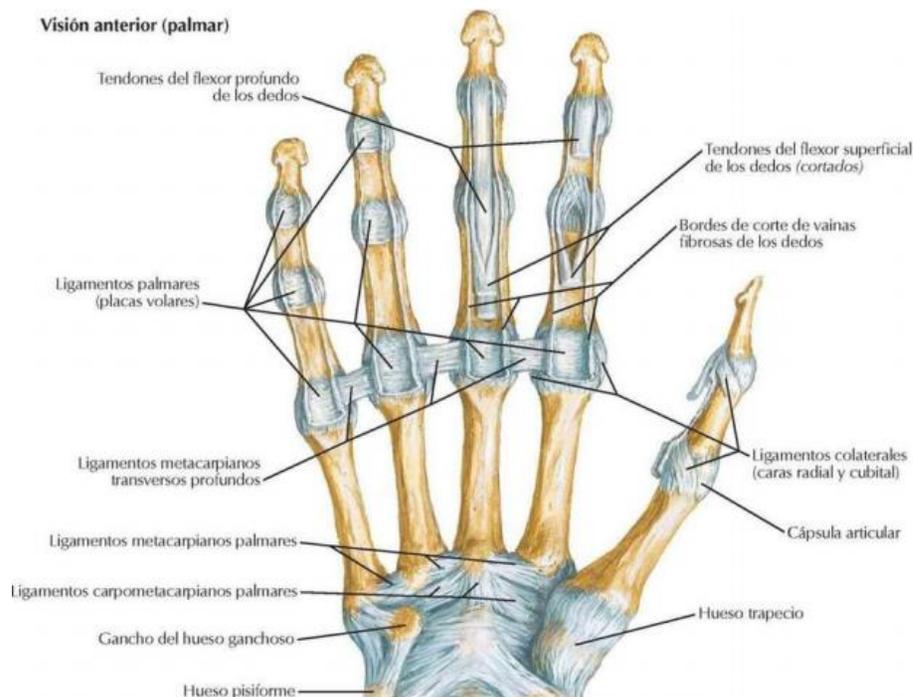
### **2.7.1. La mano humana**

La mano es la parte más importante del cuerpo humano debido a las características que posee como la sensibilidad, flexibilidad y la destreza, estas características nos permiten realizar una infinidad de actividades que nos permiten adaptarnos a los entornos que nos rodean. En la mano de los humanos la característica principal es la que el pulgar se encuentra en una posición de oposición a los demás dedos, dicha característica permite una función importante la cual es la aprehensión de los objetos y esto se da por la intervención en su gran mayoría de dos dedos los cuales son el índice y el pulgar. (Vásquez Guevara, 2016)

La mano tiene 5 dedos los cuales tienen tres falanges cada uno a excepción del pulgar que solo tiene dos, en la figura 4 se puede observar que la mano tiene un total de 27 huesos que estos se encuentran unidos a la muñeca logrando así que este sistema articulado tenga 20 grados de libertad, la mano cuenta con ligamentos y tendones en el cual los ligamentos son los encargados de unir los huesos mientras que los tendones se encargan de unir los músculos con los huesos, esto permite que la mano pueda aplicar fuerza. (Vásquez Guevara, 2016)

## Figura 4

*Sistema óseo, tendones, ligamentos y sistema articular de la mano*



*Nota.* Tomado de Atlas de Anatomía Humana (p. 726), por F. Netter, 2019.

El sistema muscular de la mano tiene dos tipos de músculos que son los extrínsecos y los intrínsecos que permiten controlar el movimiento de la mano, los músculos extrínsecos son de mayor tamaño que los intrínsecos y se encuentran ubicados en la parte del antebrazo y los intrínsecos se encuentran ubicados en la mano. (Vásquez Guevara, 2016)

### 2.7.2. Longitud de la mano

La longitud promedio de las manos de las personas es obtenida mediante la recopilación de datos a una muestra de 300 personas cuya edad oscilaba entre los 20 y 50 años de edad, para lo cual se denomina a una mano como la mano dominante y a la otra como mano no dominante en la cual se obtienen los datos como longitud de la

mano, longitud de la palma de la mano y ancho de la mano las cuales se pueden observar en tablas 1 – 4. (Vargas, 2016)

Para los hombres las longitudes promedios en milímetros de la mano dominante y no dominante para las falanges son: pulgar 62 y 62, índice 91 y 91, medio 103 y 102, anular 97 y 96, meñique 76 y 76 respectivamente. (Vargas, 2016)

Para las mujeres las longitudes promedias en milímetros de la mano dominante y no dominante para las falanges son: pulgar 58 y 58, índice 85 y 85, medio 96 y 96, anular 90 y 89, meñique 69 y 70 respectivamente. (Vargas, 2016)

**Tabla 1**

*Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano dominante del hombre*

<b>Mano dominante</b>	<b>Máxima</b>	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>
<b>Longitud palma</b>	132	90	105
<b>Longitud mano</b>	198	157	179
<b>Ancho mano</b>	120	75	103
<b>Longitud pulgar</b>	78	50	62
<b>Longitud índice</b>	107	81	91
<b>Longitud medio</b>	116	90	103
<b>Longitud anular</b>	112	85	97
<b>Longitud meñique</b>	91	65	76

**Tabla 2**

*Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano no dominante del hombre*

<b>Mano no dominante</b>	<b>Máxima</b>	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>
<b>Longitud palma</b>	131	94	105
<b>Longitud mano</b>	200	153	179
<b>Ancho mano</b>	118	80	101
<b>Longitud pulgar</b>	77	52	62
<b>Longitud índice</b>	102	79	91
<b>Longitud medio</b>	115	90	102
<b>Longitud anular</b>	111	83	96
<b>Longitud meñique</b>	89	66	76

**Tabla 3**

*Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano dominante de la mujer*

<b>Mano dominante</b>	<b>Máxima</b>	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>
<b>Longitud palma</b>	110	85	97
<b>Longitud mano</b>	186	143	166
<b>Ancho mano</b>	108	77	90
<b>Longitud pulgar</b>	80	50	58
<b>Longitud índice</b>	97	73	85
<b>Longitud medio</b>	110	83	96
<b>Longitud anular</b>	107	78	90
<b>Longitud meñique</b>	84	58	69

**Tabla 4**

*Longitud promedio de la mano, palma, ancho de la mano, longitud de falanges de la mano no dominante de la mujer*

<b>Mano no dominante</b>	<b>Máxima</b>	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>
<b>Longitud palma</b>	111	85	97
<b>Longitud mano</b>	198	141	166
<b>Ancho mano</b>	102	65	89
<b>Longitud pulgar</b>	75	49	58
<b>Longitud índice</b>	98	72	85
<b>Longitud medio</b>	110	85	96
<b>Longitud anular</b>	101	78	89
<b>Longitud meñique</b>	95	57	70

### **2.7.3. Fuerza de la mano**

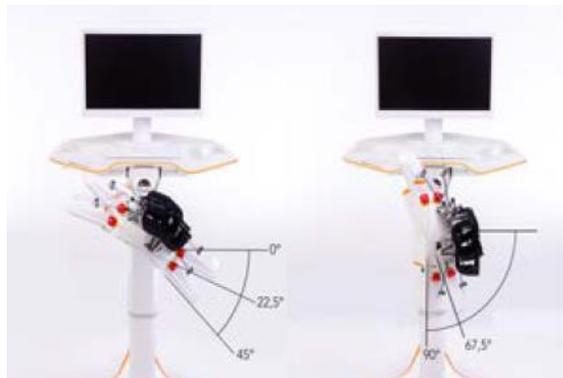
Las fuerzas que pueden ejercer cada mano varían según la edad, el tipo de nutrición que tenga la persona, la estatura, además de la mano con la que este ejerce el agarre, por ello se determina que la fuerza promedio de agarre para la mano dominante del hombre es de 38 kg llegando a una fuerza máxima de 45 kg y una fuerza mínima de 30 kg, para la mano no dominante del hombre se la fuerza promedio es de 35 kg con una fuerza máxima de 43 kg y una fuerza mínima de 28 kg. En cambio, para la mujer la fuerza promedio de agarre para la mano dominante es de 23 kg con una fuerza máxima de 27 kg y una fuerza mínima de 18 kg, para la mano no dominante de la mujer la fuerza promedio es de 21 kg con una fuerza máxima de 25 kg y una fuerza mínima de 17 kg. (Vargas, 2016)

## 2.8. Análisis del robot AMADEO

El robot AMADEO fue desarrollado para la rehabilitación de los dedos de las manos para personas que tienen deficiencias cognitivas y motoras, este robot como se ve en la figura 5 se adapta en la altura de la mesa y la inclinación de la mano de acuerdo a la necesidad de cada paciente independiente del tamaño de mano, también puede trabajar de manera individual en cada dedo de la mano del paciente o a su vez trabajar con todos los dedos, mediante el robot el paciente puede realizar varios ejercicios con repeticiones, fuerzas, velocidades y distancias de movimiento determinadas por un especialista. (TYROMOTION, 2013)

### Figura 5

*Ajustabilidad del robot AMADEO*



*Nota.* Tomado de Terapia con dedos, mano y cerebro (p. 3), por TYROMOTION, 2013.

El robot AMADEO tiene un enfoque terapéutico en donde un terapeuta puede realizar una programación de rutina de rehabilitación para cada paciente dependiendo la modalidad de la terapia que este deba realizar, el robot también ayuda mucho en los casos en donde un paciente presenta espasticidad creando movimientos de agarre estableciendo una intensidad del ejercicio acorde a sus capacidades, el robot también

puede crear una terapia con movimientos programados aun cuando el paciente no pueda llegar a completar el ejercicio por su propia fuerza. (TYROMOTION, 2013)

AMADEO cuenta con un software TYROS el cual permite cuantificar la fuerza que ejercen los dedos en una terapia y de esta manera generar una evaluación y progreso de un paciente, este progreso puede ver el paciente en el monitor y a su vez mediante los sensores que posee el robot nos permite recopilar mediciones que en conjunto con los datos del paciente se puede generar un informe del avance del paciente y este puede ser visualizado y evaluado por el especialista, así también si fuese necesario esto puede ser subido a un servidor mediante el cual otro médico que necesite la información pueda acceder de una manera más fácil. (TYROMOTION, 2013)

### **2.8.1. Programas que tiene el robot AMADEO**

Terapia activa: El terapeuta puede programar para que cada dedo se mueva de manera independiente y así entrenar la fuerza y el rango que ejerce cada dedo. (Domínguez, 2014)

Terapia asistida: Hace que el paciente mueva sus dedos con su propia fuerza y en el caso que este no complete el desplazamiento el programa le ayuda a completar permitiendo así mediante la retroalimentación indicar en que porcentaje está el movimiento activo de la mano del paciente durante la terapia. (Domínguez, 2014)

Terapia de Movimiento Continuo Pasivo (CPM): Hace que en paciente tenga unos movimientos pasivos de los dedos de manera continua. Además, el terapeuta tiene la opción de programar la alternancia del movimiento de los dedos, el número de desplazamientos, el tiempo de ejecución del ejercicio, la velocidad y el rango que se moverán los dedos. (Domínguez, 2014)

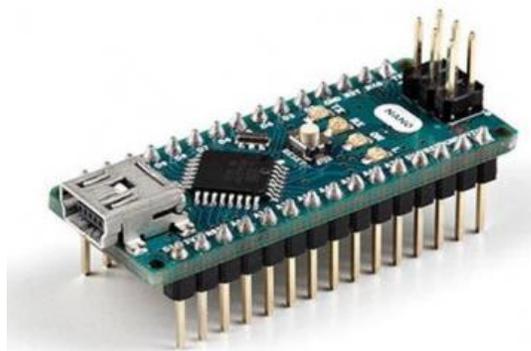
Terapia CPMplus: Es lo mismo del CPM con la diferencia que el paciente puede ver en el monitor mediante gráficos la resistencia que tiene cada dedo. (Domínguez, 2014)

Bomberos y globos: estos dos programas son interactivos en los cuales en el de los bomberos hace que el paciente mueva los dedos para que el agua en el monitor salga a diferentes presiones según cuan lejano este el fuego, mientras que el programa de los globos hace que el paciente mueva sus dedos para evitar que estos choquen pudiendo así variar la dificultad del juego. Estos dos programas hacen que el paciente mejore su capacidad flexo-extensor. (Domínguez, 2014)

## **2.9. Componentes del equipo**

### **2.9.1. *Arduino Nano***

Al hablar del Arduino Nano (figura 6) se habla de un microcontrolador el cual está diseñado para la aplicación de proyectos de robótica en las cuales el espacio es reducido, así como la colocación de peso sobre el proyecto, Arduino es una herramienta de código abierto lo que le permite que cada vez se sigan implementando y mejorando funciones y aplicaciones, además de ser un instrumento de multiplataforma permitiéndolo ejecutarse e en sistemas operativos como Linux, Mac OS y Windows. El entorno de programación de Arduino es un entorno amigable y no complejo para estudiantes, adicional a esto se tiene una facilidad en cuanto a la asequibilidad es decir es de bajo costo. A continuación, la tabla 5 se habla de las características técnicas que tiene el Arduino Nano. (Abrajan Arias, 2020)

**Figura 6***Arduino Nano*

*Nota.* Tomado de Diseño y construcción de un robot seguidor de línea evasor de obstáculos empleando Arduino Nano (p. 21), por C. Abrajan Arias, 2020.

**Tabla 5***Características técnicas del Arduino Nano*

<b>Microcontrolador</b>	<b>ATmega328</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	7V – 12V DC
<b>Voltaje de I/O</b>	5V
<b>Frecuencia del reloj</b>	16MHz
<b>Entradas analógicas</b>	8
<b>Pines digitales I/O</b>	14 (6 son para PWM)
<b>Corriente Max I/O</b>	40mA

*Nota.* Tomado de Diseño y construcción de un robot seguidor de línea evasor de obstáculos empleando Arduino Nano (p. 21), por C. Abrajan Arias, 2020.

### 2.9.2. Java

Java es el lenguaje de programación libre y es el más utilizado para el desarrollo de software ya que es orientado a objetos y puede ser ejecutado en cualquier dispositivo ya sea esta una laptop, una computadora de escritorio, tablet, celular. Además, al programar una aplicación o programa este se puede ejecutar en cualquier sistema operativo ya sea Windows, Mac OS, Linux entre otros (figura 7). (Bocangel Lamas, 2016)

#### Figura 7

*Sistemas operativos para la ejecución de Java*



*Nota.* Tomado de Fundamentos de programación en Java (p. 2), por J. Guevara, 2014.

### 2.9.3. Servomotores

El servomotor SunFounder 20Kg SF3218MG es utilizado para la realización de proyectos como brazos mecánicos, robots, coches. Tiene una carcasa de aleación de aluminio la cual ayuda a que este disipe calor de una mejor manera, el servomotor cuenta con un potenciómetro avanzado y un rodamiento de bolas dobles lo cual le da

una mayor precisión y una alta linealidad, este servomotor además posee un rango de rotación de 0 a 270 grados y es impermeable. Las características técnicas del motor se pueden ver en la tabla 6. (SunFounder, 2020)

**Tabla 6**

*Características técnicas del servomotor SunFounder 20Kg SF3218MG*

<b>Característica</b>	<b>Unidades</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	4.8 V -7.2 V
<b>Velocidad</b>	0.18 seg/60°
<b>Material</b>	Aleación de aluminio
<b>Torque</b>	20.5 kg/cm
<b>Tamaño</b>	40.0x20.5x40.5mm
<b>Peso</b>	60 gr
<b>Tipo de motor</b>	Motor de cepillo de carbono
<b>Tipo de engranaje</b>	5 metal

*Nota.* Tomado de SunFounder, por SunFounder, 2020.

#### **2.9.4. Guías lineales**

La guía lineal está compuesta por un patín y un riel el cual facilita un desplazamiento lineal de un punto a otro ya que las guías lineales tienen elementos como rodillos o bolas que hacen posible que el patín se desplace por el riel, las guías lineales son muy útiles por que poseen un nivel de precisión alto, soportan cargas en diferentes direcciones y tienen un coeficiente de rozamiento bajo de 0.02. Los husillos de recirculación de bolas mejoran la precisión en las guías lineales al momento de realizar un desplazamiento. (GAES, 2015)

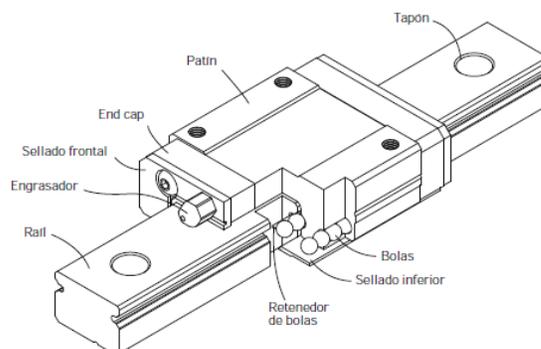
#### **2.9.4.1. Características de las guías lineales MGN**

En la figura 8 se pueden observar las partes de la serie MGN de las guías lineales tanto del patín como la del riel, la guía lineal empleada en el rehabilitador de dedos es la MGN 12H. (GAES, 2015)

- Tienen una larga vida útil debido a la utilización de rodillos y bolas los cuales sufren de poco desgaste al movimiento, además de brindar un movimiento suave y muy preciso.
- Las guías lineales pueden moverse a altas velocidades debido al bajo coeficiente de fricción lo cual ayuda a que la potencia requerida para desplazar una carga no tenga que ser alta al contrario con una potencia baja puede alcanzar una alta velocidad.
- Los diseños de las guías lineales permiten que soporten cargas en sentido horizontal o vertical.
- La lubricación es fácil ya que el patín cuenta con un engrasador evitando así el desgaste en la superficie de contacto.
- Su montaje es fácil ya que solo requiere el ajuste correcto de los tornillos en una bancada logrando así un correcto movimiento lineal.
- Son pequeños y con un peso muy ligero lo cual les hace que se utilicen en proyectos de pequeño tamaño.
- El riel, retenedor, patín y bolas están hechos de acero inoxidable.

**Figura 8**

*Partes de la guía lineal MGN*



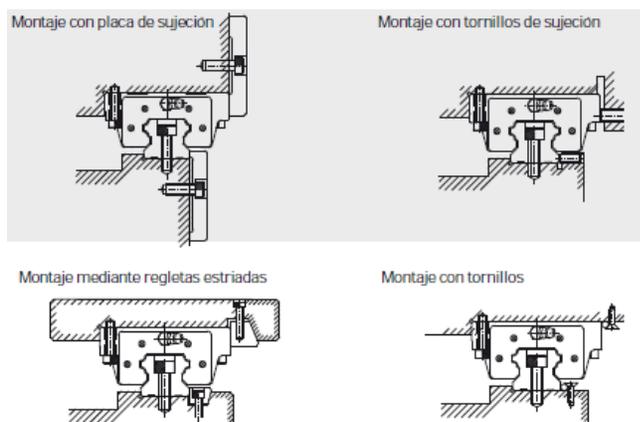
*Nota.* Tomado de Información Técnica: Guías Lineales (p. 89), por GAES, 2015.

#### 2.9.4.2. Montaje de una guía lineal

Al momento de instalar una guía lineal se debe considerar tres cosas como: las vibraciones, la precisión y el grado de impacto. Para reducir la vibración y evitar el desplazamiento de los patines o rieles existen cuatro métodos de montaje que se pueden apreciar en la figura 9, estos montajes son: con tornillos, con tornillos de sujeción, mediante regletas estriadas y con placa de sujeción. (GAES, 2015)

**Figura 9**

*Método de montaje para evitar la vibración*



*Nota.* Tomado de Información Técnica: Guías Lineales (p. 13), por GAES, 2015.

## Capítulo III

### 3. Rediseño y reconstrucción de los componentes

#### 3.1. Introducción

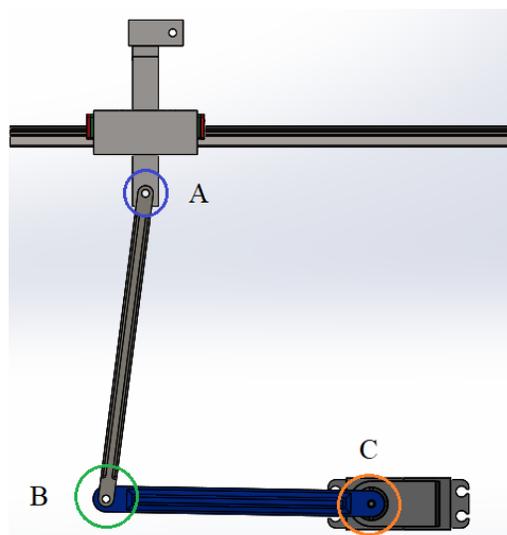
En el presente capítulo se realiza el diseño de los diferentes componentes del equipo el cual está basado en el diseño del robot rehabilitador de mano AMADEO. Para el diseño del rehabilitador de manos es importante realizar un mecanismo de conversión de movimiento circular a un movimiento lineal para el cual se utiliza un mecanismo biela-manivela y corredera, para poder determinar los esfuerzos y fuerzas del mecanismo se realiza los análisis dinámico y estático empleando las teorías y las ecuaciones respectivas para su diseño.

#### 3.2. Diseño de los elementos mecánicos

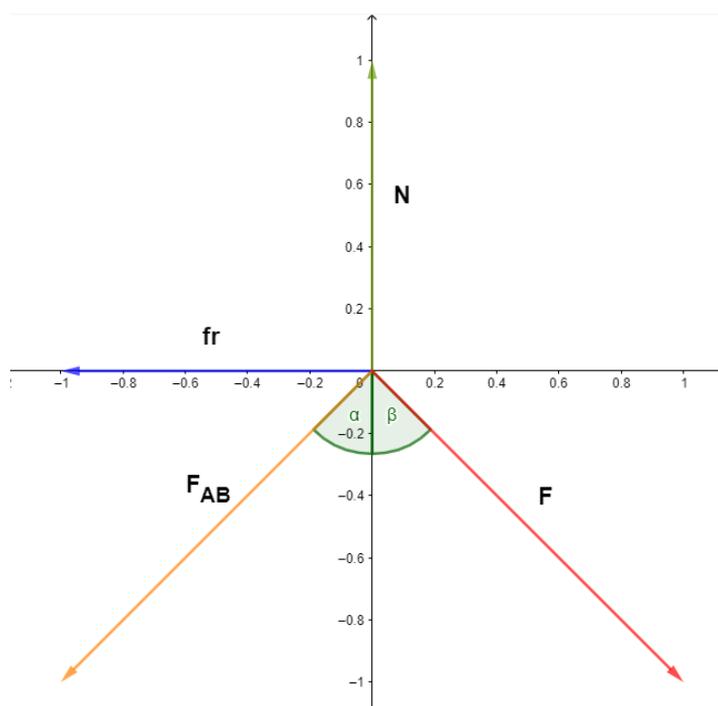
##### ***3.2.1. Análisis estático del mecanismo manivela-biela-corredera***

Para realizar el cálculo y obtener las fuerzas que ejercen cada elemento que forma parte del mecanismo biela-manivela y corredera de la figura 10 se emplea el método de un análisis estático por nodos.

La fuerza a considerar para el análisis es de 40 N basado en el peso máximo que ejerce un dedo sobre una superficie. (Valencia-Otero et al., 2016)

**Figura 10***Mecanismo biela-manivela-corredera*

En la figura 11 se visualiza un diagrama de cuerpo libre del mecanismo biela-manivela-corredera en el nodo A.

**Figura 11***Diagrama de cuerpo libre en el nodo A*

Para el desarrollo de los cálculos se aplican los siguientes datos:

$$F = 40 \text{ N}$$

$$\mu = 0.4$$

$$\beta = 85^\circ$$

$$\alpha = 7.35^\circ$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F * \sin \beta - F_{AB} * \sin \alpha - fr = 0$$

$$40 * \sin(85) - F_{AB} * \sin(7.35) - N * \mu = 0$$

$$39.84 = F_{AB} * \sin(7.35) + N * 0.4 \quad (1)$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - F_{AB} * \cos \alpha - F * \cos \beta = 0$$

$$N - F_{AB} * \cos 7.35 - 40 * \cos 85 = 0$$

$$N = F_{AB} * \cos 7.35 + 40 * \cos 85$$

$$N = F_{AB} * \cos 7.35 + 3.48 \quad (2)$$

Se reemplaza la ecuación 2 en la ecuación 1.

$$39.84 = F_{AB} * \sin(7.35) + (F_{AB} * \cos 7.35 + 3.48) * 0.4$$

$$39.84 = F_{AB} * \sin(7.35) + F_{AB} * \cos 7.35 * 0.4 + 1.39$$

$$38.44 = F_{AB}(\sin(7.35) + \cos(7.35) * 0.4)$$

$$F_{AB} = \frac{38.44}{\sin(7.35) + \cos(7.35) * 0.4}$$

$$F_{AB} = 73.268 \text{ N}$$

Se sustituye el valor de  $F_{AB}$  en la ecuación 2.

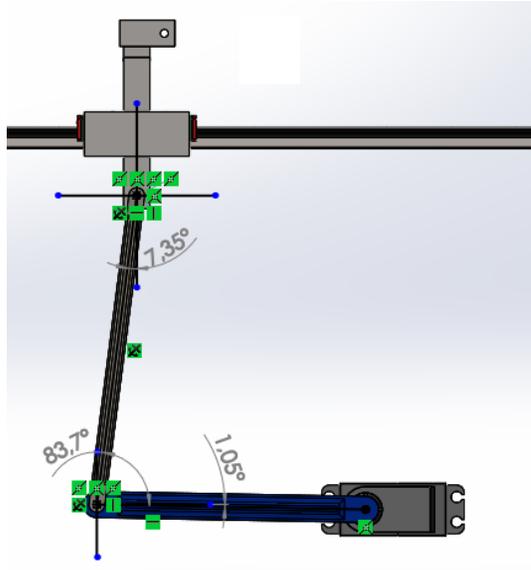
$$N = 73.268 * \cos 7.35 + 3.48$$

$$N = 76.145 \text{ N}$$

En la figura 12 tenemos el punto en donde el mecanismo esta lo más cerca a la colinealidad generando una mayor fuerza al motor.

### Figura 12

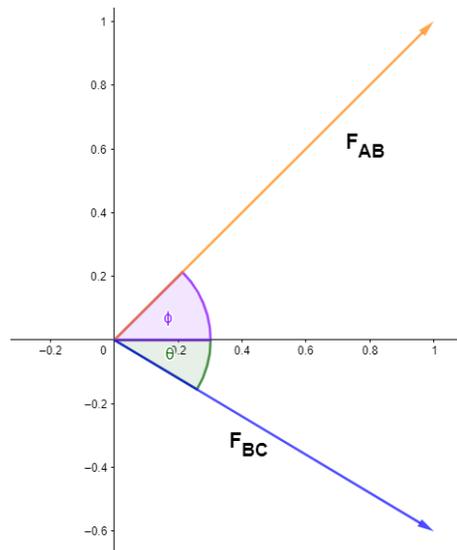
*Ángulos del mecanismo cuando el motor genera más fuerza*



El diagrama de cuerpo libre del mecanismo manivela-biela-corredera en el nodo B se ve en la figura 13.

### Figura 13

*Diagrama de cuerpo libre en el nodo B*



Para los cálculos en el nodo B se tiene los siguientes datos.

$$F_{AB} = 73.268 \text{ N}$$

$$\theta = 1.05^\circ$$

$$\phi = 83.7^\circ$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{AB} * \cos \phi + F_{BC} * \cos \theta = 0$$

$$F_{BC} = -\frac{F_{AB} * \cos \phi}{\cos \theta}$$

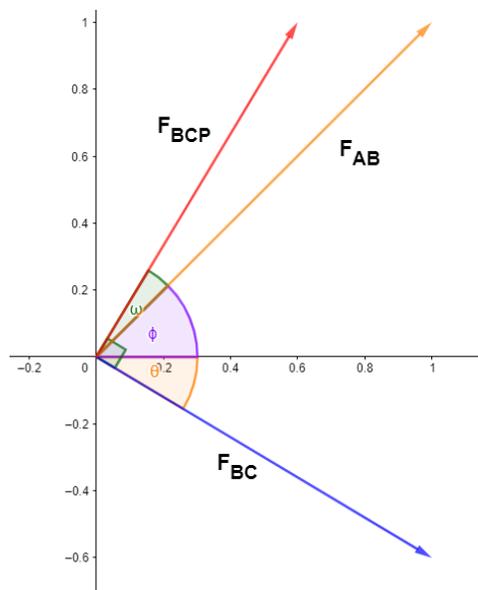
$$F_{BC} = -\frac{73.268 * \cos(83.7)}{\cos(1.05)}$$

$$F_{BC} = -8.041 \text{ N}$$

Para obtener la proyección de la fuerza máxima que actúa en el mecanismo se debe proyectar una perpendicular a la fuerza  $F_{BC}$  la cual lleva el nombre de  $F_{BCP}$  como se ve en la figura 14, esta fuerza sirve para el cálculo de torque que debe poseer el motor.

### Figura 14

*Diagrama de cuerpo libre en el nodo B con la proyección de la fuerza máxima*



$$\omega = 90 - \phi - \theta$$

$$\omega = 90 - 83.7 - 1.05$$

$$\omega = 5.25^\circ$$

$$\cos \omega = \frac{F_{AB}}{F_{BCP}}$$

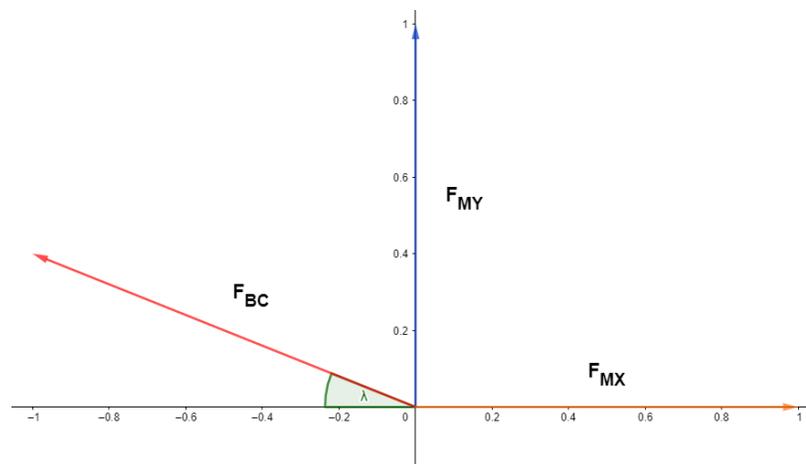
$$F_{BCP} = \frac{73.268}{\cos(5.25)}$$

$$F_{BCP} = 73.577 \text{ N}$$

En la figura 15 se tiene en el diagrama de cuerpo libre en el nodo C para poder calcular las fuerzas que actúan en el motor.

### Figura 15

Diagrama de cuerpo libre en el nodo C



$$\lambda = 1.05^\circ$$

$$F_{BC} = -8.041 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{MX} - F_{CB} * \cos \lambda = 0$$

$$F_{MX} = 8.041 * \cos (1.05)$$

$$F_{MX} = 8.039 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{MY} + F_{CB} * \sin \lambda = 0$$

$$F_{MY} = -8.041 * \sin (1.05)$$

$$F_{MY} = -0.147 \text{ N}$$

Se calcula el torque al que estará sujeto el mecanismo.

$$T = F_M * d$$

$$T = 8.04 \text{ N} * 119 \text{ mm}$$

$$T = 956.8 \text{ N} * \text{mm}$$

$$T = 9.76 \text{ Kg} * \text{cm}$$

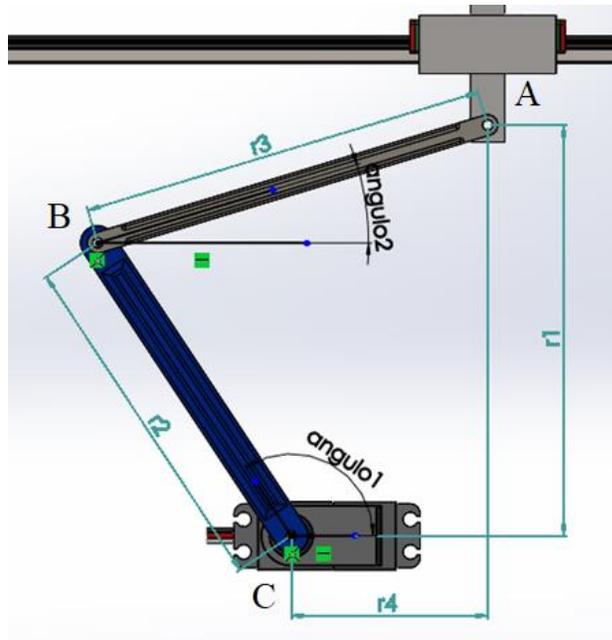
Debido al torque requerido el motor seleccionado es el servomotor SunFounder 20Kg SF3218MG el cual tiene un torque de 20 Kg\*cm.

### **3.2.2. Análisis dinámico del mecanismo manivela-biela-corredera**

Para realizar el análisis dinámico del mecanismo manivela-biela-corredera y determinar la posición, velocidad y aceleración, se realiza mediante el análisis de un ángulo generado entre una línea paralela a la base del servomotor situada en el eje giro del motor y la manivela (ángulo1) el cual provoca un movimiento angular. El análisis del mecanismo se realiza mediante ecuaciones de mecanismos que son resueltas por un software tomando en cuenta las medidas reales de los eslabones obtenidas mediante el software SOLIDWORKS las cuales se ven en la figura 16, donde:

**Figura 16**

*Eslabones y ángulos para el análisis dinámico del mecanismo*



$r_1$  = es la excentricidad, distancia vertical desde el nodo C hasta el nodo A.

$r_2$  = distancia de la manivela.

$r_3$  = distancia de la biela.

$r_4$  = distancia horizontal desde el nodo C hasta el nodo A.

$\text{angulo1} = \theta_2$  ángulo medido desde  $r_4$  hasta  $r_2$

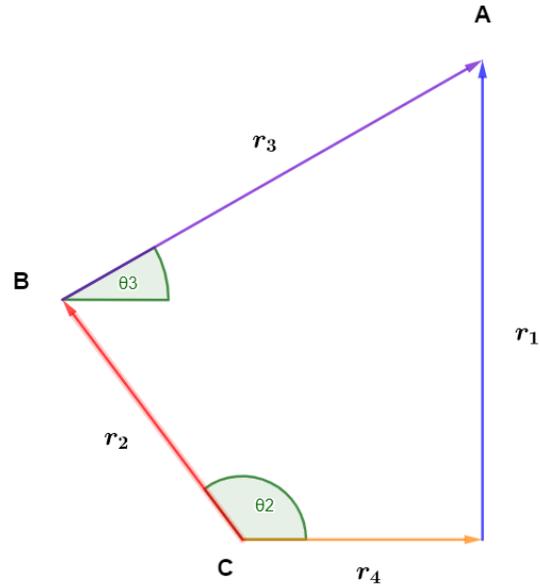
$\text{angulo2} = \theta_3$  ángulo de una paralela de  $r_4$  en el nodo B hasta  $r_3$

### 3.2.2.1. Análisis de la posición

Para el análisis del mecanismo y determinar su posición se realiza un análisis vectorial como se ve en la figura 17 para lo cual se toma en cuenta que el ángulo de entrada en el mecanismo es  $\theta_2$ .

Figura 17

Análisis vectorial del mecanismo manivela-biela-corredera



$$\vec{r}_1 + \vec{r}_4 = \vec{r}_2 + \vec{r}_3$$

Para el eje X del mecanismo tenemos:

$$r_1 * \cos \theta_1 + r_4 * \cos \theta_4 = r_2 * \cos \theta_2 + r_3 * \cos \theta_3$$

Para el eje Y del mecanismo tenemos:

$$r_1 * \sin \theta_1 + r_4 * \sin \theta_4 = r_2 * \sin \theta_2 + r_3 * \sin \theta_3$$

Para el mecanismo los ángulos del sistema son:

$$\theta_4 = 0^\circ$$

$$\theta_1 = 90^\circ$$

Reemplazamos los ángulos en las ecuaciones de X e Y.

$$r_4 = r_2 * \cos \theta_2 + r_3 * \cos \theta_3 \quad (1)$$

$$r_1 = r_2 * \sin \theta_2 + r_3 * \sin \theta_3 \quad (2)$$

$$f_1(\theta_3, r_4) = r_2 * \cos \theta_2 + r_3 * \cos \theta_3 - r_4$$

$$f_2(\theta_3, r_4) = r_2 * \sin \theta_2 + r_3 * \sin \theta_3 - r_1$$

Para el mecanismo las variables a tratar son  $\theta_3$  y  $r_4$ , para lo cual despejamos  $\theta_3$  de la ecuación 2.

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left( \frac{r_1 - r_2 * \sin \theta_2}{r_3} \right)$$

Se sustituye el valor de  $\theta_3$  en la ecuación 1.

$$r_4 = r_2 * \cos \theta_2 + r_3 * \cos \left[ \sin^{-1} \left( \frac{r_1 - r_2 * \sin \theta_2}{r_3} \right) \right]$$

### 3.2.2.2. Análisis de la velocidad

Para obtener la velocidad se procede a derivar las ecuaciones de la posición  $f_1(\theta_3, r_4)$  y  $f_2(\theta_3, r_4)$ .

$$g_1(\omega_3, v_4) = \frac{d}{dt} f_1(\theta_3, r_4)$$

$$g_2(\omega_3, v_4) = \frac{d}{dt} f_2(\theta_3, r_4)$$

$$g_1(\omega_3, v_4) = -r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2 - r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3 - v_4$$

$$g_2(\omega_3, v_4) = r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2 + r_3 * \cos \theta_3 * \omega_3$$

$$\begin{bmatrix} -r_3 * \sin \theta_3 & -1 \\ r_3 * \cos \theta_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2 \\ -r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2 \end{bmatrix}$$

Aplicamos el método de determinantes para resolver el sistema y obtener las ecuaciones de la velocidad lineal y velocidad angular.

$$\omega_3 = \frac{\begin{vmatrix} r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2 & -1 \\ -r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2 & 0 \end{vmatrix}}{r_3 * \cos \theta_3}$$

$$\omega_3 = \frac{-r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2}{r_3 * \cos \theta_3}$$

$$\omega_3 = -\omega_2 \left( \frac{r_2}{r_3} \right) \left( \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_3} \right)$$

$$v_4 = \frac{\begin{vmatrix} -r_3 * \sin \theta_3 & r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2 \\ r_3 * \cos \theta_3 & -r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2 \end{vmatrix}}{r_3 * \cos \theta_3}$$

$$v_4 = \frac{r_3 * \sin \theta_3 * r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2 - r_3 * \cos \theta_3 * r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2}{r_3 * \cos \theta_3}$$

$$v_4 = r_2 * \omega_2 \frac{\sin(\theta_3 - \theta_2)}{\cos \theta_3}$$

$$v_4 = r_2 * \omega_2 * \cos \theta_2 * \tan \theta_3 - r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2$$

### 3.2.2.3. Análisis de la aceleración

Para obtener la aceleración se procede a derivar las ecuaciones de la velocidad  $g_1(\omega_3, v_4)$  y  $g_2(\omega_3, v_4)$ .

$$h_1(\alpha_3, a_4) = \frac{d}{dt} g_1(\omega_3, v_4)$$

$$h_2(\alpha_3, a_4) = \frac{d}{dt} g_2(\omega_3, v_4)$$

$$h_1(\alpha_3, a_4) = -r_2(\sin \theta_2 * \alpha_2 + \cos \theta_2 * \omega_2^2) - r_3(\sin \theta_3 * \alpha_3 + \cos \theta_3 * \omega_3^2) - a_4$$

$$h_2(\alpha_3, a_4) = r_2(\cos \theta_2 * \alpha_2 - \sin \theta_2 * \omega_2^2) + r_3(\cos \theta_3 * \alpha_3 - \sin \theta_3 * \omega_3^2)$$

$$h_1(\alpha_3, a_4) = -r_2 * \sin \theta_2 * \alpha_2 - r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2^2 - r_3 * \sin \theta_3 * \alpha_3 - r_3 * \cos \theta_3 * \omega_3^2 - a_4$$

$$h_2(\alpha_3, a_4) = r_2 * \cos \theta_2 * \alpha_2 - r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \cos \theta_3 * \alpha_3 - r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3^2$$

$$\begin{bmatrix} -r_3 * \sin \theta_3 & -1 \\ r_3 * \cos \theta_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 * \sin \theta_2 * \alpha_2 + r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \cos \theta_3 * \omega_3^2 \\ -r_2 * \cos \theta_2 * \alpha_2 + r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3^2 \end{bmatrix}$$

Aplicamos el método de determinantes para resolver el sistema y obtener las ecuaciones de la aceleración lineal y aceleración angular.

$$\alpha_3 = \frac{\begin{vmatrix} r_2 * \sin \theta_2 * \alpha_2 + r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \cos \theta_3 * \omega_3^2 & -1 \\ -r_2 * \cos \theta_2 * \alpha_2 + r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3^2 & 0 \end{vmatrix}}{r_3 * \cos \theta_3}$$

$$\alpha_3 = \frac{r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3^2 - r_2 * \cos \theta_2 * \alpha_2}{r_3 * \cos \theta_3}$$

$$a_4 = \frac{\begin{vmatrix} -r_3 * \sin \theta_3 & r_2 * \sin \theta_2 * \alpha_2 + r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \cos \theta_3 * \omega_3^2 \\ r_3 * \cos \theta_3 & -r_2 * \cos \theta_2 * \alpha_2 + r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2^2 + r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3^2 \end{vmatrix}}{r_3 * \cos \theta_3}$$

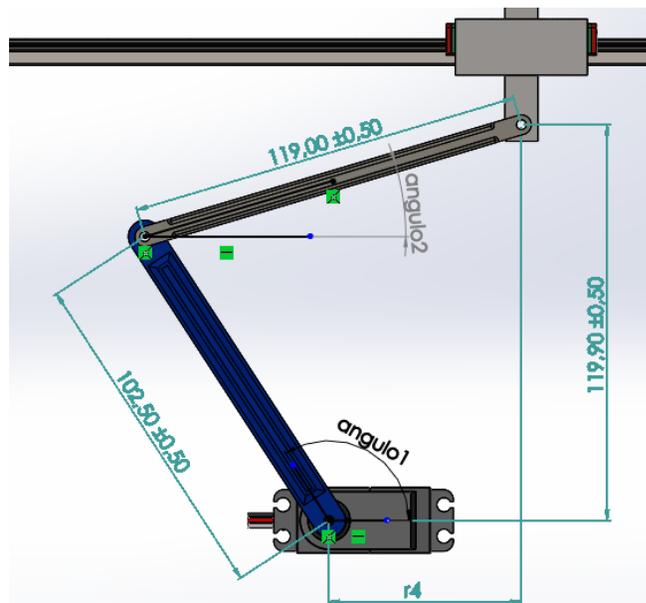
$$a_4 = \tan \theta_3 (r_2 * \cos \theta_2 * \alpha_2 - r_2 * \sin \theta_2 * \omega_2^2 - r_3 * \sin \theta_3 * \omega_3^2) - r_2 * \sin \theta_2 * \alpha_2 - r_2 * \cos \theta_2 * \omega_2^2 - r_3 * \cos \theta_3 * \omega_3^2$$

### 3.2.3. Análisis por software del mecanismo manivela-biela-corredera

Para realizar el análisis por software en Matlab de los parámetros de posición, velocidad y aceleración del mecanismo obtenidos en el análisis dinámico, se realiza un diagrama en la figura 18 para determinar las dimensiones del mecanismo, así como identificar las variables y utilizarlas en el análisis.

**Figura 18**

*Dimensiones del mecanismo*



$$r_1 = 119.9 \text{ mm}$$

$$r_2 = 102.5 \text{ mm}$$

$$r_3 = 119 \text{ mm}$$

$$r_4 = \text{variable de posición}$$

$angulo1 = \theta_2$  ángulo con datos de entrada

$angulo2 = \theta_3$  variable del ángulo de una paralela de  $r_4$  en el nodo B hasta  $r_3$

### 3.2.3.1. Código en Matlab para análisis de parámetros

```
clear;
clc;
disp('UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA');
disp('INTEGRANTES:');
disp('LUIS QUINGA');
disp('DARWIN SARZOSA');
disp('ANALISIS DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA');
r1=119.9;
r2=102.5;
r3=119;
a2=105:1:179
angulo2=deg2rad(a2);
%POSICION DEL ANGULO 3 (PARELELA AL ESLABON 4 Y LA BIELA)
angulo3=asin((r1-r2*sin(angulo2))/r3);
a3=rad2deg(angulo3)

%POSICION DEL MECANISMO
r4=r2*cos(angulo2)+r3*cos(asin((r1-r2*sin(angulo2))/r3))
figure
plot(a2,a3,'g-', 'LineWidth', 1);
grid on
xlabel('Angulo2 (grados)')
ylabel('Angulo3 (grados)')
title('GRAFICO DE ANGULOS')
pause;
figure
plot(a2,r4,'b-', 'LineWidth', 1);
grid on
xlabel('ANGULO DE LA MANIVELA (grados)')
ylabel('POSICION DEL MECANISMO (mm)')
title('GRAFICO DE LA POSICION FINAL')
pause;

%VELOCIDAD DEL MECANISMO
w2=10;
w3=(-(w2)*(r2/r3)*(cos(angulo2)/cos(angulo3)));
v4=abs(r2*w2.*cos(angulo2).*tan(angulo3)-r2*w2.*sin(angulo2))
figure
plot(a2,v4,'r-', 'LineWidth', 1);
grid on
xlabel('ANGULO DE LA MANIVELA (grados)')
ylabel('VELOCIDAD DEL MECANISMO (mm/s)')
```

```

title('GRAFICO DE LA VELOCIDAD')
pause;

%ACELERACION DEL MECANISMO
theta2=10;
a3=((r2*sin(angulo2)*(w2)^2+r3*sin(angulo3)*(w3)^2-
r2*cos(angulo2)*theta2)/(r3*cos(angulo3)));
A4=abs((r2*theta2*cos(angulo2)-r2*(w2)^2*sin(angulo2)-
r3*(w3)^2*sin(angulo3)).*tan(angulo3)-r2*(w2)^2*cos(angulo2)-r2*theta2*sin(angulo2)-
r3*(w3)^2*cos(angulo3))
figure
plot(a2,A4,'m-', 'LineWidth', 1);
grid on
xlabel('ANGULO DE LA MANIVELA (grados)')
ylabel('ACELERACION DEL MECANISMO (mm/s^2)')
title('GRAFICO DE LA ACELERACION')
pause;

```

La figura 19 permite observar la relación existente entre los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_3$  para lo cual se observa que mientras más aumenta el ángulo  $\theta_2$  que tiene un rango de movimiento de 105 a 179 grados también aumentara el ángulo  $\theta_3$ .

### Figura 19

*Desplazamiento de los ángulos del mecanismo*

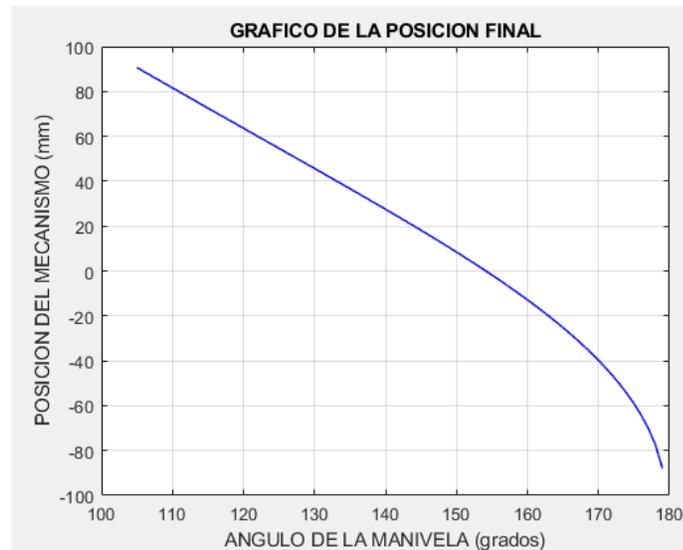


La figura 20 presenta la gráfica de la posición lineal del mecanismo  $r_4$  conforme aumenta el ángulo  $\theta_2$  para lo cual se ve que mientras más aumenta el ángulo  $\theta_2$  la

posición  $r_4$  varia hasta llegar a pasar el punto de referencia y realizar un desplazamiento negativo generando un desplazamiento total de 180 mm.

### Figura 20

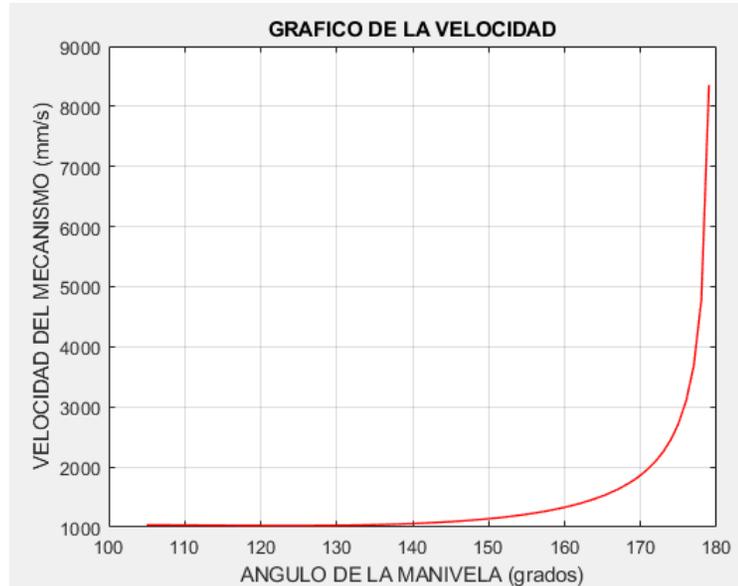
*Posición del mecanismo vs ángulo de la manivela*



La figura 21 muestra la gráfica de la velocidad lineal del mecanismo  $v_4$  en relación con la posición del ángulo  $\theta_2$  en la cual vemos que mientras aumenta el ángulo la velocidad va aumentando lentamente hasta llegar a un ángulo en donde la velocidad aumenta rápidamente para poder llegar a la posición deseada la cual debido al diseño del mecanismo la velocidad máxima es de 11.091 *rev/seg*.

**Figura 21**

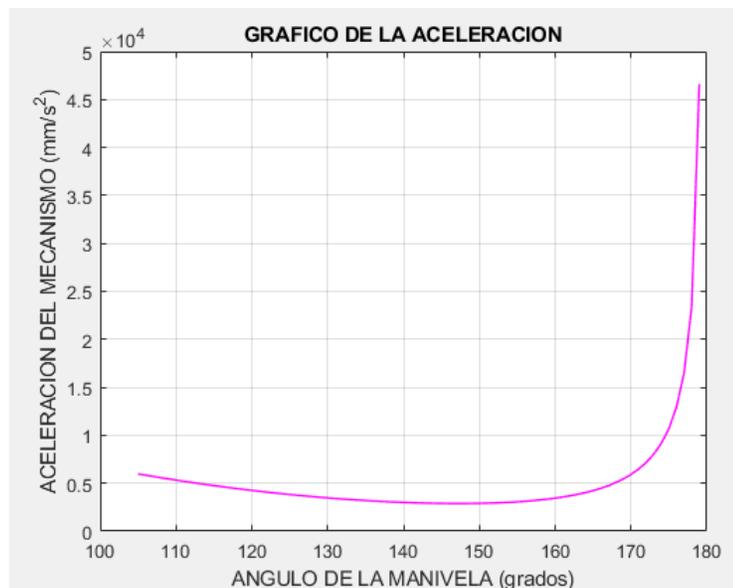
*Velocidad del mecanismo vs ángulo de la manivela*



La figura 22 muestra la aceleración lineal del mecanismo conforme  $\theta_2$  va aumentando llegando a presentar una aceleración máxima de  $61.87 \text{ rev/seg}^2$ .

**Figura 22**

*Ángulo del mecanismo vs ángulo de la manivela*



### 3.2.4. Análisis de esfuerzos por software de los elementos mecánicos

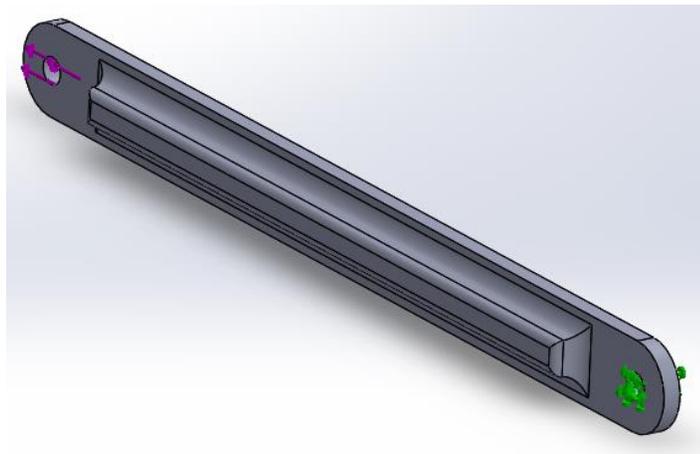
Para poder establecer los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los elementos mecánicos se utiliza el software SolidWorks en el cual se considerara las características como propiedades del material de elaboración, así como las cargas a los que el elemento mecánico se encuentra sometido.

#### 3.2.4.1. Análisis de esfuerzos de la manivela

La figura 23 se determina los esfuerzos a los que está sometida la manivela en la cual se aplica la fuerza máxima que se determina en el sistema biela manivela la cual es de 73.577 N, además se determina el material que se empleará para su elaboración el cual debe ser capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometido el elemento mecánico.

#### Figura 23

*Esfuerzos presentes en la manivela*

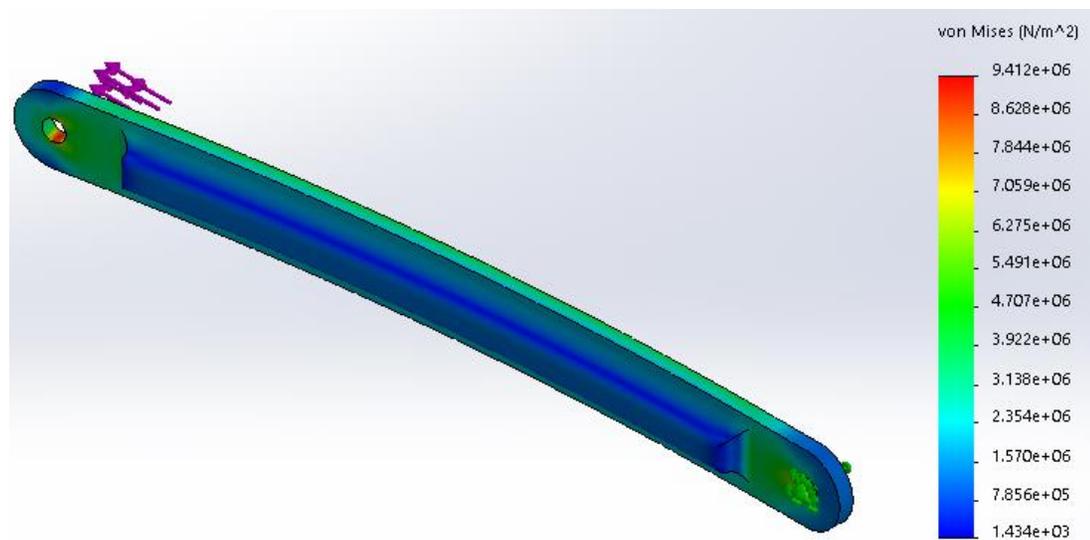


Para el análisis de la manivela se emplea el material de poliamida el cual tiene las propiedades mecánicas que se describen en la tabla 7.

**Tabla 7***Propiedades de la poliamida*

Poliamida	Características
Densidad	1.13 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.39
Límite de tracción	41-46 MPa
Módulo elástico	1.59-3.79 GPa
Módulo cortante	318.9 MPa

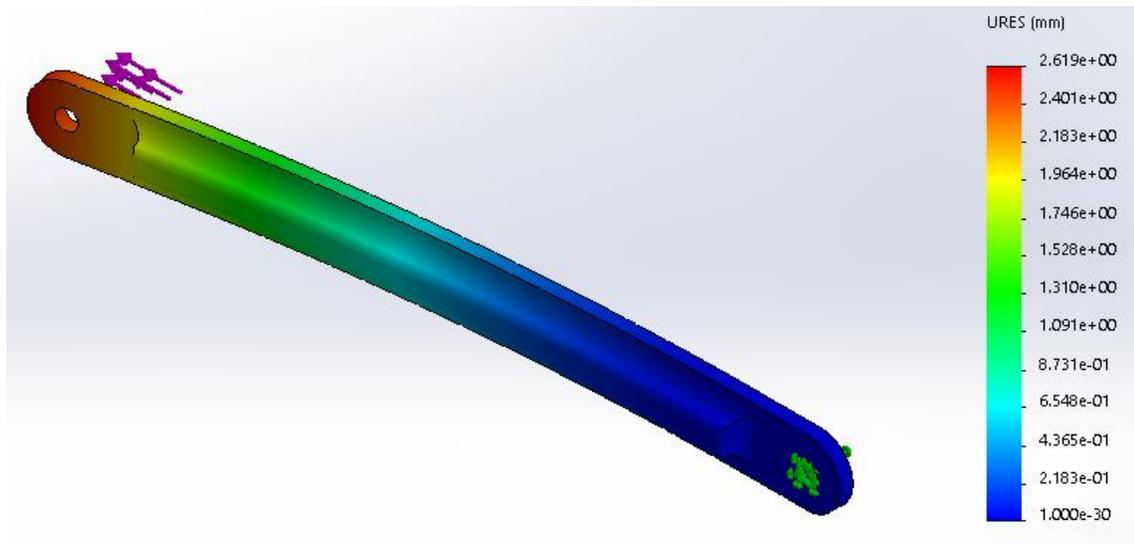
En la figura 24 se determina las tensiones de la manivela empleando la teoría de Von Mises en la cual se considera la fuerza máxima que se aplica a la manivela, dando como resultado un valor mínimo de  $1.434 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  y un valor máximo de  $9.412 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  los cuales no superan el valor de 46 MPa que es el límite elástico logrando así que el material no se deforme y recupere su forma original.

**Figura 24***Análisis de tensión de la manivela*

En la figura 25 se determina los desplazamientos de la manivela generados por la fuerza a la que está sometida la manivela y el material por el cual está elaborado, dando como resultado un valor mínimo de  $1 * 10^{-3} \text{ mm}$  y un valor máximo de  $2.619 \text{ mm}$  la cual se genera en la unión entre la manivela y la biela.

### Figura 25

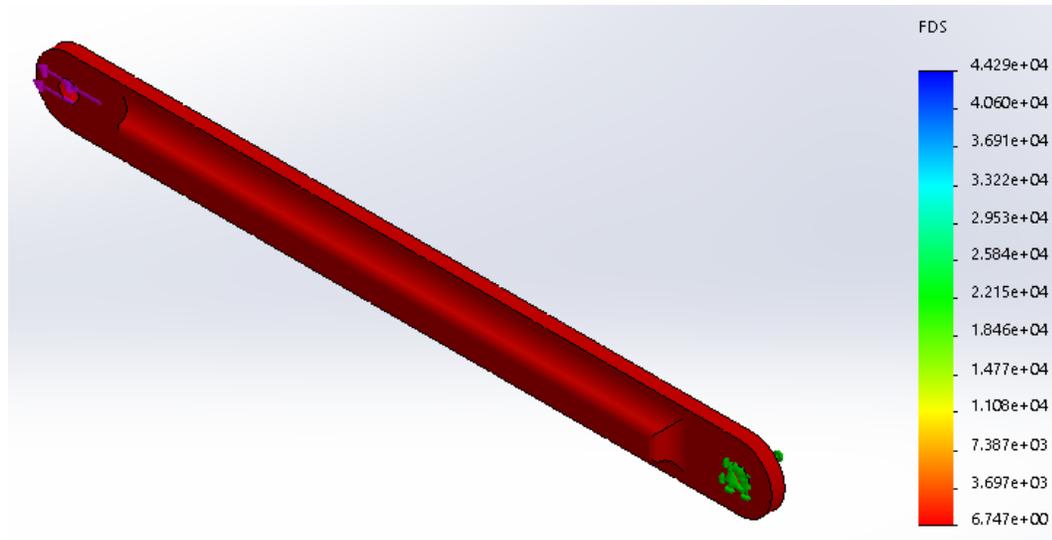
*Análisis de desplazamientos de la manivela*



En la figura 26 se determina el factor de seguridad que tienen la manivela al ser aplicada una fuerza máxima de  $73.577 \text{ N}$  la cual según el análisis del software el factor de seguridad mínimo es de  $6.747$  lo que indica que material ABS cumple la función de soportar las cargas que se vayan a presentar en la manivela ya que el factor de seguridad requerido para el diseño es mayor a  $2$ .

**Figura 26**

*Factor de seguridad de la manivela*



### 3.2.4.2. Análisis de esfuerzos de la biela

La figura 27 se determina los esfuerzos a los que está sometida la biela en la cual se aplica la fuerza máxima que se determina en el sistema biela manivela la cual es de 73.577 N, además se determina el material que se empleará para su elaboración el cual debe ser capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometido el elemento mecánico.

**Figura 27**

*Esfuerzos presentes en la biela*

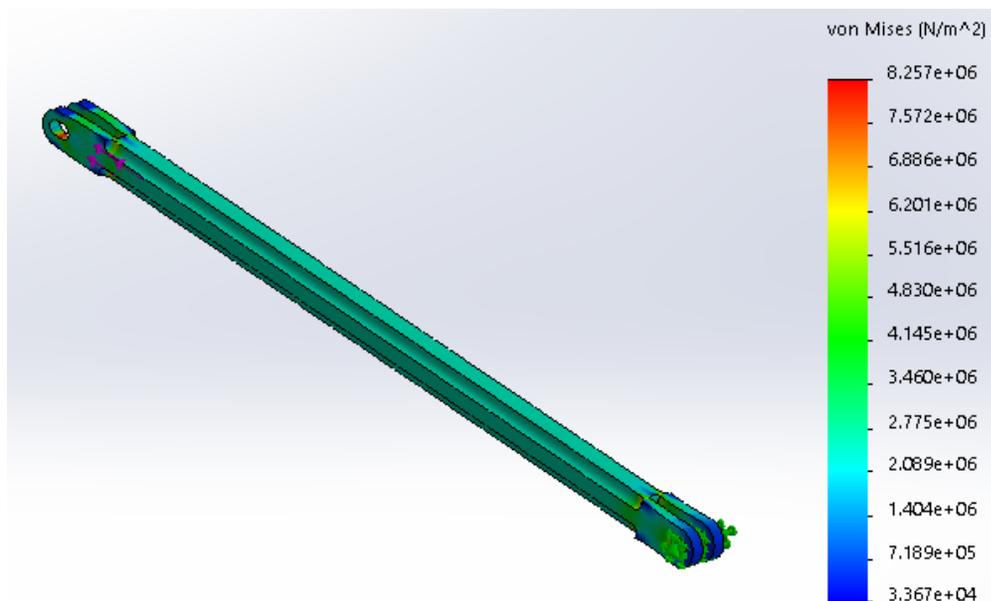


Para el análisis de la biela se emplea el material de poliamida el cual tiene las propiedades mecánicas que se describen en la tabla 7.

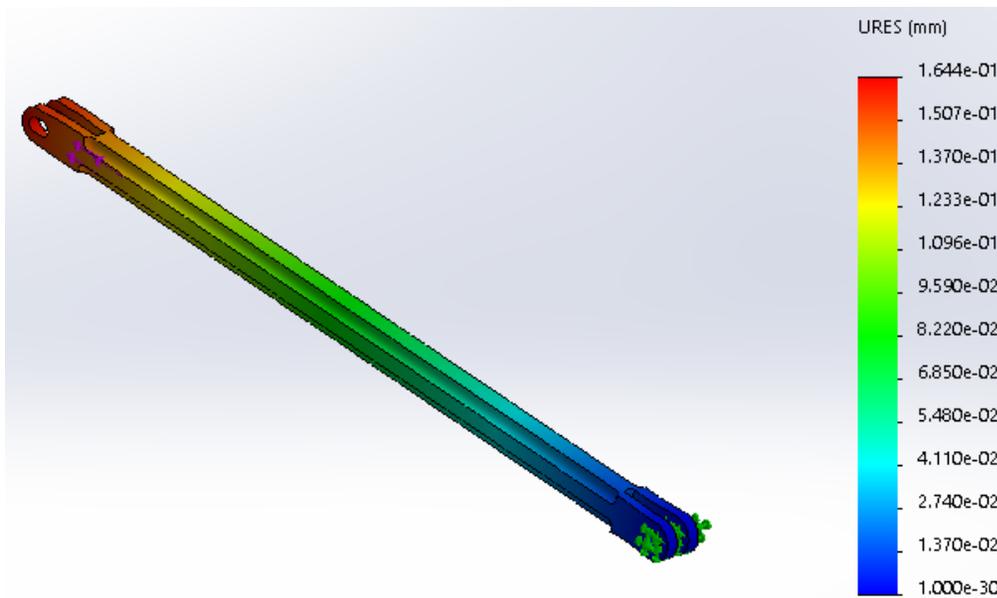
En la figura 28 se determina las tensiones de la biela empleando la teoría de Von Mises en la cual se considera la fuerza máxima que se aplica a la biela, dando como resultado un valor mínimo de  $3.367 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  y un valor máximo de  $8.257 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  los cuales no superan el valor de 46 MPa que es el límite elástico logrando así que el material no se deforme y recupere su forma original.

### Figura 28

*Análisis de tensión de la biela*



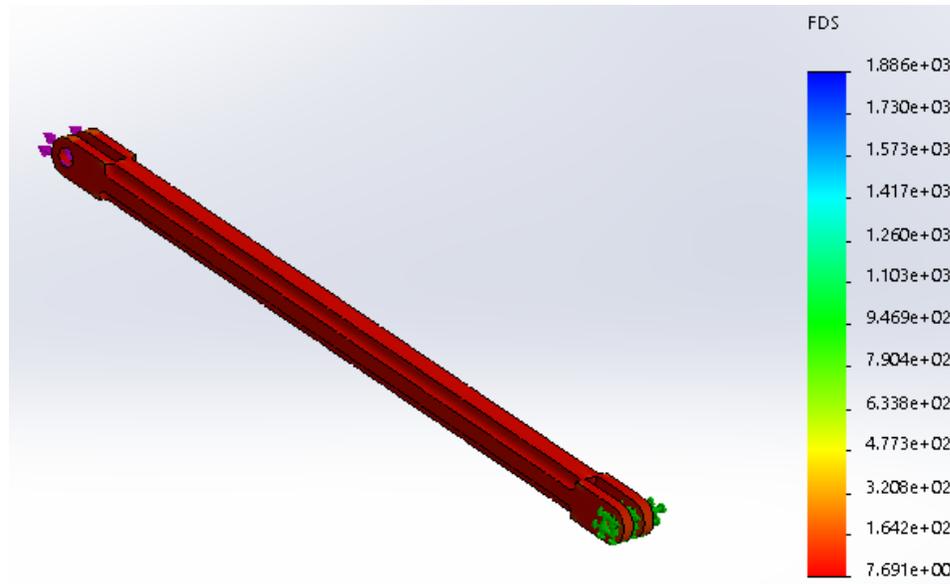
En la figura 29 se determina los desplazamientos de la biela generados por la fuerza a la que está sometida la biela y el material por el cual está elaborado, dando como resultado un valor mínimo de  $1 \times 10^{-3} \text{ mm}$  y un valor máximo de  $1.644 \times 10^{-1} \text{ mm}$  la cual se genera en la unión entre la base de los dedos y la biela.

**Figura 29***Análisis de desplazamiento de la biela*

En la figura 30 se determina el factor de seguridad que tienen la biela al ser aplicada una fuerza máxima de 73.577 N la cual según el análisis del software el factor de seguridad mínima es de 7.691 lo que indica que material ABS cumple la función de soportar las cargas que se presenten en la biela ya que el factor de seguridad requerido para el diseño es mayor a 2.

**Figura 30**

*Análisis del factor de seguridad de la biela*

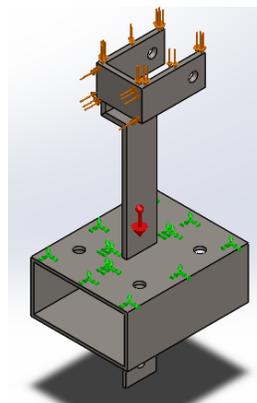


### 3.2.4.3. Análisis de esfuerzos del soporte de dedos

La figura 31 se determina los esfuerzos a los que está sometido el soporte de dedos en la cual se aplica la fuerza que realiza un dedo la cual es de 40 N, además se determina el material que se empleará para su elaboración el cual debe ser capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometido el elemento mecánico.

**Figura 31**

*Esfuerzos presentes en el soporte de dedos*



Para el análisis del soporte de dedos se emplea el material de acero ASTM A36 el cual tiene las propiedades mecánicas que se describen en la tabla 8.

**Tabla 8**

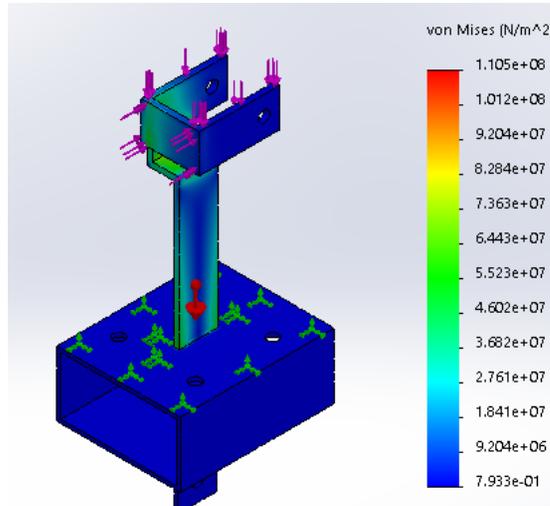
*Propiedades del acero ASTM A36*

<b>Acero ASTM A36</b>	<b>Características</b>
<b>Resistencia a la tracción</b>	400-550 MPa
<b>Límite elástico</b>	250 MPa (espesor < 200m) – 220 MPa (espesor >= 200m)
<b>Límite de fluencia</b>	250 MPa
<b>Módulo de elasticidad</b>	200 GPa
<b>Módulo cortante</b>	79.3 GPa

En la figura 32 se determina las tensiones del soporte de dedos es empleando la teoría de Von Mises en la cual se considera la fuerza máxima que se aplica al soporte de dedos, dando como resultado un valor mínimo de  $7.933 * 10^{-1} N/m^2$  y un valor máximo de  $1.105 * 10^8 N/m^2$  los cuales no superan el valor de 250 MPa que es el límite elástico logrando así que el material no se deforme y recupere su forma original.

### Figura 32

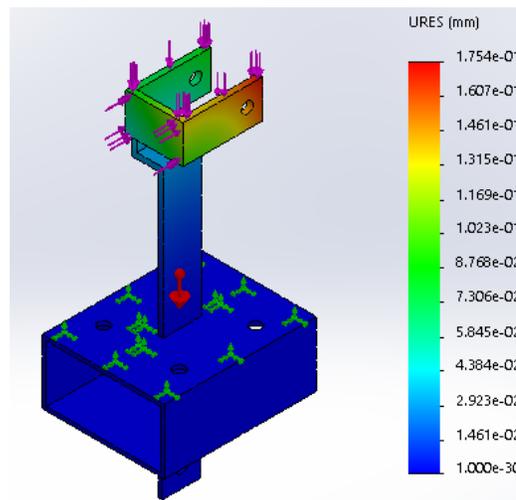
#### *Análisis de tensión del soporte de dedos*



En la figura 33 se determina los desplazamientos del soporte de dedos generados por la fuerza a la que está sometido el elemento mecánico y el material por el cual está elaborado, dando como resultado un valor mínimo de  $1 * 10^{-3} \text{ mm}$  y un valor máximo de  $1.754 * 10^{-1} \text{ mm}$  la cual se genera en la parte superior del soporte ya que es la parte más distante a la base empotrada.

### Figura 33

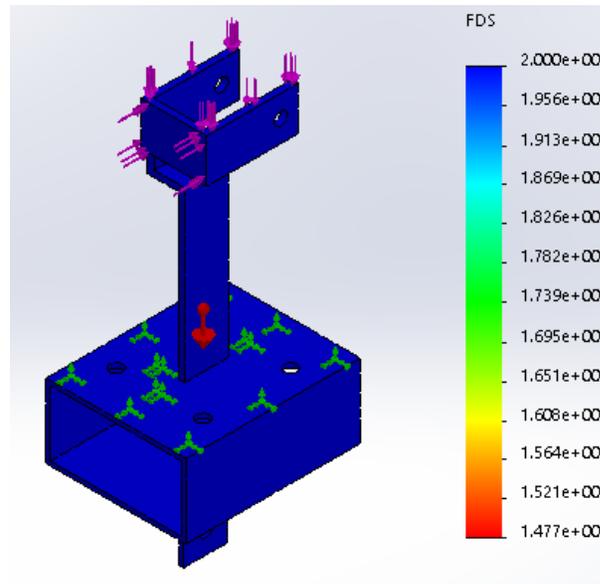
#### *Análisis de desplazamiento del soporte de dedos*



En la figura 34 se determina el factor de seguridad que tienen el soporte de dedos al ser aplicada una fuerza de 40 N que es la fuerza que aplica el dedo sobre el soporte, dicho factor de seguridad según el análisis del software el valor mínimo es de 1.477 lo que indica que material acero ASTM A36 cumple la función de soportar las cargas que se vayan a presentar en el soporte de dedos ya que el factor de seguridad requerido para el diseño es mayor a 1.

### Figura 34

*Análisis del factor de seguridad del soporte de dedos*

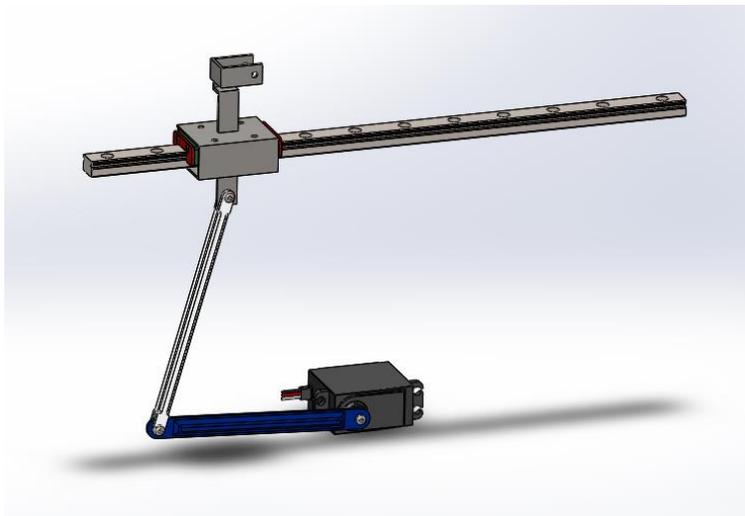


### 3.2.5. Análisis de movimiento del mecanismo manivela-biela-corredera

El mecanismo manivela-biela-corredera (figura 35) se ensambló en SolidWorks para realizar un análisis de movimiento y visualizar la posición, velocidad y aceleración del mecanismo, para la simulación de movimiento se configuró la distancia máxima de 146mm de desplazamiento del soporte de dedos sobre el riel.

**Figura 35**

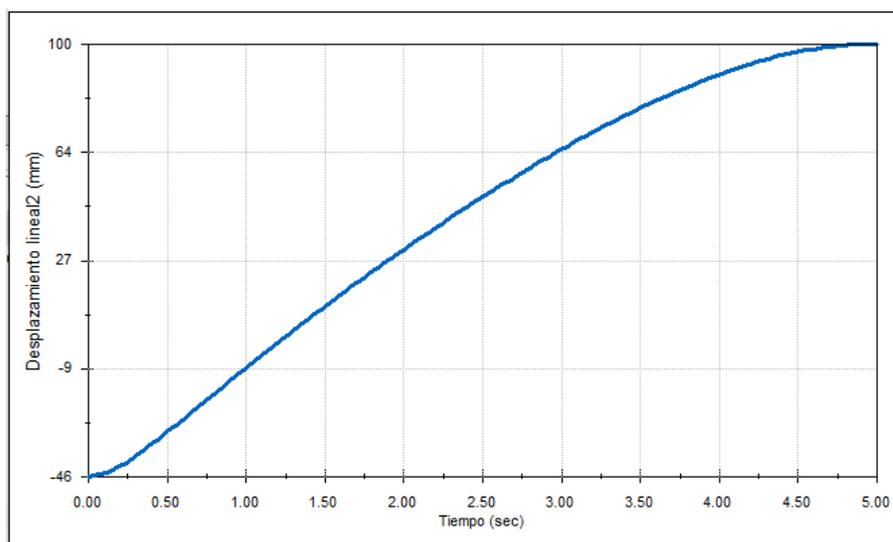
Mecanismo manivela-biela-corredera ensamblado



En la figura 36 se ve la gráfica del desplazamiento del patín sobre el riel de la guía lineal obtenida por la simulación del movimiento, en la cual se observa que el desplazamiento máximo generado es de  $146\text{ mm}$  y se desplazó en un tiempo de 5 segundos el cual fue un parámetro colocado en el software para su simulación.

**Figura 36**

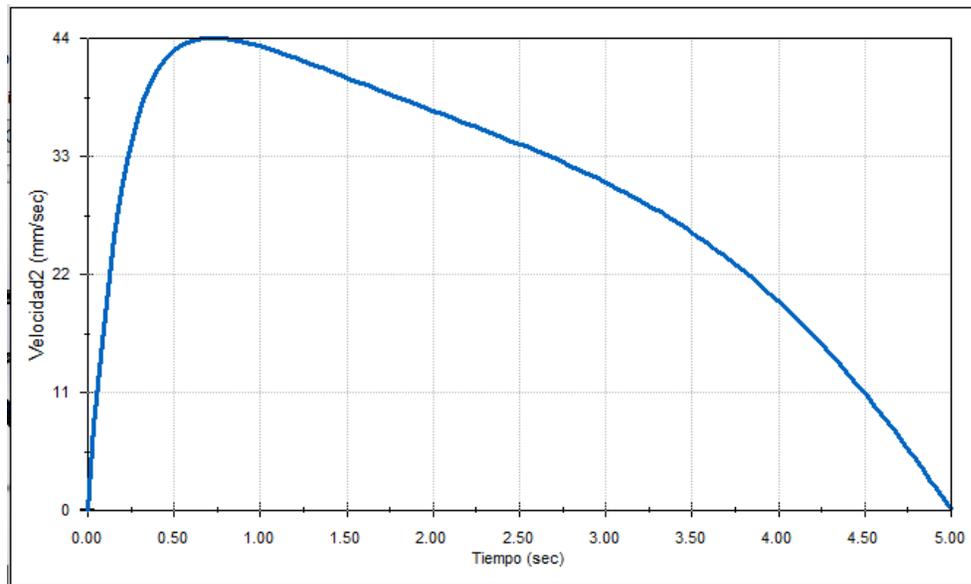
Desplazamiento lineal del patín sobre el riel



En la figura 37 se ve la gráfica de la velocidad del patín sobre el riel de la guía lineal obtenida por la simulación del movimiento, en la cual se observa que la velocidad máxima generada es de  $44 \text{ mm/seg}$  y se realizó dentro del primer segundo después de esto la velocidad reduce de manera lentamente.

### Figura 37

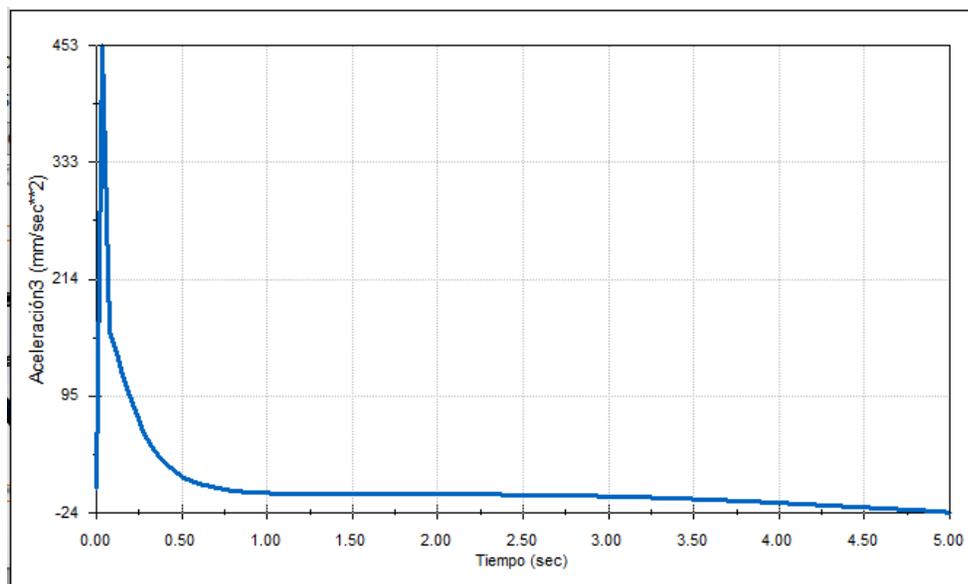
Velocidad lineal del patín sobre el riel



En la figura 38 se ve la gráfica de la aceleración del patín sobre el riel de la guía lineal obtenida por la simulación del movimiento, en la cual se observa que la aceleración máxima generada es de  $453 \text{ mm/seg}^2$  y se realizó dentro de los primeros 0,25 seg después de este tiempo la aceleración reduce exponencialmente.

**Figura 38**

Aceleración del patín sobre el riel

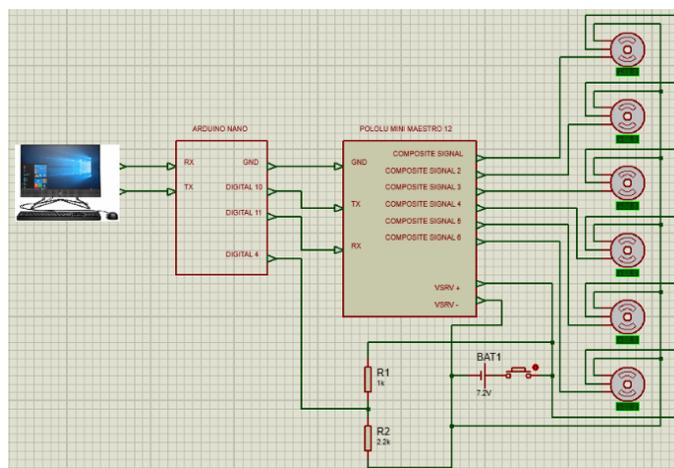


### 3.3. Diseño eléctrico del control

En la figura 39 se observa cómo es la conexión de los elementos electrónicos y eléctricos que componen el circuito eléctrico del equipo rehabilitador de dedos, para ello se usan las siguientes conexiones:

**Figura 39**

*Diagrama esquemático de conexión*



Se ocupan los canales 0, 1, 2, 3, 4, 5 del servocontrolador Pololu los cuales son canales de salida que indican la posición, velocidad, aceleración y a que servomotor se va a mandar estos datos, en la tabla 9 se ve los pines utilizados del servocontrolador Pololu Mini Maestro 12 y a que dedo esta usado cada canal.

**Tabla 9**

*Dedo correspondiente al pin del servocontrolador Pololu*

<b>Dedo correspondiente</b>	<b>Pin del servocontrolador Pololu</b>
Pulgar izquierdo	5
Índice Iz – Meñique Der	4
Medio Iz – Anular Der	3
Anular Iz – Medio Der	2
Meñique Iz – Índice Der	1
Pulgar derecho	0

En el Arduino el pin 4 es conectado a un divisor de voltaje el cual detecta la activación del paro de emergencia por la desconexión de la fuente de poder, el divisor de voltaje al estar realizado con resistencias comerciales de  $1\text{ K}\Omega$  y  $2.2\text{ K}\Omega$  da un voltaje de salida de  $4.95\text{ V}$  que es tomada como señal en alto e indica que el paro de emergencia no está pulsado, mientras que si el voltaje es de  $0\text{V}$  indica que el paro de emergencia ha sido presionado.

Los pines GND del Arduino y del servocontrolador Pololu se encuentran conectados al GND de la fuente de poder.

### **3.4. Diseño mediante computador del sistema de control**

#### **3.4.1. Organización de los datos**

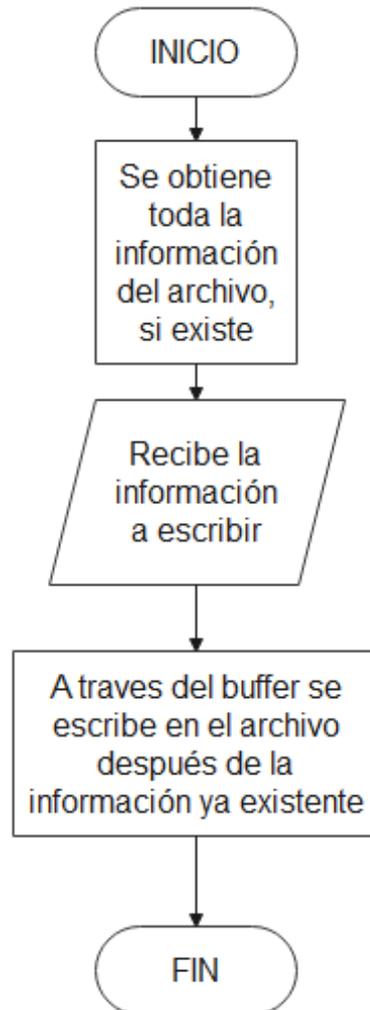
Para el sistema de organización de datos para los usuarios, estos se almacenan en un archivo con formato JSON con sus valores correspondientes. El formato JSON (JavaScript Object Notation) es un formato ligero de intercambio de datos. JSON es de fácil lectura y escritura para los usuarios. JSON es fácil de analizar y generar por parte de las máquinas, lo cual es útil para manejar los datos de los pacientes. Luego se crea una clase llamada Datos donde los objetos creados a partir de esta clase son los pacientes quienes poseen sus atributos de nombre, cédula, edad, ciudad y correo electrónico. La clase para mayor comodidad por cada atributo tiene una función interna que modifica el valor deseado y también otra que solo lo devuelve el valor para consulta.

Para la lectura, escritura y modificación de los datos de los pacientes, se genera funciones específicas:

- Función Escribir

**Figura 40**

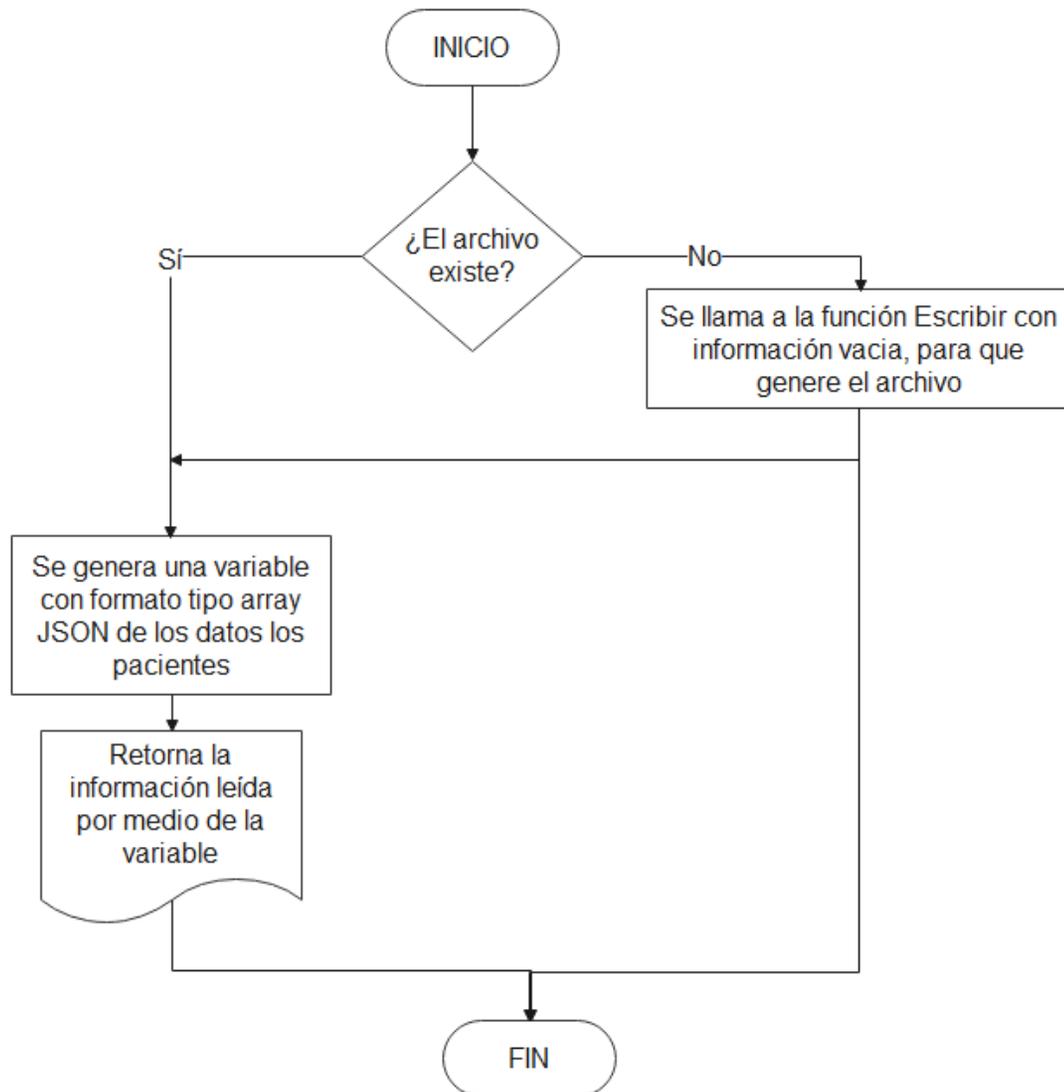
*Flujograma de la función escribir*



- Función Leer

**Figura 41**

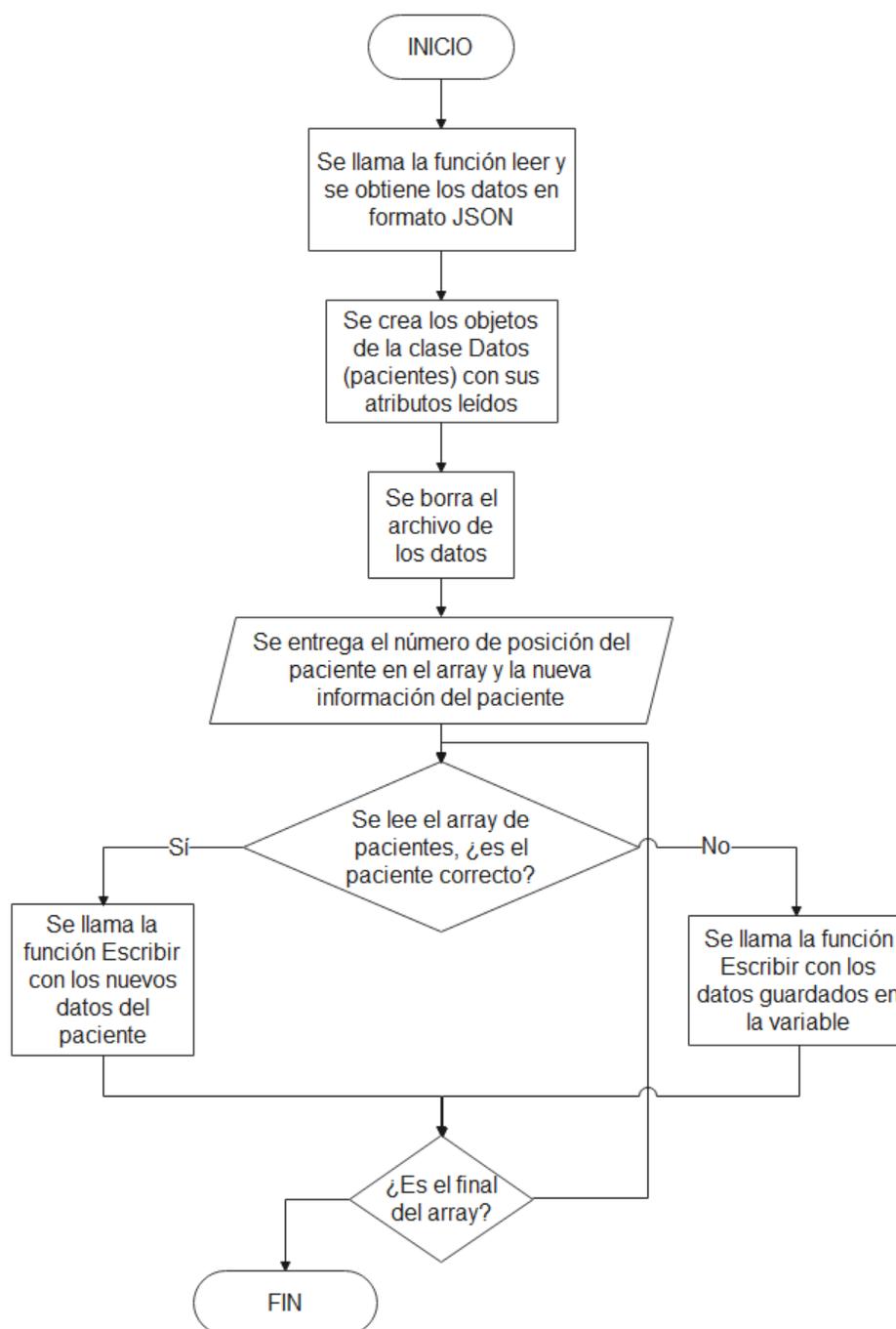
*Flujograma de la función leer*



- Función Editar

**Figura 42**

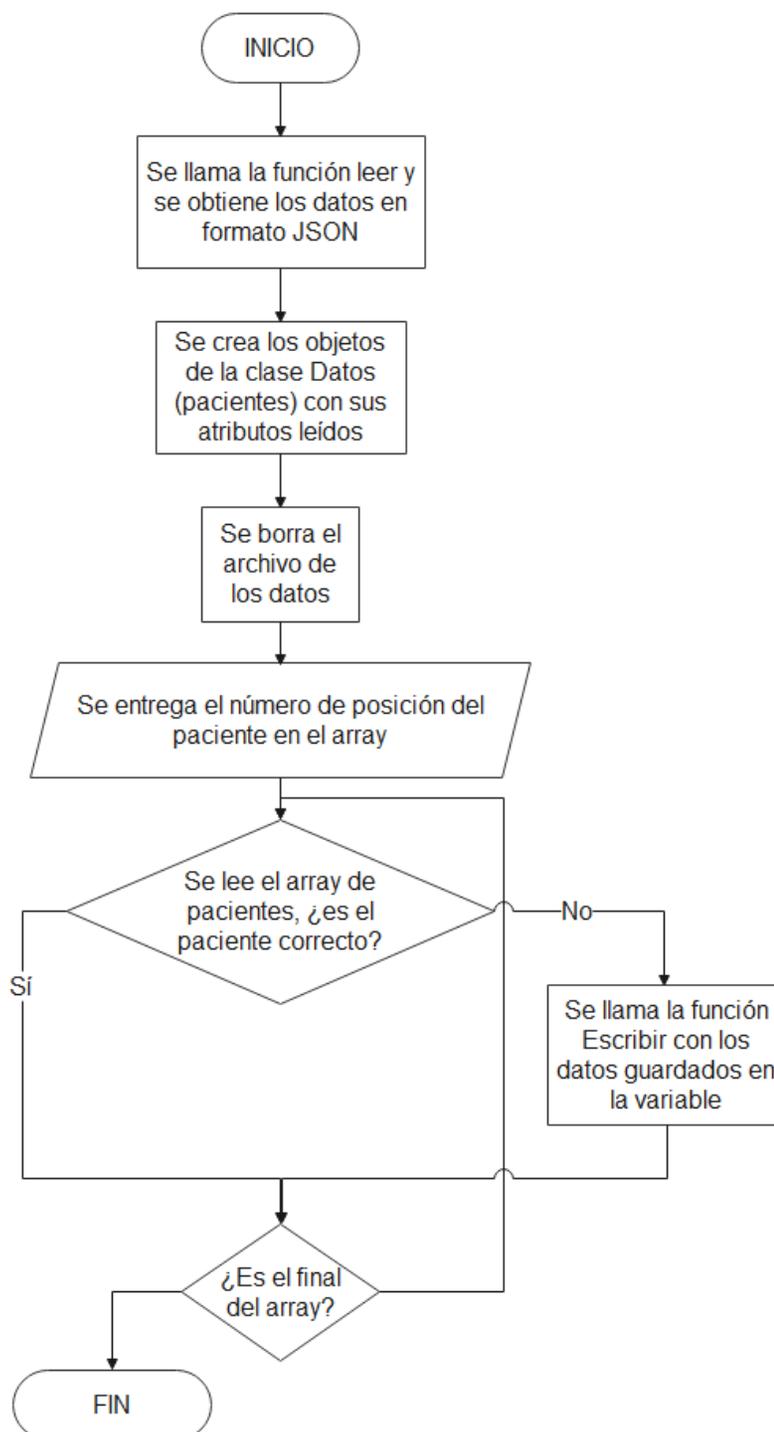
*Flujograma de la función editar*



- Función Borrar

**Figura 43**

*Flujograma de la función editar*



Para el ingreso de los nuevos datos de pacientes se utiliza una ventana (figura 44), una clase tipo JFrame como se ve en la figura. Los datos obligatorios son el nombre, edad y número de cédula si se intenta guardar los datos faltando uno de estos, se abrirá una ventana emergente informando del problema como se ve en la figura 45.

#### Figura 44

*HMI del ingreso de datos del paciente*



INGRESE LOS DATOS DEL PACIENTE

Nombre

Edad

Cédula

Ciudad

Email

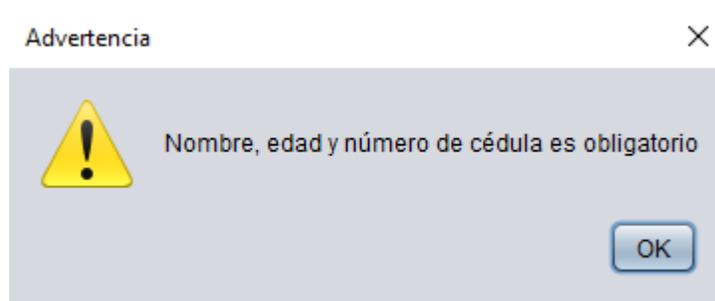
Aceptar

SIGUIENTE

CANCELAR

#### Figura 45

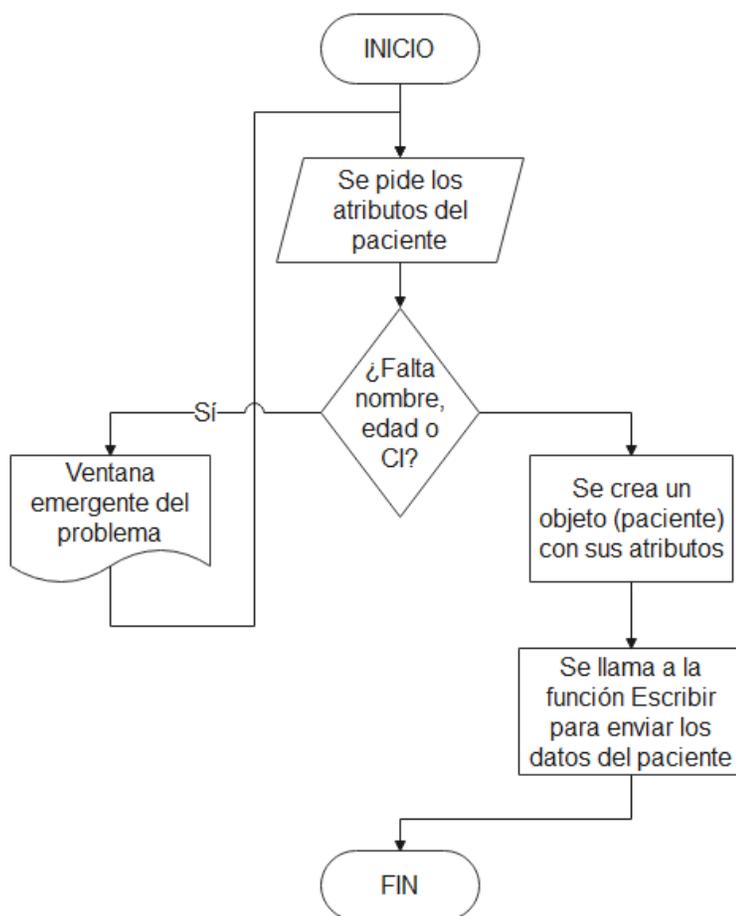
*Anuncio de falta de ingreso de datos*



Si todos los datos obligatorios son llenados, cuando se active la opción de guardar. La ventana procederá a guardar la información respecto a la siguiente lógica.

**Figura 46**

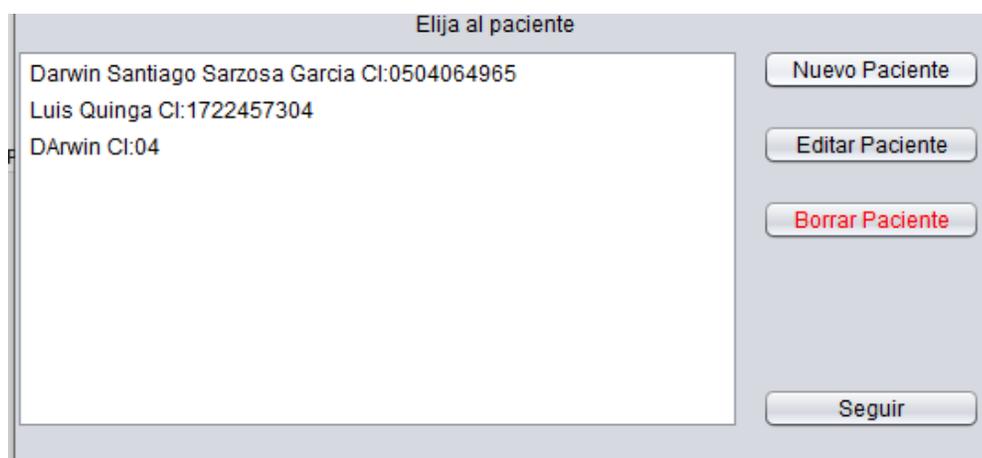
*Flujograma del ingreso de datos del paciente*



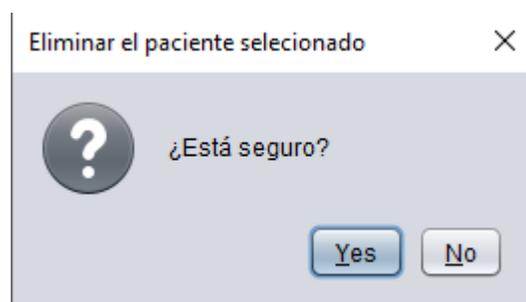
Una vez existan datos anteriores de pacientes guardados, en la ventana antes de escoger los ejercicios a realizar se muestra la lista de los pacientes con su nombre y número de cédula (figura 47) para poder diferenciar los homónimos si existieran. En esta ventana se aprecia crear nuevo paciente que lleva a la ventana anteriormente detallada, la opción de editar paciente y borrar paciente (figura 48).

**Figura 47**

*Ventana de selección del paciente*

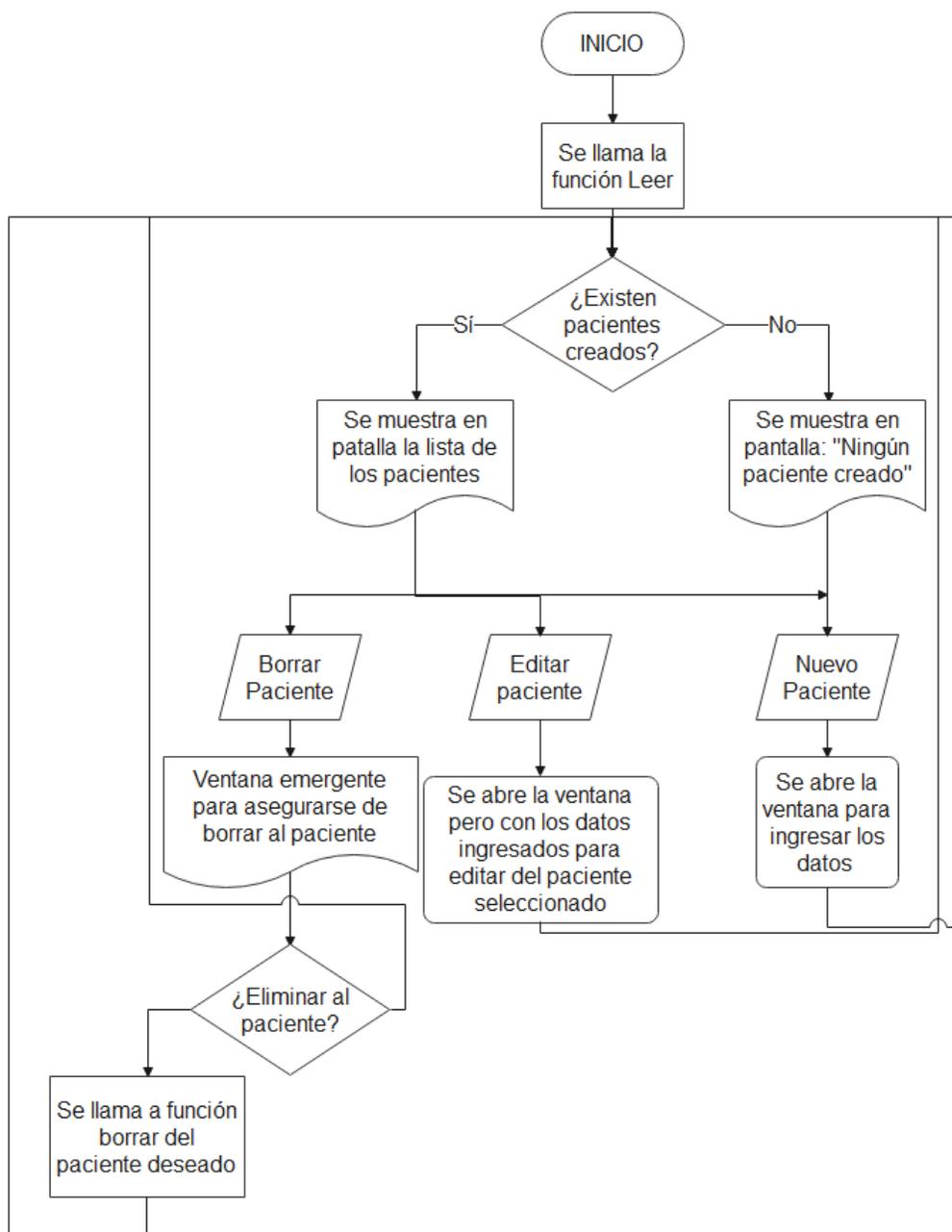
**Figura 48**

*Ventana de anuncio de eliminación del paciente*



**Figura 49**

*Flujograma de selección, eliminación e ingreso del paciente*



### **3.4.2. Comunicación Serial y lógica del microcontrolador**

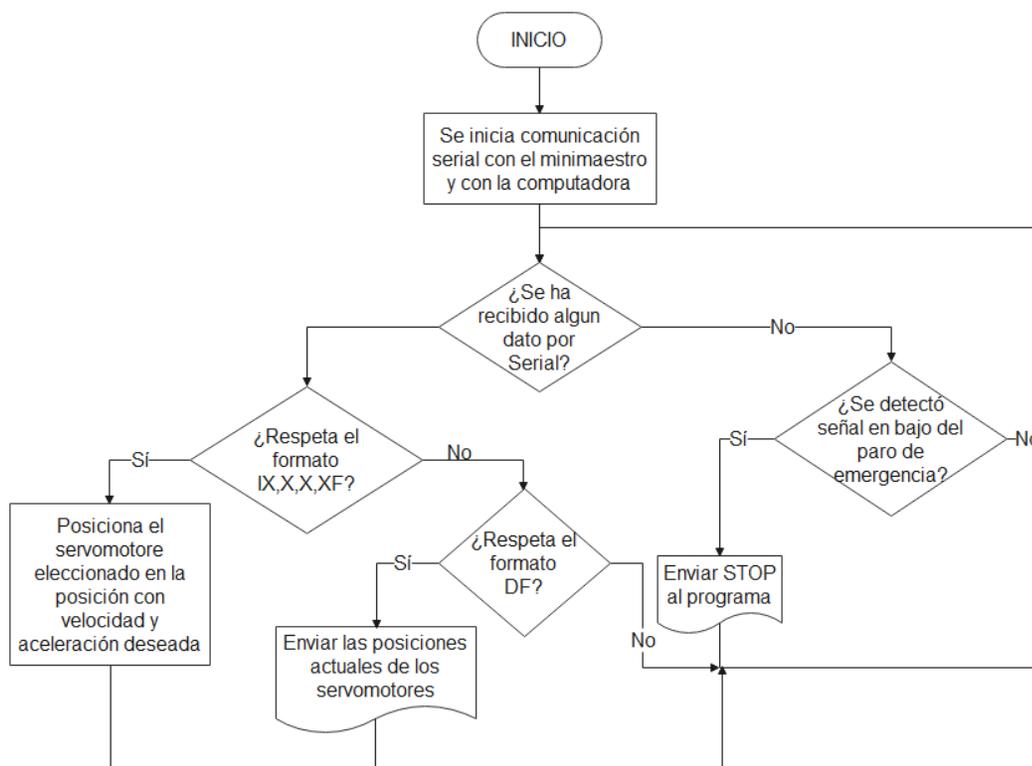
El microcontrolador es el Arduino Nano, este está programado para recibir en forma compacta los valores para comandar los servomotores a través del Mini Maestro

Pololu. La secuencia debe ser enviada de la siguiente forma: "Ia,b,c,dF". Donde la "a" es la dirección del servomotor, la b es el ángulo deseado, c es la velocidad y d es la aceleración. Si queremos que el primer servomotor de dirección 0 se mueva a 90 grados, con máxima velocidad y máxima aceleración posible sería: "I0,6000,0,0F". Donde I y F son valores para evitar que ruido ingrese al sistema y prevenir errores. Y solo los valores encontrados entre IF van a ser ejecutados. Se puede notar que para 90 grados corresponde a 6000, este valor es en microsegundos de control del servo, específicamente el control acepta  $\frac{1}{4}$  de microsegundos de posición. Siendo 4000us (0°) y 8000us (180°) respectivamente. Valores de 0 en velocidad y aceleración representan que se posicionen a la máxima velocidad y aceleración posible, esto siendo limitado por cuestiones mecánicas y eléctricas del sistema.

Simultáneamente si se recibe la señal "DF" el microcontrolador enviará la posición actual de todos los servomotores. Mientras a través del divisor de voltaje en la entrada digital cuando detecte bajo voltaje (aprox. 0.5V o menos) indicará que el paro de emergencia ha sido activado y enviará el mensaje al programa para informar al operador.

Figura 50

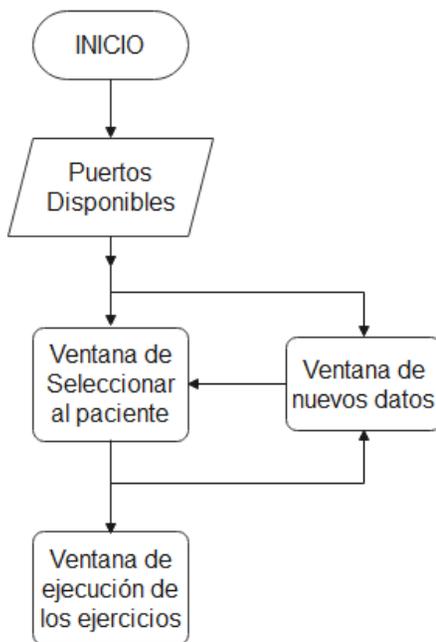
Flujograma de comunicación serial y microcontrolador



Para la buena comunicación serial con la computadora, con el software en resumen debe identificar los puertos serial y seleccionar el correcto del microcontrolador. En la ventana principal de inicio se debe seleccionar de la lista de puertos disponibles, una vez se haya establecido conexión se podrá proceder con el software para elegir al paciente y continuar con el tratamiento. Además de transmitir el nombre puerto correcto entre las ventanas, abrir el puerto a 9600 baudios/s para enviar y recibir los valores para el control de los servos. Para cada ventana se debe cerrar y abrir la comunicación serial para evitar problemas.

**Figura 51**

*Flujograma de selección de puertos*



### 3.5. Descripción del software

Al iniciar el programa ejecutable, se muestra la pantalla de inicio. Como se ve en la figura 52, consta del título del proyecto y los respectivos nombres de los autores y el tutor. En la parte inferior se puede notar que existe la opción de seleccionar del puerto, se deberá seleccionar el puerto correspondiente para continuar con el programa dando al botón Iniciar.

**Figura 52**

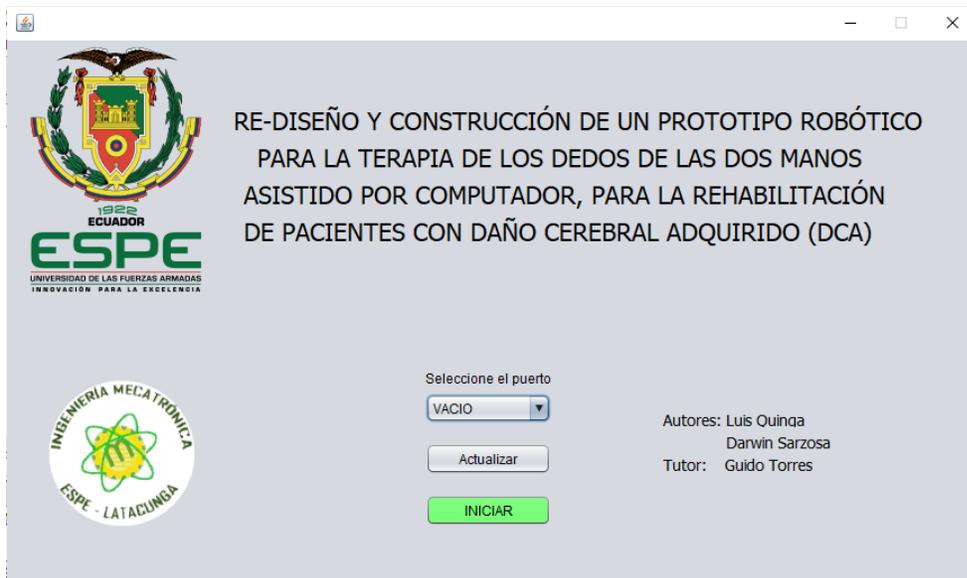
*Pantalla de inicio*



En el caso que no reconozca el puerto, como se ve en la figura 53, y se intenta iniciar el programa saldrá una ventana de error dando las sugerencias para arreglar la comunicación con el microcontrolador, como se ve en la figura 54.

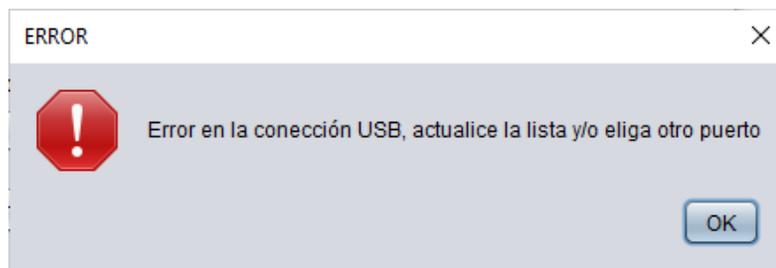
**Figura 53**

*No detección del puerto de comunicación*



**Figura 54**

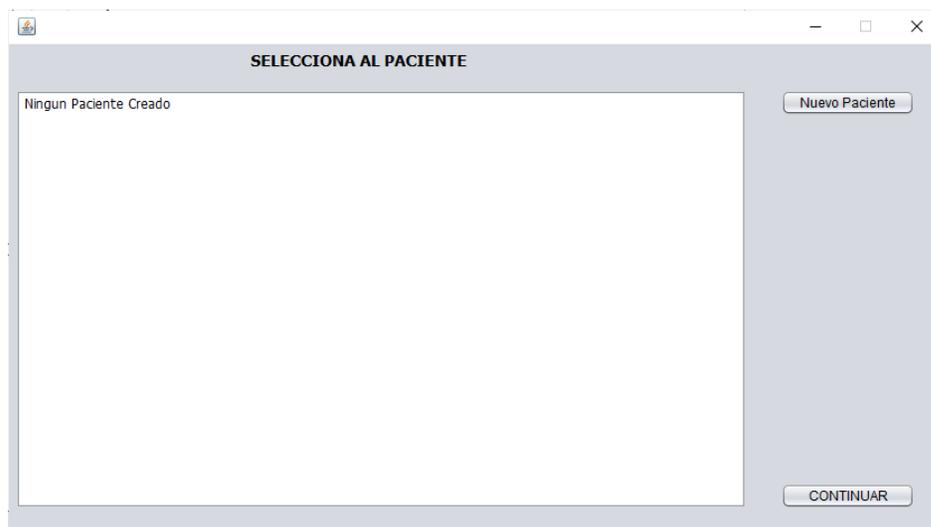
*Mensaje de alerta de error de conexión*



En la siguiente ventana, siendo la primera vez que iniciamos el programa notamos que existe el mensaje que ningún paciente ha sido creado, como se nota en la figura 55. Tenemos dos botones disponibles, Nuevo Paciente que abrirá la ventana para crear los datos del nuevo paciente con sus respectivos datos personales y de configuración para la máquina, el botón Siguiente para continuar con el programa. Si intentamos seguir sin haber creado ningún paciente nos mostrará una ventana emergente mostrando ese error y sugiriendo crear un paciente nuevo, como se ve en la figura 56.

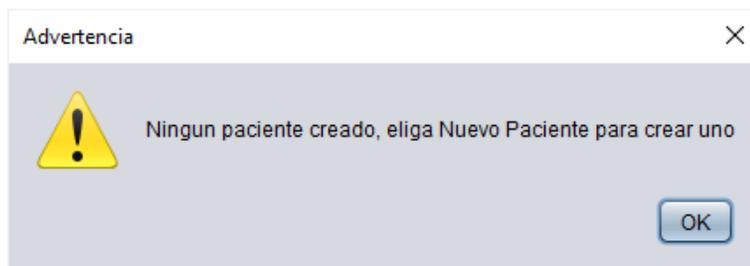
**Figura 55**

*Ventana del listado de pacientes*



**Figura 56**

*Mensaje de advertencia de no creación de pacientes*



En la ventana para crear los datos del paciente nuevo, nos pedirá los siguientes datos, nombre, edad, número de cédula, ciudad de residencia y correo electrónico, como se ve en la figura 57. Pero solo son obligatorios los datos de nombre, edad y número cédula y se intenta continuar con la configuración para el nuevo paciente con el botón de Siguiente saltará la ventana emergente que señalará los datos requeridos, como se ve en la figura 58. También se puede cancelar la creación del nuevo paciente con el botón cancelar.

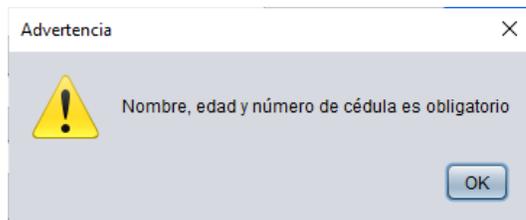
**Figura 57**

*Ventana para el ingreso de datos del paciente*

Una ventana de formulario con el título "INGRESE LOS DATOS DEL PACIENTE". A la izquierda hay un formulario con los siguientes campos: "Nombre" (campo de texto), "Edad" (campo de texto), "Cédula" (campo de texto), "Ciudad" (campo de texto), "Email" (campo de texto) y "Mano" (menú desplegable con "Mano Derecha" seleccionado). A la derecha hay un icono de un paciente (círculo azul con un signo de persona blanca). En la parte inferior hay dos botones: "CANCELAR" a la izquierda y "SIGUIENTE" a la derecha.

**Figura 58**

*Mensaje de que faltan datos por llenar*



La siguiente ventana para configurar nos muestra con una animación, la configuración de los máximos y mínimos para cada uno de los dedos, como se ve en la figura 59. Para posicionar los soportes en la máxima distancia y mínima distancia para la mano del paciente.

**Figura 59**

*Ventana para configurar posición de los dedos*

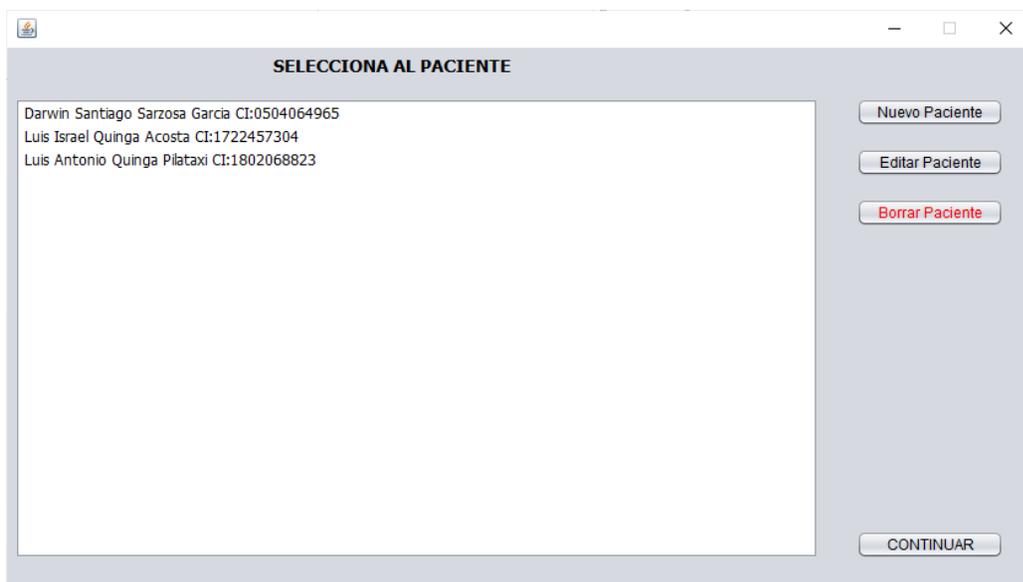


En la ventana para seleccionar al paciente, ahora creado mínimo un paciente se mostrará dos nuevos botones, como se ve en la figura 60. Editar Paciente, que abrirá la ventana de Nuevo paciente, pero con los datos ya existentes del paciente como se ve

en la figura 61. Aquí se puede editar tantos los datos personales del paciente, como los datos de configuración para los soportes, si se desea se puede cambiar.

### Figura 60

*Ventana con el listado de pacientes creados*



### Figura 61

*Venta de edición de datos del paciente*

The screenshot shows a window titled "INGRESE LOS DATOS DEL PACIENTE". It contains a form with the following fields:

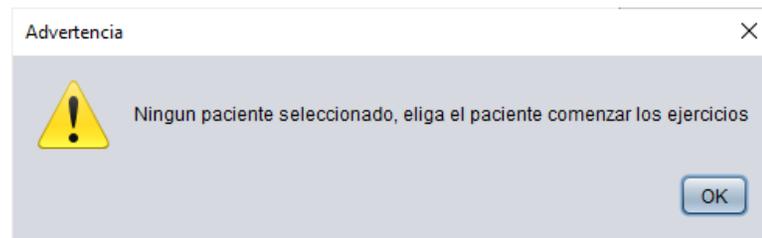
- Nombre: Luis Israel Quinga Acosta
- Edad: 25
- Cédula: 1722457304
- Ciudad: Quito
- Email: (empty)
- Mano: Mano Derecha (dropdown menu)

On the right side of the form, there is a large blue circular icon representing a person. At the bottom of the window, there are two buttons: "CANCELAR" and "SIGUIENTE".

Para continuar con la selección de los ejercicios, primero se escoge al paciente deseado, si no se selecciona, se mostrará la ventana emergente correspondiente, como se ve en la figura 62.

### Figura 62

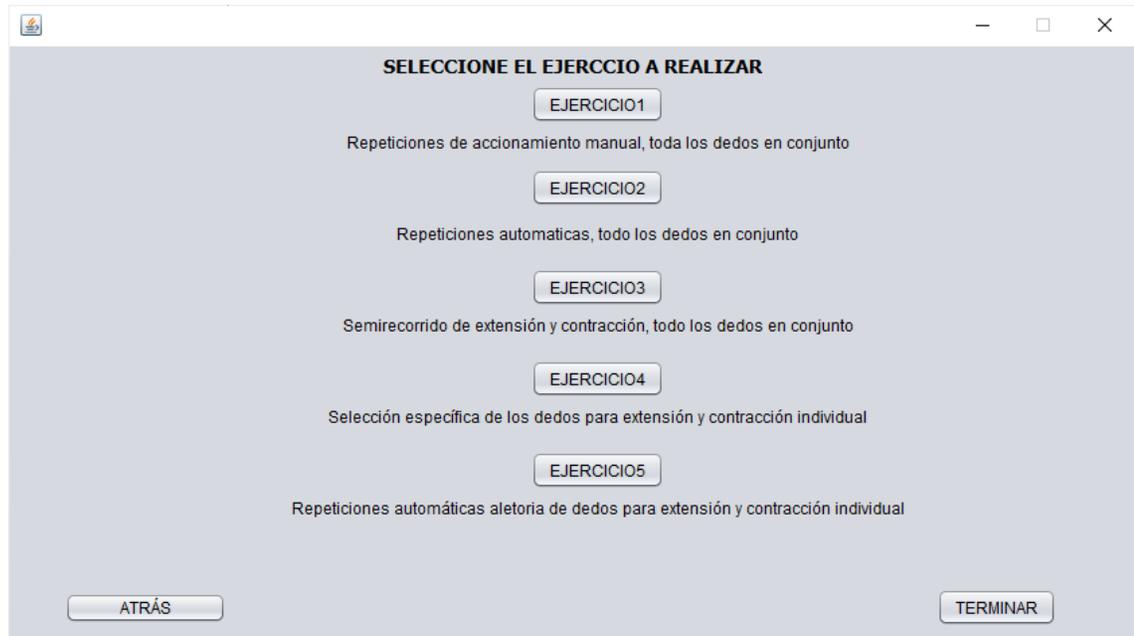
*Mensaje de alerta de selección del paciente*



Con los ejercicios en pantalla tendremos un botón para cada uno de ellos, con una explicación corta para el mejor entendimiento del operador, como se ve en la figura 63. El primer ejercicio consiste en extensión y contracción completa de todos los dedos en conjunto, pero accionado manualmente por el operador. El segundo ejercicio consiste en extensión y contracción completa de todos los dedos en conjunto, pero con la opción de configurar el número de operaciones a realizar automáticamente. El tercer ejercicio consiste en extensión y contracción parcial de todos los dedos en conjunto, es decir desde la mitad la máxima distancia posible se harán las repeticiones automáticas, ya sea en contracción o extensión. El cuarto ejercicio consiste en la contracción y extensión de los dedos individual, donde el operador puede escoger el dedo en cuestión a realizar las repeticiones y el número de las mismas. El quinto ejercicio consiste en repeticiones de contracción y extensión de selección aleatoria e individual de los dedos, una vez pasado por todos los dedos se contará la repetición, las cuales se pueden configurar cuantas realizar. También existe el botón terminar para terminar la sesión y guardar los datos a exportar.

**Figura 63**

*Ventana de selección de ejercicio a realizar*



En la pantalla del Ejercicio 1, tenemos a disposición indicadores visuales de la extensión y contracción de los dedos, así como de la fuerza ejercida por cada dedo, como se ve en la figura 64. Además de un deslizador para seleccionar la velocidad del mecanismo, siendo por defecto la velocidad recomendada de 115.7 mm/s, esto expande la posibilidad de duplicar la velocidad si se necesita o reducir 10 veces en la opción de velocidad mínima. Tenemos otro deslizador para elegir el desplazamiento para el ejercicio en porcentaje al desplazamiento máximo que el paciente puede. Con la ayuda de los botones para la acción manual de extender y contraer, además se tener un indicador numérico de cuantas repeticiones se realizaron. Una vez terminado con el ejercicio se puede terminar con la sesión y escoger otro ejercicio o terminar la terapia.

**Figura 64***Ventana del ejercicio 1*

En el ejercicio 2, se colocan los mismos botones e indicadores del ejercicio 1, pero ahora tenemos como entrada el número de repeticiones a realizar para comenzar, como se ve en la figura 65.

**Figura 65***Ventana del ejercicio 2*

En el ejercicio 3, se colocan los mismos botones e indicadores del ejercicio 1, pero ahora tenemos como entrada el sentido del ejercicio parcial si en contracción, es decir desde la mitad del desplazamiento hacia el mínimo desplazamiento y el de extensión que va desde la mitad del desplazamiento hacia el máximo desplazamiento, como se ve en la figura 66.

### Figura 66

Ventana del ejercicio 3



En el ejercicio 4, se coloca los mismos botones e indicadores del ejercicio 1, pero tendremos que seleccionar el dedo para las repeticiones individuales, como se ve en la figura 67.

**Figura 67***Ventana del ejercicio 4*

En el ejercicio 5, se coloca los mismos botones e indicadores del ejercicio 1, pero ahora por selección aleatoria, se realizará el ejercicio de extensión y contracción para cada los dedos, una vez completado todos los dedos contará como una repetición, como se ve en la figura 68.

**Figura 68***Ventana del ejercicio 5*

### 3.6. Construcción y montaje del equipo rehabilitador

Después de realizar los cálculos y tras la simulación de los elementos mecánicos con la aplicación de una fuerza la cual permite que el rehabilitador funcione acorde a las cargas que estará sometido en su funcionamiento se procede a la construcción de las partes del equipo rehabilitador de dedos.

#### 3.6.1. Construcción de la estructura base

Para la realización de la estructura base se la construye en base al diagrama de procesos de la tabla 10 la cual sirve de guía para su construcción.

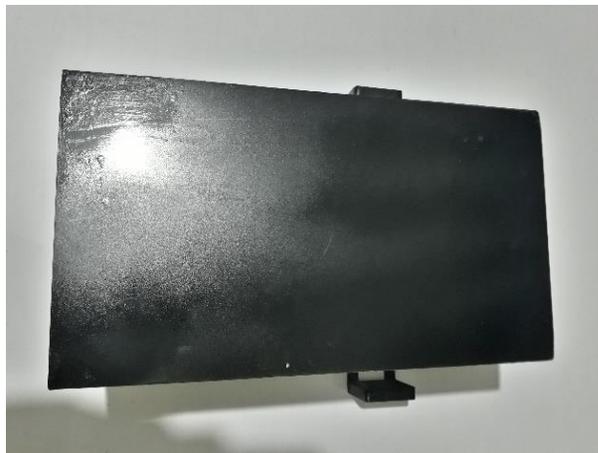
**Tabla 10**

*Hoja de procesos de la estructura base*

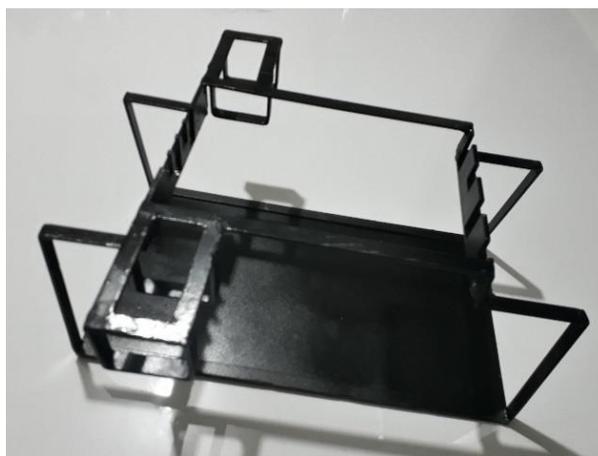
Investigación para el rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las dos manos asistido por computador, para la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido (DCA)							
<b>Método actual</b>	Montaje propuesto	Fecha: 24/05/2021					
<b>Descripción de la parte:</b>	<b>Estructura base</b>						
<b>Descripción de la operación:</b>	<b>Fabricación y montaje</b>						
	Actual		Propuesto		Diferencia		Análisis
	Tiempo	Núm.	Tiempo	Núm.	Tiempo	Núm.	Estudiado por: grupo de investigación
○ Operaciones	6	5					
⇒ Transporte	3	4					
□ Inspecciones	5	24					
D Retrasos	4	3					
▽ Almacenamiento	6	4					
<b>Dist. Recorrida (km)</b>	3 km						

Paso	Procesos	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacenamiento	Distancia (m)	Cantidad	Tiempo (h)	Costo/trabajo
1	Adquisición de material	Vehículo	●	→	■	⌒	▼	200 0	1	3	
2	Medición	Calibrador	●	⇨	■	⌒	▼	2	15	1	
3	Cortes	Amoladora	●	⇨	■	⌒	▼	6	26	4	
4	Soldadura	Soldadura	●	→	■	⌒	▼	6	20	3	
5	Ensamblaje	Ensamble	●	→	■	⌒	▼	7	35	4	

En la construcción de la estructura base del rehabilitador de dedos la parte principal es la base que es visible en la figura 69 la cual está hecha de acero ASTM A36 sobre la cual se instalara la mayoría de los elementos de la máquina, esta base tiene unas medidas de 375x209 mm y tiene un espesor de 3 milímetros.

**Figura 69***Base de la estructura*

Para la construcción de la estructura de la figura 70 que se encuentra sobre la base se emplea platinas acero ASTM A36 de 12.5 mm de ancho y 3 mm de espesor con diversas longitudes, para los soportes de los motores sujetos a la base se utiliza platinas en forma de L de las dimensiones de 12.5mm de ancho y 3 mm de espesor con medidas de 25x25 mm, para la unión de la base con la estructura y los soportes se emplea la soldadura MIG.

**Figura 70***Estructura de soporte*

### **3.6.2. Construcción de la plantilla de mano**

Para la elaboración de la plantilla se mano de la figura 71 se realiza tomando en referencia el diseño y análisis hecho en software para lo cual se requiere de una plancha de aluminio 6061 la cual se realiza un corte de 320x230 y a partir de este corte se procede a realizar unos pequeños cortes rectangulares, así como se procede a realizar el fresado de aberturas en la plancha con diferentes inclinaciones que servirán para el desplazamiento de los soportes de dedos en las guías lineales.

#### **Figura 71**

*Plantilla de mano*



### **3.6.3. Construcción de la cubierta de la estructura**

La construcción de la cubierta de la estructura de la figura 72 se realiza tomando en consideración las medidas de la estructura base permitiendo así que el acople y desacople sea fácil, otra característica que posee la cubierta es que debe ser resistente pero no pesada por ende se la construye en el material de fibra de vidrio.

**Figura 72***Cubierta de la estructura***3.6.4. Construcción del mecanismo manivela-biela-corredera**

Para la realización del mecanismo manivela-biela-corredera se lo construye en base al diagrama de procesos de la tabla 11 la cual sirve de guía para su construcción.

**Tabla 11***Hoja de procesos del mecanismo manivela-biela-corredera*

Investigación para el rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las dos manos asistido por computador, para la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido (DCA)						
<b>Método actual</b>	Montaje propuesto	Fecha: 02/06/2021				
<b>Descripción de la parte:</b>	<b>Mecanismo manivela-biela corredera</b>					
<b>Descripción de la operación:</b>	<b>Fabricación y montaje</b>					
	Actual		Propuesto		Diferencia	Análisis
	Tiempo	Núm.	Tiempo	Núm.	Tiempo	Núm.
○ Operaciones	16	6				
⇒ Transporte	5	4				

Estudiado por: grupo de investigación

□	Inspecciones	5	12								
D	Retrasos	4	25								
▽	Almacenamiento	3	25								
<b>Dist. Recorrida (km)</b>		12 km									
Paso	Procesos	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacenamiento	Dist. (m)	Cantidad	Tiempo (h)	Costo/trabajo
1	Adquisición de material	Vehículo	●	→	→	D	▽	200	1	4	
2	Medición	Calibrador	●	→	●	■	▽	5	15	1	
3	Corte	Amoladora	●	→	●	D	▽	6	30	4	
4	Perforaciones	Taladro	●	→	→	■	▽	6	16	4	
5	Impresión	Impresora	●	→	→	■	D	1200	8	3	
6	Ensamble	Ensamblaje	●	→	→	D	■	3	40	3	

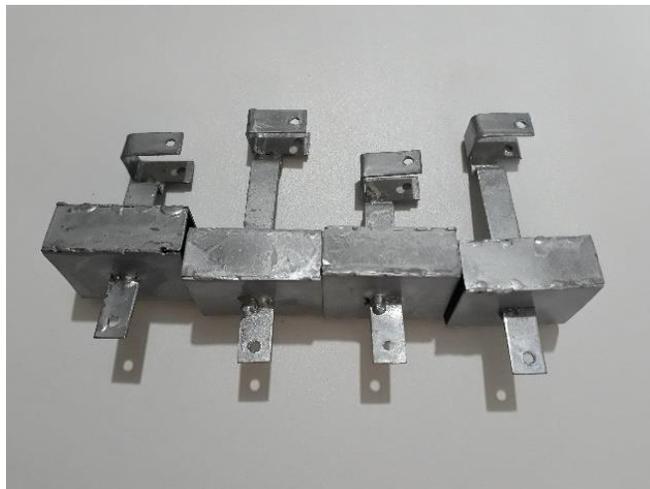
La construcción del mecanismo manivela-biela-corredera contempla tres partes: construcción del mecanismo manivela biela, construcción del soporte de dedos y la selección de la guía lineal. Para la elaboración de la manivela (figura 73) y la biela (figura 74) se toman en cuenta las fuerzas que van actuar sobre ellos para lo cual se los elabora mediante impresión 3D en material ABS.

**Figura 73***Manivela***Figura 74***Biela*

Para la elaboración del soporte de dedos de la figura 75 se considera la fuerza máxima que puede aplicar un dedo y la dimensión de los dedos, para lo cual se los realiza en platinas acero con una longitud máxima de 50 mm para lo cual se realiza dobleces para adquirir la forma deseada, así como para las uniones se utilizó soldadura tipo MIG para unir la parte del acople del riel y el soporte del imán de neodimio.

**Figura 75**

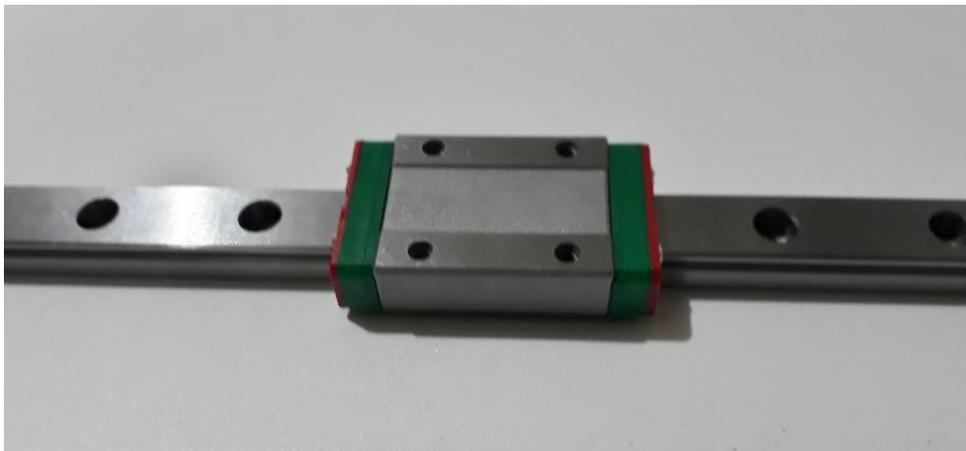
*Soporte de dedos*



Para la guía lineal (figura 76) se realiza la selección del tamaño del riel la cual debe ser lo suficientemente largo para que se pueda desplazar los dedos y otras características que se ven en el capítulo 2, esto permite la selección de la guía lineal MGN12 de 30 cm de longitud.

**Figura 76**

*Guía Lineal MGN 12H*



**3.6.5. Construcción del soporte de la mano**

Para la realización del soporte de mano se lo construye en base al diagrama de procesos de la tabla 12 la cual sirve de guía para su construcción.

**Tabla 12**

*Hoja de procesos del soporte de muñeca*

Investigación para el rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las dos manos asistido por computador, para la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido (DCA)											
<b>Método actual</b>		Montaje propuesto				Fecha: 15/06/2021					
<b>Descripción de la parte:</b>		<b>Soporte muñeca</b>									
<b>Descripción de la operación:</b>		<b>Fabricación y montaje</b>									
		Actual		Propuesto		Diferencia		Análisis			
								Estudiado por: grupo de investigación			
		Tiempo		Tiempo		Tiempo					
		Núm.		Núm.		Núm.					
○	Operaciones	6	5								
➔	Transporte	3	4								
□	Inspecciones	5	24								
D	Retrasos	4	3								
▽	Almacenamiento	6	4								
<b>Distancia Recorrida (km)</b>		3 km									

Paso	Procesos	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacenamiento	Distancia (m)	Cantidad	Tiempo (h)	Costo/trabajo
1	Adquisición de material	Vehículo	●	➔	■	D	▽	500	1	3	
2	Medición	Calibrador	●	➔	■	D	▽	5	30	1	

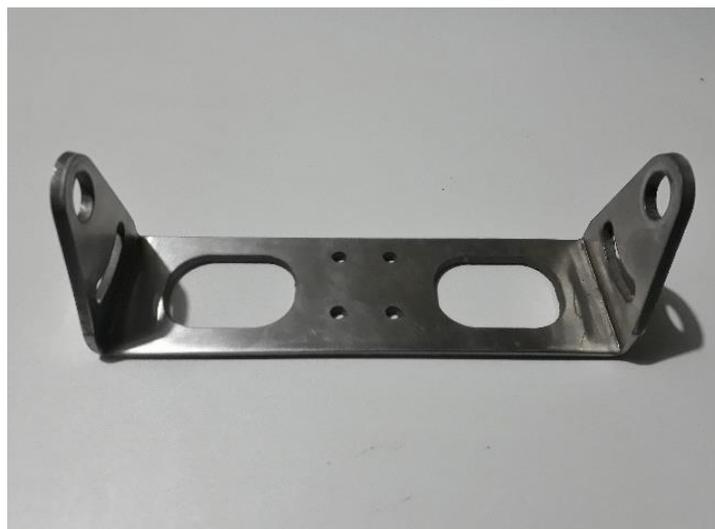
Paso	Procesos	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacenamiento	Dista (m)	Cantidad	Tiempo (h)	Costo/trabajo
3	Cortes	Amolador a	●	⇒	■	⌒	▼	4	10	4	
4	Perforaciones	Taladro	●	⇒	■	D	▼	4	45	3	
5	Ensamblaje	Ensambl e	●	⇒	■	⌒	▼	8	35	4	

Tras el diseño y análisis de la base principal (figura 77), base secundaria (figura 78), base auxiliar (figura 79), base de la muñeca (figura 80) y la lengüeta (figura 81) se procede a la fabricación de estas en el material de acero inoxidable 304 para la cual en una plancha de este material se procede a realizar cortes mediante el método de chorro de agua el cual ofrece un mejor acabado, una vez cortados a la medida requerida se procede a realizar los dobleces y perforación requeridos para el acoplamiento y ensamble final.

### Figura 77

*Base principal*



**Figura 78***Base secundaria***Figura 79***Base auxiliar*

**Figura 80**

*Base de la muñeca*

**Figura 81**

*Lengüeta*



### **3.6.6. Construcción del apoyo del antebrazo**

Tras el diseño y análisis de los extensores del antebrazo de la figura 82 se procede a la fabricación de estas en el material de tubos cuadrados de acero ASTM A500 para lo cual se procede al corte de los tubos cuadrados de 20 mm y 25 mm con

una longitud de 120 mm además se procede a realizar perforaciones de 12 mm en los extremos de cada tubo para la sujeción, al tubo de 20 mm se realiza la colocación de un prisionero de 5 mm.

### Figura 82

*Extensores del antebrazo*



### 3.6.7. Construcción del sistema eléctrico

Para la construcción del sistema eléctrico del rehabilitador de dedos se lo hace en base al diagrama de procesos de la tabla 13 la cual sirve de guía para su construcción.

### Tabla 13

*Hoja de procesos del sistema eléctrico del rehabilitador*

Investigación para el rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las dos manos asistido por computador, para la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido (DCA)		
Método actual	Montaje propuesto	Fecha: 22/06/2021
Descripción de la parte:	Sistema eléctrico	
Descripción de la operación:	Diseño y ensamble	

		Actual		Propuesto		Diferencia		Análisis			
		Tiempo	Núm.	Tiempo	Núm.	Tiempo	Núm.	Estudiado por: grupo de investigación			
○	Operaciones	120	5								
⇒	Transporte	6	2								
□	Inspecciones	40	5								
D	Retrasos	10	2								
▽	Almacenamiento	4	3								
Distancia Recorrida (km)		3 km									

Paso	Procesos	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacenamiento	Distancia (m)	Cantidad	Tiempo (h)	Costo/trabajo
1	Adquisición de material	Vehículo	●	⇒	⇒	D	▽	220	50	12	
2	Soldadura	Estaño y cautín	●	⇒	⇒	■	D	20	30	4	
3	Sujeción	Pernos y tuercas	●	⇒	⇒	■	D	2	60	3	
4	Mediciones	Multímetro	●	⇒	⇒	D	D	2	10	2	
5	Ensamble	Pernos y tuercas	●	■	⇒	D	⇒	10	25	8	

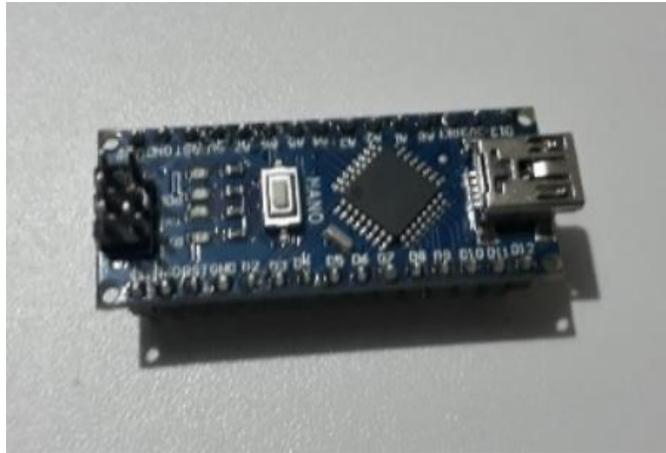
El sistema eléctrico consta de los siguientes elementos:

Microcontrolador de la marca Arduino modelo Nano como se ve en la figura 83, por su tamaño y forma es muy conveniente. Sirve como puente de comunicación para el control de los servomotores a través del Mini Maestro Pololu. Recibe a través de

comunicación serial los mensajes del software para accionar los servomotores con determinada velocidad y aceleración deseada hacia el ángulo requerido. Además de enviar al software las posiciones actuales de los motores y en el caso cuando el paro de emergencia esté activado.

### **Figura 83**

*Arduino Nano*



Mini Maestro Pololu 12 como se ve en la figura 84, es un servocontrolador de 12 canales, es decir para doce 12 servos en simultáneo. Se utiliza para enviar las señales moduladas que entiende el servo, en cuestiones de ángulo, cuidando velocidad y aceleración por software.

**Figura 84***Servocontrolador Mini Maestro 12 de Pololu*

Servomotor SunFounder SF3218MG como se ve en la figura 85, con 20 Kg-f de rango de trabajo entre 4.5 V – 7.2 V es el accionamiento del mecanismo para el desplazamiento de los deslizadores. Tales deslizadores siendo para el tratamiento de rehabilitación del proyecto.

**Figura 85***Servomotor SunFounder SF3218MG*

Paro de emergencia EBSA4-BS542 como se ve en la figura 86, sirve como mecanismo de seguridad para el paciente, ubicado al principio del sistema eléctrico, si

se acciona corta todo el suministro de energía de los motores y del servocontrolador. Para detectar su accionamiento está siendo monitoreado a través de un divisor de voltaje con el microcontrolador.

### **Figura 86**

*Paro de emergencia*



Fuente de poder MCH-K305D, como se ve en la figura 87, con un rango de funcionamiento de 1 V-30 V con 0A-5A de corriente. Sirve alimentación eléctrica de 7.2 V para los 6 servomotores además de alimentar el servocontrolador sin ningún problema. Se alimenta a través de la red comercial ecuatoriana 120 V a 60 Hz.

### **Figura 87**

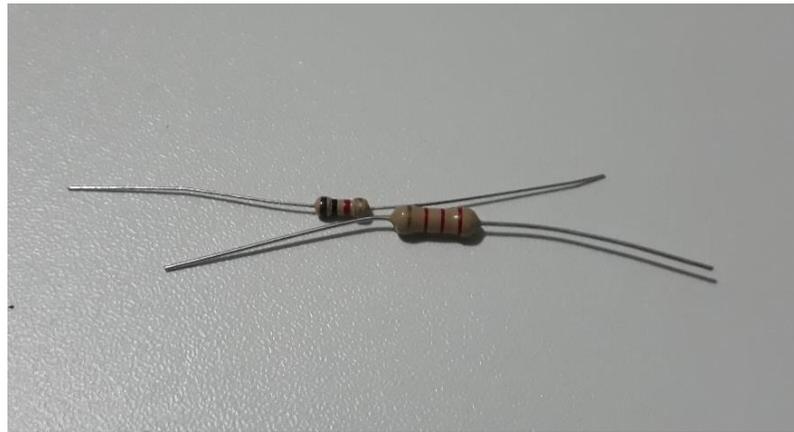
*Fuente de poder MCH-K305D*



Resistencias comerciales como se ve la figura 88, de  $1\text{ K}\Omega$  y  $2.2\text{ K}\Omega$  de  $1\text{W}$  de potencia máxima para el divisor de voltaje para la detección de activación del paro de emergencia con el microcontrolador Arduino Nano.

### **Figura 88**

*Resistencias eléctricas*



## **3.7. Ensamble del equipo rehabilitador de dedos**

### **3.7.1. Ensamble del mecanismo manivela-biela-corredora**

El ensamble del mecanismo se realiza por fases acorde al siguiente orden secuencial establecido:

Acoplamiento de los servomotores a las platinas de las bases con la ayuda de tuercas y pernos de tamaño M4 como se ve en la figura 89.

**Figura 89**

*Acoplamiento de los servomotores a la base*



Instalación del soporte de dedos en el patín de la guía lineal como se ve en la figura 90 en la cual la sujeción se emplea pernos M3 para su unión, los soportes de dedos son para los dedos índice, medio, anular y medio.

**Figura 90**

*Ensamble de soporte para dedos y patines*

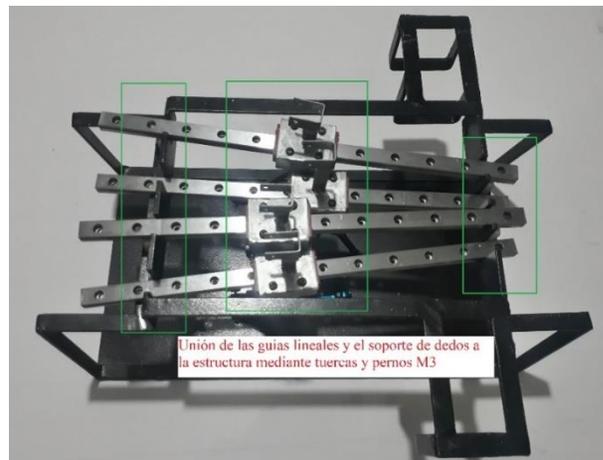


Acoplamiento de las guías lineales a la estructura base y a la unión del patín y los soportes de los dedos, la instalación del riel se realiza con tuercas y pernos M3 para

la cual se realizan perforaciones en la estructura base, este ensamble completo se ve en la figura 91.

### **Figura 91**

*Unión de las guías lineales y soporte de dedos a la estructura base*



La unión del mecanismo manivela-biela se realiza mediante la utilización de tuercas y pernos M3 como se ven en la figura 92, para completar el montaje del mecanismo manivela-biela-corredera se une la manivela al servomotor y se une la biela al soporte de dedos mediante pernos M3 como se ve en la figura 93 y 94 respectivamente.

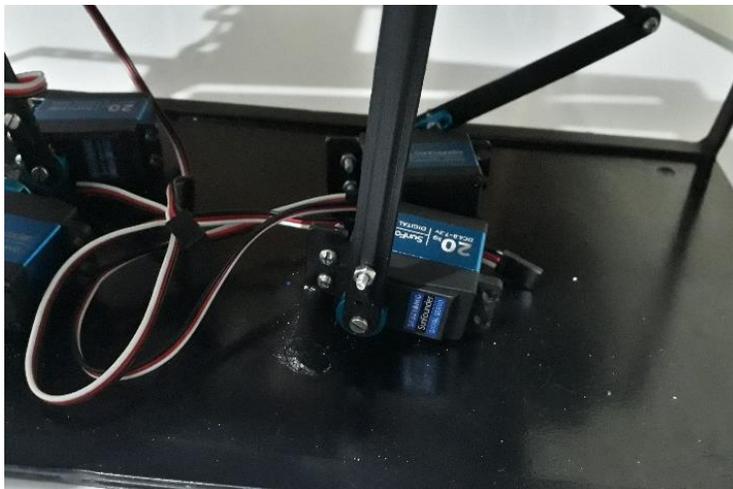
### **Figura 92**

*Unión manivela-biela*

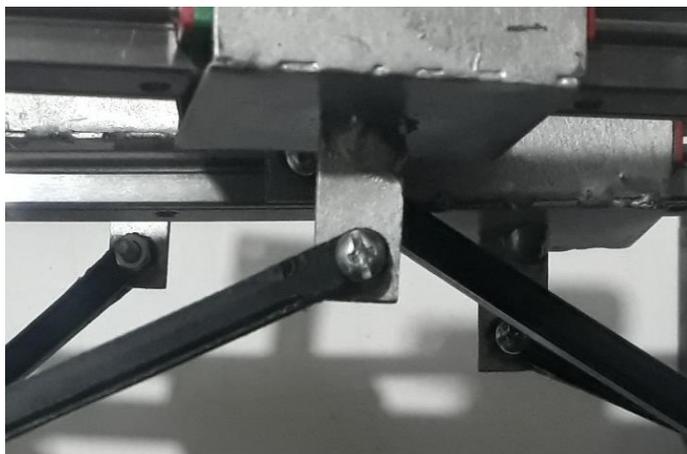


**Figura 93**

*Unión de la manivela al servomotor*

**Figura 94**

*Unión de la biela al soporte de dedos*



### **3.7.2.** ***imanes***

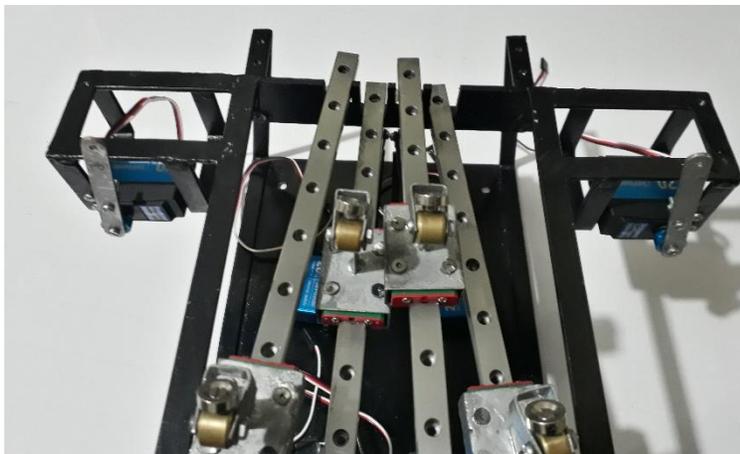
### ***Acoplamiento del soporte del pulgar e***

La unión del soporte del pulgar se realiza mediante una platina al servomotor además se une el otro extremo de la plantilla a una base del pulgar mediante tuercas y pernos M3 como se ve en la figura 95, tras este acople se procede a la colocación de la

platilla de la mano la cual se sujeta a la estructura base a través de perforaciones y pernos y tuercas M3 como se ve en la figura 96.

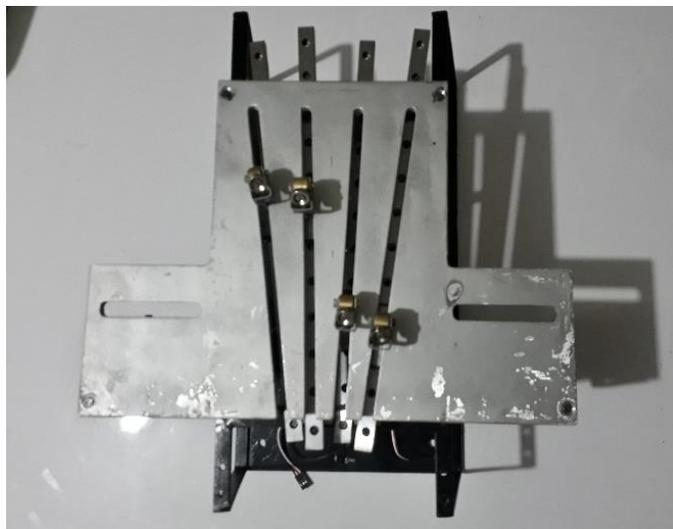
### Figura 95

*Unión del soporte del pulgar al servomotor*



### Figura 96

Acoplamiento de la plantilla de mano



La colocación de imanes de neodimio con aberturas en el centro se realiza en el soporte de los dedos mediante un eje el mismo que sujetara al imán y al soporte de dedos con la utilización de tuercas y pernos M3 como se ve en la figura 97.

**Figura 97**

*Acople de los imanes de neodimio en los soportes de dedos*

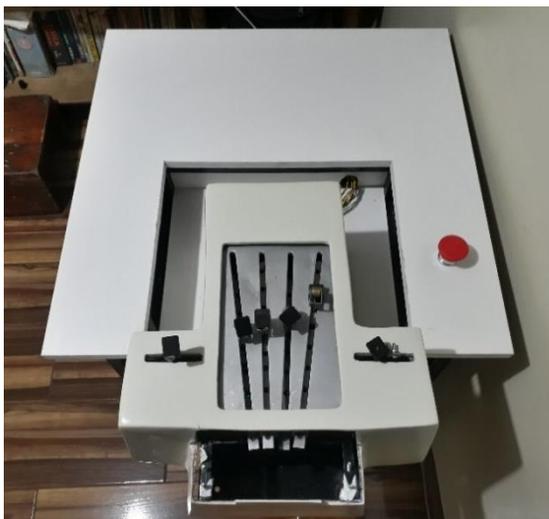


### **3.7.3. Montaje de la estructura base y cubierta en la mesa de trabajo**

Tras el acople de las partes mecánicas se procede a la colocación de la estructura ensamblada a la mesa de trabajo la cual se lo realizara mediante tuercas y pernos M6. Finalmente se procede a la colocación de la cubierta de la estructura realizada en fibra de vidrio, esta se coloca sobre la estructura base con los elementos mecánicos sobre ella como se ve en la figura 98.

**Figura 98**

*Montaje de la estructura base y cubierta en la mesa de trabajo*

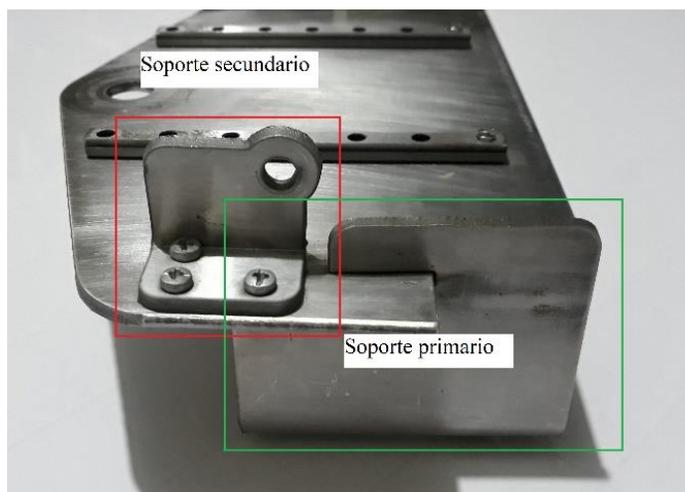


### 3.7.4. *Ensamble del soporte de la mano*

Se procede a la colocación de los soportes primarios y secundarios en la base principal mediante tuercas y pernos M3 como se ve en la figura 99, además se procede a la colocación de las guías lineales MGN9 a la base principal mediante tuercas y pernos M2 como se ve en la figura 100.

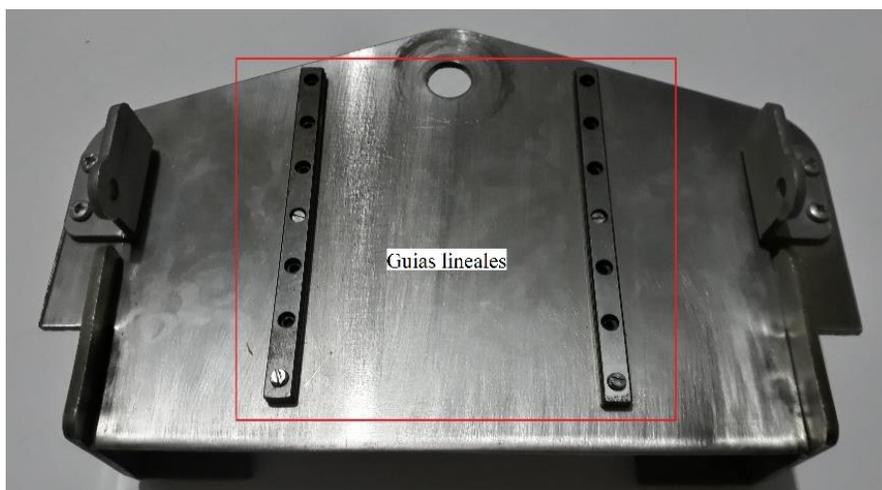
**Figura 99**

*Soportes primarios y secundarios*



**Figura 100**

*Base principal y guías lineales*



En la base secundaria se procede al acople del patín de la guía lineal mediante pernos M2 como se ve en la figura 101, tras el acople del patín a la base secundaria se procede al montaje sobre la base principal mediante tuercas y pernos M4 como se ve en la figura 102.

### **Figura 101**

*Base secundaria y patín*



### **Figura 102**

*Base principal y secundaria*



En la base auxiliar se procede al ensamble de la lengüeta mediante tuercas y pernos M3 como se ve en la figura 103, terminado este acople se procede al montaje sobre la base secundaria mediante tuercas y pernos M4 como se ve en la figura 104.

**Figura 103**

*Base auxiliar y lengüeta*



**Figura 104**

*Base auxiliar y secundaria*



En la base de muñeca se coloca la almohadilla con cintas de velcro para ajustar la muñeca y se la sujeta mediante tuercas y tornillos M10 los mismos que servirán para unir a la base auxiliar tal como se ve en la figura 105.

### **Figura 105**

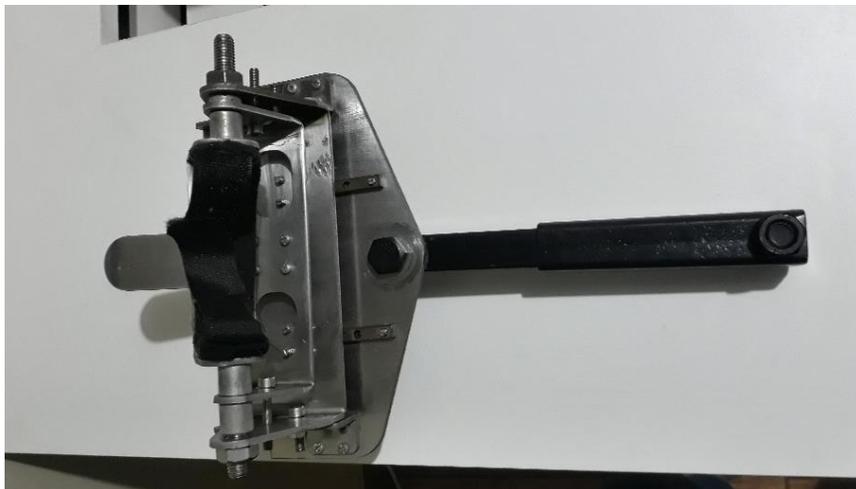
*Acople de las bases*



Una vez ensamblado el soporte de la muñeca se procede a la colocación del extensor del antebrazo el cual está compuesto por dos piezas que están fabricadas con tubos cuadrados vacíos de acero ASTM A500 los cuales van sujetos a la base principal mediante tuercas y pernos M12 como se ve en la figura 106.

**Figura 106**

*Ensamble del soporte de muñeca y el soporte del antebrazo*



### **3.8. Ensamble final**

Tras el ensamble del soporte de la muñeca y el soporte del antebrazo se realiza su acople en la estructura base mediante tuercas y pernos M4 como se indica en la figura 107.

**Figura 107**

*Ensamble final de la parte mecánica*

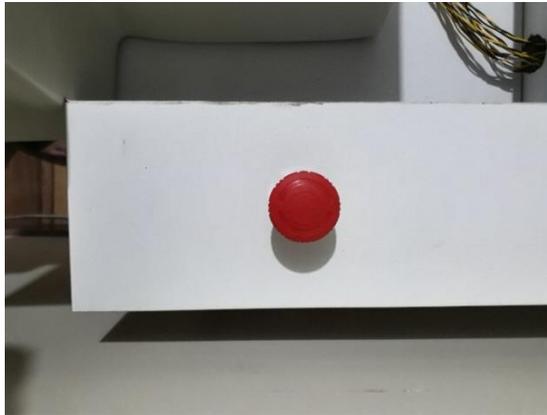


### **3.8.1. Ensamble del sistema eléctrico**

Tras el ensamble de la parte mecánica y el montaje de los motores a la estructura base se procede a la instalación del sistema eléctrico para el funcionamiento y control de la misma, para eso se inicia colocando el paro de emergencia en la parte derecha de la mesa de trabajo cercana a la estructura base como se indica en la figura 108.

#### **Figura 108**

*Colocación del paro de emergencia*

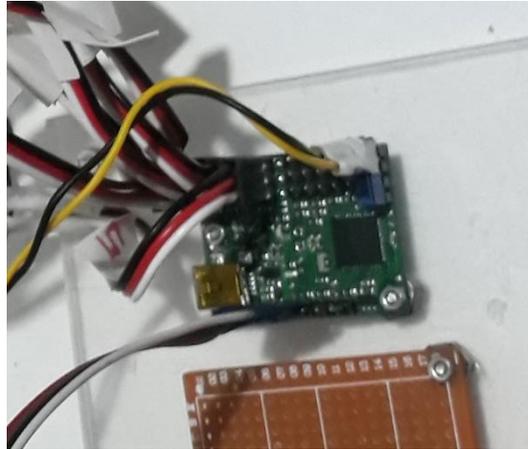


Los componentes del sistema eléctrico y electrónico están compuestos por un sistema de control de los servomotores y un sistema de interrupción de operación mediante un paro de emergencia los cuales se encuentran conectados de la manera siguiente:

Se realiza la conexión de los servomotores al servocontrolador Mini Maestro Pololu de 12 canales la cual es alimentada por la fuente de poder con un voltaje de 7.2 como se ve en la figura 109.

**Figura 109**

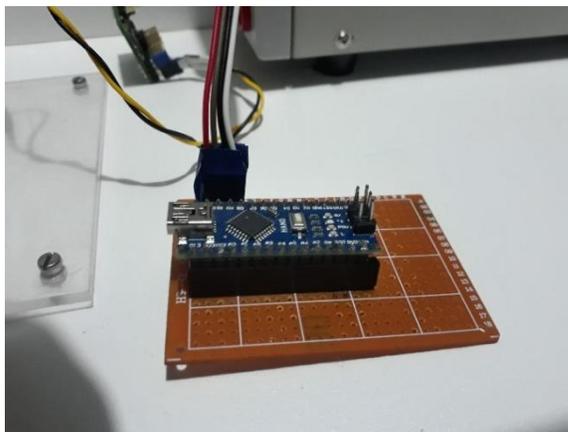
*Conexión de los servomotores al Mini Maestro Pololu*



Se procede a la soldadura de un divisor de voltaje a la galleta de soldadura, la salida del divisor de voltaje es empleada para la detección de la activación del paro de emergencia, en la galleta de soldadura además se procede a soldar el Arduino nano como se ve en la figura 110.

**Figura 110**

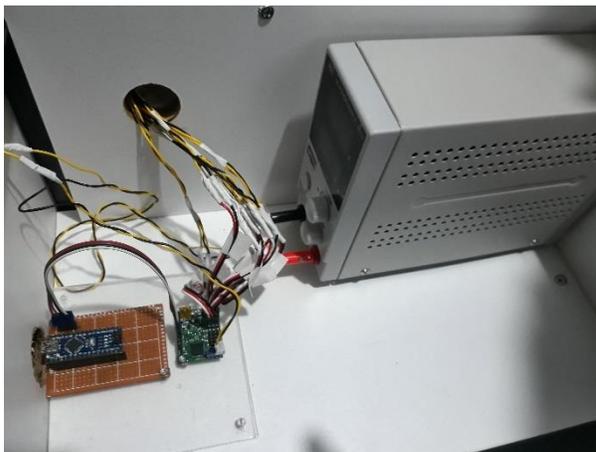
*Soldadura del divisor del voltaje y Arduino nano*



Finalmente se procede la alimentación del servocontrolador Pololu y el Arduino mediante la fuente de poder, además de conectar el Arduino y el servocontrolador como se muestra en la figura 111.

### Figura 111

*Conexión final del sistema eléctrico*



### 3.9. Costos de producción

Después del diseño, construcción y ensamble de la máquina de rehabilitación de dedos se realiza un desglose de los gastos totales de producción de la máquina tomando en consideración cada gasto directo e indirecto realizado.

**Tabla 14**

*Costo de materiales del rehabilitador de dedos*

Objeto	Descripción	Costo/Unidad (\$)	Cant.	Total (\$)
<b>Estructura</b>	Plancha acero AISI	40	1	40
<b>base</b>	1020 (e=3 mm)			

<b>Objeto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo/Unidad (\$)</b>	<b>Cant.</b>	<b>Total (\$)</b>
	Platinas acero AISI 1020 (12x3 mm)	30	1	30
	Cubierta de fibra de vidrio	90	1	90
<b>Plantilla de la mano</b>	Plancha de aluminio 6061	30	1	30
	Tuercas y Pernos	0.05	20	1
<b>Mecanismo manivela- biela- corredera</b>	Manivela y biela	3	8	24
	Guías Lineales	30	6	180
	Platina de acero AISI A36	30	1	30
	Servomotor SunFounder 20KG	30	4	120
	Tuercas y pernos	0.05	120	6
	Broca (3mm)	3.5	1	3.5
	Broca (4mm)	4	1	4
	Imán de neodimio avellanado	2	4	8
	Imán de neodimio plano	2	4	8
	Porta imán	2	4	8
	Eje de bronce	25	1	25

<b>Objeto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo/Unidad (\$)</b>	<b>Cant.</b>	<b>Total (\$)</b>
<b>Soporte de pulgares</b>	Servomotor	30	2	60
	SunFounder 20KG			
	Platina AISI 304	30	1	30
	Broca (3mm)	3.5	1	3.5
	Imán de neodimio plano	2	2	4
	Porta imán	2	2	4
	Tuercas y pernos	0.05	40	2
<b>Mesa</b>	Tableros de madera laminados	70	1	70
	Estructura Metálica	30	1	30
	Juego de brocas de madera	6	1	6
<b>Material eléctrico</b>	Alambre de timbre	0.3	15	4.5
	Pasta de soldar	5	1	5
	Estaño	0.25	4	1
	Galletas de soldadura	1.5	2	3
	Arduino nano	10	1	10
	Servocontrolador Mini Maestro Pololu	40	1	40
	Acrílico	5	1	5
	Resistencias	0.25	4	1

<b>Objeto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo/Unidad (\$)</b>	<b>Cant.</b>	<b>Total (\$)</b>
	Taípe	3	1	3
	Alambre para protoboard	4.5	1	4.5
	Paro de emergencia	6	1	6
<b>Apoyo</b>	Tubo cuadrado 20x20	10	1	10
<b>antebrazo</b>	Tubo cuadrado 25x25	10	1	10
	Prisionero	0.6	1	0.6
	Tuercas y pernos	0.75	2	1.5
<b>Subtotal gastos de materiales</b>				<b>922.10</b>

**Tabla 15**

*Costo de procedimientos para el montaje del rehabilitador de dedos*

<b>Objeto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo/Unidad (\$)</b>	<b>Cant.</b>	<b>Total (\$)</b>
<b>Estructura</b>	Corte	2	30	60
<b>base</b>	Soldadura	20	1	20
	Perforaciones	1.5	28	42
<b>Plantilla de la</b>	Corte	10	1	10
<b>mano</b>	Fresado	20	1	20
	Perforaciones	1.5	4	6
<b>Mecanismo</b>	Corte	2	8	16
<b>manivela-</b>	Soldadura	20	1	20

<b>Objeto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo/Unidad (\$)</b>	<b>Cant.</b>	<b>Total (\$)</b>
<b>biela-</b>	Perforaciones	1.5	24	36
<b>corredera</b>	Mano de obra de ensamble del mecanismo	20	1	20
<b>Soporte de</b>	Corte	2	2	4
<b>pulgares</b>	Perforaciones	1.5	8	12
	Soldadura	20	1	20
	Mano de obra de ensamble del soporte	20	1	20
<b>Mesa</b>	Corte	2	27	54
	Soldadura	20	1	20
	Perforaciones	1.5	30	45
	Mano de obra del ensamble	25	1	25
<b>Material</b>	Mano de obra de	20	1	20
<b>eléctrico</b>	conexión			
	Perforación	1.5	8	12
<b>Apoyo</b>	Corte	2	2	4
<b>antebrazo</b>	Perforación	1.5	3	4.5
<b>Gastos</b>	Transporte de	10	3	30
<b>extras</b>	materiales			

<b>Objeto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo/Unidad (\$)</b>	<b>Cant.</b>	<b>Total (\$)</b>
	Mano de obra del ensamblaje completo	20	1	20
<b>Subtotal gastos de procedimientos</b>				<b>540.50</b>

**Tabla 16**

*Gasto total del rehabilitador de dedos*

<b>Gasto total</b>		
Subtotal gastos de materiales		\$ 922.10
Subtotal gastos de procedimientos		\$ 540.50
<b>Gasto total</b>		<b>\$ 1462.6</b>

## Capítulo IV

### 4. Pruebas y resultados

#### 4.1. Evaluación del funcionamiento del equipo respecto a los parámetros de desplazamiento, velocidad y repeticiones de ejercicios de los dedos

La siguiente evaluación de los parámetros es realizada con la información generada por el programa ejecutable realizado en Java, la información proporciona para el análisis es la información personal del paciente, así como los datos técnicos a evaluar que son: el porcentaje de desplazamiento, la velocidad, la fuerza y el número de repeticiones que realiza el paciente con la posibilidad de realizar los cinco ejercicios.

##### 4.1.1. Datos Personales

Como se observa en la figura 112, cuando se inicia el programa por primera vez y para poder realizar los ejercicios el operario debe ingresar los datos personales creando un nuevo paciente. Nuestra paciente se llama Sandra Acosta, con 48 años, quien procederá a realizar los ejercicios en su mano izquierda. Y luego se procede a guardar los puntos máximos y mínimos de extensión que tiene cada dedo. Con el cual obtenemos el desplazamiento máximo que tiene cada dedo y lo usaremos como una constante para obtener los demás valores de interés, en este caso los desplazamientos máximos de la paciente son los valores de la tabla 17.

**Figura 112**

*Pantalla Inicial de guardado de datos iniciales del paciente*

**INGRESE LOS DATOS DEL PACIENTE**

Nombre

Edad

Cédula

Ciudad

Email

Mano

Medico

**Tabla 17**

*Desplazamiento de los dedos del paciente*

<b>Desplazamiento máximo</b>	
<b>Dedo Pulgar</b>	34 mm
<b>Dedo Índice</b>	47 mm
<b>Dedo Medio</b>	54 mm
<b>Dedo Anular</b>	52 mm
<b>Dedo Meñique</b>	35 mm

La paciente realizó ejercicios para su mano. En cada sesión se registró el total de repeticiones por ejercicio, el promedio de su porcentaje de desplazamiento en la sesión, el promedio de velocidad utilizada y la fuerza promedio utilizada. Tales valores se exportan para una posterior interpretación de los datos, poniendo en perspectiva de los dedos, sus desplazamientos, velocidades y fuerza.

En cuanto a velocidades, limitado por software, el máximo de velocidad es de 168.46 mm/s, mientras que el recomendado es de 84.23 mm/s y siendo la mínima velocidad de 16.85 mm/s. En los datos recolectados se muestran de forma porcentual respecto a la velocidad máxima, siendo el 50% de este la velocidad recomendada.

#### **4.1.2. Análisis de resultados de los ejercicios**

##### **4.1.2.1. Desplazamiento manual de los dedos (ejercicio 1)**

El ejercicio uno consiste en la extensión y contracción manual por parte del operario. Con la opción de establecer una velocidad y un desplazamiento porcentual por repetición, se cuenta una repetición completa cuando se haya extendido y luego contraído los dedos. Sabiendo el desplazamiento del paciente, y el porcentaje del desplazamiento de cada sesión del ejercicio uno obtenemos los datos de la Tabla 18. Este es el desplazamiento medio que realizó el paciente. Como se nota en la Figura 114, en términos de porcentaje, se nota que a través de la evolución de las sesiones el paciente se le aumenta sus desplazamientos porcentuales paulatinamente hasta llegar a más del 95% del máximo. Por la naturaleza del ejercicio que es desplazamiento simultáneo de todos los dedos, y siendo estos graficados como porcentaje. La figura indica el progreso de todos los dedos en conjunto.

Figura 113

Interfaz gráfica del ejercicio 1



Tabla 18

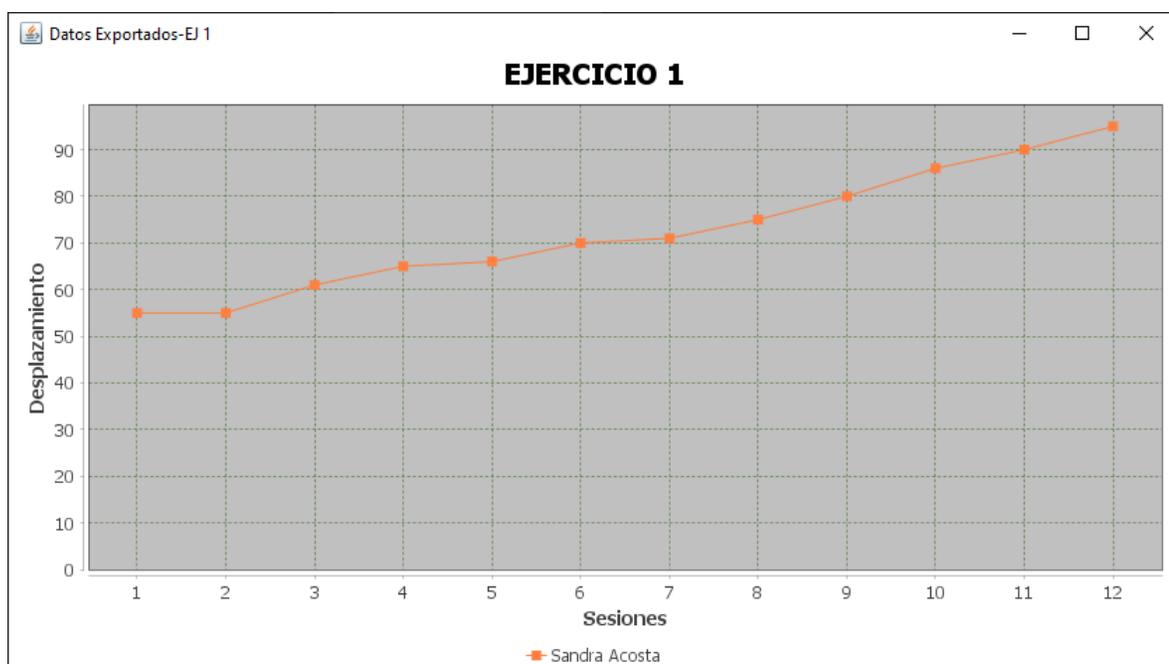
Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 1

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 1 (mm)												
Sesiones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	18,7	18,7	20,7	22,1	22,4	23,8	24,1	25,5	27,2	29,2	30,6	32,3
<b>Pulgar</b>	0	0	4	0	4	0	4	0	0	4	0	0
<b>Dedo</b>	25,8	25,8	28,6	30,5	31,0	32,9	33,3	35,2	37,6	40,4	42,3	44,6
<b>Índice</b>	5	5	7	5	2	0	7	5	0	2	0	5
<b>Dedo</b>	29,7	29,7	32,9	35,1	35,6	37,8	38,3	40,5	43,2	46,4	48,6	51,3
<b>Medio</b>	0	0	4	0	4	0	4	0	0	4	0	0
<b>Dedo</b>	28,6	28,6	31,7	33,8	34,3	36,4	36,9	39,0	41,6	44,7	46,8	49,4
<b>Anular</b>	0	0	2	0	2	0	2	0	0	2	0	0

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 1 (mm)												
Sesiones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dedo	19,2	19,2	21,3	22,7	23,1	24,5	24,8	26,2	28,0	30,1	31,5	33,2
Meñique	5	5	5	5	0	0	5	5	0	0	0	5

**Figura 114**

*Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 1*



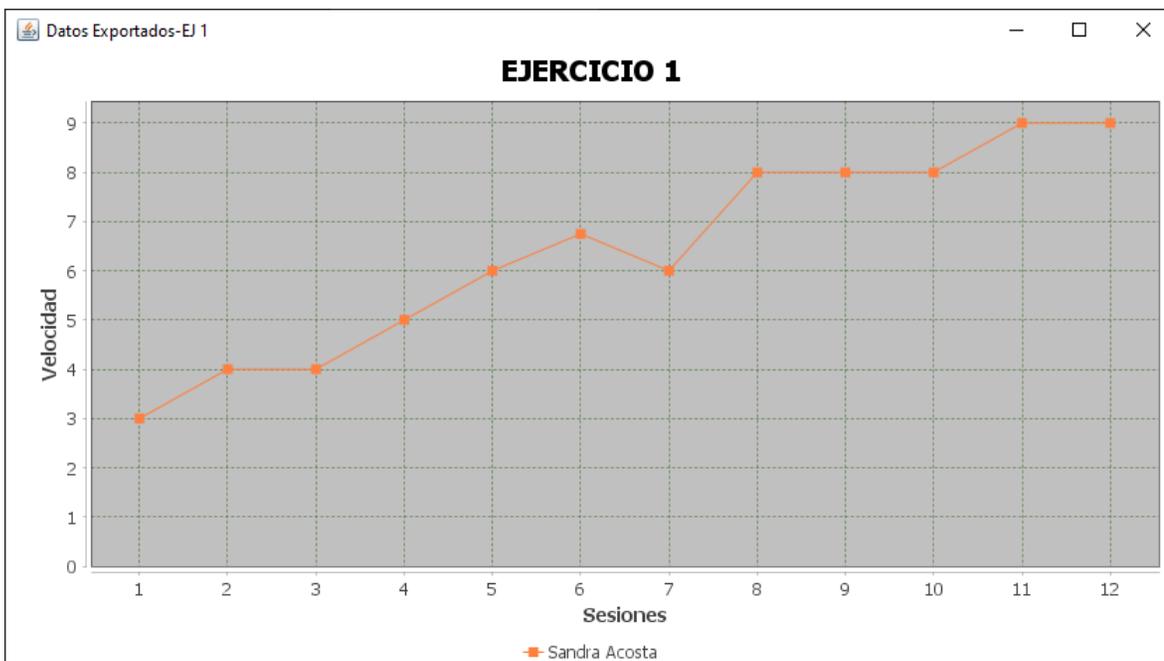
En términos de velocidad igual que el desplazamiento en las primeras sesiones para acostumbrar al paciente, se inicia con velocidades pequeñas, incrementando respecto a la respuesta fisiológica del paciente. En las sesiones podemos observar que la velocidad recomendada es la velocidad que tiende a establecerse para las siguientes sesiones, está siendo de 69,30 mm/s como se ve en la figura 115.

**Tabla 19***Velocidad de desplazamiento de los dedos del ejercicio 1*

<b>Velocidades por sesiones del ejercicio 1 (mm/s)</b>												
<b>Sesiones</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Dedo</b>	23,1	30,8	30,8	38,5	46,2	51,9	46,2	61,6	61,6	61,6	69,3	69,3
<b>Pulgar</b>	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
<b>Dedo</b>	23,1	30,8	30,8	38,5	46,2	51,9	46,2	61,6	61,6	61,6	69,3	69,3
<b>Índice</b>	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
<b>Dedo</b>	23,1	30,8	30,8	38,5	46,2	51,9	46,2	61,6	61,6	61,6	69,3	69,3
<b>Medio</b>	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
<b>Dedo</b>	23,1	30,8	30,8	38,5	46,2	51,9	46,2	61,6	61,6	61,6	69,3	69,3
<b>Anular</b>	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
<b>Dedo</b>	23,1	30,8	30,8	38,5	46,2	51,9	46,2	61,6	61,6	61,6	69,3	69,3
<b>Meñique</b>	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0

**Figura 115**

*Velocidad vs sesiones del ejercicio 1*

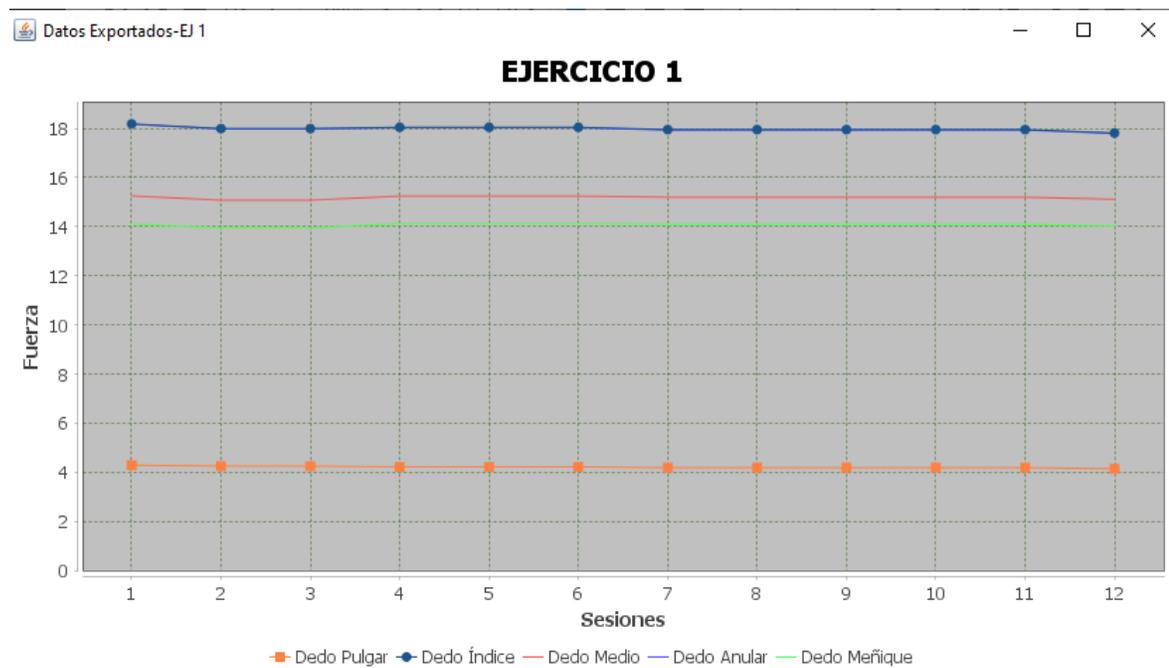


Las fuerzas medias ejercidas en las sesiones, como se ve en la Tabla 20 e igual con el desplazamiento y la velocidad aumenta hasta que se estabiliza aproximadamente conforme se establezca la velocidad óptima para el paciente. Como se puede observar en la figura 116, la fuerza ejercida para el pulgar es más pequeña que los otros dedos, seguido del meñique y del medio. Pero todas presentan el mismo comportamiento que las otras fuerzas, pero a diferentes valores por el distinto desplazamiento de cada dedo.

Tabla 20

*Fuerza por sesiones del ejercicio 1*

Fuerza por sesiones del ejercicio 1 (N)												
Sesiones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo Pulgar</b>	4,29	4,25	4,25	4,22	4,22	4,22	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,14
<b>Dedo Índice</b>	18,1	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,8
<b>Dedo Medio</b>	15,2	15,0	15,0	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
<b>Dedo Anular</b>	18,1	17,9	17,9	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,8
<b>Dedo Meñique</b>	7	8	8	3	3	3	4	4	4	4	4	0
<b>Dedo e</b>	14,1	13,9	13,9	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,0
<b>Dedo e</b>	1	6	6	3	3	3	0	0	0	0	0	3

**Figura 116***Fuerza vs sesiones del ejercicio 1*

Para el ejercicio 1, se establecieron 10 repeticiones aproximado para realizar por ejercicio para los dedos, valor recomendado para terapia de la mano por ICATME, centro de Ortopedia y Traumatología de España, exceptuando la sesión 3 que tiene una repetición más, en propuesta para aumentar más repeticiones conforme se hagan más sesiones. Pero respecto a la comodidad y tiempo del paciente se optó por realizar 10 repeticiones constante.

**Tabla 21***Número de repeticiones del ejercicio 1*

<b>Número de repeticiones por sesión del ejercicio 1</b>												
<b>Sesiones</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Dedo Pulgar</b>	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Índice</b>	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Medio</b>	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Anular</b>	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Meñique</b>	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10

**4.1.2.2. Desplazamiento automático de los dedos (ejercicio 2)**

El ejercicio dos consiste en extensiones y contracciones de la mano por un número determinado de repeticiones escogido por el operario, una vez empieza la máquina realizará todas las repeticiones establecidas. Similar con el ejercicio uno, que es con accionamiento manual se establecen las repeticiones a realizar automáticamente. Igual con la misma idea conforme a la evolución del paciente, se aumenta el desplazamiento, tabla 22, y la velocidad, tabla 23. Todo esto con el objetivo

de llegar al 100% del desplazamiento de los dedos, y en términos de velocidad hasta llegar a una velocidad cómoda para el paciente, como se nota en la figura 118 y figura 119, respectivamente.

**Figura 117**

*Interfaz gráfica del ejercicio 2*



**Tabla 22**

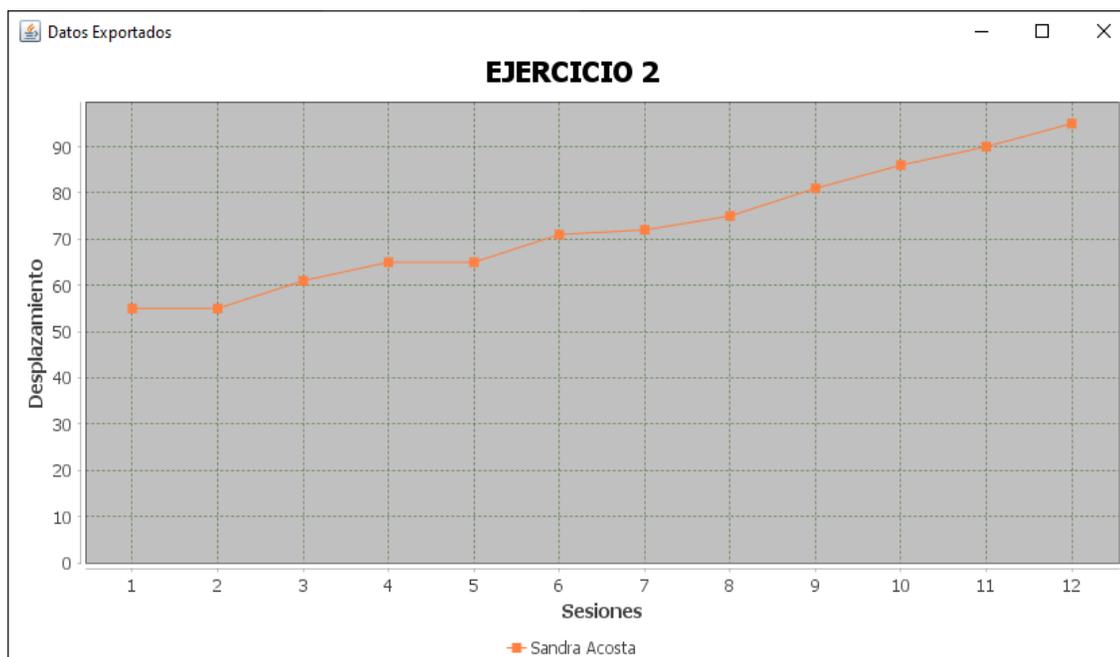
*Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 2*

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 2 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	18,7	18,7	20,7	22,1	22,1	24,1	24,4	25,5	27,5	29,2	30,6	32,3
<b>Pulgar</b>	0	0	4	0	0	4	8	0	4	4	0	0

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 2 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	25,8	25,8	28,6	30,5	30,5	33,3	33,8	35,2	38,0	40,4	42,3	44,6
<b>Índice</b>	5	5	7	5	5	7	4	5	7	2	0	5
<b>Dedo</b>	29,7	29,7	32,9	35,1	35,1	38,3	38,8	40,5	43,7	46,4	48,6	51,3
<b>Medio</b>	0	0	4	0	0	4	8	0	4	4	0	0
<b>Dedo</b>	28,6	28,6	31,7	33,8	33,8	36,9	37,4	39,0	42,1	44,7	46,8	49,4
<b>Anular</b>	0	0	2	0	0	2	4	0	2	2	0	0
<b>Dedo</b>	19,2	19,2	21,3	22,7	22,7	24,8	25,2	26,2	28,3	30,1	31,5	33,2
<b>Meñiqu</b>	5	5	5	5	5	5	0	5	5	0	0	5

Figura 118

Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 2



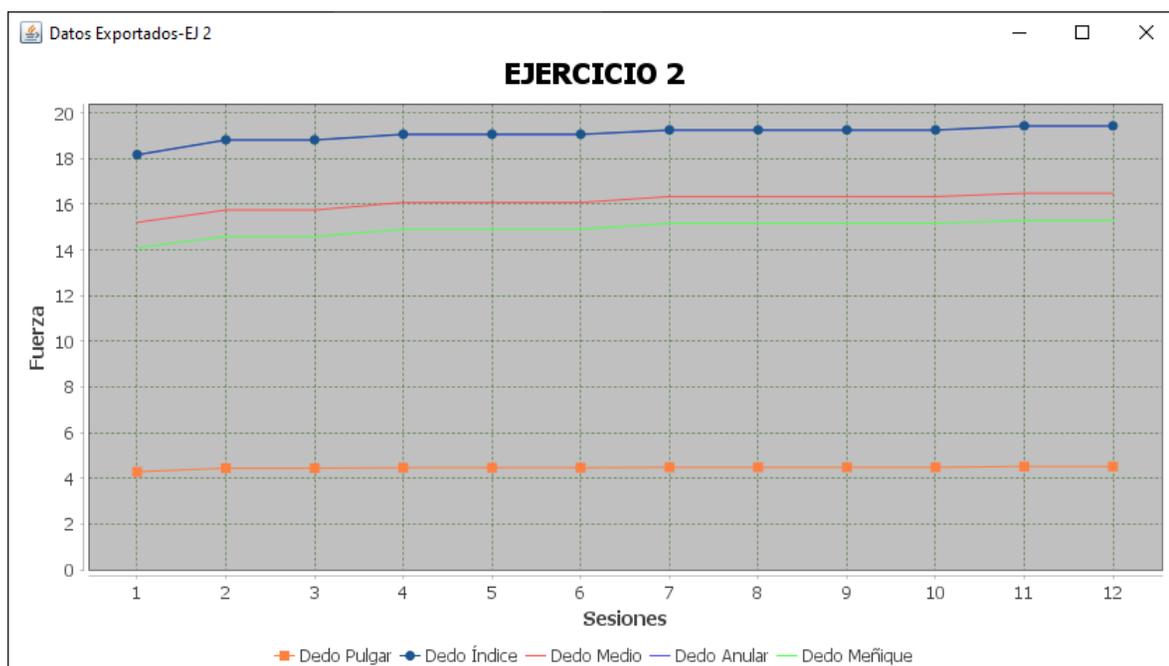




Fuerza por sesiones del ejercicio 2 (N)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	18,1	18,8	18,8	19,0	19,0	19,0	19,2	19,2	19,2	19,2	19,4	19,4
<b>Índice</b>	7	2	2	7	7	7	5	5	5	5	3	3
<b>Dedo</b>	15,2	15,7	15,7	16,0	16,0	16,0	16,3	16,3	16,3	16,3	16,4	16,4
<b>Medio</b>	0	4	4	8	8	8	3	3	3	3	8	8
<b>Dedo</b>	18,1	18,8	18,8	19,0	19,0	19,0	19,2	19,2	19,2	19,2	19,4	19,4
<b>Anular</b>	5	0	0	4	4	4	3	3	3	3	1	1
<b>Dedo</b>	14,0	14,5	14,5	14,9	14,9	14,9	15,1	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2
<b>Meñiqu</b>	9	9	9	0	0	0	6	6	6	6	9	9

**Figura 120**

*Fuerza vs sesiones del ejercicio 2*



Igualmente, como el ejercicio uno, se establecieron 10 repeticiones por sesión para todas las sesiones de forma constante como se ve en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Número de repeticiones del ejercicio 2*

<b>Número de repeticiones por sesión del ejercicio 2</b>												
<b>Sesion</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>es</b>												
<b>Dedo</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Pulgar</b>												
<b>Dedo</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Índice</b>												
<b>Dedo</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Medio</b>												
<b>Dedo</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Anular</b>												
<b>Dedo</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Meñique</b>												
<b>e</b>												

#### **4.1.2.3. Semi-recorrido de extensión y contracción (ejercicio 3)**

El ejercicio tres consiste en la extensión y contracción de la mano, pero desde la mitad respecto al desplazamiento máximo hasta el máximo porcentualmente. Los datos obtenidos por la paciente son los expresados de la tabla 26, y de manera visual en la figura 122. Sigue el mismo patrón de los anteriores ejercicios de aumento en cada

sesión hacia el máximo respecto al desplazamiento y una velocidad cómoda para la configuración de velocidad, como se ve en la tabla 27, y la figura 123.

**Figura 121**

*Interfaz gráfica del ejercicio 3*



**Tabla 26**

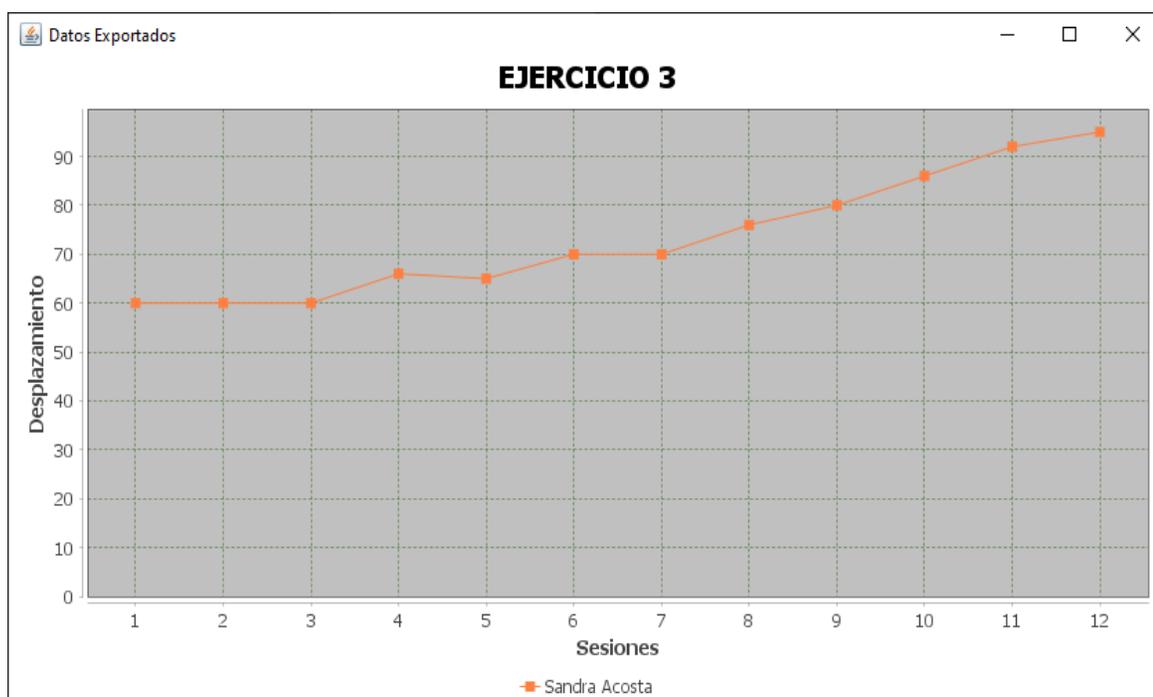
*Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 3*

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 3 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	20,4	20,4	20,4	22,4	22,1	23,8	23,8	25,8	27,2	29,2	31,2	32,3
<b>Pulgar</b>	0	0	0	4	0	0	0	4	0	4	8	0
<b>Dedo</b>	28,2	28,2	28,2	31,0	30,5	32,9	32,9	35,7	37,6	40,4	43,2	44,6
<b>Índice</b>	0	0	0	2	5	0	0	2	0	2	4	5

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 3 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	32,4	32,4	32,4	35,6	35,1	37,8	37,8	41,0	43,2	46,4	49,6	51,3
<b>Medio</b>	0	0	0	4	0	0	0	4	0	4	8	0
<b>Dedo</b>	31,2	31,2	31,2	34,3	33,8	36,4	36,4	39,5	41,6	44,7	47,8	49,4
<b>Anular</b>	0	0	0	2	0	0	0	2	0	2	4	0
<b>Dedo</b>	21,0	21,0	21,0	23,1	22,7	24,5	24,5	26,6	28,0	30,1	32,2	33,2
<b>Meñiqu</b>	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5

**Figura 122**

*Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 3*



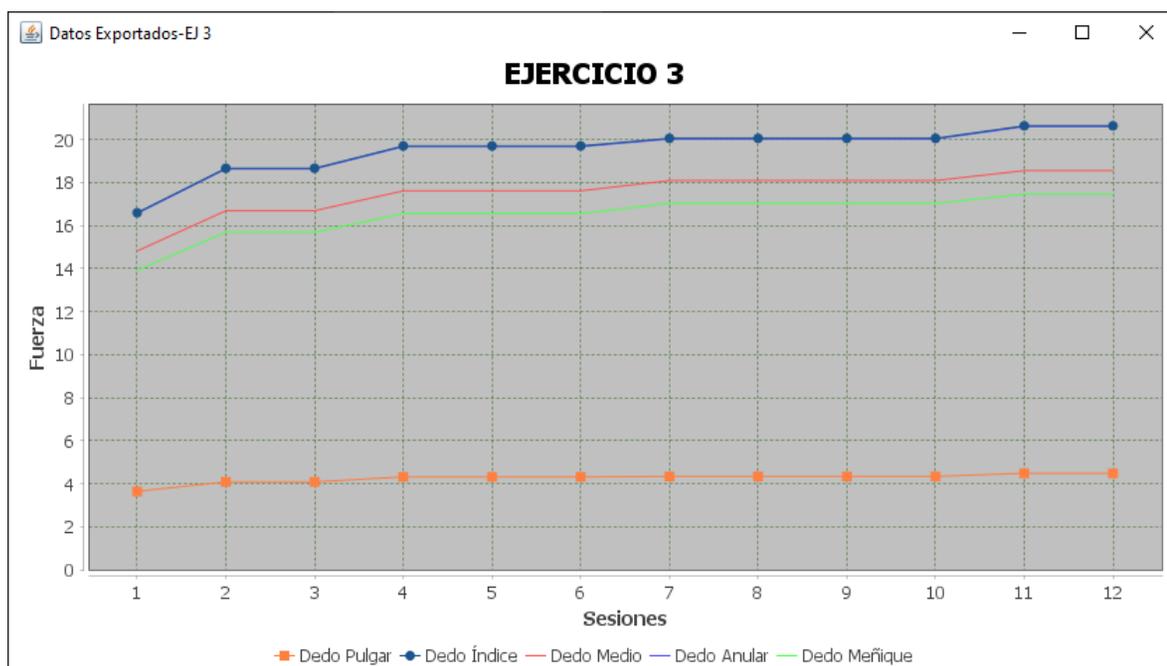




Fuerza por sesiones del ejercicio 3 (N)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	16,5	18,6	18,6	19,7	19,7	19,7	20,0	20,0	20,0	20,0	20,6	20,6
<b>Índice</b>	9	6	6	0	0	0	6	6	6	6	4	4
<b>Dedo</b>	14,8	16,6	16,6	17,6	17,6	17,6	18,0	18,0	18,0	18,0	18,5	18,5
<b>Medio</b>	2	9	9	1	1	1	9	9	9	9	5	5
<b>Dedo</b>	16,5	18,6	18,6	19,6	19,6	19,6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,6	20,6
<b>Anular</b>	6	3	3	7	7	7	2	2	2	2	0	0
<b>Dedo</b>	13,9	15,6	15,6	16,5	16,5	16,5	17,0	17,0	17,0	17,0	17,4	17,4
<b>Meñiqu</b>	2	9	9	6	6	6	4	4	4	4	6	6

Figura 124

*Fuerza vs sesiones del ejercicio 3*



**Tabla 29***Número de repeticiones del ejercicio 3*

<b>Número de repeticiones por sesión del ejercicio 3</b>												
<b>Sesiones</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Dedo Pulgar</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Índice</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Medio</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Anular</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Meñique</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

#### **4.1.2.4. Selección específica para extracción y contracción individual de los dedos (ejercicio 4)**

El ejercicio cuatro consiste en la extensión y contracción de un solo dedo seleccionado por el operario con velocidad y máximo desplazamiento porcentual ajustables, todo esto dependiendo del avance en la rehabilitación y el criterio del operario. Este ejercicio es útil para enfocarse en dedos que necesiten entre velocidades y desplazamientos porcentuales específicos. A la paciente se le enfocó en el dedo

índice, que es el dedo que tiene más desplazamiento, el progreso de este dedo a través de las sesiones se muestra en la tabla 30. y de manera visual en la figura 126. El dedo presentó respuesta positiva respecto al aumento del desplazamiento porcentual e igual con la velocidad como se muestra en la tabla 31 y figura 127.

**Figura 125**

*Interfaz gráfica del ejercicio 4*



**Tabla 30**

*Desplazamiento por sesiones de los dedos del ejercicio 4*

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 4 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	13,1	12,9	14,3	15,2	15,5	16,6	16,6	17,1	17,8	17,6	18,8	19,9
<b>Índice</b>	6	3	4	8	1	9	9	6	6	3	0	8



**Figura 127***Velocidad vs sesiones del ejercicio 4*

Respecto a la fuerza aplicada al dedo, podemos ver que no posee mayores variaciones, como se ve en la tabla 32 y en la figura 128, de alrededor de 0,1 N, a través de las sesiones, que representa un 0.01% de la máxima fuerza detectada.

**Tabla 32***Fuerza por sesiones del ejercicio 4*

Fuerza por sesiones del ejercicio 4 (N)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7
<b>Índice</b>	3	3	2	1	0	7	6	6	5	5	3	3



#### **4.1.2.5. Repeticiones automáticas de selección aleatoria para extensión y contracción individual (ejercicio 5)**

El ejercicio cinco consiste en desplazamientos aleatorios de los dedos, es decir se acciona por turnos dedo por dedo escogido al azar, una vez completados todos los dedos se cuenta una repetición. Por tal razón este ejercicio tiende a tardar más tiempo por repetición alargando las sesiones, se estableció unas 10 repeticiones por sesión para el paciente. Respecto a desplazamientos, tabla 34 y figura 130, velocidades, tabla 35 y figura 131, y fuerza, tabla 36 y figura 132, a pesar que cada dedo realiza su ejercicio de extensión y contracción individualmente, se registra lo observado en ejercicios anteriores, la misma tendencia, todo gracias a la respuesta positiva del paciente respecto al uso de la máquina. Por cada sesión se puede aumentar el nivel para los ejercicios por medio que tanto se extiende los dedos respecto a su desplazamiento máximo y la velocidad con la que se lo realiza. Y la combinación de esta, dando mucha flexibilidad al operario a la hora de escoger el ejercicio y los parámetros de esto, para la mejoría del paciente a través del uso de la máquina.

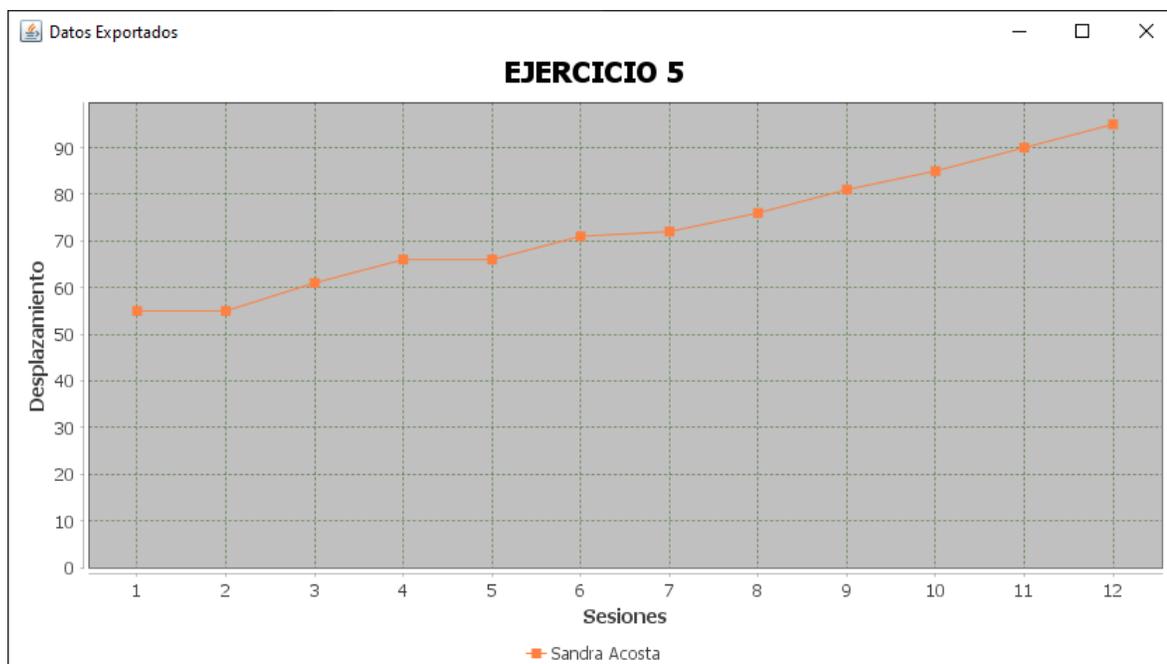
**Figura 129***Interfaz gráfica del ejercicio 5***Tabla 34***Desplazamiento de las sesiones de los dedos del ejercicio 5*

Desplazamientos por sesiones del ejercicio 5 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	18,7	18,7	20,7	22,4	22,4	24,1	24,4	25,8	27,5	28,9	30,6	32,3
<b>Pulgar</b>	0	0	4	4	4	4	8	4	4	0	0	0
<b>Dedo</b>	25,8	25,8	28,6	31,0	31,0	33,3	33,8	35,7	38,0	39,9	42,3	44,6
<b>Índice</b>	5	5	7	2	2	7	4	2	7	5	0	5
<b>Dedo</b>	29,7	29,7	32,9	35,6	35,6	38,3	38,8	41,0	43,7	45,9	48,6	51,3
<b>Medio</b>	0	0	4	4	4	4	8	4	4	0	0	0

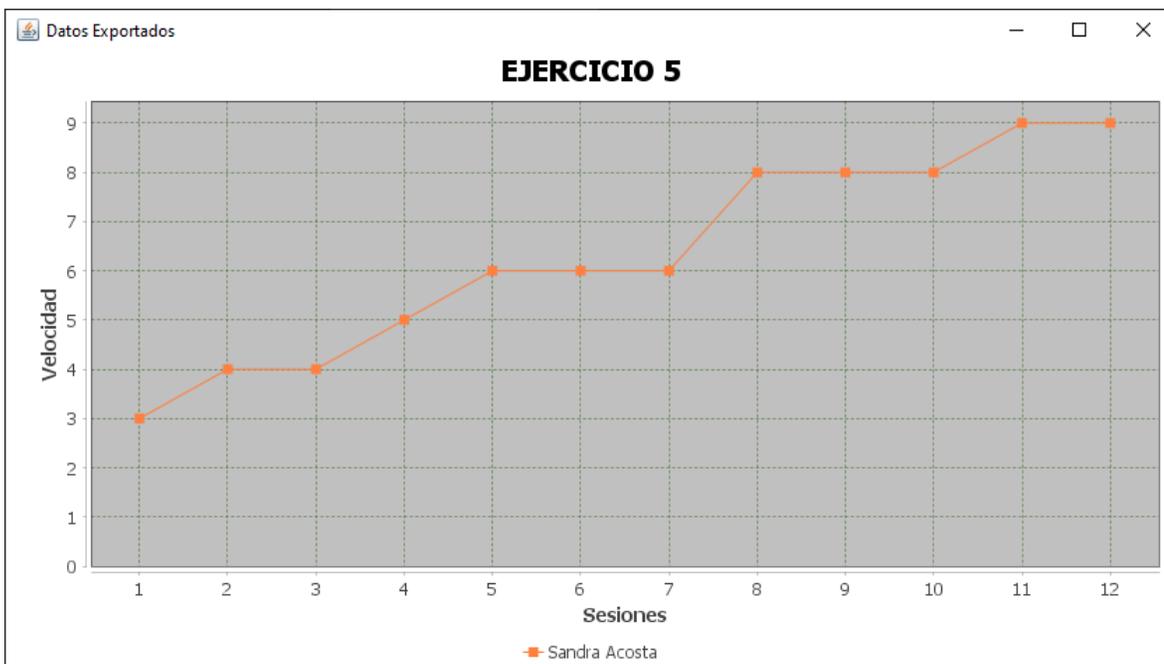
Desplazamientos por sesiones del ejercicio 5 (mm)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	28,6	28,6	31,7	34,3	34,3	36,9	37,4	39,5	42,1	44,2	46,8	49,4
<b>Anular</b>	0	0	2	2	2	2	4	2	2	0	0	0
<b>Dedo</b>	19,2	19,2	21,3	23,1	23,1	24,8	25,2	26,6	28,3	29,7	31,5	33,2
<b>Meñiqu</b>	5	5	5	0	0	5	0	0	5	5	0	5

**Figura 130**

*Desplazamiento vs sesiones del ejercicio 5*





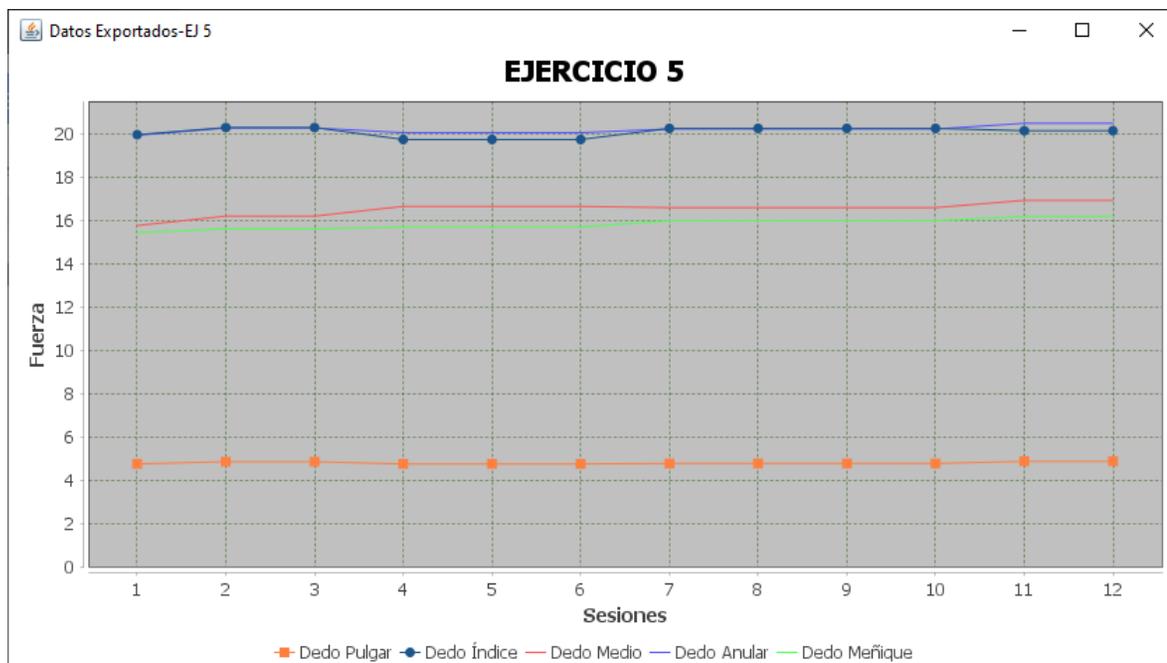
**Figura 131***Velocidad vs sesiones del ejercicio 5***Tabla 36***Fuerza por sesiones del ejercicio 5*

Fuerza por sesiones del ejercicio 5 (N)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	4,73	4,84	4,84	4,73	4,73	4,73	4,76	4,76	4,76	4,76	4,85	4,85
<b>Pulgar</b>												
<b>Dedo</b>	19,9	20,2	20,2	19,7	19,7	19,7	20,2	20,2	20,2	20,2	20,1	20,1
<b>Índice</b>	4	7	7	2	2	2	4	4	4	4	3	3
<b>Dedo</b>	15,7	16,1	16,1	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,9	16,9
<b>Medio</b>	5	8	8	3	3	3	8	8	8	8	1	1

Fuerza por sesiones del ejercicio 5 (N)												
Sesion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Dedo</b>	19,9	20,2	20,2	20,0	20,0	20,0	20,2	20,2	20,2	20,2	20,4	20,4
<b>Anular</b>	1	5	5	4	4	4	1	1	1	1	7	7
<b>Dedo</b>	15,4	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,9	15,9	15,9	15,9	16,1	16,1
<b>Meñiqu</b>	1	0	0	8	8	8	7	7	7	7	7	7

**Figura 132**

*Fuerza vs sesiones del ejercicio 5*



**Tabla 37***Número de repeticiones del ejercicio 5*

<b>Número de repeticiones por sesión del ejercicio 5</b>												
<b>Sesiones</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Dedo Pulgar</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Índice</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Medio</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Anular</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Dedo Meñique</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

La paciente al principio de la terapia en comparación a la última sesión realizada, con los datos obtenidos, siente mayor comodidad a la extensión de los dedos de la mano tanto en velocidades lentas o medias. Una respuesta fisiológica positiva al uso de la máquina de rehabilitación. Se ve que la tendencia del desplazamiento de la mano aumenta hasta llegar al máximo deseado que es cuando la mano está completamente extendida. El uso de la velocidad corresponde a influir al tiempo de sesión que pasa la paciente, con lo que su respuesta a los estímulos de extensión y

comprensión son efectivos a la rehabilitación a la variación de la velocidad de los desplazamientos cuando se quiera trabajar en movimientos lentos o rápidos.

#### **4.2. Validación de la hipótesis**

**Hipótesis:** El rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA), controlado a lazo cerrado e implementado en software libre, permitirá ayudar a la rehabilitación de los pacientes con dificultades de motricidad en las manos.

**Hipótesis alternativa:** El rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA), controlado a lazo cerrado e implementado en software libre, ayudará a la rehabilitación de los pacientes con dificultades de motricidad en las manos

**Hipótesis nula:** El rediseño y construcción de un prototipo robótico para la terapia de los dedos de las manos para personas con daño cerebral adquirido (DCA), controlado a lazo cerrado e implementado en software libre, no ayudará a la rehabilitación de los pacientes con dificultades de motricidad en las manos

**Análisis:** En las tablas (18-37) y en las figuras (113-127) de la evaluación del funcionamiento del equipo se observa los desplazamientos, velocidades, fuerzas y repeticiones del paciente, durante las sesiones conforme avanza la persona va mostrando un leve incremento en el desplazamiento de los dedos, así como el aumento de la velocidad desplazamiento conforme el paciente va teniendo una mejor motricidad ya que este puede desplazar los dedos con menor dificultad además de aumentar el rango de extensión y contracción de los dedos con las que inicio el paciente los ejercicios , evidenciando así que la persona tiene una mayor desplazamiento de los dedos y una mayor movilidad al ver que la velocidad con la que realiza el ejercicio

incrementa, lo que hace que los ejercicios desarrollados por la máquina de rehabilitación validen la hipótesis.

## Capítulo V

### 5. Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

- Mediante la investigación bibliográfica y la observación física del rehabilitador de los dedos de la mano izquierda para pacientes con DCA se evidenció que es necesario el rediseño de la máquina para que pueda brindar la rehabilitación de las dos manos teniendo presente la situación económica para su construcción, lo cual establece que la máquina realizara la rehabilitación no simultánea de las manos sino alternada de las manos permitiendo así el ahorro de recursos y de espacio para su construcción.
- El diseño y construcción del equipo rehabilitador se realizó en base a la antropometría de las manos de personas del Ecuador la cual comprendía de un grupo de 300 personas de edades entre 20-50 años según (Vargas, 2016) también se consideró la fuerza máxima que puede ejercer un dedo la cual es de 40N según (Valencia-Otero et al., 2016), esto permite obtener un diseño ergonómico dando una mayor fiabilidad al uso en pacientes del país ya que además dispone de una interfaz gráfica que permite visualizar el desarrollo de las actividades acorde a la selección que considere el terapeuta.
- El soporte de los dedos se realizó en acero ASTM A36 ya que soporta el esfuerzo máximo de  $1.105 * 10^8 \text{ N/m}^2$  y no supera el del material que es de 250 MPa, el desplazamiento realizado es de  $1.754 * 10^{-1} \text{ mm}$  que es un valor despreciable de deformación, el factor de seguridad mínimo es de 1,477 lo que hace que el soporte de dedos sea seguro.

- El mecanismo manivela-biela es realizado en ABS ya que soporta los esfuerzos de  $9.412 * 10^6 \text{ N/m}^2$  y  $8.257 * 10^6 \text{ N/m}^2$  y no superan al del material que es de 46 MPa, el factor de seguridad mínimo es de 6,747 para la manivela y 7.691 para la biela lo cual hace que sean seguras.
- La longitud de desplazamiento máxima de los patines de las guías lineales sobre las rieles una vez montadas en la estructura base es de 145 mm acorde al diseño mecánico para lo cual se colocó el servomotor en  $90^\circ$  para realizar el acople con el patín de la guía lineal que se encontraba en la mitad del desplazamiento máximo, este acople se realizó mediante el mecanismo manivela-biela ya que el servomotor tiene un rango de giro de  $270^\circ$ , esto permite que la máquina pueda ser configurada a diferentes medidas de los dedos de las manos de las personas con DCA.
- La velocidad máxima que se puede mover los soportes de los dedos es de 168.46 mm/s el cual es el límite establecido por software, mientras que la velocidad recomendada es de 84.23 mm/s que representa el 50%, y la velocidad mínima para los soportes es de 16.85 mm/s. El operario podrá escoger la velocidad establecida mientras se encuentre entre este intervalo, lo cual dependerá de la decisión profesional del terapeuta y la respuesta fisiológica del paciente.
- El programa ejecutable guarda todas las características del paciente tanto su información personal como sus datos de las sesiones de las terapias. Para su exportación en formato CSV y posterior análisis por un experto en el área. Estos están almacenados en un archivo en la raíz donde se ejecute el programa y

podrán ser accedidos por medio del software con la función de la exportación anteriormente descrita.

- El HMI del software ofrece una interfaz gráfica para el uso de la máquina rehabilitadora, de fácil interpretación y uso para el operario, con ventanas emergentes con mensajes claros de los diversos errores que pueda pasar y su posible solución ejemplo error en la comunicación entre el microcontrolador y la computadora, empezar ejercicios sin datos creados para un paciente o la activación del paro de emergencia. Cuenta con indicadores gráficos para visualizar las posiciones de los soportes de los dedos, un indicador para visualizar la fuerza, deslizadores para controlar la velocidad y el porcentaje del desplazamiento total además de una animación como guía visual para la primera configuración de los máximos y mínimos de cada uno de los dedos del paciente.
- Se diseñó un sistema de control de la máquina de rehabilitación donde se envía la posición de los soportes de los dedos, a una velocidad deseada por el servomotor, a través programa por comunicación serial al microcontrolador con método para evitar la entrada de ruido entre la comunicación y prevenir movimientos no deseados en los motores, todo en un tiempo de muestreo de 100 ms valor mínimo aceptable para esta aplicación que da confiabilidad en el control diseñado.
- La paciente al principio de la terapia en comparación a la última sesión realizada, mediante el testimonio siente una mayor movilidad en el desplazamiento de sus dedos que se realizó a velocidades bajas y medias, lo que es verificado por los datos obtenidos de la máquina respecto al desplazamiento total de los dedos a velocidades bajas y medias mediante tablas

y gráficas representando una mejoría de la espasticidad de los dedos de la paciente.

## 5.2. Recomendaciones

- Investigar sobre materiales para realizar una carcasa de la estructura, este material debe soportar condiciones climáticas variables de humedad y calor, debe ser fácil de limpiar, debe ser resistente a golpes y evitar deformaciones que puedan comprometer mecanismos internos de la máquina de rehabilitación.
- Investigar otro tipo de mecanismos para la rehabilitación de los dedos de la mano como: utilización de exoesqueletos para realizar el movimiento de los dedos, utilización de un sistema neumático o hidráulico.
- Investigar sobre métodos de acople para el mecanismo biela manivela corredera que pueda ser ajustados todas las uniones a una fuerza constante la cual no haga que el mecanismo sea rígido y dificulte su movilidad pero que tampoco quede sin el ajuste necesario generando que el mecanismo se desacople o se mueva de manera errónea.
- Determinar la velocidad máxima de los motores a los parámetros físicos y mecánicos del sistema, igual con la velocidad mínima, ya que el sistema puede no aceptar velocidades grandes o muy pequeñas y hará que los soportes no se muevan fluidamente.
- Configurar la base de datos de los pacientes en un archivo externo encriptado para evitar la manipulación por parte de personas externas. Los datos son accesibles desde el software y para evitar errores de lectura debe encontrarse cerca como en la raíz de ejecución del programa.

- No sobrecargar la pantalla de información para que el operador pueda entender y manejar fácilmente la interfaz gráfica, evitar el uso de colores muy brillantes que provoquen fatiga visual en el operador.
- Observar el tiempo de respuesta al sistema de control digital, y elegir el mínimo posible, además de ser constante, ya que si se envía siempre que pueda a los más rápido posibles algunas determinadas operaciones pueden tardar más o menos tiempo y hacer que el tiempo de muestreo sea inestable.
- Crear un método para evitar entrada de ruido en el microcontrolador y evitar el accionamiento inoportuno de los motores, si solo se envía valores de velocidades y posiciones, algunas veces ruido en el sistema interpretará como datos a realizar.

## Bibliografía

- Abrajan Arias, C. S. (2020). *Diseño y construcción de un robot seguidor de línea evasor de obstáculos empleando Arduino Nano*. Recuperado el 8 de julio de 2021, obtenido de [http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,shib&db=bth&AN=92948285&site=eds-live&scope=site%0Ahttp://bimpactassessment.net/sites/all/themes/bcorp\\_impact/pdfs/em\\_stakeholder\\_engagement.pdf%0Ahttps://www.globus.com/help/helpFiles/CDJ-Pa](http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,shib&db=bth&AN=92948285&site=eds-live&scope=site%0Ahttp://bimpactassessment.net/sites/all/themes/bcorp_impact/pdfs/em_stakeholder_engagement.pdf%0Ahttps://www.globus.com/help/helpFiles/CDJ-Pa)
- Asensi, M. G. (2019). *Daño Cerebral Adquirido*.
- Avila, V. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo de rehabilitador de mano aplicando robótica blanda para el mejoramiento de la sujeción en personas con escasa movilidad*. Recuperado el 1 de julio de 2021, obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15646>
- Bocangel Lamas, E. A. (2016). Java y Base de Datos. *Trabajo De Suficiencia Profesional*, 1–84. Recuperado el 27 de julio de 2021, obtenido de <http://190.116.183.244/handle/ujcm/435>
- Braidot, N. (2014). *Cómo funciona tu cerebro*. Recuperado el 15 de julio de 2021, obtenido de [https://static0planetadelibroscom.cdnstatics.com/libros\\_contenido\\_extra/28/27413\\_Como funciona cerebro DUMMIES.pdf](https://static0planetadelibroscom.cdnstatics.com/libros_contenido_extra/28/27413_Como funciona cerebro DUMMIES.pdf)
- Charry, J. D., Cáceres, J. F., Salazar, A. C., López, L. P., & Solano, J. P. (2017). *Trauma craneoencefálico . Revisión de la literatura. c*, 177–182.

- Domínguez, M. G. (2014). *Evaluabilidad De Los Programas Del Robot Amadeo En La Rehabilitación De La Mano Del Hemipléjico*. 11, 1–22.
- GAES. (2015). *Información Técnica: Guías Lineales*. Recuperado el 5 de julio de 2021, obtenido de <http://www.rodalsa.net/wp-content/uploads/2015/06/guias-lineales-hiwin.pdf>
- Giuria, M. (2010). Causas determinantes del Accidente Cerebrovascular. *Universidad FASTA, Ciencias de La Salud Carrera*, 22–31. Recuperado el 2 de julio de 2021, obtenido de [http://redi.ufasta.edu.ar:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/457/2010\\_Kine\\_006.pdf?sequence=1](http://redi.ufasta.edu.ar:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/457/2010_Kine_006.pdf?sequence=1)
- Hidrovo Loor, A. M., & Torres Llerena, G. R. (2018). *Diseño y construcción de un dispositivo robótico para la terapia de los dedos de la mano asistido por computador, para paciente con daño cerebral adquirido (DCA)*. Recuperado el 5 de julio de 2021, obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14483>
- Netter, F. (2019). *Atlas de Anatomía Humana. séptima ed.*
- Real Academia Española. (octubre de 2014). *Real Academia Española*. Recuperado el 14 de julio de 2021, obtenido de <https://dle.rae.es/rehabilitaci%C3%B3n>
- Rios-Iago, M., Benito-León, J., Complutense, N. P., & Tirapu-Ustárrroz, J. (2011). *Neuropsicología del daño cerebral adquirido*. May 2015.
- Sánchez Cabeza, A. (2005). Terapia Ocupacional y daño cerebral adquirido. Conceptos básicos. *TOG - Revista de Terapia Ocupacional de La APGTO*, 2, 4.

- Solana, J. (2014). Monitorización y optimización de terapias de tele-neurorrehabilitación cognitiva. *Doctoral Dissertation, Universidad Politécnica Dde Madrid, Madrid, España.*
- SunFounder. (2020). *SunFounder*. Recuperado el 7 de junio de 2021, obtenido de <https://www.sunfounder.com/collections/servos/products/20kg-high-torque-servo>
- Torres Ávila, I. (2014). Evidencia del tratamiento desde terapia ocupacional en actividades de la vida diaria en pacientes con accidentes cerebrovasculares. *Revista Electrónica de Terapia Ocupacional Galicia, TOG, 11(19), 3.*  
Recuperado el 14 de julio de 2021, obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4710575&info=resumen&idioma=ENG>
- Triglia, A. (2020). *Los 5 lóbulos del cerebro y sus distintas funciones*. Recuperado el 12 de julio de 2021, obtenido de <https://psicologiymente.com/neurociencias/lobulos-del-cerebro-funciones>
- Trullenque, L. S. (2012). Terapia ocupacional en el tratamiento temprano del daño cerebral adquirido. *Zaguan.Unizar.Es, li, 157.*
- TYROMOTION. (2013). *Terapia con dedos, mano y cerebro*. Recuperado el 8 de julio de 2021, obtenido de <http://www.arrayamed.com/fullaccess/product78file1.pdf>
- Valencia-Otero, Á. F., Maradei-García, M. F., & Espinel-Correal, F. (2016). Estudio sobre la influencia del diámetro de apertura en la fuerza ejercida por cada dedo. *Revista de Salud Pública, 18(6), 935–945.* Recuperado el 7 de julio

de 2021, obtenido de <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n6.50424>

- Vargas, E. A. R. (2016). *Determinación de la fuerza de agarre y medidas antropométricas de mano en la población indígena de la comunidad Miguel Egas - Otavalo, Provincia de Imbabura año 2016.*
- Vásquez Guevara, O. (2016). *Diseño y análisis de un prototipo de una mano robótica antropométrica.*

# ANEXOS