



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**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**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
MANO ROBÓTICA CON ARQUITECTURA
ANTROPOMÓRFICA CONTROLADO MEDIANTE ONDAS
CEREBRALES**

**AUTORES:
EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA
DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA**

DIRECTOR: ING. MARCO SINGAÑA

LATACUNGA

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA CONTROLADO MEDIANTE ONDAS CEREBRALES”** realizado por: EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA y DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA y DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA, para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 24 de Febrero del 2017

ING. MARCO SINGAÑA

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA, con cédula de identidad N. 180426204-4 y DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA, con cédula de identidad N. 180341972-8, declaramos que este trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA CONTROLADO MEDIANTE ONDAS CEREBRALES” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 24 de Febrero del 2017

EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA

C.C.: 180426204-4

DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA

C.C.: 180341972-8



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA y DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA CONTROLADO MEDIANTE ONDAS CEREBRALES” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 24 de Febrero del 2017

EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA

C.C.: 180426204-4

DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA

C.C.: 180341972-8

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi hija, mi esposa y mis padres que han sido un apoyo en los incontables años de estudio.

A Dios que ha sido un pilar en el cual apoyarme toda la vida, el cual me ha presentado retos y pruebas superables. A todas aquellas personas que deseen crear, innovar y superarse a sí mismos.

Edisson Escobar

Este proyecto lo dedico a Dios que ha sabido guiarme por el camino del bien y en especial a la mejor madre del mundo Susana Arboleda, porque desde el cielo siempre iluminaste mi camino para llegar a esta meta tan anhelada, a mi padre, mis hermanos, mi hijo, mis tíos, mi compañera de vida y todos quienes siempre me acompañaron en este largo camino con sus consejos, ayuda y preocupaciones.

David Zurita

AGRADECIMIENTO

Expreso mis agradecimientos a la Escuela Politécnica del Ejército sede Latacunga, a los Ingenieros Marco Singaña y Vicente Hallo por su guía en el desarrollo de este proyecto. Agradezco a Dios por darme fuerzas en este duro trayecto, a mi hija Samantha que ha sido una razón para seguir adelante, a mi esposa Veronica Sailema con la cual he luchado varias pruebas y a mis padres Luis Escobar y Mariana Sailema que han sido un ejemplo y apoyo para combatir los problemas y dificultades que la vida me ha dispuesto.

Edisson Escobar

Los más sinceros agradecimientos a la Escuela Politécnica del Ejército sede Latacunga y en especial a los Ingenieros Marco Singaña y Vicente Hallo por su ayuda y apoyo en el desarrollo de este proyecto. Un profundo agradecimiento a mi Padre Juan Zurita, a mis tíos Ing. Oscar Arboleda y Dr. Antonio Arboleda, a mi abuelita Agripina, a mis hermanos Juan y Alex y toda mi familia por su ayuda incondicional para lograr esta meta tan anhelada. Un especial agradecimiento a mi inspiración, mi razón de ser, mi hijo Juan David; de igual manera a mi compañera de vida por su ayuda y fuerzas en todo este trascurso ante los problemas y dificultades, mí prometida Jazmine. Mil gracias por toda su ayuda.

David Zurita

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xxii
RESUMEN.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxiv

CAPÍTULO I

GENERALIDADES.....	1
1. Sistemas antropomórficos.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Mano Utah/MIT.....	1
1.1.2. Mano NTU.....	2
1.1.3. Mano DLR.....	3
1.1.4. Mano Robonaut.....	3
1.1.5. Mano biónica Cyberhand.....	4
1.2. Criterios para el diseño antropomórfico de mano humana.....	4
1.2.1. Fisiología.....	5
1.1.1. Referencia para el dimensionamiento de falanges.....	6
1.2.2. Grados de libertad en articulaciones.....	8
1.2.3. Ángulos limitantes para el movimiento de los dedos.....	10
1.2.4. Patrón para el posicionamiento de los dedos.....	12
1.2.5. Método de transmisión de movimiento.....	15
2. Ondas cerebrales y sus equipos de lectura.....	16

2.1.	Antecedentes	16
2.1.1.	Diseño e implementación de un sistema de adquisición de ondas cerebrales (EEG) de seis canales y análisis en tiempo, frecuencia y coherencia.....	16
2.1.2.	Adquisición y análisis de señales cerebrales utilizando el dispositivo MindWave.....	17
2.1.3.	Diseño y construcción de una silla de ruedas autónoma accionada mediante ondas cerebrales, para la asociación de limitados pléjicos de Tungurahua (ASOPLEJICAT).....	18
2.2.	Tipos de ondas cerebrales	19
2.2.1.	Onda delta (0.1 Hz – 3.99 Hz)	20
2.2.2.	Onda theta (4 Hz – 7.99 Hz)	20
2.2.3.	Onda alfa (9 Hz -12.99 Hz).....	21
2.2.4.	Onda beta (14 Hz – 30 Hz).....	22
2.2.5.	Onda gamma (Superior a 40 Hz).....	22
2.3.	Equipos de lectura de ondas cerebrales.....	23
2.3.1.	Auricular móvil MindWave de NeuroSky	23
2.3.2.	Lector cerebral EMOTIV-EPOC+	26
3.	Microcontroladores	27
3.1.	Plataforma de control SSC-32.....	27
3.2.	Plataforma de control arduino	28
4.	Servomotores DC	29
4.1.	Componentes internos fundamentales.....	29
4.1.1.	Motor de corriente continua (DC).....	29
4.1.2.	Sensor de desplazamiento	30
4.1.3.	Circuito de control.....	30
4.1.4.	Engranajes reductores	30
4.2.	Dimensiones Generales	30
4.3.	Principios de funcionamiento.....	31
5.	Software especializado para la adquisición y procesamiento de datos ...	32
5.1.	Entorno de software LabView.....	32
5.2.	Ventajas en el uso de LabView	33
5.3.	Herramientas de vinculación.....	34

5.3.1.	Interfaz NeuroSky	34
5.3.2.	Interfaz arduino	35
6.	Prototipado rápido (Impresión 3D)	35
6.1.	Deposición de hilo fundido	36
6.2.	Ventajas de la tecnología FDM.....	36
6.3.	Fases de proceso.....	37
6.4.	Material para prototipado	37
6.4.1.	Filamento ABS	37
6.4.2.	Filamento PLA	38

CAPÍTULO II

	DISEÑO Y SELECCIÓN	39
1.	Descripción del proyecto.....	39
1.1.	Adquisición de datos	39
1.2.	Procesamiento de la Señal.....	39
1.3.	Plataforma de Control	40
1.4.	Actuadores.....	40
1.5.	Mano Robótica	40
2.	Diseño de mano robótica con arquitectura antropomórfica	40
2.1.	Dimensionamiento en dedos meñique, anular, medio e índice	41
2.1.1.	Cálculo de las longitudes en falanges	41
2.1.2.	Articulaciones.....	42
2.1.3.	Grados de libertad y ángulos de movimiento.....	45
2.2.	Dimensionamiento del dedo pulgar.....	46
2.2.1.	Cálculo de las falanges, metacarpo y articulaciones	46
2.2.2.	Grados de libertad y ángulos de movimiento.....	47
2.3.	Método de transmisión de movimiento.....	48
2.3.1.	Modelado del dedo meñique, anular, medio e índice.....	50
2.3.2.	Modelado del dedo pulgar.....	53
2.3.3.	Ensamblaje virtual de mano robótica con arquitectura antropomórfica .	55
2.3.4.	Análisis en zonas vulnerables	61
3.	Análisis y selección de ondas cerebrales.....	69
4.	Selección de equipos y materiales.....	69

4.1.	Selección de dispositivo para la adquisición de ondas cerebrales	69
4.2.	Selección de plataforma para el control de servomotores.....	70
4.3.	Selección del material de impresión 3D.....	71

CAPÍTULO III

	CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	72
1.	Construcción de la mano robótica con arquitectura antropomórfica	72
1.1.	Prototipado de piezas	72
1.1.1.	Conversión de archivos	72
1.1.2.	Impresión de piezas	74
1.2.	Ensamblaje de la mano robótica con arquitectura antropomórfica.....	77
1.2.1.	Ensamblaje falange distal.....	78
1.2.2.	Unión entre las falanges y metacarpos	79
1.2.3.	Conexión de ejes para la movilidad en las articulaciones.....	79
1.2.4.	Acoplamiento de la palma.....	80
1.2.5.	Ubicación de bandas elásticas para la extensión de dedos.....	80
1.2.6.	Anclaje de mano robótica sobre modular.....	81
2.	Dimensionamiento y selección de servomotor.....	81
2.1.	Medición del peso y cálculo de torque en las partes móviles de la mano robótica.....	82
2.1.1.	Cálculo y medición del dedo índice	82
2.1.2.	Cálculo y medición del dedo medio	83
2.1.3.	Cálculo y medición del dedo anular	84
2.1.4.	Cálculo y medición de meñique	85
2.1.5.	Cálculo y medición de pulgar.....	85
2.2.	Cálculo de torques	86
2.3.	Selección de servomotor	91
3.	Unificación del sistema de control mediante ondas cerebrales.....	92
3.1.	Lógica de control.....	92
3.1.1.	Pantalla menú principal.....	92
3.1.2.	Pantalla de análisis de ondas	93
3.1.3.	Pantalla de control.....	96
3.2.	Configuración y programación de señales en LabView.....	106

3.2.1.	Configuración de puertos de comunicación	106
3.2.2.	Análisis y selección de ondas en LabView	108
3.2.3.	Acondicionamiento de señales	111
3.2.4.	Programación de movimientos controlados mediante ondas cerebrales	113
3.2.5.	Programación para salida de señales	115
3.3.	Configuración de pantallas.....	116
3.3.1.	Pantalla (menú principal)	116
3.3.2.	Pantalla (análisis de onda).....	117
3.3.3.	Pantalla (control)	118
3.3.4.	Pantalla (calibración de home).....	119
4.	Integración sistema de control por ondas cerebrales-mano robótica con arquitectura antropomórfica	120
4.1.	Conexión de la mano robótica a servomotores	120
4.2.	Enlace de comunicación arduino.....	122
4.3.	Conexión de salidas PWM con servomotores de control.....	123

CAPÍTULO IV

	PRUEBAS Y RESULTADOS	125
1.	Pruebas mecánicas - eléctricas y de calibración.....	125
1.1.	Pruebas de comunicación	125
1.1.1.	Comunicación MindWave-LabView	125
1.1.2.	Comunicación LabView-arduino	128
1.2.	Comparación entre ángulos seleccionados y movilizados	130
1.3.	Pruebas de control y calibración de movimientos.....	131
1.3.1.	Calibración de home.....	131
1.3.2.	Prueba manual y calibración de movimientos.....	132
2.	Pruebas de integración control cerebro-mano robótica con arquitectura antropomórfica	141
3.	Prueba general de funcionamiento	143
3.1.	Comunicación MindWave, arduino con LabView.....	143
3.2.	Apertura de programa y selección de movimiento.....	145
3.3.	Selección de onda de control.....	147
3.4.	Control cierre-apertura con onda cerebral.....	148

4.	Validación de Hipótesis	149
4.1.	Planteamiento de la hipótesis	149
4.2.	Planteamiento de la hipótesis alternativa y nula	149
4.3.	Designación de variables.....	150
4.4.	Valores observados	150
4.5.	Valor de frecuencias esperadas y observadas	150
4.6.	Cálculo de chi cuadrado	151
4.7.	Cálculo del grado de libertad y nivel de significancia	152
4.8.	Análisis de chi cuadrado mediante tabla.....	152
5.	Análisis técnico/económico.....	153
5.1.	Costos por impresión de mano	153
5.2.	Costos de elementos de sistemas de control.....	154
5.3.	Costos de elementos eléctrico-electrónicos.....	154
5.4.	Costos de elementos de sistemas mecánicos.....	155
5.5.	Costo total del proyecto.....	155
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	155
6.1.	Conclusiones	155
6.2.	Recomendaciones.....	158
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161

ANEXOS

ANEXO A – Planos de diseño

ANEXO B – Manual de mantenimiento

ANEXO C – Manual de operación

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de mano Utah/MIT	2
Tabla 2. Características generales de mano NTU	2
Tabla 3. Características generales de mano DLR	3
Tabla 4. Características generales de mano Robonaut.....	3
Tabla 5. Características generales de mano Cyberhand.....	4
Tabla 6. Valores norma DIN 33.402.....	7
Tabla 7. Longitud de las falanges en dedos	42
Tabla 8. Cálculo de articulaciones en base a la longitud de falanges	44
Tabla 9. Flexión y extensión de articulaciones	45
Tabla 10. Ángulos y grados de libertad de articulaciones	46
Tabla 11. Dimensiones del dedo pulgar.....	46
Tabla 12. Grados de libertad del pulgar	47
Tabla 13. Ángulos del pulgar hiperextensión y flexión	48
Tabla 14. Abducción, aducción palmar y radial	48
Tabla 15. Comparativa de lectores de ondas cerebrales	70
Tabla 16. Comparativa de plataformas de control	71
Tabla 17. Peso calculado y medido de falanges (índice)	82
Tabla 18. Peso calculado y medido (accesorios)	83
Tabla 19. Peso total índice	83
Tabla 20. Peso calculado y medido de falanges (medio).....	83
Tabla 21. Peso calculado y medido (accesorios)	83
Tabla 22. Peso total del dedo medio	84
Tabla 23. Peso calculado y medido de falanges (anular).....	84
Tabla 24. Peso calculado y medido (accesorios)	84
Tabla 25. Peso total del dedo anular	84
Tabla 26. Peso calculado y medido de falanges (meñique)	85
Tabla 27. Peso calculado y medido (accesorios)	85
Tabla 28. Peso total del dedo meñique	85
Tabla 29. Peso calculado y medido de falanges (pulgares).....	86
Tabla 30. Peso calculado y medido (accesorios)	86

Tabla 31. Peso total del dedo pulgar	86
Tabla 32. Cálculo de peso y torque de meñique, anular, medio, índice y pulgar	88
Tabla 33. Selección de servomotor	91
Tabla 34. Configuración de salidas	116
Tabla 35. Comparación de ángulos, generados y desplegados	130
Tabla 36. Ángulos para el movimiento punta	133
Tabla 37. Ángulos para movimiento lateral	135
Tabla 38. Ángulos para movimiento gancho	137
Tabla 39. Ángulos para movimiento cilíndrico	138
Tabla 40. Ángulos para movimiento esférico	140
Tabla 41. Valores obtenidos en pruebas de control	150
Tabla 42. Valores obtenidos.....	151
Tabla 43. Valores esperados	151
Tabla 44. Distribución de Chi Cuadrado χ^2	152
Tabla 45. Costos de impresión 3D	153
Tabla 46. Costos de impresión del sistema de control	154
Tabla 47. Costos de impresión sistema eléctrico-electrónico	154
Tabla 48. Costos de impresión sistema mecánico.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de mano Utah/MIT	2
Figura 2. Diseño de mano NTU	2
Figura 3. Diseño de mano DLR	3
Figura 4. Diseño de mano Robonaut.....	4
Figura 5. Diseño de mano Cyberhand.....	4
Figura 6. Fisiología de una mano humana	5
Figura 7. Ejes de la mano humana	6
Figura 8. Norma DIN 33.402 medidas en mano humana	7
Figura 9. Vista lateral de las articulaciones del dedo.....	9
Figura 10. Pertenecientes al dedo	9
Figura 11. Distal: flexión y extensión	10
Figura 12. Proximal: flexión y extensión.....	11
Figura 13. Flexión y extensión articulación MCF	11
Figura 14. Flexión y extensión articulación IF pulgar	12
Figura 15. Flexión y extensión articulación MCF pulgar	12
Figura 16. Agarre cilíndrico.....	13
Figura 17. Agarre tipo punta	13
Figura 18. Agarre de gancho.....	14
Figura 19. Agarre esférico.....	14
Figura 20. Agarre lateral	14
Figura 21. Movimiento por eslabones.....	15
Figura 22. Transmisión por poleas.....	16
Figura 23. Posición de sensores para la adquisición de señales.....	17
Figura 24. Adquisición de señales de EEG	18
Figura 25. Ubicación del lector MindWave.....	18
Figura 26. Emotiv EPOC HEADSET	19
Figura 27. Prueba de control de silla de ruedas	19
Figura 28. Onda delta.....	20
Figura 29. Onda theta.....	21
Figura 30. Onda alfa.....	21

Figura 31. Onda Beta	22
Figura 32. Onda gamma.....	23
Figura 33. Funcionamiento del lector MindWave de NeuroSky	24
Figura 34. Dispositivo MindWave.....	24
Figura 35. VI lectura onda atención.....	25
Figura 36. VI lectura onda meditación.....	25
Figura 37. VI detección de parpadeos.....	25
Figura 38. VI calidad de la señal.....	26
Figura 39. Distribución de electrodos	26
Figura 40. Controlador SSC-32	28
Figura 41. Controlador arduino.....	28
Figura 42. Componentes de un servomotor	29
Figura 43. Dimensiones de un servomotor	31
Figura 44. Colores de los cables de los principales fabricantes de servomotores.....	31
Figura 45. Pulsos PWM para controlar servomotores	32
Figura 46. LabView con NeuroSky	34
Figura 47. Proceso FDM.....	36
Figura 48. Esquema de componentes del proyecto.....	39
Figura 49. Longitud de referencia (fm).....	41
Figura 50. Pendiente generada por simetría de elementos.....	43
Figura 51. Método de transmisión de movimiento	49
Figura 52. Falange dorsal índice	50
Figura 53. Falange palmar índice.....	50
Figura 54. Falange Medial	51
Figura 55. Falange proximal	52
Figura 56. Punto de referencia del diseño.....	52
Figura 57. Falange palmar pulgar, agujeros para tornillos.....	53
Figura 58. Falange dorsal pulgar, polea y pista	54
Figura 59. Falange proximal pulgar	54
Figura 60. Metacarpo pulgar	55
Figura 61. Articulación carpometacarpiana	55
Figura 62. Parte 1 metacarpo palmar	56
Figura 63. Parte 2 metacarpo dorsal.....	56

Figura 64. Cubierta base metacarpo.....	56
Figura 65. Metacarpo ensamblado	56
Figura 66. Ensamblaje arduino falange proximal con metacarpo.....	57
Figura 67. Ensamblaje arduino falange medial.....	57
Figura 68. Ensamblaje meñique falange distal dorsal.....	58
Figura 69. Ensamblaje meñique falange distal palmar	58
Figura 70. Ensamblaje meñique al metacarpo	58
Figura 71. Ensamblaje dedo anular	58
Figura 72. Ensamble falange anular con metacarpo	58
Figura 73. Ensamblaje dedo medio.....	59
Figura 74. Ensamblaje falanges medial con metacarpo	59
Figura 75. Ensamblaje de dedo índice	59
Figura 76. Ensamblaje falanges índice con metacarpo	59
Figura 77. Ensamblaje dedo pulgar.....	60
Figura 78. Ensamblaje falanges pulgar con metacarpo.....	60
Figura 79. Ensamblaje cubierta frontal	60
Figura 80. Selección de área meñique distal.....	61
Figura 81. Propiedades físicas del elemento del dedo meñique.....	62
Figura 82. Análisis de esfuerzo de Von Mises del dedo meñique	64
Figura 83. Análisis del factor de seguridad del dedo meñique	64
Figura 84. Análisis de deformaciones unitarias del dedo meñique.....	65
Figura 85. Área que soporte el meñique en la base de articulación.....	65
Figura 86. Análisis de Von Mises en soporte del meñique.....	67
Figura 87. Análisis de factor de seguridad del soporte del meñique	68
Figura 88. Análisis deformaciones unitarias del soporte del meñique.....	68
Figura 89. Palma metacarpo.....	73
Figura 90. Palma central metacarpo en SolidWorks.....	73
Figura 91. Conversión de archivo CAD a formato STL	73
Figura 92. Acceso directo Solidoodle	74
Figura 93. Importando formato STL en software	74
Figura 94. Pantalla 3D de diseño y posición de inicio.....	75
Figura 95. Menú Slice con Slic3r.....	75
Figura 96. Configuración de Slicer	76

Figura 97. Creación de códigos G.....	76
Figura 98. Proceso de impresión 3D	77
Figura 99. Anclaje de hilo nylon.....	78
Figura 100. Parte palmar del distal	78
Figura 101. Unión de falanges distales	79
Figura 102. Enlazado con hilo nylon	79
Figura 103. Colocación de ejes en articulaciones	80
Figura 104. Sujeción de la palma.....	80
Figura 105. Colocación de bandas elásticas.....	81
Figura 106. Mano robótica ensamblada	81
Figura 107. Medición de fuerza ejercida con romanilla	87
Figura 108. Balanza digital	87
Figura 109. Flujograma de la pantalla (menú principal).....	92
Figura 110. Flujograma de la pantalla (análisis de ondas).....	93
Figura 111. Flujograma del proceso (parpadeo)	94
Figura 112. Flujograma (proceso de atención)	95
Figura 113. Flujograma del proceso (meditación)	96
Figura 114. Flujograma de la pantalla (control).....	97
Figura 115. Flujograma del proceso (control manual).....	98
Figura 116. Flujograma para control del cierre y apertura manual.....	99
Figura 117. Flujograma del proceso (control por ondas).....	100
Figura 118. Flujograma del proceso del movimiento	102
Figura 119. Flujograma del proceso de selección de onda de control	103
Figura 120. Flujograma del proceso de atención y meditación	104
Figura 121. Flujograma para el proceso de control por ondas.....	105
Figura 122. VI NeuroSky	106
Figura 123. Configuración del VI de NeuroSky	107
Figura 124. Programación plataforma arduino	107
Figura 125. VI interactivo NeuroSky LabView	108
Figura 126. VI adquisición de tipos de ondas	108
Figura 127. VI adquisición de ondas alfa – meditación.....	109
Figura 128. VI adquisición de ondas beta-atención.....	110
Figura 129. Acondicionamiento de señal para parpadeo	110

Figura 130. Acondicionamiento de señal de parpadeo	111
Figura 131. Selección de movimiento.....	111
Figura 132. Selección de onda de control	112
Figura 133. Sistema de escalamiento y promediación	113
Figura 134. Rango de movimiento.....	114
Figura 135. Salida a plataforma de control	115
Figura 136. Programación de salidas LabView-arduino.....	115
Figura 137. Pantalla menú principal	117
Figura 138. Pantalla principal prueba	118
Figura 139. Pantalla de control	118
Figura 140. Pantalla de calibración de home	119
Figura 141. Pantalla de movimiento manual	120
Figura 142. Estructura de servomotor	121
Figura 143. Conexión de poleas a servomotor	121
Figura 144. Conexión de servomotores con mano robótica.....	121
Figura 145. Puerto de enlace arduino.....	122
Figura 146. Puertos de salida en la placa de control	122
Figura 147. Conexión de salidas PWM a servomotores	123
Figura 148. Conexión de salidas PWM.....	123
Figura 149. Mano antropomórfica armada.....	124
Figura 150. AD (MindWave).....	125
Figura 151. Icono de acceso para programa NI-MAX.....	126
Figura 152. NI-MAX puerto COM 3	126
Figura 153. NI-MAX mensaje de sesión.....	126
Figura 154. Alarma óptica de falla de lectura	127
Figura 155. Programa menú principal en ejecución.....	127
Figura 156. Sensor y USB MindWave sin conexión	128
Figura 157. Sensor y USB MindWave con conexión	128
Figura 158. AD (arduino).....	128
Figura 159. NI-MAX puerto COM 15	129
Figura 160. Arduino mega RX y TX apagados sin conexión	129
Figura 161. Arduino mega RX y TX encendidos con conexión	130
Figura 162. Modo manual y pantalla de calibración.....	131

Figura 163. SubVI movimiento home.....	132
Figura 164. Posición home.....	133
Figura 165. SubVI movimiento punta.....	134
Figura 166. Modo manual y pantalla de calibración (Punta).....	134
Figura 167. Movimiento punta.....	135
Figura 168. SubVI movimiento lateral	135
Figura 169. Modo manual y pantalla de calibración (Lateral).....	136
Figura 170. Movimiento lateral	136
Figura 171. SubVI movimiento gancho	137
Figura 172. Modo manual y pantalla de calibración (Gancho).....	137
Figura 173. Movimiento gancho	138
Figura 174. SubVI movimiento cilíndrico	138
Figura 175. Modo manual y pantalla de calibración (Cilíndrico).....	139
Figura 176. Movimiento cilíndrico	139
Figura 177. SubVI movimiento esférico	140
Figura 178. Modo manual y pantalla de calibración (Esférico).....	140
Figura 179. Movimiento esférico	141
Figura 180. Selección de movimientos con parpadeo.....	141
Figura 181. Marcado movimiento como movimiento de trabajo.....	142
Figura 182. Control mediante ondas cerebrales de agarre lateral	142
Figura 183. Cierre proporcional de movimiento lateral.....	143
Figura 184. Conexión de la PC al modular	143
Figura 185. Conexión de la PC al modular	144
Figura 186. Administrador de dispositivos	144
Figura 187. Validando con NI –MAX	144
Figura 188. Sesión abierta.....	144
Figura 189. Carpeta en escritorio	145
Figura 190. Lector y USB MindWave sin conexión.....	145
Figura 191. Sensor y USB MindWave con conexión	145
Figura 192. Pantalla principal “Menú principal”	146
Figura 193. Ingreso de rangos de control de ondas cerebrales	146
Figura 194. Pantalla control	146
Figura 195. Selección de movimiento.....	147

Figura 196. Activación, registro de parpadeos fuertes.....	147
Figura 197. Selección de onda para el control	148
Figura 198. Led movimiento completo.....	148
Figura 199. Apertura y cierre de la mano	149

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1 Longitud de la falange proximal.....	6
Ec. 2 Longitud de metacarpiano.....	7
Ec. 3 Esfuerzo de trabajo.....	63
Ec. 4 Fuerza de trabajo.....	63
Ec. 5 Cálculo del chi cuadrado.....	151
Ec. 6 Cálculo de grados de libertad.....	152

RESUMEN

El presente trabajo de titulación, describe los principales aspectos de diseño para la construcción de una mano robótica, considerando características de la anatomía de la mano humana, como son las longitudes y relaciones entre sus falanges, al igual que la movilidad de sus articulaciones que permiten adecuar de forma efectiva la transmisión de movimiento, todos estos aspectos permiten una arquitectura antropomórfica para la mano robótica, la misma que brinda versatilidad en los movimientos para efectuar la imitación de diferentes tipos de agarre que la mano humana posee, logrando su movilidad mediante servomotores controlados con la plataforma arduino, conectados mediante hilos nylon a cada dedo para su transmisión. El control de cada movimiento será realizado mediante la actividad eléctrica producida por el cerebro a través del sensor MindWave de la empresa NeuroSky. En la aplicación diseñada en el software LabView, mediante el parpadeo fuerte y débil se puede seleccionar el tipo de agarre de la mano antropomórfica, el cual será controlado mediante la magnitud de la amplitud de la onda cerebral de atención o meditación, lo cual permite el control de apertura y cierre del movimiento respecto al tipo de agarre seleccionado. Este trabajo de titulación está orientado como una base para la creación de nuevas prótesis de extremidades superiores en este caso la mano humana.

PALABRAS CLAVE:

- **ONDAS CEREBRALES**
- **MANO ROBÓTICA**
- **ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA**
- **SERVOMOTORES**

ABSTRACT

The present research project describes the main design aspects for the construction of a robotic hand, considering characteristics of the human hand's anatomy, such as the lengths and relationships between their phalanges, as well as their joints' mobility that allows adapting effectively the movement's transmission. All these aspects allow an anthropomorphic architecture for the robotic hand, which provides versatility in the movements to imitate different types of grip that the human hand has, achieving their mobility by controlled servomotors with the Arduino platform, connected by nylon threads to each finger for transmission. The control of each movement will be realized by the electrical activity produced by the brain through the MindWave sensor from the NeuroSky Company. In the application designed in the LabView software, by means of the strong and weak flicker, the type of anthropomorphic hand grip can be selected, which will be controlled by the magnitude of the brain wave amplitude of attention or meditation, which allows the opening and closing movement control with respect to the selected grip type. This project is oriented as a basis for the creation of new prosthesis of upper limbs in this case the human hand.

KEYWORDS:

- **BRAIN WAVES**
- **ROBOTIC HAND**
- **ANTHROPOMORPHIC ARCHITECTURE**
- **SERVOMOTOR**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1. Sistemas antropomórficos

Los sistemas antropomórficos, muestran atribuciones con características y cualidades humanas, edificando una base para la fusión de organismos vivos con elementos mecánicos. A continuación, se detallan proyectos basados en este sistema, junto con los parámetros a considerar para el diseño de una mano robótica con arquitectura antropomórfica.

1.1. Antecedentes

En el transcurso de los años se han desarrollado manos robóticas con mayor similitud a la mano humana sea esto en su forma o movimiento, lo que permite obtener prótesis de mayor eficacia y versatilidad en su funcionamiento de la amplia variedad existente se describen las más significativas.

1.1.1. *Mano Utah/MIT*

Según (Mason & Salisbury, 1985), la mano Utah del *Instituto Tecnológico de Massachusetts*, fue desarrollada por el grupo de investigación en agarre y manipulación de dedos, la geometría de la mano robótica es antropomórfica a pesar de que el dedo pulgar permanece en una posición solamente cuenta con 4 dedos, cada uno con 4 grados de libertad "GDL". Los 16 GDL funcionan mediante una conexión de 32 tendones independientes poliméricos, los cuales son accionados mediante actuadores neumáticos, su diseño se puede observar en la Figura 1 y sus características en la Tabla 1.

Tabla 1.
Características generales de mano Utah/MIT

Año	Articulaciones	Grados de libertad	Tipo de transmisión
1984	4	16 GDL	Cilindros neumáticos



Figura 1. Diseño de mano Utah/MIT

Fuente: (Mason & Salisbury, 1985).

1.1.2. Mano NTU

La mano NTU desarrollada por la “*Universidad Nacional de Taiwán*”, según (Li-Ren & Han Pang, 1998) dispone de 5 dedos equipados con sensores para detectar la fuerza y posición, cuenta con 17 GDL, el dedo pulgar y el índice tienen 4 GDL, mientras que los otros dedos cuentan con 3 articulaciones activas, lo que representa un grado de libertad por cada una. Los motores, reducciones y sensores se encuentran instalados en la mano, su diseño se observa en la Figura 2 y sus características en la Tabla 2.

Tabla 2.
Características generales de mano NTU

Año	Articulaciones	Grados de libertad	Tipo de transmisión
1998	5	17 GDL	Engranajes

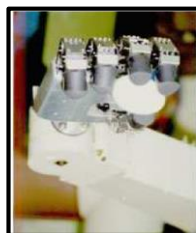


Figura 2. Diseño de mano NTU

Fuente: (Li-Ren & Han Pang, 1998)

1.1.3. Mano DLR

Según (Butterfass M, Liu, & Hirzinger, 1998), la mano DLR elaborada por el “*Centro Aeroespacial de Alemania*”, es la primera versión mecatrónica, la cual brinda un mejor rendimiento en aplicaciones de agarre y manipulación. Dispone de 4 dedos con un total de 14 grados de libertad movilizada por motores DC de escobillas, es decir rotan únicamente magnetos permanentes y los electroimanes no se mueven, al igual que su armadura permanece estática. Los dedos disponen de sensores de posición, fuerza y temperatura, su diseño se puede ver en la Figura 3 y sus características en la Tabla 3.

Tabla 3.
Características generales de mano DLR

Año	Articulaciones	Grados de libertad	Tipo de transmisión
1998	4	14 GDL	Motores de escobillas



Figura 3. Diseño de mano DLR

Fuente: (Butterfass M, Liu, & Hirzinger, 1998)

1.1.4. Mano Robonaut

Según (Lovchik & Diftler, 1999), la mano se implementó para el robot antropomórfico Robonaut, dispone de 5 dedos, con 12 GDL en la mano y 2 en la muñeca; cuenta con 14 motores de corriente directa sin escobillas para el movimiento de sus articulaciones y equipada con 43 sensores de diversos tipos instalados. Su diseño se puede observar en la Figura 4 y sus características en la Tabla 5.

Tabla 4.
Características generales de mano Robonaut

Año	Articulaciones	Grados de libertad	Tipo de transmisión
1999	5	14 GDL	Motores DC sin escobillas



Figura 4. Diseño de mano Robonaut

Fuente: (Lovchik & Diftler, 1999)

1.1.5. Mano biónica Cyberhand

Según (Carroza, 2006), la mano biónica cuenta con tres dedos completamente articulados con movimientos independientes impulsados por seis diminutos motores y se conecta mediante electrodos de platino a las terminaciones nerviosas de la persona. La prótesis recoge información del cerebro mediante sensores biomiméticos y en función de ellos mueve los motores que impulsan los dedos. El usuario es capaz de sentir la presión y temperatura a la que está sometida la prótesis, lo que permite que trascurrido un corto tiempo la sienta como parte de su cuerpo, de esta forma aumenta la confianza en el uso del dispositivo. Su diseño se observa en la Figura 5 y sus características en la Tabla 5.

Tabla 5.

Características generales de mano Cyberhand

Año	Articulaciones	Grados de libertad	Tipo de transmisión
2005	5	15 GDL	Motores

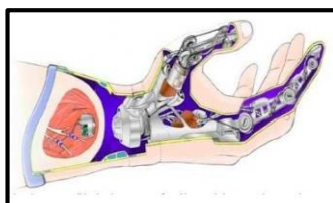


Figura 5. Diseño de mano Cyberhand

Fuente: (Carroza, 2006)

1.2. Criterios para el diseño antropomórfico de mano humana

La mano humana se puede definir como un órgano prensil, es el resultado de la fusión de un conjunto de estructuras complejas con dinámica propia, que constituye un todo funcional.

Está formada por una serie de elementos que han evolucionado hasta adquirir una forma casi perfecta, convirtiéndose en una herramienta indispensable en los diferentes aspectos de la vida diaria (Quiñonez, 2015). A continuación se describe las dimensiones, movimientos y métodos de transmisión necesarios para brindar las cualidades antropomórficas al diseño de la mano robótica.

1.2.1. *Fisiología*

Según (García, Martínez, Saltaren, Guerrero, & Lopez, 2001) la mano humana cuenta con 27 huesos incluyendo aquellos ubicados en la muñeca, 14 falanges distribuidos en sus dedos, 5 metacarpianos y 8 carpianos (Figura 6). Cada dedo está compuesto por tres falanges: distal, medial o intermedia y proximal (Figura 6), a excepción del dedo pulgar que solo tiene dos: distal y proximal. El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos, puede realizar desplazamientos de cierre y rotación, debido a la gran movilidad de su metacarpo; como se observa en la Figura 6, estas características permiten variar la dirección en la cual se desarrolla el movimiento de flexión y extensión del dedo pulgar, propiedad a través de la cual es posible unirlo con el resto de dedos. (Rouviere & Delmas, 2005).



Figura 6. Fisiología de una mano humana

Fuente: (Nachon, 2009)

Según (Quiñonez, 2015), el sistema óseo de la mano constituye una estructura compleja, la cual por su arquitectura forma una serie de ejes (transverso-longitudinal) que favorecerá su funcionalidad; éstos tanto el longitudinal como los dos transversales, son esenciales para la prensión y adaptabilidad de la mano, logrando una cantidad innumerable de movimientos y sujeciones.

La nomenclatura utilizada para denominar estos ejes o articulaciones (Figura 7), se describe a continuación:

- Metacarpofalángica (MF o MCF)
- Interfalángicas (IF)
- Interfalángica proximal (IFP)
- Interfalángica distal (IFD)
- Carpometacarpiana (CM o CMC)

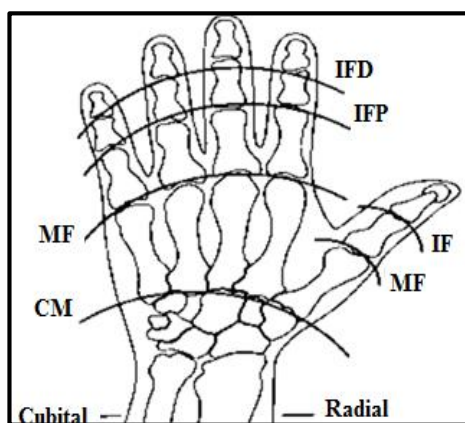


Figura 7. Ejes de la mano humana

Fuente: (Quiñonez, 2015)

1.1.1. Referencia para el dimensionamiento de falanges

Según (Quiñonez, 2015), la mano tiene una gran proporcionalidad y simetría, por tal motivo se debe tomar en cuenta las siguientes definiciones:

- La longitud de la falange distal, más la medial es igual a la proximal:

$$fp = fd + fm$$

Ec. 1

Dónde:

fp = Longitud de la falange proximal

fd = Longitud de la falange distal

fm = Longitud de la falange medial

- La longitud de la falange media, más la longitud de la proximal es igual a la longitud del metacarpo:

$$Mtc = fp + fm \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

Mtc = Longitud de metacarpo

fp = Longitud de la falange proximal

fm = Longitud de la falange medial

Existen referencias que dimensionan al cuerpo humano, una de ella es la norma **DIN 33.402** (Figura 8 y Tabla 6), describe a la mano en base a medidas tomadas a una cantidad N de personas, cada grupo con rasgos de similitud entre sí; éstas presentan medidas promedio, las cuales no son útiles al momento de replicar una mano real, debido a la diferencia existente entre razas y su ubicación geográfica.

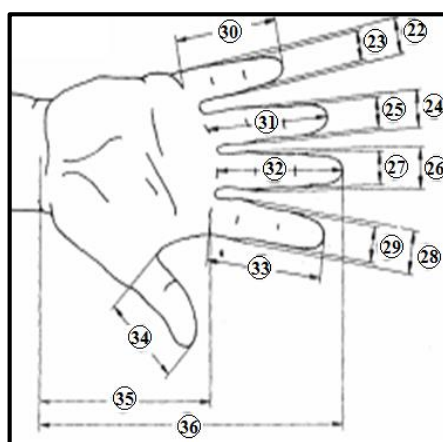


Figura 8. Norma DIN 33.402 medidas en mano humana

Fuente: (Melo, 2015)

Tabla 6.
Valores norma DIN 33.402

Dimensiones (cm)	Percentil					
	Hombres			Mujeres		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
22 Ancho del arduino en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7

CONTINÚA 

23	Ancho del arduino próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
30	Largo del dedo arduino	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	9,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

Fuente: (Melo, 2015)

1.2.2. Grados de libertad en articulaciones

Una parte importante a considerar para el diseño de los dedos son sus grados de libertad, debido a que estos individualmente y en conjunto permiten realizar movimientos variados; los grados de libertad son dados físicamente por las articulaciones, se los puede observar representados por los números 7 y 11 de la Figura 9.

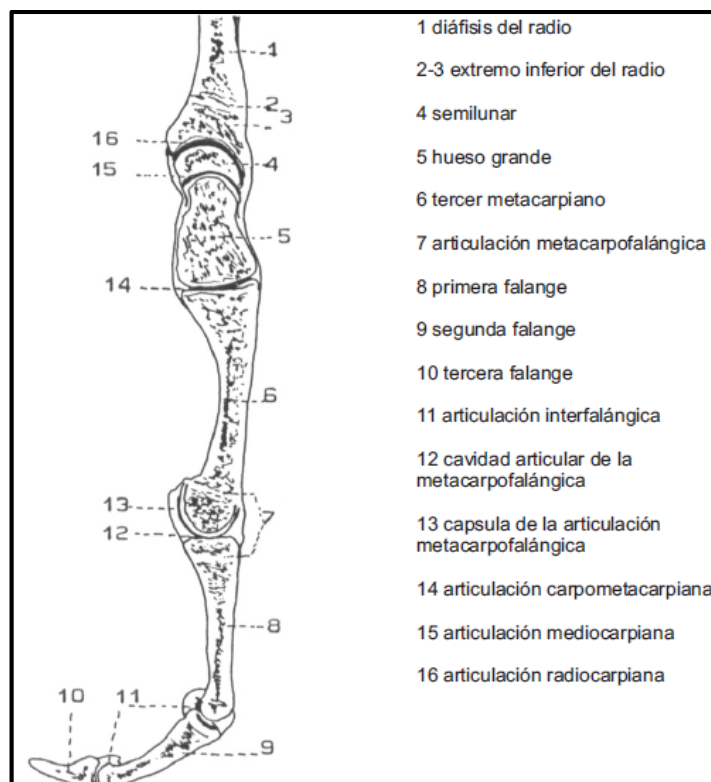


Figura 9. Vista lateral de las articulaciones del dedo

Fuente: (Borri, 2011)

Según sus grados de libertad, las articulaciones se caracterizan de la siguiente manera (Figura 10), las interfalángicas proximal y distal tienen 1 GDL, esto le permite realizar la flexión y extensión de los dedos direccionados hacia la palma de la mano, en el caso de la articulación metacarpofalángica cuenta con 2 GDL para la abducción y la aducción, la combinación de ambas le proporciona un total de 4 GDL en los dedos meñique, anular, medio e índice.

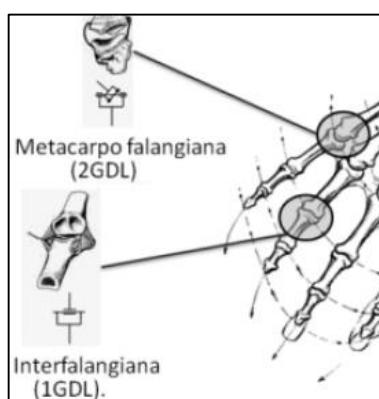


Figura 10. Pertenecientes al dedo

Fuente: (Flores, 2010)

1.2.3. Ángulos limitantes para el movimiento de los dedos

El movimiento de los dedos se mide desde el grado máximo de flexión hasta su extensión, es importante observar que la hiperextensión esta medida con un ángulo negativo, por lo tanto el rango total de movimiento de cada dedo se determina restando el ángulo de extensión menos el ángulo de flexión, dando así el ángulo de trabajo. (Hoppenfeld, 1985)

Según (Velásquez Sánchez, Merchán Cruz, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Calderón, 2007), el movimiento de las articulaciones interfalángicas proximal (PIF), distal (DIF) y metacarpofalángicas (MCF) del dedo pulgar, están determinadas de la misma forma que los demás dedos empleando el criterio anterior para cada una de las articulaciones. El movimiento de la articulación Carpometacarpiana (CMC) del pulgar, está definido por la abducción radial y palmar, así como de la oposición y retroposición del pulgar, destacando los siguientes movimientos a continuación:

- Flexión y extensión de los dedos a la altura de las articulaciones MCF.
- Flexión y extensión de los dedos a la altura de las articulaciones PIF y DIF.
- Abducción y aducción de los dedos a la altura de las articulaciones MCF.
- Flexión y extensión del pulgar a la altura de la articulación.

Durante la flexión normal de los dedos, los cuales se encuentran juntos en un movimiento continuo, tocando la palma aproximadamente al nivel del surco palmar distal (Figura 11), en la misma figura se puede observar la flexión y extensión de la falange distal, los 10° que se visualizan son considerados como negativos o hiperextensión.

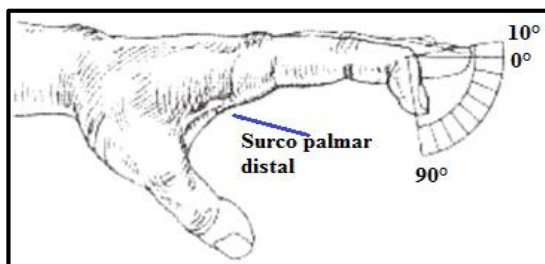


Figura 11. Distal: flexión y extensión

Fuente: (Velásquez Sánchez, Merchán Cruz, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Calderón, 2007)

En la Figura 12, se puede observar la flexión y extensión de la falange medial, en la cual se está flexionando la articulación proximal, nótese que no existe hiperextensión debido a que la articulación que actúa en este movimiento no posee esta capacidad.

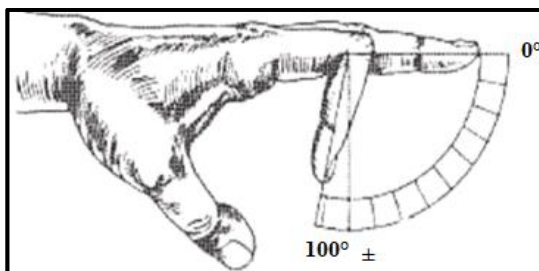


Figura 12. Proximal: flexión y extensión

Fuente: (Velásquez Sánchez, Merchán Cruz, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Calderón, 2007)

En la Figura 13, se puede observar la articulación metacarpofalángica actuar sobre la falange proximal, la hiperextensión mostrada varía entre 30° y 45° ; esto depende de la flexibilidad articular de cada persona.

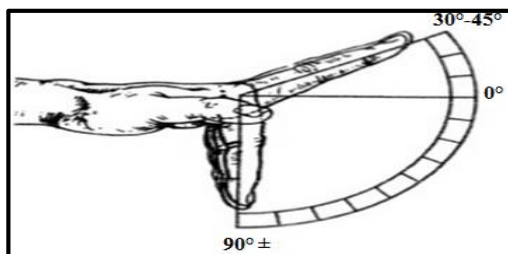


Figura 13. Flexión y extensión articulación MCF

Fuente: (Velásquez Sánchez, Merchán Cruz, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Calderón, 2007)

Los dedos meñique, anular, medio e índice cumplen los mismos ángulos descritos anteriormente, a excepción del dedo pulgar el cual cuenta con una mayor cantidad de grados de libertad; en el caso de la articulación interfalángica de este dedo, posee 20° de extensión y 90° de flexión como se muestra en la Figura 14, además de una flexión de 50° en la articulación metacarpofalángica, iniciando su movimiento desde una posición paralela al dedo índice (Figura 15).

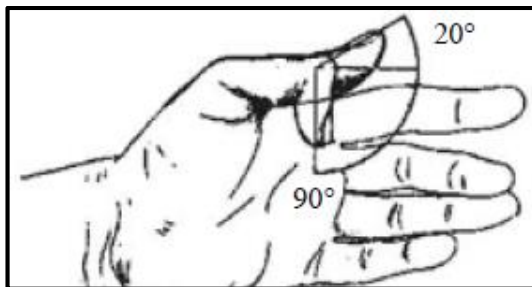


Figura 14. Flexión y extensión articulación IF pulgar

Fuente: (Velásquez Sánchez, Merchán Cruz, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Calderón, 2007)



Figura 15. Flexión y extensión articulación MCF pulgar

Fuente: (Velásquez Sánchez, Merchán Cruz, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Calderón, 2007)

1.2.4. Patrón para el posicionamiento de los dedos

El conjunto de músculos y articulaciones que conforman la mano ofrece una gran versatilidad en movimientos y agarres; en cuanto a configuración de sujeciones, pueden ser divididas en dos grandes grupos:

- Sujeciones prensiles: Son movimientos en los cuales un objeto es agarrado y mantenido parcial o totalmente dentro de la mano.
- Sujeciones no prensiles: Son movimientos en los cuales no son realizadas acciones de agarre, pero los objetos pueden ser manipulados, empujados o levantados con la mano entera o con los dedos individuales.

En 1955 se desarrolló una clasificación de la taxonomía, para el estudio de la destreza de las manos humanas según (Taylor & Schwarz, 1955), agrupándolas en cinco categorías de agarres: cilíndrico, punta, gancho, esférico y lateral. A continuación se describirán estos movimientos:

a) ***Movimiento de agarre tipo cilíndrico***

En este movimiento interactúan los dedos con la palma de la mano. Es una presión de fuerza para tomar objetos pesados y voluminosos (Figura 16), se usa para sujetar objetos de forma cilíndrica en general.

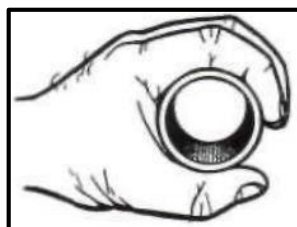


Figura 16. Agarre cilíndrico

Fuente: (Taylor & Schwarz, 1955)

b) ***Movimiento de agarre tipo punta***

El agarre tipo punta (Figura 17), se usa al sujetar objetos pequeños como tornillos, clavos o pedazos de papel, esto se puede realizar con éxito gracias a la maleabilidad de las yemas de los dedos.

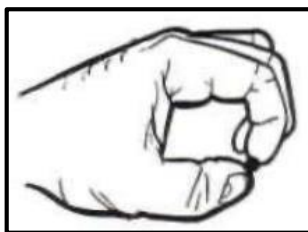


Figura 17. Agarre tipo punta

Fuente: (Taylor & Schwarz, 1955)

c) ***Movimiento de agarre tipo gancho***

El agarre de gancho (Figura 18), se usa para levantar, jalar o sujetar objetos pesados, acercándolos y aprisionándolos a la palma de la mano, teniendo así un mejor control del elemento para su traslado o reposicionamiento.

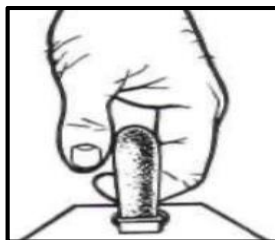


Figura 18. Agarre de gancho

Fuente: (Taylor & Schwarz, 1955)

d) *Movimiento de agarre tipo esférico*

El agarre esférico (Figura 19), se emplea para sujetar objetos globulares, cubriendo su periferia con la palma y las yemas de los dedos, teniendo de esta manera un buen agarre mientras las dimensiones del objeto no superen las de la mano, como una pelota o una manzana.



Figura 19. Agarre esférico

Fuente: (Taylor & Schwarz, 1955)

e) *Movimiento de agarre tipo lateral*

El agarre lateral (Figura 20), se usa para objetos delgados y planos cuya superficie sea uniforme, generalmente se realiza con el pulgar y el índice, aunque también se puede utilizar los dedos medio, anular y meñique e incluso en combinaciones entre ellos.

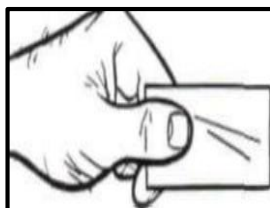


Figura 20. Agarre lateral

Fuente: (Taylor & Schwarz, 1955)

1.2.5. Método de transmisión de movimiento

La transmisión de movimiento es un factor importante, debido a que se lo utiliza como un criterio fundamental para el diseño mecánico, mediante el cual se dimensiona mecanismos, equipos y accesorios, éstos pueden llegar a determinar los grados de libertad. Existen varios métodos de los cuales se nombran los siguientes:

a) *Transmisión por eslabones*

Esta transmisión se basa en la conexión de varios eslabones impulsados por un solo motor, produciendo un movimiento armónico simple, con este método el mecanismo recorre una trayectoria por cada dedo; es decir, el diseño grafica una sola trayectoria como se puede observar en la Figura 21.

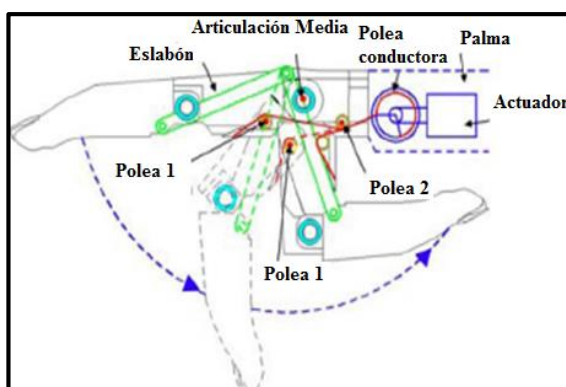


Figura 21. Movimiento por eslabones

Fuente: (Romero Perez, 2011)

b) *Transmisión por poleas*

En la transmisión por poleas los grados de libertad de cada dedo dependen del número de motores que se van implementar, se puede considerar el uso de motores de corriente directa para cada articulación, éstos permiten un control individual de cada falange (Figura 22). También existen métodos en los cuales el motor se conecta directamente a cada articulación, su uso es poco común debido a que las dimensiones de diseño dependen del tamaño del motor, delimitando demasiado al mecanismo.

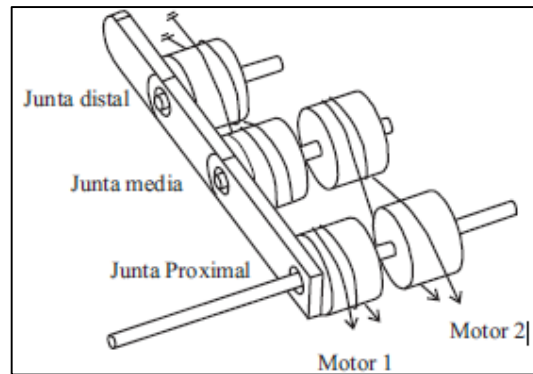


Figura 22. Transmisión por poleas
Fuente: (Aviles, Leon, & Calle, 2005)

2. Ondas cerebrales y sus equipos de lectura

El proceso de lectura de ondas se realiza mediante la adquisición de voltajes de diferente amplitud y frecuencia por medio de electrodos, los cuales son distribuidos en secciones estratégicas de la cabeza para una mejor adquisición de ondas. A continuación se describe proyectos relacionados y las definiciones de los tipos de ondas cerebrales estudiadas en la actualidad con sus diferentes equipos de lectura.

2.1. Antecedentes

Tras los avances tecnológicos en los últimos años, se ha incrementado la demanda en la generación de sistemas de control avanzados, algunos se realizan empleando interfaces cerebrales como un enlace entre una máquina y parte del sistema nervioso, se describen proyectos relacionados con este tipo de control:

2.1.1. *Diseño e implementación de un sistema de adquisición de ondas cerebrales (EEG) de seis canales y análisis en tiempo, frecuencia y coherencia*

Según (Changoluisa Romero & Escalante Viteri, 2012), el proyecto tuvo como objetivo el estudio en tiempo, frecuencia y coherencia de las señales electroencefalográficas (E.E.G.). Se diseñó e implementó un sistema de seis canales conformado por una etapa de amplificación y filtrado de las señales eléctricas

cerebrales, cuenta con una etapa dedicada a la adquisición de señales mediante una **DAQ NI-USB 6009** y una computadora portátil. Se desarrolló en LabView un HMI, acorde a las necesidades de la aplicación, el software permite el análisis de 6 canales concernientes a las ondas cerebrales, tanto en tiempo real como diferido, en la Figura 23 se puede observar la ubicación de los electrodos en una persona.

Estos canales pueden ser visualizados en el dominio del tiempo y la frecuencia, permite grabar los voltajes de las ondas cerebrales para su posterior análisis en tiempo diferido. Para los tipos de análisis mencionados, se implementa los algoritmos necesarios que permite adquirir las señales cada 3 segundos, que es el tiempo en que se actualizan los datos de la tarjeta de adquisición. Todo este análisis se basa en el principio de que el cerebro está conformado por miles de millones de células cerebrales llamadas neuronas, que utilizan electricidad para comunicarse entre sí.



Figura 23. Posición de sensores para la adquisición de señales

Fuente: (Changoluisa Romero & Escalante Viteri, 2012)

2.1.2. Adquisición y análisis de señales cerebrales utilizando el dispositivo MindWave

Según (Torres & Sanchez, 2014), el dispositivo MindWave desarrollado por el fabricante NeuroSky, permite la obtención de señales electroencefalográficas (Figura 24), a través de un interface tipo diadema que se coloca en la cabeza (Figura 25), la cual se alimenta mediante una pila de 1,5 V tipo AAA. Utiliza una conexión inalámbrica para comunicarse con el computador y adquiere señales a través de biosensores pasivos conectados a un electrodo en contacto con la frente. Cuenta con un terminal de referencia que se conecta con el lóbulo de la oreja, ésta característica

se utiliza para determinar el origen de la señal, la localización de los electrodos permite obtener diferentes representaciones del EEG y con mayor claridad. El dispositivo MindWave dispone de un solo terminal colocado en la frente del sujeto, en lo que se conoce formalmente como zona pre-frontal lo cual da una lectura parcial de cada onda (Larsen, 2011).

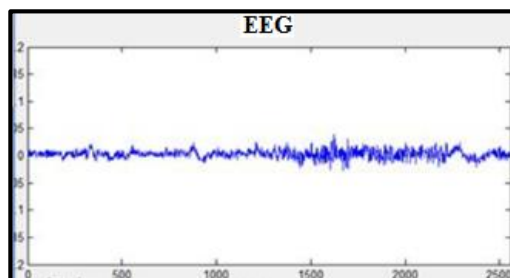


Figura 24. Adquisición de señales de EEG

Fuente: (Torres & Sanchez, 2014)



Figura 25. Ubicación del lector MindWave

Fuente: (Torres & Sanchez, 2014)

2.1.3. Diseño y construcción de una silla de ruedas autónoma accionada mediante ondas cerebrales, para la asociación de limitados pléjicos de Tungurahua (ASOPLEJICAT)

Como menciona (Lasluisa Garcés, 2015), el proyecto muestra la fusión de un sistema mecánico controlado mediante ondas cerebrales; en este caso, se diseñó y fabricó una silla de ruedas cuyos motores son controlados mediante la plataforma arduino y a su vez recibe las instrucciones para su movimiento con programas diseñados en el software LabView. La adquisición de ondas fue realizada con el sensor “*Emotiv Epoc*” el cual se puede observar en la Figura 26; según (EMOTIV, 2011) el dispositivo cuenta con 14 electrodos de señales para los canales EEG y 2 electrodos de referencia.

El análisis de datos fue realizado en LabView y cuenta con tres modos de funcionamiento: modo expresivo, modo cognitivo/expresivo y modo giroscopio, éste último sin ser una onda cerebral es un adicional para su control. Una de las conclusiones de este proyecto fue la dificultad al utilizar las ondas cerebrales pues varios factores las alteran, se puede ver un ejemplo de su funcionamiento en modo giroscopio en la Figura 27.



Figura 26. Emotiv EPOC HEADSET

Fuente: (EMOTIV, 2011)



Figura 27. Prueba de control de silla de ruedas

Fuente: (Lasluisa Garcés, 2015)

2.2. Tipos de ondas cerebrales

Existen 5 tipos de ondas cerebrales: alfa, beta, delta, theta y gamma, cada una predomina en ciertos estados de la conciencia, de esta manera pueden estar presentes todas al mismo tiempo pero una sobresaliendo ante el resto. A continuación se presenta la descripción de cada una de ellas.

2.2.1. Onda delta (0.1 Hz – 3.99 Hz)

Son las ondas de mayor amplitud y menor frecuencia, se encuentran en los rangos de 0.1 a 3.99 Hz (Figura 28). Nunca llegan a cero, pues eso significaría la muerte cerebral. Es un estado de sueño profundo. (Alvarado, 2009)

Se las puede visualizar como oscilaciones electromagnéticas detectadas en el cerebro humano a través de un electroencefalograma. No se las encuentra en la actividad cerebral consciente, estas ondas se presentan en el caso de daño cerebral o coma, surgen en el sueño profundo y rara vez se experimentan despierto. Al momento de dormir, las ondas cerebrales van pasando sucesivamente de beta a alfa, theta y finalmente delta.

Según (Martinez, 2009), durante el sueño se producen ciclos que duran 90 minutos, además las ondas delta resultan de gran importancia en los procesos curativos y en el fortalecimiento del sistema inmunitario, por eso la importancia del sueño para la salud.

Las frecuencias delta generalmente no son tan buenas como el alfa o la theta para la meditación, algunas personas han tenido éxito utilizando frecuencias delta junto con la relajación. (Brainwave, 2013)



Figura 28. Onda delta

Fuente: (Jaramillo, 1996)

2.2.2. Onda theta (4 Hz – 7.99 Hz)

Las ondas theta según (Alvarado, 2009) son ondas de mayor amplitud y menor frecuencia, generadas en un estado de meditación profunda, se encuentran en el rango de 4 a 7.99 Hz (Figura 29). A menudo una persona tiene las mejores ideas cuando predominan este tipo de ondas, se trata de un estado en el cual las tareas que realizan se han vuelto tan automáticas, que no necesitan tener un control consciente de su realización y pueden distanciarse de ellas mentalmente, es decir, la mente está en “otro

sitio”. Las ideas que surgen en la mente en este estado fluyen con libertad y sin censura o culpa.

Según (Martinez, 2009), mientras actúa el subconsciente se generan las ondas theta, tras la interacción entre los lóbulos temporal y frontal.



Figura 29. Onda theta

Fuente: (Jaramillo, 1996)

2.2.3. Onda alfa (9 Hz -12.99 Hz)

Según (Martinez, 2009), las ondas alfa tiene una frecuencia entre 9 a 12.99 Hz (Figura 30), están relacionadas con estados de relajación, se registran especialmente en el momento antes de dormir. Se originan con mayor notoriedad en el lóbulo occipital durante periodos de calma con los ojos cerrados, pero todavía despierto. Estas ondas se atenúan al abrirse los ojos, son producidas durante la somnolencia y el sueño. Se piensa que representan la actividad de la corteza visual en un estado de reposo, estas ondas son más lentas y de mayor amplitud que las ondas beta.

Una persona que ha terminado una tarea y se sienta a descansar, se encuentra a menudo en un estado alfa, así como la persona que está dando un paseo, disfrutando del paisaje o relajándose de algún modo. (Alvarado, 2009)

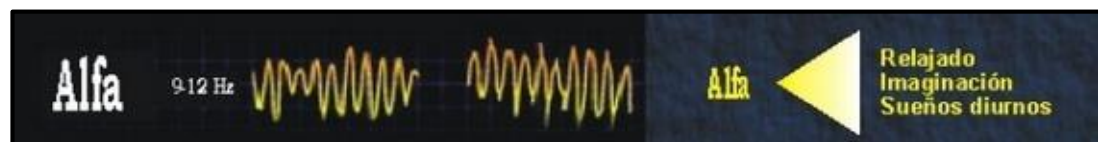


Figura 30. Onda alfa

Fuente: (Jaramillo, 1996)

2.2.4. Onda beta (14 Hz – 30 Hz)

Las ondas beta según (Martinez, 2009) originan un campo electromagnético con una frecuencia comprendida entre 14 Hz y 30 Hz (Figura 31), se registran cuando la persona se encuentra despierta y en plena actividad mental. Los sentidos se hallan enfocados hacia el exterior, de manera que la irritación, inquietud y temores repentinos pueden asociarse con éste.

En la fase beta, la mente permanece despierta en estado de alerta y enfocada hacia objetivos determinados. Es un estado presente en aquellas actividades que exigen niveles altos de concentración (analizar, organizar información, presentar un examen, jugar, deportes, etc.). Según (Binaurales, 2012) si los niveles de ondas beta suben, la persona puede padecer de estrés y ansiedad.



Figura 31. Onda Beta

Fuente: (Jaramillo, 1996)

2.2.5. Onda gamma (Superior a 40 Hz)

De entre todas, las ondas gamma son las que más llaman la atención del ser humano, debido a su rapidez y al ser las de mayor actividad mental; se presentan en momentos repentinos de lucidez, intuición, brillantez y concentración extrema.

Las ondas gamma, son un conjunto de señales eléctricas que emiten las neuronas y tienen una frecuencia aproximada de 40 Hz (Figura 32). También pueden realizarse mediciones bajo las mismas condiciones y encontrar a personas situadas en los rangos de 26 Hz a 70 Hz.

Las actividades que más requieren el uso del intelecto se las denomina como cognitivas de alto nivel, se presentan cuando se supera el límite de los 24 Hz, debido a que en este punto prevalecen las ondas gamma. También pueden estar presentes en

la fase REM (Rapid Eye Moment), esta fase es considerada la quinta etapa del sueño, cuando los ojos se mueven rápidamente mientras los párpados se encuentran cerrados, en esta etapa el cuerpo no puede moverse e incluso presenta mayor actividad cerebral; de hecho los últimos estudios realizados sugieren, que la capacidad de resolver problemas se relaciona directamente con el aumento de las frecuencias de 20 Hz a 40 Hz, dentro del rango de esta onda. (Binaurales, 2012)



Figura 32. Onda gamma

Fuente: (Escribano, 2010)

2.3. Equipos de lectura de ondas cerebrales

A continuación se describen los equipos más utilizados en la adquisición de ondas cerebrales:

2.3.1. Auricular móvil *MindWave de NeuroSky*

El auricular móvil *MindWave* basado en electroencefalogramas (EEG), es la culminación de décadas de investigación en tecnología de biosensores, compacto y fácil de controlar. El *MindWave* móvil adquiere las señales y envía los espectros de potencia del EEG (ondas alfa, beta, etc.), para visualizarlos como medidores de atención, meditación y parpadeo del ojo (Figura 33).

El dispositivo consiste en un auricular, con un clip de oreja, y un brazo sensor (Figura 34). Los electrodos de referencia y de tierra de los auriculares están en el clip de la oreja y el electrodo de EEG está en el brazo del sensor, éste descansa sobre la frente por encima del ojo. Utiliza una sola batería AAA, con 8 horas de duración. (NeuroSky, 2014)



Figura 33. Funcionamiento del lector MindWave de NeuroSky

Fuente: (NeuroSky, 2014)



Figura 34. Dispositivo MindWave

Fuente: (NeuroSky, 2014)

Los algoritmos de ondas cerebrales, desarrollados por investigadores de la misma empresa, universidades asociadas e instituciones de investigación, están descubriendo nuevas formas de interactuar con sistemas de monitoreo y control, tales como LabView, a continuación se describe estos algoritmos:

- Algoritmo de atención

El medidor de atención, indica la intensidad de enfoque mental o concentración del usuario; su valor oscila entre 0 y 100; aumenta el nivel de atención cuando el usuario se centra en un solo pensamiento o un objeto externo, disminuye cuando está distraído o meditabundo, es una de las ondas de más fácil adquisición y control con la práctica. LabView cuenta con un VI (Virtual Instruments) *“ThinkGear Read attention”* para la interpretación de la onda atención (Figura 35).



Figura 35. VI lectura onda atención

Fuente: (NeuroSky, 2014)

- Algoritmo de meditación

El medidor de meditación, indica el nivel de calma mental o relajación de un usuario. Su valor oscila entre 0 y 100. Aumenta el nivel de meditación cuando el usuario relaja su mente y disminuye cuando se siente incómodo o estresado, esta onda al igual que la atención son las de más fácil control con la práctica, LabView cuenta con un VI “ThinkGear Read meditation” para el análisis de esta onda (Figura 36).

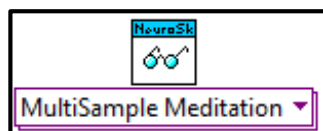


Figura 36. VI lectura onda meditación

Fuente: (NeuroSky, 2014)

- Algoritmo para detección de parpadeo

En la detección de parpadeo, al detectarlo el lector de ondas cerebrales, no envía el dato como booleano sino como una señal de magnitud variante, se presentan como una variable, teniendo señales bajas de 0 a 100 con parpadeos suaves y una señal de mayor amplitud al parpadear con fuerza, esto puede servir como un sistema de selección variada, debido a que emite señales analógicas dependiendo de la fuerza de los parpadeos. Cuenta con un VI “ThinkGear Blink Strength” que permite la interacción entre el lector y la computadora (Figura 37).



Figura 37. VI detección de parpadeos

Fuente: (NeuroSky, 2014)

- Algoritmo para la calidad de la señal

El VI “*ThinkGear Signal Quality*” ofrecido por NeuroSky, permite determinar la calidad de la señal detectada, si es buena o mala, para que el usuario considere utilizar o no ésta señal para el control (Figura 38).



Figura 38. VI calidad de la señal
Fuente: (NeuroSky, 2014)

2.3.2. Lector cerebral EMOTIV-EPOC+

Según (EMOTIV, 2011), este dispositivo cuenta con 14 canales para la adquisición de ondas cerebrales, cada uno situado en lugares específicos para una mejor calidad en la señal. Los 14 electrodos se encuentran descritos con la siguiente nominación, AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF42 y las referencias como P3 y P4 (ubicado detrás de los oídos), cada uno en un sitio específico como se puede observar en la Figura 39.

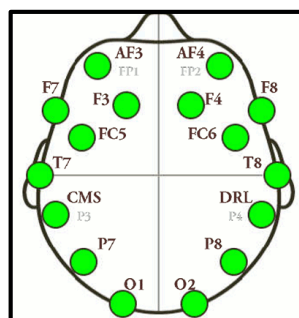


Figura 39. Distribución de electrodos
Fuente: (EMOTIV, 2011)

Cuenta con un software de análisis de ondas, con varias funciones para comodidad del usuario. Dispone de una batería interna de lithium con capacidad de 6 horas en uso

continuo, además cuenta con comunicación wireless que supera en velocidad al MindWave, al igual que varios accesorios adicionales (Ver Figura 26).

EMOTIV-EPOC control panel: son aplicaciones para familiarizarse con el casco, cuenta con herramientas de expresividad, afecto, cognitivas y de simulación con el ratón. El campo de la medicina puede aprovechar estos dispositivos, pero debido a la tecnología actual aún no son adecuados para controles finos, pues la precisión en la señal y la exactitud de los datos todavía no son los óptimos. (Marzo & Abad, 2013)

3. Microcontroladores

A continuación, se describen plataformas integradas por microcontroladores, las cuales cuentan con entradas y salidas que permiten el control de servomotores y procesos.

3.1. Plataforma de control SSC-32

El SSC-32, como se muestra en la Figura 40, es un controlador de la empresa Lynxmotion, que permite controlar hasta un máximo de 32 servomotores, dispone de un conjunto de funcionalidades adicionales: control por tiempo/velocidad/posición, movimiento síncrono, consulta de posición, utilización de los pines de control como salidas digitales TTL. Dispone de 4 entradas (A, B, C y D), que pueden ser leídas de manera digital (bits) o de manera analógica (voltios). Este controlador cuenta con 4 entradas, diversas configuraciones de alimentación (fuente única para placa y servomotores o fuentes separadas), mayor rango de velocidades en el puerto serie (2400bps, 9600bps, 38.4 Kbps y 115.2Kbps) y la posibilidad de conectar el SSC-32 a un micro-controlador a través de comunicación serie TTL. Su único inconveniente es su gran tamaño al contar con un conector DB9 estándar.

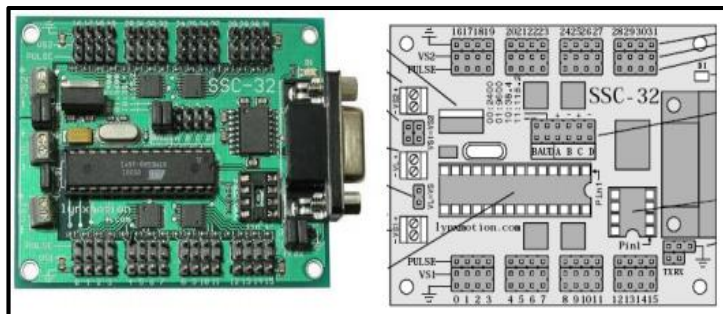


Figura 40. Controlador SSC-32

Fuente: (Lynxmotion, 2005)

3.2. Plataforma de control arduino

Arduino, es una plataforma **“open-hardware”** que significa diseño de libre distribución, basada en una placa sencilla de entradas y salidas analógico - digitales (Figura 41), dispone de un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje **“Processing/Wiring”** que permite la programación libre. Existen varias versiones de arduino según la interfaz de conexión a la PC: serie, USB, bluetooth y zigbee; con los cuales puede comunicarse entre dispositivos del mismo fabricante y otros. Esta placa presenta una gran variedad y compatibilidad, incluso permite la conexión de sensores y actuadores variados.

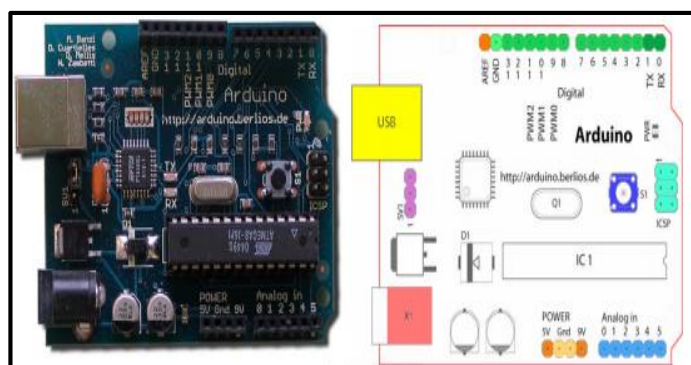


Figura 41. Controlador arduino

Fuente: (Arduino, 2007)

El uso de este dispositivo no se remite simplemente al control de servomotores, cuenta con entradas para la lectura de varios tipos de sensores como: acelerómetros, sensores de distancia, sensores de temperatura, sensores de humedad, sensores de luz, potenciómetros, etc. Al igual que el control de diversos actuadores.

4. Servomotores DC

Un servomotor (servo), es un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ser controlado en su posición y ubicarse en cualquier punto dentro de su rango de operación (generalmente de 180°) manteniéndose estable. Los servos debido a su gran precisión se utilizan en robótica y modelismo (vehículos por radio-control, etc.).

En la Figura 42, se muestran los componentes internos de un servomotor detallados de la siguiente manera: a) carcasa; b) motor DC; c) potenciómetro; d) circuito de control; e) tren reductor; f) brazo (elemento terminal en el eje).

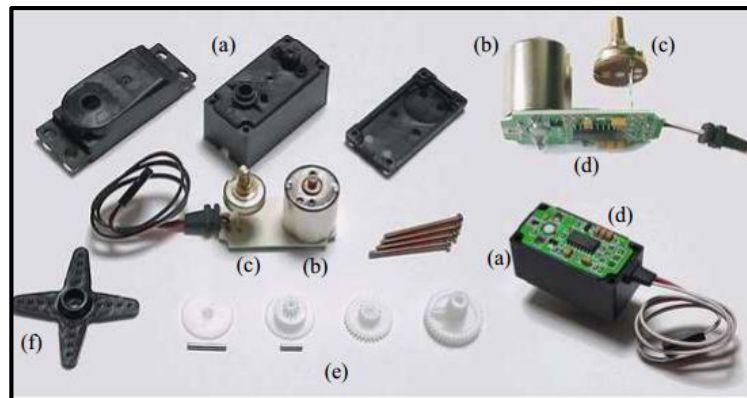


Figura 42. Componentes de un servomotor

Fuente: (Carletti, 2007)

4.1. Componentes internos fundamentales

Según (Candelas Herías & Corrales Ramón, 2007) los servos pueden estar compuestos por 4 elementos fundamentales:

4.1.1. Motor de corriente continua (DC)

Es el elemento que brinda movilidad al servo (Ver Figura 42 b). Cuando se aplica un potencial a sus dos terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima, si el voltaje aplicado en sus dos terminales es inverso, el sentido de giro también se invierte.

4.1.2. *Sensor de desplazamiento*

Suele ser un potenciómetro (Ver Figura 42 c), se encuentra conectado al eje de salida del servo, se utiliza para conocer la posición angular del mismo según la variación en su resistencia.

4.1.3. *Circuito de control*

Es una placa electrónica (Ver Figura 42 d), su control lo realiza mediante un proceso de retroalimentación. Para ello, este circuito compara la señal de entrada de referencia (posición deseada), con la posición actual medida por el potenciómetro. La diferencia entre la posición actual y la deseada es amplificada y utilizada para mover el motor en la dirección necesaria para reducir el error, es decir un sistema de lazo cerrado.

4.1.4. *Engranajes reductores*

El tren de engranajes (Ver Figura 42 e), se encarga de reducir la alta velocidad de giro del motor, para acrecentar su capacidad de torque (o par de motor), a través de relaciones de transmisión.

4.2. Dimensiones Generales

Los servomotores presentan diferentes dimensiones en relación a su modelo, capacidad, uso, etc. En la Figura 43 presentada por (EPSA, 2005) se muestra un servo normal o estándar como el modelo HS-300 de Hitec, el cual dispone de 42 onzas por pulgada o 3kg por cm de torque, lo que lo hace bastante fuerte para su tamaño en conjunto con su diseño, no consume mucha energía y se los puede obtener en una gama de hasta 11 Kg.cm de torque.

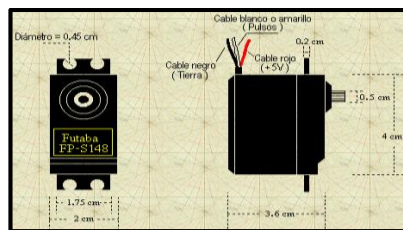


Figura 43. Dimensiones de un servomotor

Fuente: (EPSA, 2005)

4.3. Principios de funcionamiento

Los servomotores disponen de tres cables (Figura 44), dos cables de alimentación (positivo y negativo/masa) que suministran un voltaje de 4.8-6V y un cable de control que indica la posición deseada al circuito de control mediante señales PWM “**Pulse Width Modulation**”.

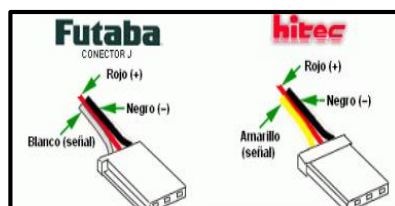


Figura 44. Colores de los cables de los principales fabricantes de servomotores

Fuente: (Carletti, 2007)

Las señales PWM utilizadas para controlar los servomotores están formadas por pulsos positivos cuya duración es proporcional a la posición deseada del servomotor y que se repiten cada 20ms (50Hz). Todos los servomotores pueden funcionar correctamente en un rango de movimiento de 90°, los cuales corresponde a un pulso PWM, comprendido entre 0.9 y 2.1ms. Sin embargo, también existen servomotores que se pueden mover en un rango extendido de 180° y sus pulsos de control varían entre 0.5 y 2.5ms (Figura 45). Antes de utilizar un servomotor, se debe comprobar experimentalmente su rango de movimiento para no dañarlo. Para mantener fijo un servomotor en una posición es necesario enviar periódicamente el pulso correspondiente ya que si no recibe señales el eje del servomotor quedará libre y se podrá moverse ejerciendo presión en él.

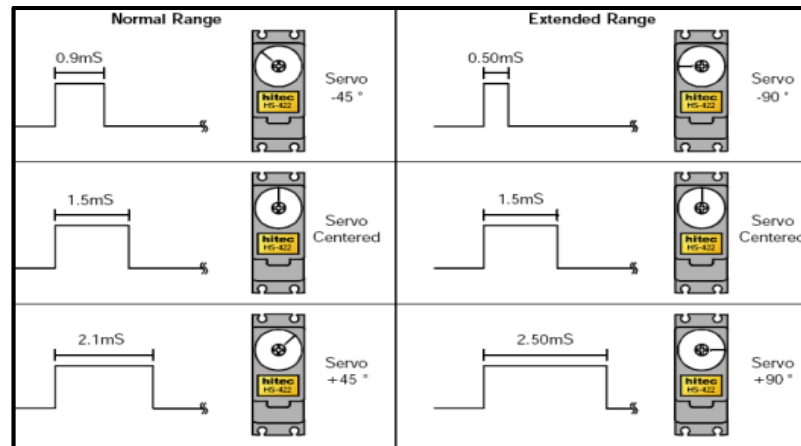


Figura 45. Pulsos PWM para controlar servomotores

Fuente: (Candelas Herías & Corrales Ramón, 2007)

5. Software especializado para la adquisición y procesamiento de datos

En esta sección se describe el software con mayor compatibilidad en cuestión de adquisición de datos, además dispone de una interfaz gráfica que permite mayor facilidad en la programación e interpretación de señales, de igual manera brinda al usuario una forma amigable en el manejo de aplicaciones.

LabView es el acrónimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, es un lenguaje y al mismo tiempo un entorno de programación gráfica, que permite crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla con la utilización de los VI's (Virtual Instruments), a continuación se describirá varios aspectos de este software.

5.1. Entorno de software LabView

LabView cuenta con un entorno de desarrollo gráfico, funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medida y presentaciones de variables. Proporciona al usuario la flexibilidad de un potente ambiente de programación, pero mucho más sencillo que los entornos tradicionales. (National Instruments, 2014)

Una de las aplicaciones que tiene LabView es el "VI", denominado instrumento virtual y está compuesto de dos elementos primarios: un panel frontal y un panel de control, éstos pueden programarse usando la paleta de funciones. Tiene la posibilidad de declarar variables, usar estructuras de control como otros lenguajes de programación y de forma gráfica los siguientes: while, for, case, flat sequence, event, etc.

En el panel frontal se puede observar los datos entrantes (controles, referencias a entradas de instrumentos, etc.) y sus salidas acondicionadas para el proceso (indicadores numéricos, gráficos, etc.), lo cual es una gran ayuda ya que permite entender lo que sucede mediante su interfaz gráfico.

El panel de control es donde se pone el código gráfico contiene las funciones o nodos de programación matemática, lógica, las funciones para el manejo de cadenas de caracteres, manipulación de arreglo de datos, conversión, temporización, manipulación de documentos, almacenamiento de información, manejo de base de datos, etc. (Lajara Vizcaino & Pelegri Sebastia , 2007)

5.2. Ventajas en el uso de LabView

Según (Veliz, Vera , & Valdivieso, 2011), las principales ventajas del uso de LabView se detallan a continuación:

- Es un lenguaje gráfico intuitivo por su facilidad de programación.
- Puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo Matlab/Simulink, AutoCAD, etc.
- Facilidades en el manejo de interfaces de comunicación. Se puede citar: puerto serie, puerto paralelo, USB, entre otros.
- Fácil integración con hardware, por ejemplo: tarjetas de adquisición, medición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).
- Posee una herramienta de rápida adquisición de ondas cerebrales, por medio del módulo “**NeuroSky Interface**” que adquiere los datos de su auricular (hardware).

- Al utilizar el módulo arduino Toolkit no hay necesidad de profundizar en la programación para controlar varios servomotores ya que permite la comunicación directa con el microcontrolador.

5.3. Herramientas de vinculación

Algunas funciones vienen por defecto con la instalación de LabView pero otras requieren ser instaladas para que estos módulos agreguen más anexos a su entorno de desarrollo, como el módulo LabView – NeuroSky y el módulo arduino toolkit, los cuales se detallan a continuación:

5.3.1. Interfaz NeuroSky

Este módulo permite a los usuarios adquirir fácilmente los datos y acceder a toda la funcionalidad del controlador del sistema de NeuroSky (Figura 46), proporciona una biblioteca dinámica (DLL) vinculada con un conjunto de funciones escritas en C que acceden al puerto COM virtual el cual se ejecuta con el auricular. En lugar de acceder a las funciones DLL específicas, los usuarios acceden fácilmente a los datos del controlador NeuroSky. (National Instrument, 2011)

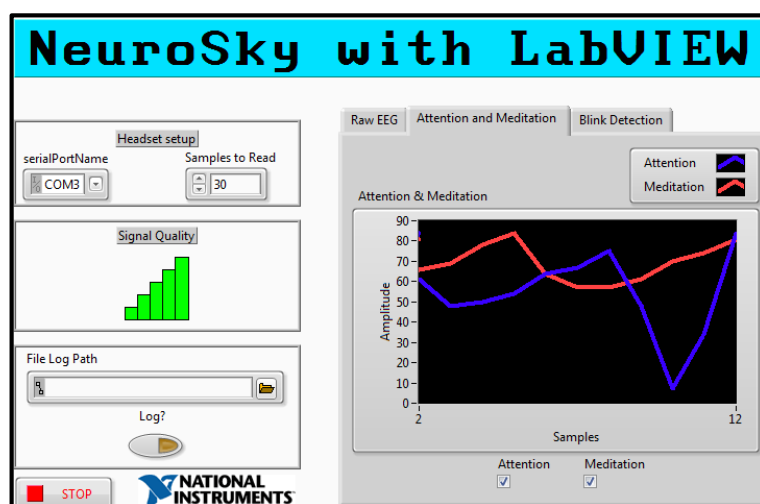


Figura 46. LabView con NeuroSky

Fuente: (National Instrument, 2011)

5.3.2. Interfaz arduino

El módulo arduino toolkit ayuda a establecer una interfaz fácilmente con el microcontrolador usando LabView, con este juego de herramientas se puede controlar y adquirir datos. Una vez que la información es adquirida, se analiza utilizando sus bibliotecas integradas; un icono que representa el microcontrolador arduino, actúa como una tarjeta de entradas/salidas que se conecta con los VI's de LabView a través de una conexión serial. Esto le ayuda a mover información rápidamente desde pines arduino al software, sin ajustar la comunicación, la sincronización o incluso en una sola línea de código C. Al usar los VI's de arduino, se puede tener acceso a las señales digitales, analógicas y moduladas por ancho de pulso, puede conectarse a la PC mediante LabView a través de un enlace serial, bluetooth o xbee. (National Instrument, 2010)

6. Prototipado rápido (Impresión 3D)

Esta sección se añadió con la finalidad de explicar una de las tecnologías más usadas para la fabricación de prototipos, considerándose para la construcción de la mano robótica, debido a su rapidez en la elaboración de piezas mediante un diseño CAD (Diseño asistido por computadora).

Según (Digita2, 2013), el prototipado rápido puede definirse como un conjunto de tecnologías, que permiten la obtención de prototipos en corto tiempo a partir de un fichero CAD. Consecuencia de esta rapidez de respuesta el mecanizado de un diseño puede reducirse a la mitad, la quinta e incluso la décima parte. Esta técnica de construcción de sólidos parte del corte en secciones horizontales paralelas de piezas representadas en CAD. Estas secciones al fundirse construyen las formas sólidas a partir de la superposición de capas horizontales, una de las técnicas conocidas es el FDM. "Fused deposition modeling", la cual va a ser utilizada y descrita a continuación.

6.1. Deposición de hilo fundido

La deposición de hilo fundido o FDM, consiste en un proceso mediante el cual se utiliza una boquilla o extrusor (Figura 47), la misma que se mueve en el plano XY horizontal depositando un hilo de material a 1°C por debajo de su punto de fusión, este hilo se solidifica inmediatamente sobre la capa precedente del mismo material (ProtoRapido, 2016).

Las impresoras 3D que utilizan la tecnología FDM, crean piezas capa por capa de abajo hacia arriba, calentando y extruyendo el filamento termoplástico.

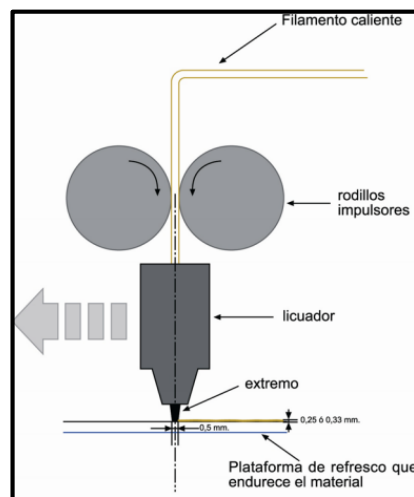


Figura 47. Proceso FDM
Fuente: (ProtoRapido, 2016)

6.2. Ventajas de la tecnología FDM

Según (Stratasys, 2017) en el uso de impresoras 3D para el prototipado mediante tecnología FDM se tienen las siguientes ventajas:

- La tecnología es limpia, fácil de usar y adecuada para las oficinas.
- Los termoplásticos de producción compatibles son estables mecánica y medioambientalmente.
- Las geometrías y las cavidades complejas que podrían ser problemáticas al usar otros sistemas se facilitan gracias a la tecnología FDM.

6.3. Fases de proceso

El proceso utilizado para la impresión se describe a continuación:

- **Procesado previo:** El software de preparación, lamina y coloca un archivo CAD 3D en la bandeja virtual, a continuación calcula la trayectoria para extruir el material termoplástico y cualquier material de soporte necesario.
- **Producción:** La impresora 3D calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas ultra finas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora 3D deposita un material eliminable que hace las veces de soporte para la construcción del mecanismo.
- **Posprocesado:** El usuario retira el material de soporte o lo disuelve en agua y detergente, a continuación la pieza ya se puede utilizar y darle el acabado más conveniente.

6.4. Material para prototipado

La tecnología FDM, utiliza los mismos materiales termoplásticos probados que se pueden encontrar en los procesos de fabricación tradicionales.

Se debe realizar una selección del material para aplicaciones que requieran tolerancias exactas, resistencia, estabilidad medioambiental o propiedades especializadas tales como la disipación electrostática, la traslucidez, la biocompatibilidad, la inflamabilidad, etc. A continuación se describe las características de los materiales comúnmente utilizados en el medio.

6.4.1. *Filamento ABS*

El ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) es uno de los materiales más utilizados en la actualidad para los procesos de impresión 3D, es el más indicado cuando se busca

la fuerza y resistencia térmica en el mecanismo. Está disponible en un rango amplio de colores sobre todo por su buena tolerancia a la pigmentación de sí mismo, aunque su precio es más elevado que el PLA. (Escobar, 2013)

Éste es el material utilizado para la fabricación de piezas lego, carrocerías de los automóviles por su resistencia a impactos, los electrodomésticos y las carcasas de celulares. Pertenecen a la familia de los termoplásticos o plásticos térmicos, pero contienen elastómeros a base de polibutadieno que los hace más flexibles y resistentes a los choques. El ABS se funde entre 200 y 250 °C y puede soportar temperaturas muy bajas (-20 °C) y muy elevadas (80 °C), además de su alta resistencia, este material permite obtener una superficie pulida, es reutilizable y puede ser soldado con procesos químicos, utilizando acetona por ejemplo. (Sanchez, 2015)

6.4.2. *Filamento PLA*

El filamento PLA o ácido poliláctico, es otro material utilizado para procesos de prototipado, está ganando terreno entre los usuarios de la impresión 3D, ya que a diferencia del ABS, el PLA es biodegradable, en EE.UU., normalmente se obtiene de almidón de maíz y en gran parte del resto del mundo se obtiene de la caña de azúcar, al igual que el ABS también viene en varios colores. Este filamento, superficialmente no es tan suave como el ABS, se puede usar para partes planas y las esquinas salen mejor con este material.

La temperatura necesaria para su impresión es de (210 °C), con la cama a unos (60 °C). Su desventaja en comparación con el ABS es su rigidez, esto lo expone mayormente a fracturas.

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN

1. Descripción del proyecto

El presente proyecto tiene como finalidad la implementación de un sistema de control mediante ondas cerebrales para la manipulación de un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica, se puede observar su esquema en la Figura 48.

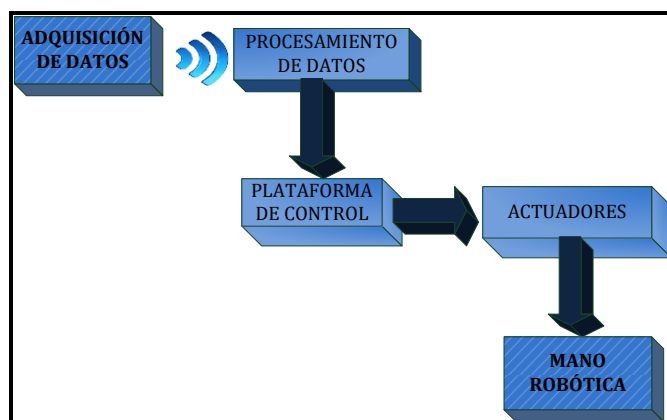


Figura 48. Esquema de componentes del proyecto

1.1. Adquisición de datos

El control se realiza mediante la detección y selección de ondas cerebrales, dichas ondas serán adquiridas por medio de un lector destinado para este fin, éste se encuentra constituido por electrodos colocados en ciertas zonas de la cabeza predefinidas previamente por el fabricante.

1.2. Procesamiento de la Señal

Los datos adquiridos por el lector de ondas cerebrales son enviados al sistema de procesamiento de datos, estos se analizan mediante un paquete computacional que procesa y selecciona las ondas necesarias para el control.

1.3. Plataforma de Control

Luego del procesamiento de las señales, éstas son transmitidas a una plataforma de control externo la cual permite manipular los actuadores necesarios para el control de la mano robótica con arquitectura antropomórfica.

1.4. Actuadores

El número de servomotores y sus características, son seleccionados mediante el análisis realizado durante el diseño y prototipado de las partes que conforman la mano robótica.

1.5. Mano Robótica

La mano robótica al ser un prototipo se diseña tomando en cuenta la arquitectura antropomórfica y posicionamiento de actuadores, lo cual definirá las cualidades motrices que se consideren más convenientes.

2. Diseño de mano robótica con arquitectura antropomórfica

En esta sección, se procede a realizar el diseño de las partes que conforman la mano robótica, tomando en consideración los criterios para el diseño antropomórfico de la mano humana, tales como la referencia para el dimensionamiento de las falanges, grados de libertad en articulaciones, ángulos delimitantes de movimiento, tipos de movimiento y métodos de transmisión. Se descarta el uso de las dimensiones descritas en la Tabla 6 pertenecientes a la norma *DIN 33.402*, mencionadas en la sección 1.1.1 del capítulo 1, debido a que es una limitante al momento de duplicar las dimensiones de una mano real.

2.1. Dimensionamiento en dedos meñique, anular, medio e índice

Para el diseño de la mano robótica con arquitectura antropomórfica se utilizó las características de la mano humana para el dimensionamiento, así como las definiciones correspondientes para el cálculo de las longitudes y los ángulos de movimiento de las articulaciones con sus respectivos grados de libertad.

2.1.1. Cálculo de las longitudes en falanges

Para el dimensionamiento de las falanges y el metacarpo de los dedos meñique, anular, medio e índice, se utiliza las ecuaciones 1 y 2 como se menciona en la sección 1.1.1 del capítulo 1.

Para el cálculo de la dimensión de la falange proximal (f_p) se utiliza la ecuación 1:

$$f_p = f_d + f_m$$

Dónde:

Las longitudes de la falange distal (f_d) y medial (f_m), son obtenidas mediante las mediciones realizadas con un calibrador pie de rey de la mano derecha de uno de los integrantes del proyecto (Figura 49). Las longitudes obtenidas y los cálculos realizados para cada dedo, se muestran en la Tabla 7.



Figura 49. Longitud de referencia (f_m)

Para el cálculo de la dimensión del metacarpo (MTC) se utiliza la ecuación 2:

$$MTC = f_p + f_m$$

Dónde:

La longitud de la falange proximal (fp), se obtiene del cálculo mediante la ecuación 1 y la longitud de la falange medial (fm), se toma de las mediciones de la mano en referencia.

Los resultados de los cálculos obtenidos se muestran en la Tabla 7, en la cual se aprecian las dimensiones de las falanges y el metacarpo de cada dedo obtenido. Cada elemento que forma parte del ser humano cuenta con una simetría, es decir que para una dimensión sea éste largo, ancho o profundidad tiene una medida o punto de referencia en el cual basar sus medidas, dándole proporcionalidad, por lo cual para iniciar los cálculos es necesario contar con los parámetros iniciales de diseño.

Tabla 7.
Longitud de las falanges en dedos

Longitud de falanges				
	Meñique (mm)	Anular (mm)	Medio (mm)	Índice (mm)
Falange distal (fd)	22.1	24.2	24.9	23.2
Falange medial (fm)	23	27.6	29.4	25.5
Falange proximal (fp)	45.1	51.8	54.3	48.7
Metacarpo (MTC)	68.1	79.4	83.7	74.2

2.1.2. Articulaciones

Al observar la mano lateralmente se visualiza una simetría entre la palma de la mano y la yema de los dedos, de tal forma que cuando la mano se abre en su totalidad, la palma y la yema de los dedos se posicionan paralelamente, esta simetría fisiológica en conjunto con los músculos de cada falange, hacen posible que la mano aumente su fuerza de compresión mientras más cerca se encuentre de su cierre palmar; la altura lateral de la punta del dedo y la articulación metacarpofalángica nunca van a tener la misma medida, por lo cual entre la parte posterior y la frontal de la mano se genera un triángulo equilátero, se puede llegar a deducir las medidas mediante el teorema de pitágoras, y determinar el valor del ancho de las articulaciones con solo tener la punta de los dedos y el metacarpo. (Figura 50)

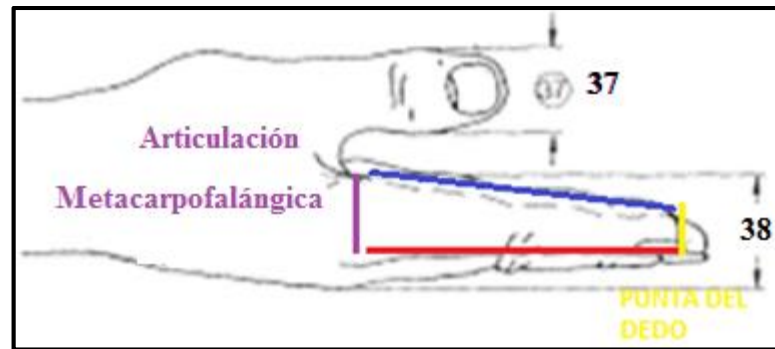


Figura 50. Pendiente generada por simetría de elementos

Para el diseño del resto de articulaciones se tomó en cuenta esta pendiente con el teorema de pitágoras y las longitudes de las falanges (Tabla 8).

Tabla 8.
Cálculo de articulaciones en base a la longitud de falanges

Cálculo de articulaciones en base a la longitud de falanges				
	Meñique (mm)	Anular (mm)	Medio (mm)	Índice (mm)
Pendiente	-0,048	-0,041	-0,039	-0,044
Altura de punta del dedo(APD)	12	12	12	12
Radio de APD	6	6	6	6
Falange distal (FD)	22.1	24.2	24.9	23.2
Articulación Inter falángica distal (IFD)	13,530	13,492	13,474	13,505
Radio de IFD	6.765	6,746	6,737	6,753
Falange medial (FM)	23	27.6	29.4	25.5
Articulación Inter falángica proximal(IFP)	15,715	15,754	15,766	15,737
Radio de IFP	7,857	7,877	7,833	7,869
Falange proximal (FP)	45,1	51,8	54,3	48,7
Articulación metacarpofalángica (MCF)	20	20	20	20
Radio de MCF	10	10	10	10
Longitud total	90,2	103,6	108,6	97,4
Metacarpo	68,1	79,4	83,7	74,2

2.1.3. Grados de libertad y ángulos de movimiento

La mano, cuenta con ángulos de movimientos descritos en la sección 1.2.3 del capítulo 1 en los cuales existen 3 articulaciones: 2 con 1 grado de libertad y el tercero con 2. Para la articulación interfalángica proximal y distal, se dispone de 1 GDL (Grado de libertad), para realizar la flexión y extensión de los dedos, ambos en dirección a la palma de la mano. La articulación metacarpofalángica posee 2 GDL para realizar la abducción y la aducción como se puede observar en la Tabla 9.

Para establecer los ángulos de flexión y extensión, se utilizó los datos del texto como indica (Banduc, 2012), estos ángulos de los dedos meñique, anular y medio, se establecen posteriormente como límites de movimiento (Tabla 9).

Tabla 9.
Flexión y extensión de articulaciones

Articulaciones	Grados de libertad (GDL)	Movimiento de articulación	
		Flexión	Extensión
Articulación interfalángica distal	1 GDL	90 °	0 °
Articulación interfalángica proximal	1 GDL	100 °	0 °
Articulación metacarpofalángica	2 GDL	90 °	0 °

Al momento de realizar un agarre puntual, es necesario brindarle al dedo índice la capacidad de flexionarse, para que de esta manera la yema del dedo pulgar e índice tenga una mayor superficie de agarre (Ver Figura 11), sus valores de referencia se pueden visualizar en la Tabla 10.

Tabla 10.
Ángulos y grados de libertad de articulaciones

Articulaciones	Grados de libertad (GDL)	Movimiento de articulación	
		Flexión	Extensión
Articulación interfalángica distal	1 GDL	90 °	10 °
Articulación interfalángica proximal	1 GDL	100 °	0 °
Articulación metacarpofalángica	2 GDL	90 °	0.1°

2.2. Dimensionamiento del dedo pulgar

Al momento de definir las dimensiones del dedo pulgar es indispensable tomar un criterio diferente, en el diseño de los dedos meñique, anular, medio e índice, las magnitudes entre ellas se basan en cálculos similares, pero en el dedo pulgar, sus falanges son calculadas de manera diferente y algunas medidas requerirán utilizar la referencia de la mano modelo real.

2.2.1. Cálculo de las falanges, metacarpo y articulaciones

El dedo pulgar no cuenta con una falange medial, dispone de falange distal y proximal con dimensiones que se pueden observar en la Tabla 11. Los grados de libertad de cada falange del pulgar, depende de sus articulaciones, teniendo la trapezometacarpiana, metacarpofalángica e interfalángica, cada una con 1 o más grados de movilidad.

Tabla 11.
Dimensiones del dedo pulgar

Longitud de falanges y articulaciones del pulgar	
	Pulgar (mm)
Pendiente	-0,113
Punta del pulgar (PP)	12

CONTINÚA 

Radio (PP)	6
Falange distal (FD)	29,7
Articulación interfalángica (IF)	15,369
Radio (IF)	7,684
Articulación metacarpofalángica (MCF)	19,406
Radio (MCF)	9,703
Falange proximal (FP)	40,5
Articulación trapezometacarpiana (TMC)	24
Radio (CMC)	12
Metacarpo	105,8
Longitud total	124

2.2.2. Grados de libertad y ángulos de movimiento

Los grados de libertad de cada articulación se describió con anterioridad (Ver Figura 7), éstos ayudan a realizar movimientos específicos, teniendo en total 5 GDL, que le dan al pulgar una gran sujeción y capacidad de agarre. Por cuestiones de diseño, se ha decidido conservar los especificados en la Tabla 12, realizando el diseño de tal manera que el pulgar disponga de 4 grados de libertad, los cuales son suficientes para satisfacer los tipos de agarre requeridos.

Tabla 12.
Grados de libertad del pulgar

Articulación	Grados de libertad
Trapezometacarpiana (TMC)	2
2 Interfalángicas (IF)	1

En el caso de los ángulos de flexión e hiperextensión en las articulaciones (IF-MCF), que se describen en la Tabla 13, son utilizados como referencia para la restricción mecánica de movimientos, es decir que poseen topes físicos que impiden sobrepasar los ángulos especificados.

Tabla 13.
Ángulos del pulgar hiperextensión y flexión

Ángulos del pulgar		
Articulación	Hiperextensión	Flexión
Interfalángica (IF)	0/20	0/90
Metacarpofalángica (MCF)	0/10	0/50

El diseño cuenta con 2 GDL, debido a la combinación de movimientos entre la articulación interfalángica y la trapezometacarpiana, la cual posee los ángulos de restricción de movimiento que se observan en la Tabla 14.

Los movimientos palmar y radial, disponen de ángulos que serán utilizados en el diseño, con la finalidad de poder restringir el movimiento mecánicamente; se recuerda que para lograr los diferentes movimientos seleccionados en este proyecto, es necesario contar con un mínimo de 2 grados de libertad en dicha articulación.

Tabla 14.
Abducción, aducción palmar y radial

Trapezometacarpiana (TMC)		
Movimiento	Abducción	Aducción
Palmar	0/45	0
Radial	0/60	0

2.3. Método de transmisión de movimiento

Tomando en consideración lo mencionado en la sección 1.2.5 del capítulo 1, se decide utilizar el método de transmisión de movimiento por poleas, debido a que ésta presenta menos limitantes al momento del diseño. En la Figura 51, se puede observar el croquis con las dimensiones respectivas para el diseño del dedo meñique las cuales de tomaron de la Tabla 7 y 8. En la primera circunferencia en el lado izquierdo de la

Figura 51, se muestra la polea utilizada como método de transmisión de movimiento, que parte desde el servomotor, se desplaza por las pistas de cada falange y reposa en la articulación interfalángica distal. El movimiento del servomotor, será transmitido mediante cables con resistencia proporcional a la fuerza aplicada para evitar su alargamiento o rotura.

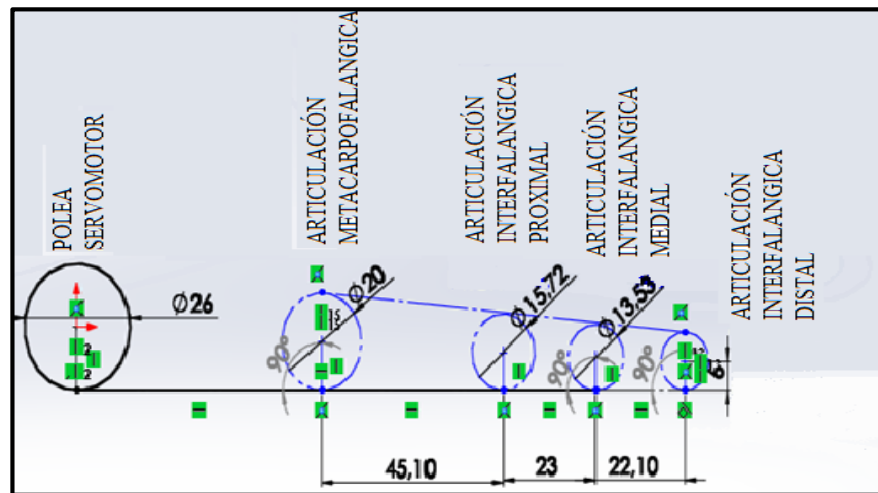


Figura 51. Método de transmisión de movimiento

Este método, permite la flexión de los dedos mediante la tracción del cable que se encuentra conectado al servomotor; el retorno a su posición inicial o de extensión, no se logra de igual manera, debido a que los cables al desplazarse por la misma polea producen demasiada fricción entre ellos, esto aumenta el torque requerido para el servomotor. Por este motivo se toma la decisión de utilizar los cables solamente para realizar la flexión de los dedos; la extensión del dedo se logra mediante bandas elásticas ubicadas en la parte dorsal de las articulaciones, lo que permite que las falanges lleguen a alinearse o extenderse.

Definidas las dimensiones de las partes que conformaran la mano robótica, se procede al modelado de las piezas, para lo cual es necesario utilizar sistemas computarizados de diseño, que cuenten con CAD (Diseño asistido por computadora) y CAE (Ingeniería asistida por computadora). El software de mayor desempeño y amigable con el usuario es SolidWorks, el cual facilitará el diseño, ensamblaje virtual y análisis de piezas.

2.3.1. Modelado del dedo meñique, anular, medio e índice

a) *Falange distal*

Seleccionado el sistema de transmisión, se procede al modelado de cada falange; debido al uso de hilo nylon para el movimiento, se consideró que la falange distal debe disponer de dos partes solidas separadas, la falange dorsal (Figura 52) y la palmar (Figura 53), esto facilita la colocación y anclaje del hilo, éste se traslada libremente por la pista central entre falanges hasta llegar al actuador. El enlace con la falange medial se realizará mediante un eje ubicado en el centro de la polea, el cual permite el acople, movimiento y alineación de falanges. La parte dorsal y palmar dispone de orificios para la colocación de tornillos milimétricos, que permiten el anclaje del hilo y la unión segura de estas partes en el ensamblaje.

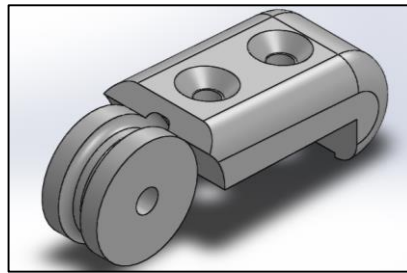


Figura 52. Falange dorsal índice

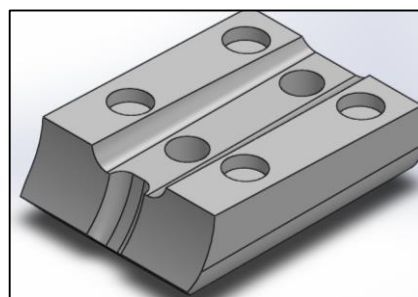


Figura 53. Falange palmar índice

La falange distal, está diseñada con las dimensiones especificadas en la Tabla 7 y Tabla 8; para la restricción del movimiento, cuenta con un tope mecánico, correspondiente a los ángulos designados para cada articulación, en el caso del meñique, anular, medio e índice se utilizan los mismos ángulos de tope. La falange

distal del dedo índice, cuenta con el ángulo de hiperextensión, que lo coloca 10 grados atrás de la posición normal del restos de dedos, de esta manera puede realizar el agarre tipo punta; los ángulos utilizados se pueden observar en la Tabla 13.

b) ***Falange medial***

El diseño de la falange medial se muestra en la Figura 54, consta de un solo elemento con poleas y longitudes dimensionadas en la Tabla 8; cada dedo cuenta con un canal que atraviesa el centro de la pieza, encargado de direccionar el hilo sobre la trayectoria hacia polea, dirigiéndolo y facilitando el desplazamiento del mismo.

La falange cuenta con topes mecánicos para evitar sobrepasar los ángulos correspondientes a cada articulación, con los ángulos de movimiento establecidos en la Tabla 9.

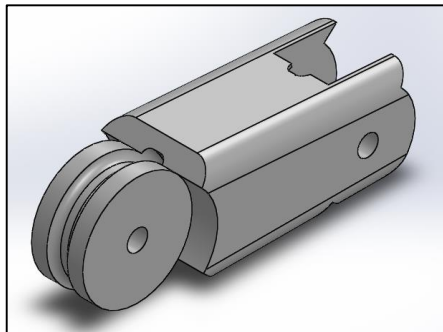


Figura 54. Falange Medial

c) ***Falange proximal***

El diseño de la falange proximal se puede observar en la Figura 55 que se encuentra dimensionada con las magnitudes descritas para cada dedo en la Tabla 7 y Tabla 8. Dispone de una polea que permite transmitir el movimiento y un canal central que logra encaminar los hilos hacia la base de la mano y posteriormente al servomotor; cuenta con topes mecánicos, los cuales limitan el movimiento a los ángulos establecidos.

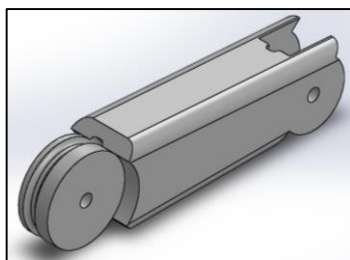


Figura 55. Falange proximal

d) *Metacarpo y carpo*

El metacarpo y carpo se fusionan en un solo elemento que corresponde a la palma de la mano, esto crea una base para el anclaje del meñique, anular, medio, índice y pulgar, también servirá como un sistema de referencia. Utilizando las longitudes y ángulos del metacarpo, se moldea la palma de la mano, considerando el punto de referencia desde el cual se direccionan los ángulos de separación entre los dedos, en el caso de contar con movimientos como abducción (apertura de dedos) y aducción (cierre de dedos) estos ángulos varían, pero en este diseño no cuenta con esa característica, por tal motivo se decidió posicionar los dedos en los ángulos de abducción tomando como referencia el dedo medio, teniendo de esta manera: medio-índice y medio-anular con 20° , medio-meñique con 40° y el pulgar paralelo al punto de referencia, lo último orientado a movimientos con mayor precisión, utilizando coordenadas de desplazamiento e incluso cinemática inversa para el análisis de su trayectoria (Figura 56).

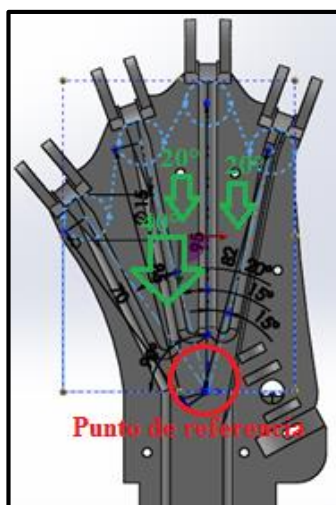


Figura 56. Punto de referencia del diseño

2.3.2. Modelado del dedo pulgar

En el diseño del dedo pulgar se debe considerar sus 4 GDL (Grados de libertad, con una articulación conductora y el resto conducidas), esto permite complementar los tipos de agarres establecidos, cada GDL corresponde a una articulación o polea, la misma que es utilizada para la unión de las falanges. Se inicia con el modelado de la falange distal, posteriormente se continúa con la proximal y sus articulaciones.

a) *Falange distal*

En la construcción de la falange distal se consideró las dimensiones establecidas en la Tabla 11, la cual contiene ecuaciones internas para el cálculo de longitudes, tomando en consideración que en el pulgar no existe la falange medial. La falange distal se compone de dos partes sólidas, en la Figura 57 se puede observar la falange palmar y la dorsal se visualiza en la Figura 58.

La falange dorsal consta de topes mecánicos los cuales evitan que el mecanismo supere los límites establecidos, se muestra también los agujeros que permitirán que los tornillos milimétricos puedan sujetar el hilo nylon y unir las falanges en el ensamble (Figura 57). Cuenta con una polea que será utilizada como guía para la transmisión del movimiento y un canal central que permite el traslado del hilo nylon (Figura 58).

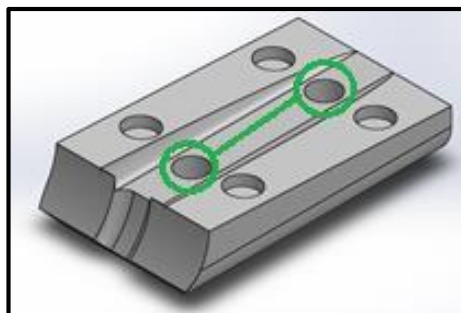


Figura 57. Falange palmar pulgar, agujeros para tornillos

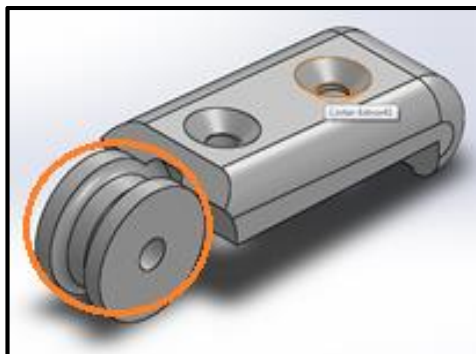


Figura 58. Falange dorsal pulgar, polea y pista

b) *Falange proximal*

La falange proximal del dedo pulgar se observa en la Figura 59, ésta consta de topes laterales (señalizado verde), para evitar que los movimientos sobrepasen los ángulos respectivos de cada falange, también cuenta con ejes para su acople con el resto de eslabones (señalizado amarillo) y canales centrales para lograr transportar los hilos sin problemas debido a que son el sistema de transmisión de los dedos (señalizado rojo).

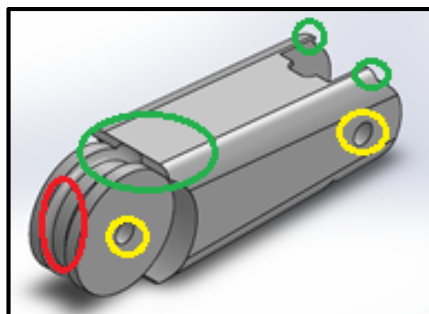


Figura 59. Falange proximal pulgar

c) *Metacarpo*

El metacarpo del dedo pulgar en la mano humana, se encuentra formando parte de la palma, pero al requerir de una libre movilidad, se consideró hacerlo visible para un mejor agarre; sus dimensiones se basan en formulas establecidas y con límites en la movilidad para evitar los daños en el mecanismo (Figura 60).

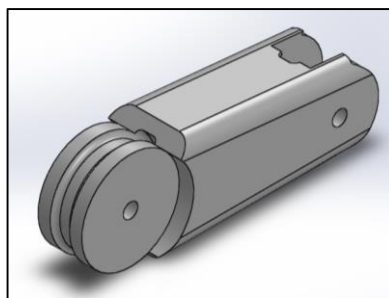


Figura 60. Metacarpo pulgar

d) *Articulación para transmisión de movimiento*

El metacarpo dispone de 2 GDL, se utiliza un servomotor por cada uno de ellos y su sistema de transmisión por cables usado para la flexión del dedo. Se optó por esta cantidad de GDL debido a que eran suficientes para realizar varios movimientos entre ellos los seleccionados. Los ejes correspondientes a cada GDL se encuentran señalizados en la Figura 61, este mecanismo descansa sobre la palma diseñada anteriormente (Ver Figura 56), para de esta manera apoyar el dedo pulgar y así evitar oscilaciones.

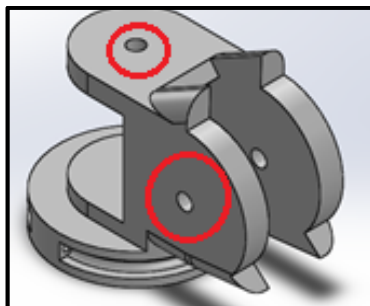


Figura 61. Articulación carpometacarpiana

2.3.3. Ensamblaje virtual de mano robótica con arquitectura antropomórfica

a) *Acoplamiento del metacarpo*

El metacarpo palmar se encuentra diseñado con sus respectivas pistas, las cuales guiaran el hilo hacia la base, de igual manera incluye la base de giro para el pulgar

como se muestra en la Figura 62, El metacarpo se dividió en 3 partes para facilitar su impresión 3d como se muestra en la Figura 62 y Figura 63, en estas se observa la fusión de las articulaciones de cada dedo a la parte 1 del metacarpo palmar, debido a que la aducción y abducción no se realizará por dificultad en la impresión 3D.

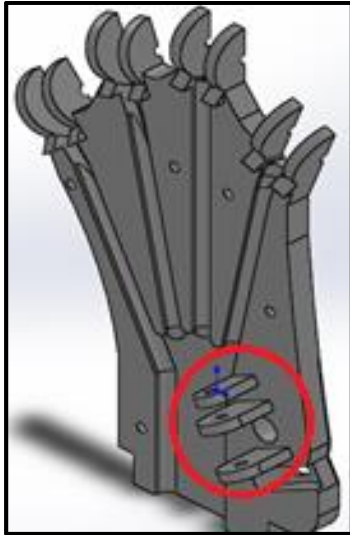


Figura 62. Parte 1 metacarpo palmar

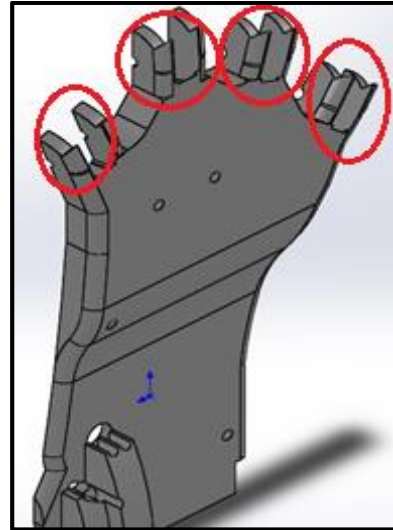


Figura 63. Parte 2 metacarpo dorsal

Se diseñó una cubierta (Figura 64), para la parte palmar de la base del metacarpo, ésta permite cubrir las pistas y evitar el cruce entre hilos, cuenta con orificios que ayudan a sujetar los tres elementos. En la Figura 71 se puede observar el metacarpo totalmente ensamblado, con las pistas y espacios necesarios para la movilidad de los dedos.

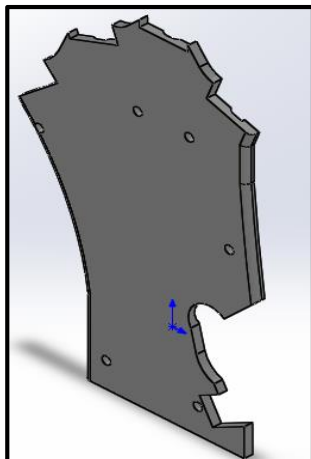


Figura 64. Cubierta base metacarpo

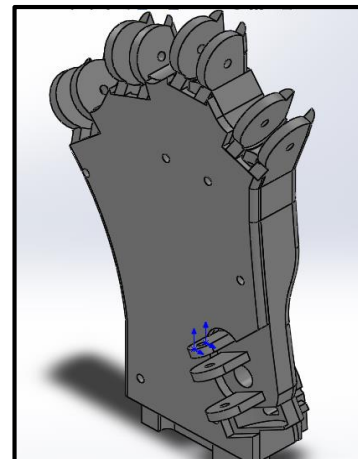


Figura 65. Metacarpo ensamblado

b) *Acoplamiento del dedo meñique*

El ensamble virtual corresponde a la prueba de acoplamiento entre los diferentes eslabones con la base principal que es el metacarpo. Inicia con el ensamblaje de la falange proximal del dedo meñique como se observa en la Figura 66.

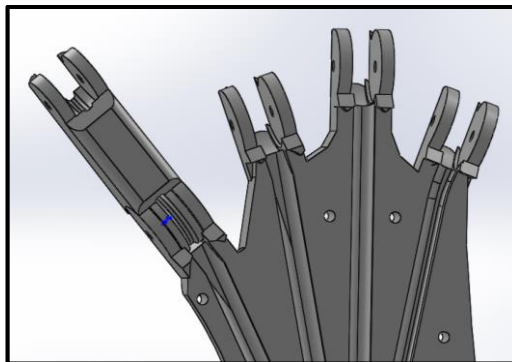


Figura 66. Ensamblaje arduino falange proximal con metacarpo

A continuación la falange medial se acopla a la falange proximal como se indica en la Figura 67.

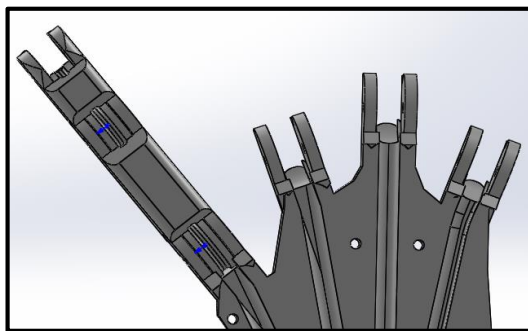


Figura 67. Ensamblaje arduino falange medial

Finalmente se ensambla la falange distal (Figura 68), como ésta se compone de dos partes, la dorsal sirve como anclaje para el hilo de transmisión y la palmar como sujeción mediante presión del mismo (Figura 69), en la Figura 70 se puede observar el anclaje del meñique al metacarpo.

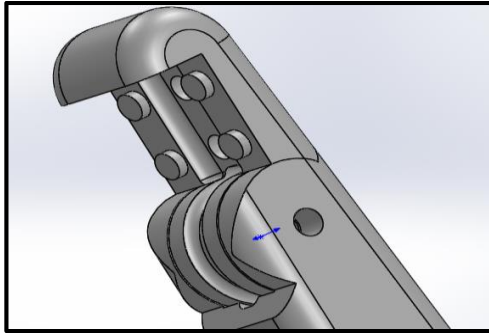


Figura 68. Ensamblaje meñique falange distal dorsal

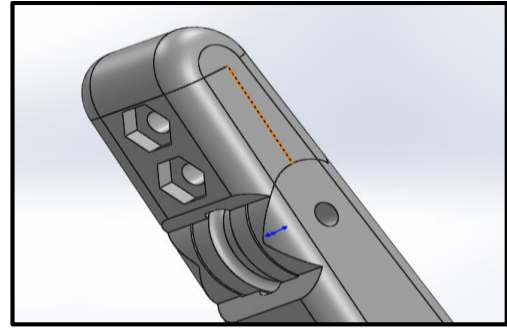


Figura 69. Ensamblaje meñique falange distal palmar

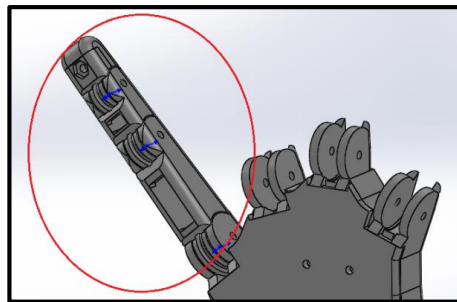


Figura 70. Ensamblaje meñique al metacarpo

c) *Acoplamiento del dedo anular*

El dedo anular cuya diferencia con los otros dedos radica únicamente en sus dimensiones, se ensambla de igual manera que el meñique como se indica en la Figura 71, al igual que el acoplamiento al metacarpo y la sujeción del hilo de transmisión (Figura 72).

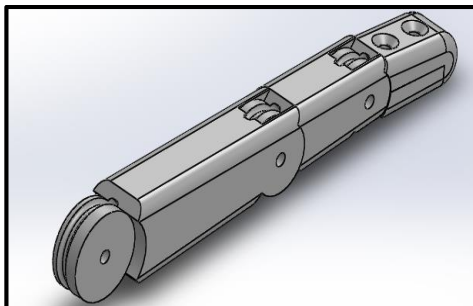


Figura 71. Ensamblaje dedo anular

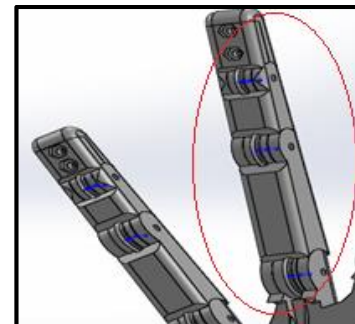


Figura 72. Ensamble falange anular con metacarpo

d) *Acoplamiento del dedo medio*

En la Figura 73 se observa el dedo medio ensamblado con sus topes mecánicos, tanto frontales como traseros para restringir la flexión y extensión, también se diseñó un paralelismo entre las falanges (Ver Figura 50), mediante el cual forman una recta como se visualiza en la Figura 74; para el acoplamiento con el metacarpo se realiza el mismo patrón de ensamblaje que en los otros dedos.

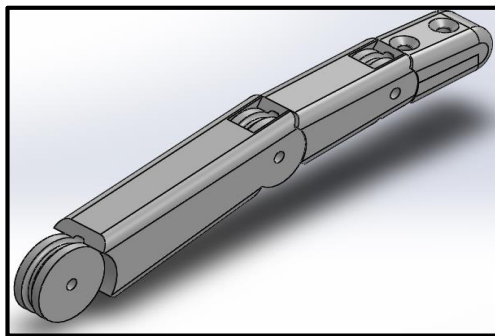


Figura 73. Ensamblaje dedo medio

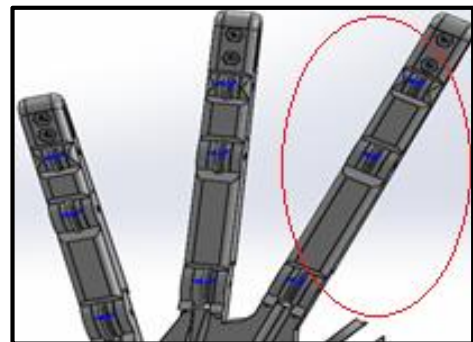


Figura 74. Ensamblaje falanges medial con metacarpo

e) *Acoplamiento del dedo índice*

En la Figura 75 se observa el ensamblaje del dedo índice, la unión de la parte palmar y dorsal de la falange distal se realiza para la sujeción del hilo el cual permite la transmisión del movimiento; se incluye los topes correspondientes a los ángulos limitantes de movimiento incluido la hiperextensión de 10 grados (Ver Figura 11), esto brinda una mejor sujeción debido a su interacción con el dedo pulgar, finalmente este conjunto de elementos se ensambla con el metacarpo (Figura 76).

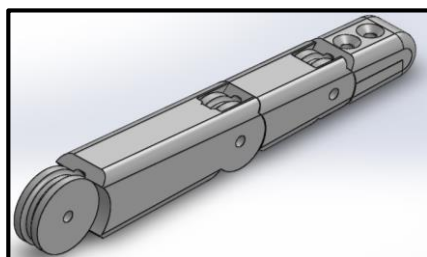


Figura 75. Ensamblaje de dedo índice

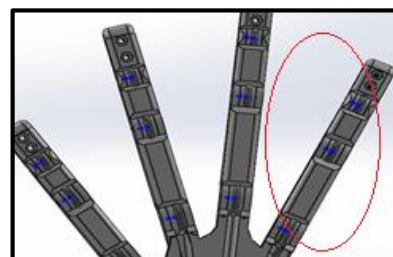


Figura 76. Ensamblaje falanges índice con metacarpo

f) *Acoplamiento del dedo pulgar*

El dedo pulgar sigue el mismo régimen de ensamblaje que el resto de dedos (Figura 77), al unir este conjunto con la articulación metacarpofalángica que se muestra en la Figura 78, permite que el mecanismo cuente con 2 GDL, se incluye los topes mecánicos para restringir el movimiento con sus ángulos respectivos de flexión, hiperextensión, aducción y abducción, en la Figura 79 se puede observar el pulgar y metacarpo ensamblados.

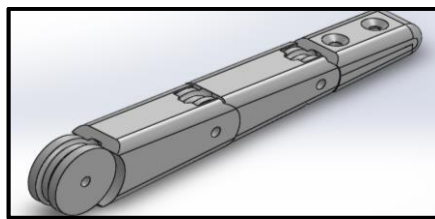


Figura 77. Ensamblaje dedo pulgar

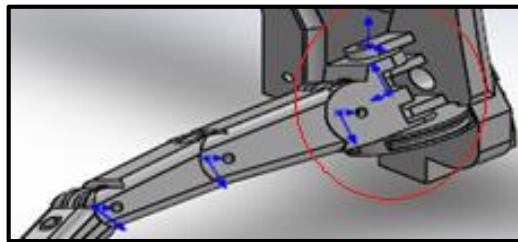


Figura 78. Ensamblaje falanges pulgar con metacarpo

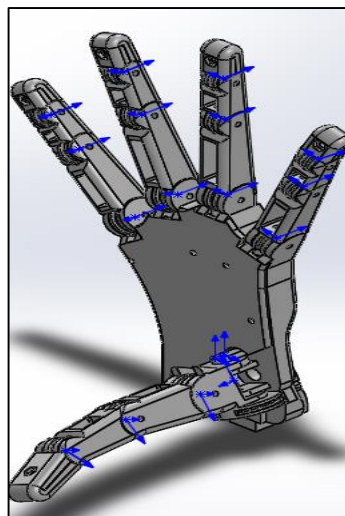


Figura 79. Ensamblaje cubierta frontal

2.3.4. Análisis en zonas vulnerables

En el diseño de la mano se debe considerar las fuerzas resultantes debido al movimiento de las falanges, éstas producen puntos vulnerables en el diseño debido a las dimensiones sobre las cuales se aplican; para este análisis se toma como referencia el dedo meñique debido a que éste es uno de los dedos con zonas de mayor vulnerabilidad, de esta manera se determinan los esfuerzos cortantes y flexionantes que afectan al diseño gravemente.

a) *Parte dorsal de la falange distal del dedo meñique*

Es necesario notar que las áreas señaladas en la Figura 80 comparten la fuerza que será generada por el servomotor al llegar a la posición home del diseño, en el caso más crítico una sola asumirá esta carga por lo cual se debe calcular el factor de seguridad para proteger estas áreas.

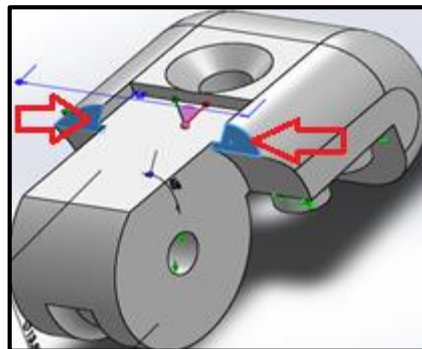


Figura 80. Selección de área meñique distal

Se utiliza el área señalada en la Figura 81, la cual pertenece a un solo tope, se define el factor de seguridad para este mecanismo, éste se encarga de proteger al diseño de esfuerzos generados por los servomotores y posteriormente poder seleccionar el más adecuado.

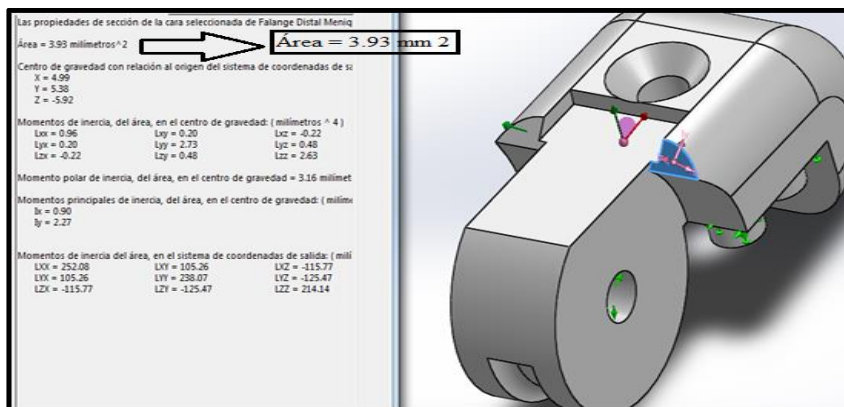


Figura 81. Propiedades físicas del elemento del dedo meñique

El área obtenida mediante el análisis de fuerzas en SolidWorks, como se indicada en la Figura 81 es la siguiente:

$$\text{Área} = 3,93 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área} = 3,93 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Según (Mott, 2009), por motivos de fabricación en el caso de que presenten golpes repentinos en las zonas vulnerables, el factor de seguridad (FDS) sugerido es 12, esto en conjunto con el esfuerzo máximo del material, permite calcular el esfuerzo de trabajo mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_T = \frac{Su}{FDS} \quad \text{Ec. 3}$$

Para el ABS, el esfuerzo máximo del material $Su = 30 \text{ MPa}$, reemplazando en la ecuación 3 se tiene:

$$\sigma_T = \frac{30 \text{ MPa}}{12}$$

$$\sigma_T = 2,5 \text{ MPa}$$

El resultado obtenido mediante la ecuación 3, corresponde al esfuerzo de trabajo al que se encuentra sometida esta área continuamente, dividido para el factor de seguridad, éste reduce la carga para proteger al mecanismo de ser sometido al esfuerzo

máximo que soporta su material de construcción. Se procede a calcular la fuerza necesaria para producir el esfuerzo del trabajo calculado.

$$F = \sigma T * A \quad \text{Ec. 4}$$

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente, se tiene:

$$F = \sigma T * A$$

$$F = 2,5\text{MPa} * 3,93 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$F = 9,825 \text{ N}$$

El valor obtenido mediante la ecuación 4 es la fuerza a la cual el mecanismo debe trabajar, tomando en cuenta el área de contacto, la cual es una de las más vulnerables del diseño por sus dimensiones. Estas fuerzas calculadas se verifican mediante el software de simulación de elementos finitos en SolidWorks, se ingresa las características mecánicas del material utilizado en este caso el ABS, luego se selecciona sujeciones y fuerzas para obtener una simulación con resultados lo más cercanos posibles a la realidad.

Resultados Obtenidos:

- **Esfuerzo de Von Mises**

Como se aprecia en la Figura 82 el esfuerzo máximo generado en este análisis es de 2.7 MPa, este valor supera en 0.2 MPa al calculado, pero muy lejano al valor de esfuerzo máximo, por lo tanto es admisible como el esfuerzo de trabajo, con lo cual el diseño no resultará afectado pero generará un nuevo factor de seguridad que se describe a continuación.

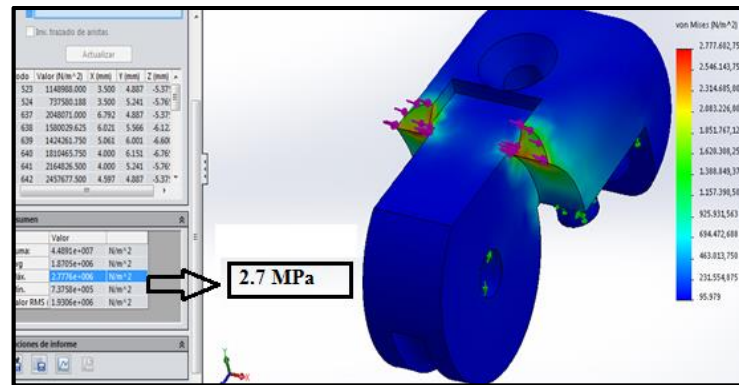


Figura 82. Análisis de esfuerzo de Von Mises del dedo meñique

- **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad mínimo del diseño presentado por SolidWorks es 13, como se puede observar en la Figura 83; indica que es necesario una fuerza 13 veces mayor de la aplicada para afectar al mecanismo, este valor es muy cercano al calculado manualmente e incluso ofrece una mayor seguridad operacional.

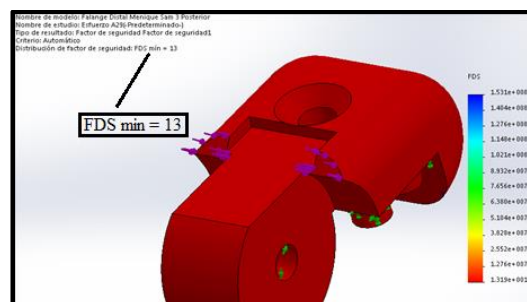


Figura 83. Análisis del factor de seguridad del dedo meñique

- **Deformaciones Unitarias**

Las deformaciones unitarias de mayor magnitud son de $1,25 \times 10^{-3}$ mm asumiendo que la fuerza se encuentra en contacto constante con el elemento; como se puede observar en la Figura 84, considerando el tamaño total del mecanismo es una deformación aceptable, aun cuando no se aplicará la fuerza del servomotor constantemente sobre esta área.

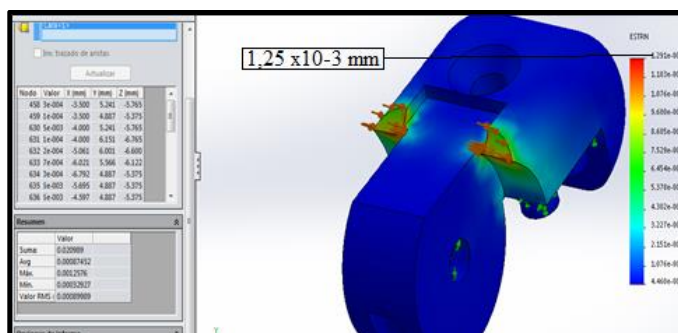


Figura 84. Análisis de deformaciones unitarias del dedo meñique

b) *Articulación carpometacarpiana meñique*

Se realiza el análisis de este segmento del mecanismo, al igual que la anterior es considerada como una área vulnerable, esto se debe a que en esta zona se apoya el dedo armado completamente, se realiza el análisis de estos elementos solamente debido a que son los de menor área y por lo tanto son los que van a recibir una fuerza mayor, teniendo así riesgo de esfuerzo mecánico (Figura 85).

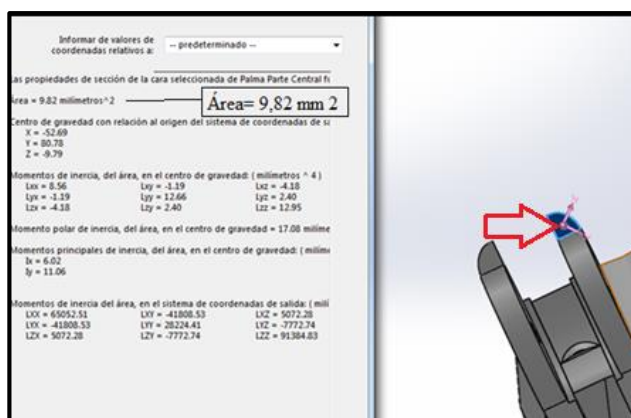


Figura 85. Área que soporte el meñique en la base de articulación

El área obtenida mediante el software como se indicada en la Figura 85 es la siguiente:

$$\text{Área} = 9,82 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área} = 9,82 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Se utilizará el factor de seguridad, que al igual que en el ejemplo anterior para ABS es igual a 12, con este valor definido se calcula el esfuerzo de trabajo, tomando en cuenta la resistencia máxima a la tracción del material y sus características mecánicas.

Se utiliza la ecuación 3 de esfuerzo de trabajo

$$\sigma_T = \frac{Su}{FDS}$$

Reemplazando los valores conocidos se obtiene:

$$\sigma_T = \frac{30 \text{ MPa}}{12}$$

$$\sigma_T = 2,5 \text{ MPa}$$

Este resultado corresponde al esfuerzo de trabajo, al cual puede estar sometido el mecanismo sin sufrir ningún daño, aun cuando se lo someta a una fuerza constantemente. Teniendo claro lo anterior, se calcula la fuerza necesaria para producir el esfuerzo anteriormente calculado utilizando el área mínima de la zona más vulnerable de la articulación.

Se utiliza la ecuación 4 de fuerzas de trabajo.

$$F = \sigma_T * A$$

Reemplazando los valores se obtiene:

$$F = 2,5 \text{ MPa} * 9,82 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$F = 24,55 \text{ N}$$

$$F = 24,55 \text{ N}$$

Esta sería la fuerza a la cual debe trabajar el mecanismo sin sufrir fracturas, tomando en cuenta el área de trabajo; como se nota, este valor en comparación con el resultado anterior presenta una mayor fuerza que podría ser aplicada en el mecanismo,

aun así se tomará en cuenta las zonas más débiles, es decir en las cuales la fuerza de trabajo resultante sea menor para la selección del servomotor.

Resultados obtenidos mediante la simulación:

- **Esfuerzo de Von Mises**

Como se observa en la Figura 86, el esfuerzo máximo es 3,4 MPa, esto significa que el diseño sufriría un esfuerzo 0,9 MPa sobre el esfuerzo de trabajo seleccionado, con el factor de seguridad de FDS=12, esto implica que el diseño resistirá pero el factor de seguridad disminuirá debido a que el diseño se somete a un esfuerzo mayor a lo calculado manualmente.

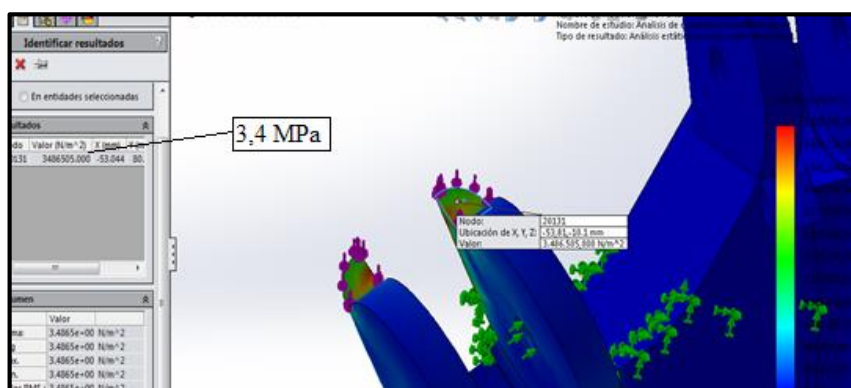


Figura 86. Análisis de Von Mises en soporte del meñique

- **Factor de seguridad**

El factor de seguridad calculado por el programa es 4,9, como se puede observar en la Figura 87, en el cálculo anterior se evidencia que el diseño va a sufrir un esfuerzo superior al calculado anteriormente pero no lo va a afectar, debido a que se encuentra muy por debajo del esfuerzo máximo como indica el factor de seguridad y mientras éste sea mayor o incluso igual a 1 el diseño soportará el esfuerzo planteado.

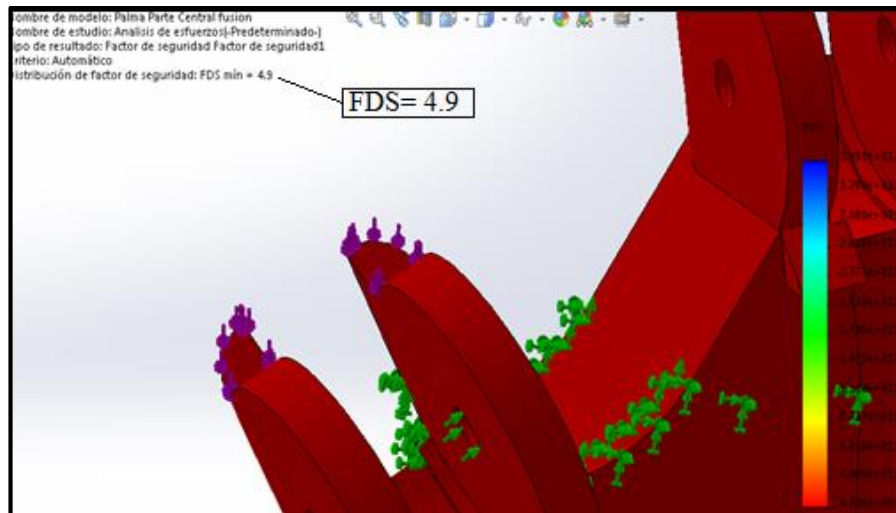


Figura 87. Análisis de factor de seguridad del soporte del meñique

- **Deformaciones unitarias**

Para el esfuerzo mencionado se presenta una deformación máxima de 1.14×10^{-3} mm suponiendo que el diseño sea sometido a esta fuerza constante, como se observa en la Figura 88, esta deformación es prácticamente imperceptible y no llegará a producirse en su totalidad, debido a que la fuerza solo se presentará mientras la mano esté en funcionamiento.

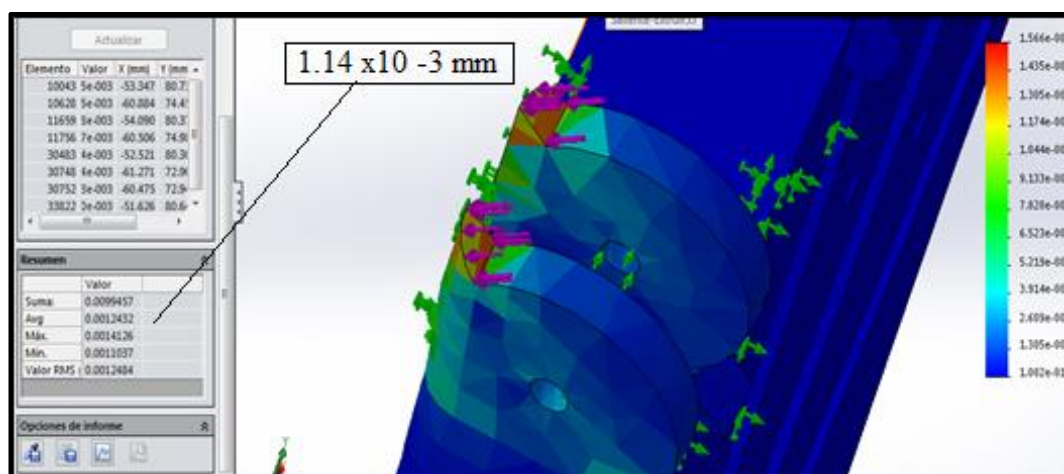


Figura 88. Análisis deformaciones unitarias del soporte del meñique

3. Análisis y selección de ondas cerebrales

Mediante las definiciones de los diferentes tipos de ondas cerebrales indicadas en la sección 2 del capítulo 1, al igual que los fundamentos relacionados con la generación y estimulación de ondas, se determinó los siguientes criterios:

Las ondas accesibles, son aquellas que los lectores cerebrales tradicionales pueden analizar, estas son alfa, beta, theta, delta y gamma. Las únicas ondas con las cuales se puede interactuar en un estado consciente son alfa y beta.

Las ondas alfa, son producidas en momentos de meditación, es decir cuando la mente se encuentra relajada, en un estado de calma consciente, sin distracciones que perturben este estado mental. Por consiguiente, se relacionan las ondas alfa directamente con la meditación; por lo cual, se la menciona en adelante como la “*onda de meditación*”.

Las ondas beta, son producidas cuando la mente se encuentra activa, concentrada en una idea o proceso. Por lo tanto, se relacionan las ondas beta directamente con la atención; por lo cual, se la menciona en adelante como la “*onda de atención*”.

Luego del análisis realizado, se concluye que las señales a utilizar en este proyecto son las ondas de meditación y atención, por ser las de más fácil acceso y control.

4. Selección de equipos y materiales

A continuación se procede a la selección de los equipos y materiales necesarios para la fabricación e implementación del proyecto.

4.1. Selección de dispositivo para la adquisición de ondas cerebrales

Considerando lo descrito en la sección 2.3 del capítulo 1, se define la Tabla 15 que compara las características entre dispositivos *MindWave* de *NeuroSky* y el *Epoc+* de *EMOTIV*.

Tabla 15.
Comparativa de lectores de ondas cerebrales

Equipos de lectura	Capacidad para adquisición de ondas alfa, beta, theta, delta	Compatibilidad con LabView + toolkit	Adquisición	Precio \$
MindWave	SI	SI	Bajo pedido en el país	218,26
Epoc+	SI	SI	Compra en el exterior	799,00

En las características de los equipos de lectura se visualizan varias similitudes que son necesarias para su uso en el proyecto, como es la adquisición de ondas alfa y beta, al igual que la compatibilidad con LabView, lo que permite el uso de cualquiera de los dos dispositivos. Epoc+ cuenta con mayor cantidad de funciones, pero inservibles para este caso, su costo es el triple en comparación con el dispositivo MindWave, por lo cual no justifica su adquisición. Luego del análisis realizado, se considera utilizar el lector de ondas cerebrales MindWave el cual abastece los requerimientos necesarios.

4.2. Selección de plataforma para el control de servomotores

Tomando en consideración lo mencionado en la sección 3 del capítulo 1, en donde se describe las plataformas de control para servomotores, se genera la Tabla 16 en la cual se puede observar que arduino cuenta con entradas y salidas que proporcionan mayor capacidad a la plataforma y en si al proyecto; dispone de la herramienta de vinculación “*LabView-toolkit*”, su fácil adquisición de compra y precio lo convierten en la mejor opción al ser una plataforma multiusos, descartando al SSC-32 por centrar más su estructura al control de servomotores.

Debido a que la mano robótica diseñada dispone de 16 grados de libertad con 6 articulaciones conductoras, es necesario utilizar un servomotor por cada una de ellas, lo que requiere una plataforma de control con un mínimo de 6 salidas específicas para este uso; lo cual no es una limitante para ninguno de los 2 dispositivos. Por estos motivos se decide utilizar arduino mega 2560 como la plataforma de control para los servomotores, ya que esta satisface los requerimientos del proyecto.

Tabla 16.
Comparativa de plataformas de control

Plataformas de control	Control de servomotores	Compatibilidad con LabView-toolkit	Adquisición en el país	Entradas y salidas adicionales	Precio \$
SSC-32	SI (Específico para el uso de 32 servomotores)	NO	NO	NO	184,44
Arduino Mega 2560	SI (Multiusos, 15 salida PWM)	SI	SI	SI	45,00

4.3. Selección del material de impresión 3D

Conforme a lo descrito en la sección 6.4 del capítulo 1, en el cual se indica que el PLA forma una superficie rígida que lo expone a fracturas en las piezas, siendo ésta una desventaja frente al material ABS que presenta las siguientes características:

- Aporta fuerza y resistencia térmica al mecanismo.
- Flexibilidad y resistencia a choques.
- Permite obtener una superficie pulida.

Debido a que se trata de un mecanismo móvil expuesto a choques en sus topes, se considera el uso del material ABS para la realización del prototipado, pues éste proporciona flexibilidad, resistencia y un mejor acabado que el PLA.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

1. Construcción de la mano robótica con arquitectura antropomórfica

Al no presentar ninguna anomalía en el modelado, ensamble virtual y análisis de fuerzas; se procede con el prototipado de las piezas que forman parte de la mano robótica utilizando una impresión 3D y posteriormente el armado de las mismas.

1.1. Prototipado de piezas

Para la impresión de las piezas modeladas en SolidWorks, se utiliza una prototipadora FDM, marca Solidoodle, como se describe a continuación:

1.1.1. Conversión de archivos

Cada archivo que forma parte del diseño (Figura 89) debe convertirse de formato .SLDPRT a .STL siglas provenientes del inglés "*STereo Lithography*", este tipo de archivo define la geometría de los objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas.

El procedimiento para obtener las partes del diseño en formato .STL es el siguiente: una vez abierto el modelado (Figura 90), se procede a seleccionar la opción "Guardar como", en esta pantalla se escoge el tipo de formato requerido como se indica en la Figura 91, esto se realiza para todas la partes que conforman la mano robótica, debido a que la prototipadora solamente reconoce este tipo de formato en sus archivos.

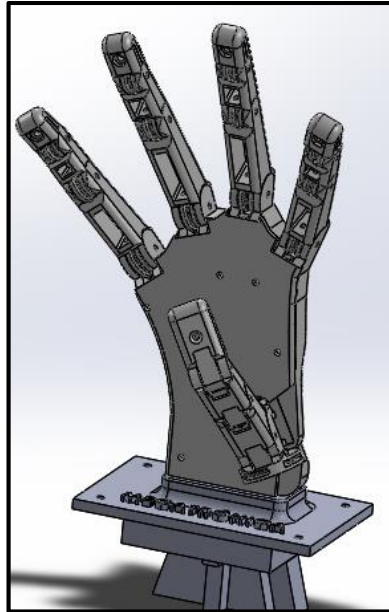


Figura 89. Palma metacarpo

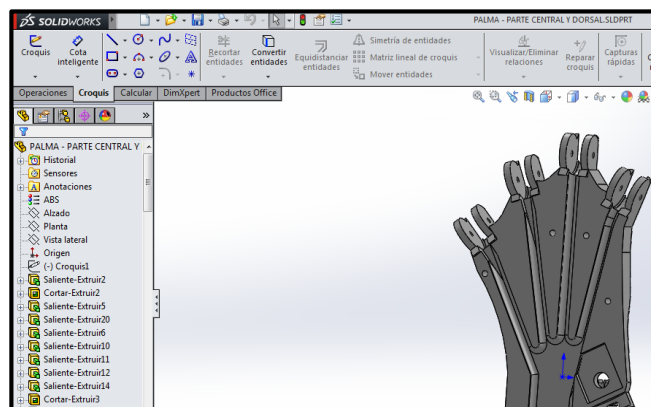


Figura 90. Palma central metacarpo en SolidWorks

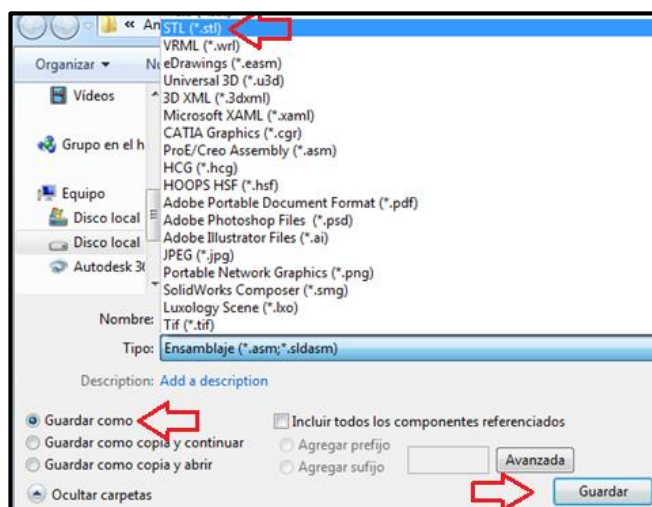


Figura 91. Conversión de archivo CAD a formato STL

1.1.2. Impresión de piezas

Una vez que los archivos se encuentran en formato .STL, se procede a abrir el software de control para el prototipado, el programa utilizado para el modelado es “Repetier Host Solidoodle”, proporcionado por el fabricante de la prototipadora, se accede a éste desde el icono de acceso directo ubicado en el escritorio (Figura 92), ya abierto el programa, se debe cargar el archivo desde la barra de tareas (Figura 93).



Figura 92. Acceso directo Solidoodle

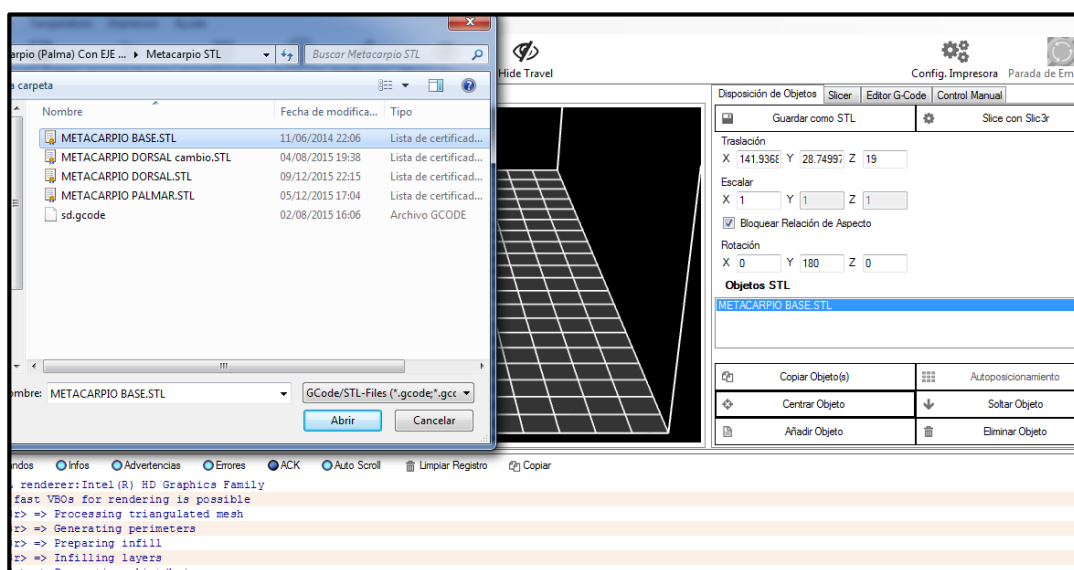


Figura 93. Importando formato STL en software

Una vez que el archivo fue cargado completamente, el modelado 3D seleccionado se despliega en la pantalla principal; dependiendo del diseño del elemento se debe mover, girar y trasladar la pieza sobre la base de la impresora o cama que simula el software, para la ubicación de la misma se considera analizar visualmente el modo de avance de la impresión al momento de fabricarse, se debe utilizar los recursos de forma óptima y no desperdiciar el material de apoyo en espacios vacíos, esto se puede resolver con una ubicación estratégica de la pieza como se indica en la Figura 94.

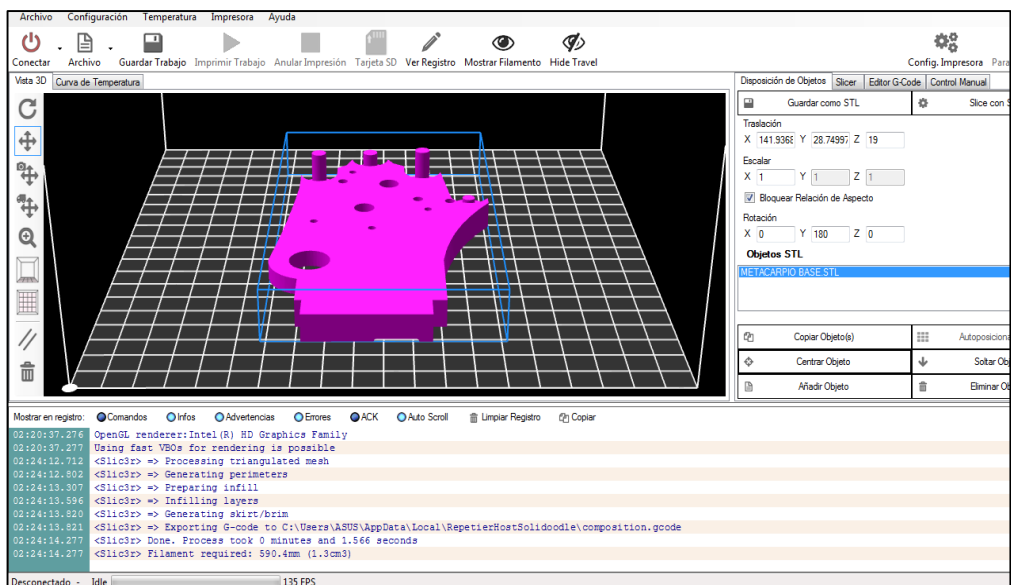


Figura 94. Pantalla 3D de diseño y posición de inicio

Ya ubicada la pieza en la posición óptima sobre la cama, se procede a seleccionar la opción “Slice con Slic3r” que se muestra en la Figura 95, esta herramienta permite en base al modelo 3D, generar las instrucciones de impresión en códigos G, realiza el proceso en base a los parámetros de configuración de Slicer, la cual varía dependiendo del acabado y la forma del diseño como se puede observar en la Figura 96.

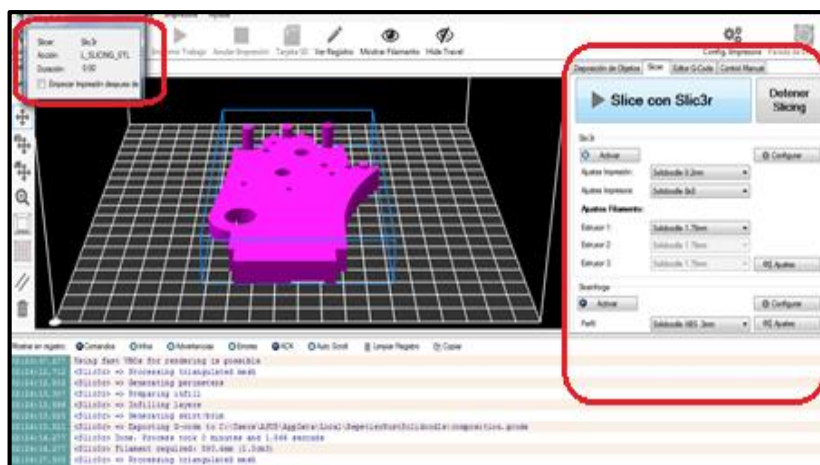


Figura 95. Menú Slice con Slic3r

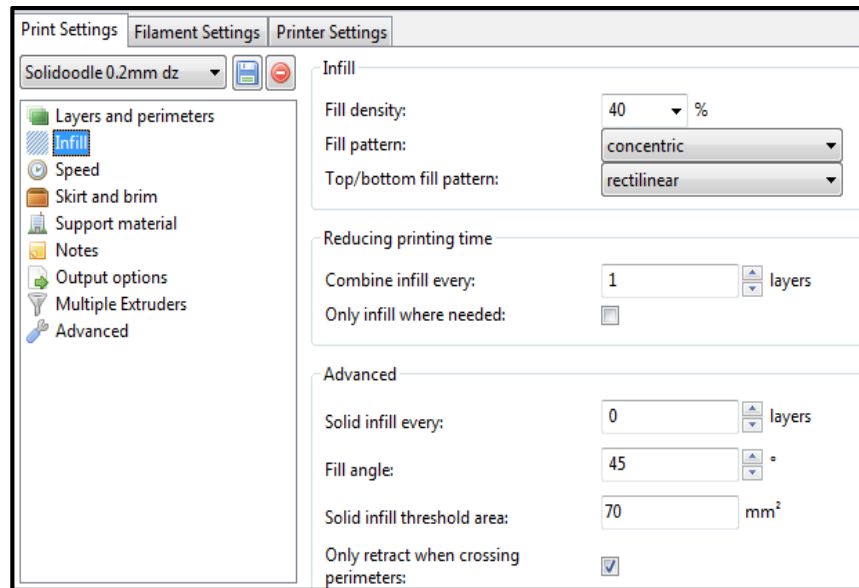


Figura 96. Configuración de Slicer

Generados los códigos G como se observa en la Figura 97, se deben especificar los parámetros de impresión, estos incluyen la temperatura de la cama que permite la sujeción de la pieza al momento de imprimir y la temperatura del extrusor para el correcto derretimiento del hilo, estas características de impresión varían dependiendo del tipo de filamento por el punto de fusión del material.

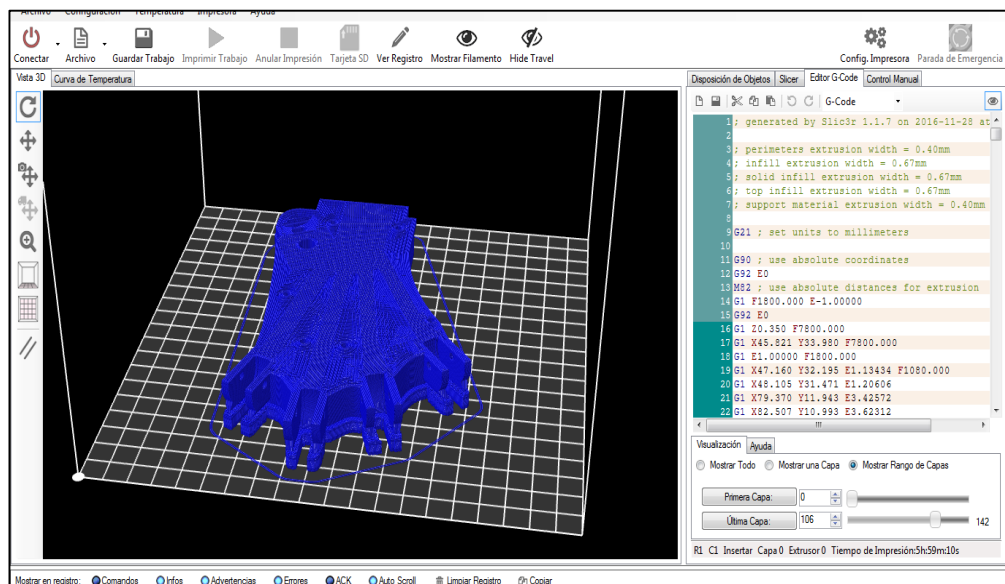


Figura 97. Creación de códigos G

- Parámetros utilizados para el calentamiento

Temperatura extrusor para ABS 1.75mm = 220 C

Temperatura cama para ABS 1.75mm = 125 C

SLICE con SLIC3R = 0.2MM

Con los parámetros definidos y las temperaturas adecuadas, se procede a referenciar el extrusor, esto se realiza desplazándolo al punto home de la mesa, realizado este procedimiento se debe presionar el botón *“Iniciar trabajo”*, de esta manera se da comienzo a la impresión como se observa en la Figura 98.

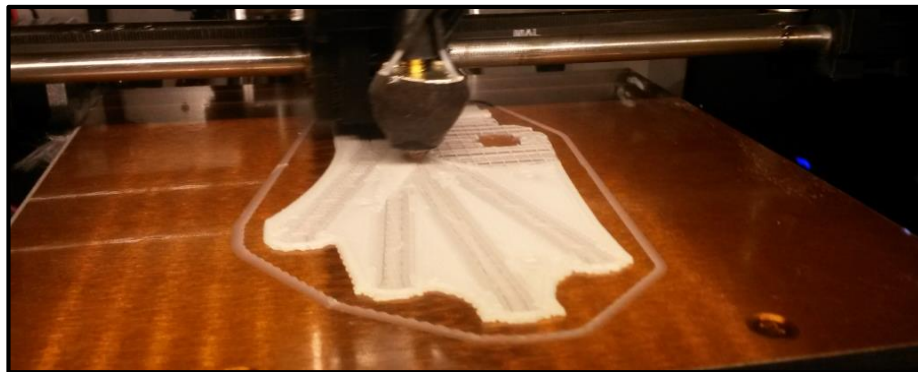


Figura 98. Proceso de impresión 3D

Transcurrido el tiempo de impresión, se considera conveniente esperar que el elemento se enfríe para poder manipularlo, este procedimiento se realiza para la impresión de todas las partes que conforman la mano robótica, se puede utilizar herramientas de pulido para limpiar el material de soporte generado en cada pieza.

1.2. Ensamblaje de la mano robótica con arquitectura antropomórfica

Una vez realizada la impresión de todas las partes que conforman la mano robótica, se procede a su ensamblaje, considerando que el proceso de armado de sus dedos es similar, teniendo en cuenta el anclaje de los cables de transmisión, como se describirá en la siguiente sección:

1.2.1. *Ensamblaje falange distal*

En la parte dorsal de esta falange, el hilo nylon es asegurado a uno de los tornillos incrustados que sirven como anclaje (Figura 99).



Figura 99. Anclaje de hilo nylon

La parte palmar de esta falange debe acoplarse perfectamente a la dorsal y posteriormente fijarse con tornillos (Figura 100).

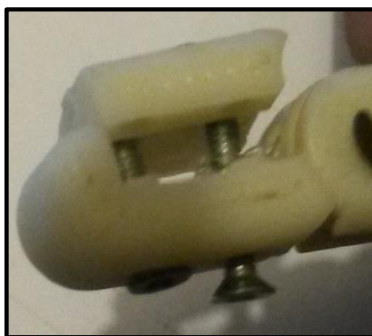


Figura 100. Parte palmar del distal

Mientras se acoplan sus partes se debe verificar que el hilo se mantenga sobre las pistas de la polea; la parte palmar y dorsal deben comprimirse sobre el hilo hasta lograr que su punta se encuentre paralela a la palma de la mano (Figura 101). Se debe tener cuidado de no sobrepasar esta sujeción pues la falange podría romperse.

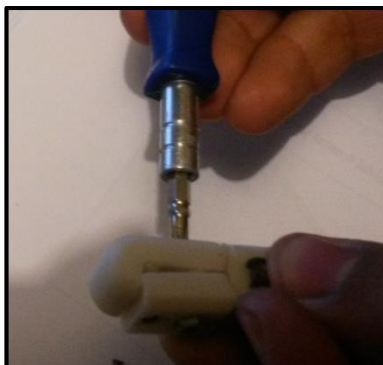


Figura 101. Unión de falanges distales

1.2.2. Unión entre las falanges y metacarpos

Para la unión entre las falanges y el metacarpo, se debe utilizar el hilo nylon anclado en la falange distal, direccionándolo hacia el canal interno de la falange adyacente continuando así su trayecto hasta llegar al metacarpo (Figura 102).

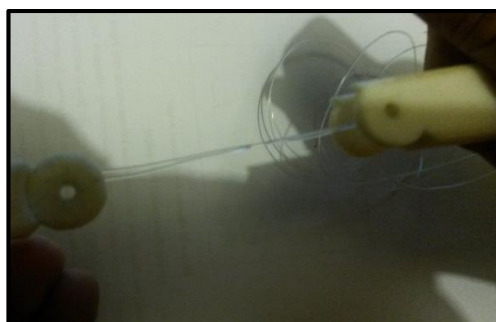


Figura 102. Enlazado con hilo nylon

1.2.3. Conexión de ejes para la movilidad en las articulaciones

La unión entre las falanges y el metacarpo como se indica en la Figura 103, se mantiene mediante un eje de bronce, éste alinea los ejes de cada dedo para permitir un movimiento simétrico, los extremos de éste poseen guías donde se colocan vinchas de presión que evitan su desarticulación.

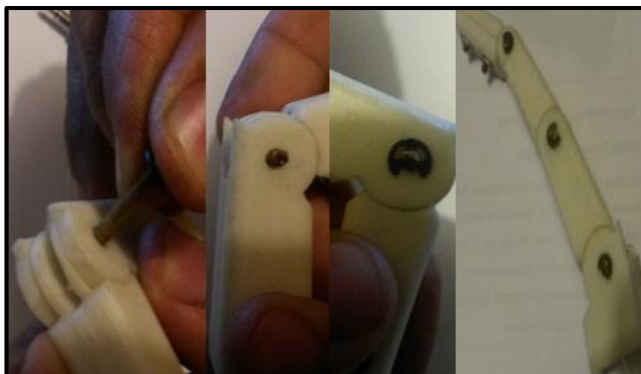


Figura 103. Colocación de ejes en articulaciones

1.2.4. Acoplamiento de la palma

Una vez que los dedos ensamblados se han conectado a la base a través de un eje de cobre, se procede a colocar los hilos sobre las pistas creadas en el metacarpo y posteriormente unir las partes 1 y 2 del mismo con su cubierta. Se debe ajustar las partes del metacarpo teniendo sumo cuidado de no aprisionar el cable e incluso de ser posible se debe colocar mangueras para evitar el cruce entre ellos, el diseño cuenta con orificios para cada tornillo como se indica en la Figura 104.

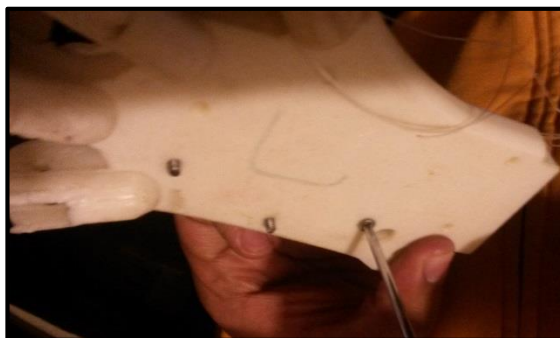


Figura 104. Sujeción de la palma

1.2.5. Ubicación de bandas elásticas para la extensión de dedos

Se realiza la ubicación de bandas elásticas en cada articulación de la mano robótica, esto permite la posición extendida de sus dedos (Figura 105) manteniéndolo así hasta que el hilo sea tensionado y flexione de sus falanges. Las bandas elásticas se acoplan mediante adhesivo que incluya cianoacrilato de metilo en su compuesto.



Figura 105. Colocación de bandas elásticas

1.2.6. Anclaje de mano robótica sobre modular

Finalmente, realizado el ensamblaje de la mano robótica con arquitectura antropomórfica, se procede a ubicarla sobre su base, la cual será anclada en el modular para su sujeción y conexión con cada servomotor (Figura 106).



Figura 106. Mano robótica ensamblada

2. Dimensionamiento y selección de servomotor

Al dimensionar los servomotores es necesario conocer el torque requerido para que éste realice su función, por lo cual se debe medir y calcular cada una de las piezas como se describe a continuación.

2.1. Medición del peso y cálculo de torque en las partes móviles de la mano robótica

Para que el programa pueda realizar los cálculos respectivos es necesario ingresar en SolidWorks los datos del material; éste mediante cálculos internos simula el peso que tiene el elemento para con ello comparar el resultado calculado con el medido y de esta manera tener una referencia para los cálculos de fuerza, torque, etc. Se toma en cuenta los accesorios utilizados para el acoplamiento de las falanges, pues esto puede generar mayor peso y fricción, lo que se convertiría en un esfuerzo adicional significativo.

2.1.1. Cálculo y medición del dedo índice

A continuación se presentan los valores de peso y volumen, medidos y calculados en el dedo índice prototipado, al igual que sus accesorios.

Tabla 17.
Peso calculado y medido de falanges (índice)

Nombre de la pieza	SolidWorks		Impresión 3D		
	Peso gr	Volumen cm ³	Filamento: 1,75MM mm	Densidad ABS 1,05 g/cm ³	cm ³
Índice – falange distal palmar	0,84	0,83	240,3	0,5	0,525
Índice – falange distal dorsal	2,34	2,295	770,9	1,7	1,785
Índice – falange medial	3,9	3,82	1183,7	2,6	2,73
Índice – falange proximal	8,76	8,59	2280,4	5,1	5,355
Total	15,84	15,54	4475,3	9,9	10,395

Tabla 18.
Peso calculado y medido (accesorios)

Peso adicional			
Cantidad	Peso	Nombre del producto	Peso total (gr)
4	0,01	Anillo de sujeción	0,04
2	1,2	Eje de bronce	2,4
1	1,19	Tornillo y tuerca	1,19
Total			3,63

Tabla 19.
Peso total índice

Peso total (gr)	14,025
------------------------	---------------

2.1.2. Cálculo y medición del dedo medio

Se presentan los valores de peso y volumen, medidos y calculados en el dedo, medio que se prototipo, al igual que sus accesorios.

Tabla 20.
Peso calculado y medido de falanges (medio)

Nombre de la pieza	SolidWorks		Impresión 3D		
	Peso gr	Volumen cm3	Filamento: 1,75MM mm	Densidad ABS cm3	1,05 g/cm3
Medio – falange distal palmar	0,92	0,901	261,8	0,6	0,63
Medio – falange distal dorsal	2,63	2,58	824,9	1,8	1,89
Medio – falange medial	4,34	4,25	1299,2	2,9	3,045
Medio – falange proximal	9,55	9,361	2454	5,4	5,67
Total	17,44	17,09	4839,9	10,7	11,235

Tabla 21.
Peso calculado y medido (accesorios)

Peso adicional			
Cantidad	Peso	Nombre del producto	Peso total (gr)
4	0,01	Anillo de sujeción	0,04
2	1,2	Eje de bronce	2,4
1	1,19	Tornillo y tuerca	1,19
Total			3,63

Tabla 22.
Peso total del dedo medio

Peso total (gr)	14,865
------------------------	---------------

2.1.3. Cálculo y medición del dedo anular

Se presentan los valores de peso y volumen, medidos y calculados en el dedo anular prototipado, al igual que sus accesorios.

Tabla 23.
Peso calculado y medido de falanges (anular)

Nombre de la pieza	SolidWorks		Impresión 3D		
	Peso gr	Volumen cm ³	Filamento: 1,75MM mm	Densidad cm ³	Densidad ABS 1,05 g/cm ³
Anular – falange distal palmar	0,92	0,899	260,1	0,6	0,63
Anular – falange distal dorsal	2,51	2,458	791,9	1,8	1,89
Anular – falange medial	4,07	3,992	1235,6	2,7	2,835
Anular – falange proximal	9,07	8,894	2360,4	5,2	5,46
Total	16,57	16,24	4648	10,3	10,815

Tabla 24.
Peso calculado y medido (accesorios)

Peso adicional			
Cantidad	Peso	Nombre del producto	Peso total (gr)
4	0,01	Anillo de sujeción	0,04
2	1,2	Eje de bronce	2,4
1	1,19	Tornillo y tuerca	1,19
Total			3,63

Tabla 25.
Peso total del dedo anular

Peso total (gr)	14,445
------------------------	---------------

2.1.4. Cálculo y medición de meñique

Se presentan los valores de peso y volumen, medidos y calculados en el dedo meñique impreso, al igual que sus accesorios.

Tabla 26.

Peso calculado y medido de falanges (meñique)

Nombre de pieza	SolidWorks		Impresión 3D		
	Peso gr	Volumen cm ³	Filamento: 1,75MM mm	Densidad ABS 1,05 cm ³	Densidad g/cm ³
Meñique- falange distal palmar	0,68	0,665	192,2	0,4	0,42
Meñique - falange distal dorsal	2,42	2,37	775,4	1,7	1,785
Meñique - falange medial	3,52	3,455	1111,9	2,5	2,625
Meñique - falange proximal	7,94	7,783	2107,9	4,7	4,935
Total	14,56	14,27	4187,4	9,3	9,765

Tabla 27.

Peso calculado y medido (accesorios)

Peso adicional			
Cantidad	Peso	Nombre del producto	Peso total (gr)
4	0,01	Anillo de sujeción	0,04
2	1,2	Eje de bronce	2,4
1	1,19	Tornillo y tuerca	1,19
Total			3,63

Tabla 28.

Peso total del dedo meñique

Peso total (gr)	13,395
------------------------	---------------

2.1.5. Cálculo y medición de pulgar

Se presentan los valores de peso y volumen, medidos y calculados en el dedo pulgar prototipado al igual que sus accesorios.

Tabla 29.
Peso calculado y medido de falanges (pulgar)

Nombre de la pieza	SolidWorks		Impresión 3D		Densidad ABS 1,05 g/cm3
	Peso gr	Volumen cm3	Filamento: 1,75MM mm	cm3	
Pulgar - falange distal palmar	2,52	2,468	261,8	0,6	0,63
Pulgar - falange distal dorsal	5	4,905	824,6	1,8	1,89
Pulgar – falange metacarpo	12,07	11,829	1299,2	2,9	3,045
Pulgar – falange proximal	8,48	8,315	2454	5,4	5,67
Total	28,07	27,52	4839,6	10,7	11,235

Tabla 30.
Peso calculado y medido (accesorios)

Peso adicional			
Cantidad	Peso	Nombre del producto	Peso total (gr)
4	0,01	Nombre del producto	0,04
2	1,2	Anillo de sujeción	2,4
1	1,19	Eje de bronce	1,19
Total			3,63

Tabla 31.
Peso total del dedo pulgar

Peso total (gr)	14,865
------------------------	---------------

2.2. Cálculo de torques

Se realiza la medición con dinamómetros (Figura 107) y balanza (Figura 108), para obtener los valores que permiten reforzar los criterios de construcción para el diseño en los puntos frágiles, si se lo considera débil para la fuerza de trabajo a la cual va a ser sometido el mecanismo, implica un rediseño del mismo realizando una retroalimentación entre la fuerza requerida y el esfuerzo generado.

En la Tabla 32 se incluyen los datos del peso obtenido por el software SolidWorks y al igual que la medida real; de la misma manera la fuerza calculada y la real sirven como una referencia para el cálculo de torque sin fricción, lo cual se obtuvo mediante el software mencionado, el torque real en base a la medición de fuerzas con el dinamómetro.

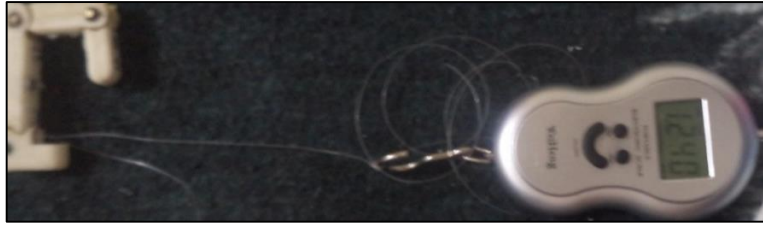


Figura 107. Medición de fuerza ejercida con romanilla



Figura 108. Balanza digital

Tabla 32.
Cálculo de peso y torque de meñique, anular, medio, índice y pulgar

Dedos de la Mano	Falange	Peso Software (gr) SolidWorks	Peso Real (Gr) Balanza	Medida(Kg) Conversión Unidad /1000	Peso (N) Conversión Unidad /0,1019	Peso (Kgf) Conversión *9,8067	Torque Requerido Calculado sin fricción (Kgf.cm) *2,6 cm	Fuerza medida con dinamómetro dedo completo (Kgf)	Torque requerido ensamble completo (Kgf.cm) *2,6 cm	Servomotor Requerido (Kgf.cm)
Índice	Falange distal palmar	0,84	0,525	0,000525	0,005152	0,0505	3,51	3,6	9,36	11
	Falange distal dorsal	2,34	1,785	0,001785	0,017517	0,1718				
	Falange medial	3,9	2,73	0,002730	0,026791	0,2627				
	Falange proximal	8,76	5,355	0,005355	0,052552	0,5154				
	Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493				
	Total dedo peso con accesorios	15,84	14,025	0,014025	0,137635	1,3497				
Medio	Falange distal palmar	0,92	0,63	0,000630	0,006183	0,0606	3,72	3,95	10,27	11
	Falange distal dorsal	2,63		0,001890	0,018548	0,1819				
	Falange medial	4,34	3,045	0,003045	0,029882	0,2930				
	Falange proximal	9,55	5,67	0,005670	0,055643	0,5457				
	Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493				

CONTINÚA



	Total dedo peso con accesorios	17,44	11,235	0,014865	0,145878	1,4306				
Anular	Falange distal palmar	0,92	0,63	0,000630	0,006183	0,0606				
	Falange distal dorsal	2,51	1,89	0,001890	0,018548	0,1819				
	Falange medial	4,07	2,835	0,002835	0,027821	0,2728				
	Falange proximal	9,07	5,46	0,005460	0,053582	0,5255	3,61	3,8	9,88	11
	Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493				
	Total dedo peso con accesorios	16,57	10,815	0,014445	0,141757	1,3902				
		Falange distal palmar	0,68	0,42	0,000420	0,004122	0,0404			
Meñique	Falange distal dorsal	2,42	1,785	0,001785	0,017517	0,1718				
	Falange medial	3,52	2,625	0,002625	0,025761	0,2526				
	Falange proximal	7,94	4,935	0,004935	0,048430	0,4749	3,35	3,2	8,32	11
	Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493				
	Total dedo peso con accesorios	14,56	9,765	0,013395	0,131452	1,2891				
Pulgar	Falange distal palmar	2,52	0,63	0,000630	0,006183	0,0606				
	Falange distal dorsal	5	1,89	0,001890	0,018548	0,1819	3,72	3,7	9,62	11



Falange proximal	12,07	3,045	0,003045	0,029882	0,2930
Metacarpo	8,48	5,67	0,005670	0,055643	0,5457
Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493
Total dedo peso con accesorios	28,07	11,235	0,014865	0,145878	1,4306

2.3. Selección de servomotor

En la Tabla 32 se visualiza las magnitudes necesarias para el movimiento de los dedos, lo cual permite seleccionar un servomotor que se acople a la necesidad especificada. El precio del servomotor en el mercado, el torque necesario y la dificultad de adquisición del producto, son limitantes para la selección del mismo. A continuación, se presenta las características de algunos de ellos en la Tabla 33:

Tabla 33.
Selección de servomotor

Servomotor Modelo	Torque (Kg.cm)		Velocidad seg/60°		Dimensiones (mm)			Precio (\$)	
	4,8 (V)	6 (V)	4,8 (V)	6 (V)	Largo	Ancho	Profundidad	Unitario	Por docena
HS-311	3,02	3,5 3	0,19	0,15	39,9	19,8	36,3	12,5	148,1
HS-422	3,3	4,1	0,21	0,16	39,88	19,82	36,02	17,5	201,5
HS-485	4,8	6	0,22	0,18	40	19,82	37,75	22,5	261,5
HS-645	7,7	9,6	0,24	0,2	40,6	19,8	37,8	52,5	630
MG-945	10	12	0,23	0,2	40,7	19,7	42,9	21	252
MG-996 r	9,4	11	0,17	0,14	40,7	19,7	42,9	20	240

En los cálculos y mediciones, el torque obtenido es 11 Kg.cm con el factor de seguridad de FDS=5, tomando en cuenta esta magnitud se selecciona el servomotor MG-996 R, el cual se encuentra en el rango de trabajo, a diferencia del MG 945 se lo puede adquirir en el país sin dificultad y dispone las características que se especifican en la Tabla 33.

3. Unificación del sistema de control mediante ondas cerebrales

3.1. Lógica de control

Para realizar la programación del control de la mano robótica con arquitectura antropomórfica, se realizan flujogramas basados en 3 pantallas de diferente lógica denominadas: menú principal, control y análisis de ondas.

3.1.1. Pantalla menú principal

El programa inicia en la pantalla de “*menú principal*” despliega una selección de 3 botones “*control*”, “*análisis de ondas*” y “*stop*”, éste último permite detener el programa. El flujograma correspondiente a la pantalla principal se muestra en la Figura 109.

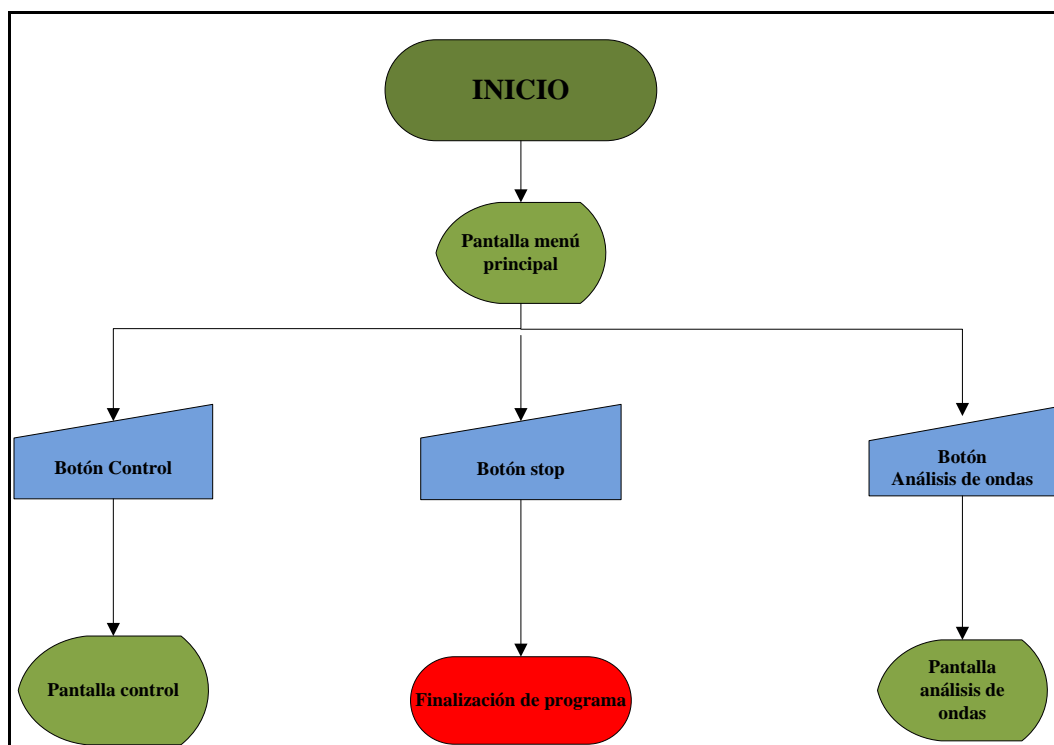


Figura 109. Flujograma de la pantalla (menú principal)

3.1.2. Pantalla de análisis de ondas

En la Figura 110, se muestra el flujograma correspondiente a la pantalla “*análisis de ondas*”, cuenta con 5 botones los cuales se resumirán a continuación y una descripción específica en la siguiente sección:

- Parpadeo: si es el primero en seleccionarse, inicia la adquisición de registros y ejecuta el subprograma correspondiente al parpadeo.
- Atención: si es el primero en seleccionarse, inicia la adquisición de registros y ejecuta el subprograma correspondiente a la atención.
- Meditación: si es el primero en seleccionarse, inicia la adquisición de registros y ejecuta el subprograma correspondiente a la meditación.
- Menú: despliega la pantalla de “*menú principal*”.
- Stop: despliega la pantalla “*menú principal*” y finaliza la ejecución del programa.

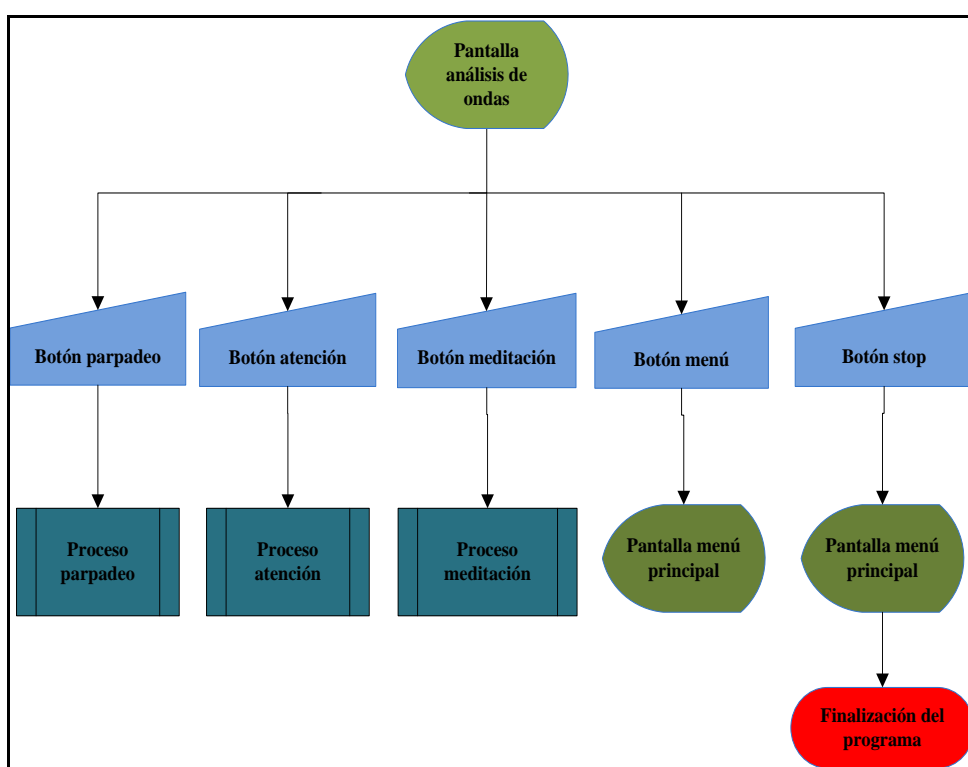


Figura 110. Flujograma de la pantalla (análisis de ondas)

- Proceso de parpadeo

Éste proceso inicia con la adquisición de registros correspondientes al parpadeo, a partir de este momento, se puede practicar para de esta manera diferenciar el parpadeo suave del fuerte, en cada caso se encenderá un led para identificarlos (Figura 111).

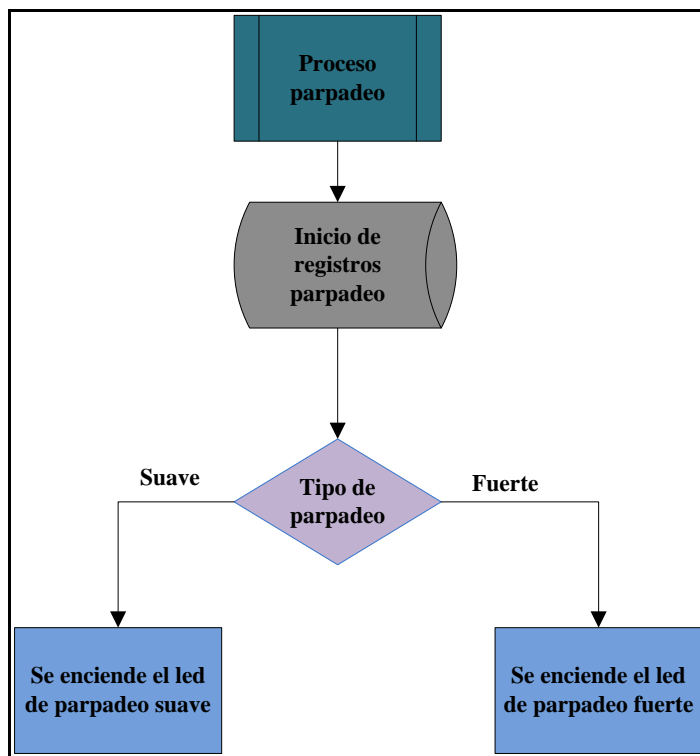


Figura 111. Flujograma del proceso (parpadeo)

- Proceso de atención

Éste proceso al ejecutarse inmediatamente finaliza la adquisición de registros del parpadeo y comienza los de la onda “**atención**”, el usuario podrá visualizará las tendencias generadas por esta onda en la pantalla, de esta manera puede decidir el rango óptimo para realizar el control, tomando en cuenta las tendencias mostradas, éste debe ingresar manualmente los valores de rango bajo y alto, los cuales se guardan hasta el reinicio del programa. El flujograma de programación se muestra en la Figura 112.

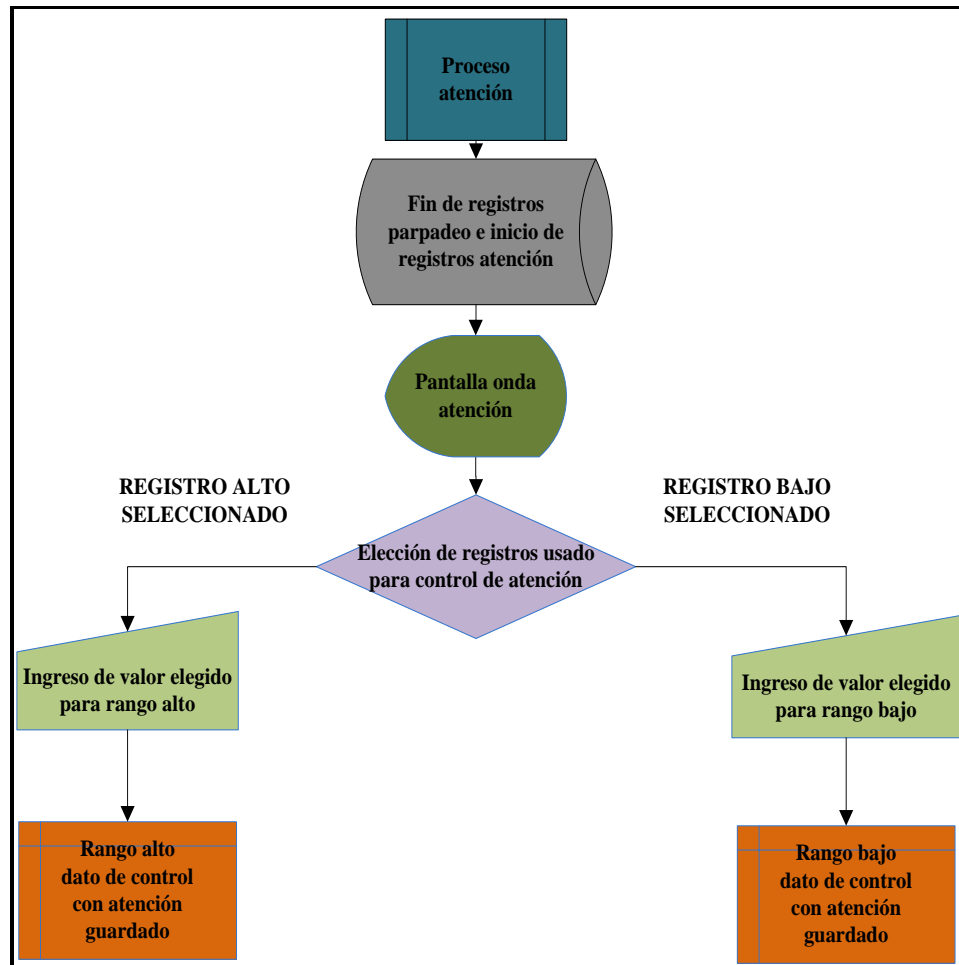


Figura 112. Flujograma (proceso de atención)

- Proceso de meditación

El proceso de meditación se realiza de acuerdo al flujograma establecido en la Figura 113; cuando éste se ejecuta, realiza el cambio en la adquisición de la señal de atención por la de meditación, de esta manera se refleja la tendencia y variación de la onda en la pantalla, para que el usuario elija el rango más conveniente para el control, estos valores deben ser ingresados manualmente en sus respectivas casillas, los cuales se guardan hasta el reinicio del programa.

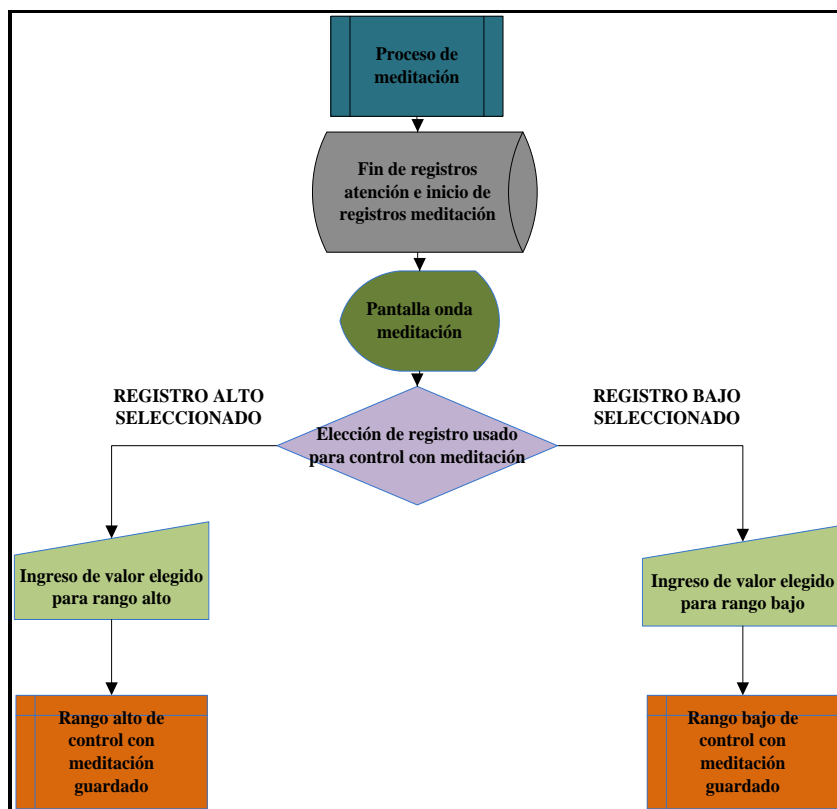


Figura 113. Flujograma del proceso (meditación)

3.1.3. *Pantalla de control*

La pantalla "*control*" tiene su funcionamiento de acuerdo al flujograma descrito en Figura 114.

Para acceder a esta pantalla es necesario que el usuario regrese al menú principal y seleccione control, en ésta se observa cinco opciones, las cuales se resumen a continuación:

- Indicador de parpadeo: se ejecuta inmediatamente al abrir "*control*"; en el caso de no seleccionar las otras opciones, se ejecuta el proceso de control por ondas.
- Botón movimiento manual: ésta opción ejecuta el proceso de control manual, anulando el de ondas cerebrales u otro que se esté realizando.
- Botón selección de movimiento: permite suspender cualquier otro proceso y regresar al indicador de parpadeo.
- Botón menú: regresar a la pantalla "*menú principal*".

- Botón stop: despliega la pantalla “*menú principal*” y finaliza la ejecución de los programas.

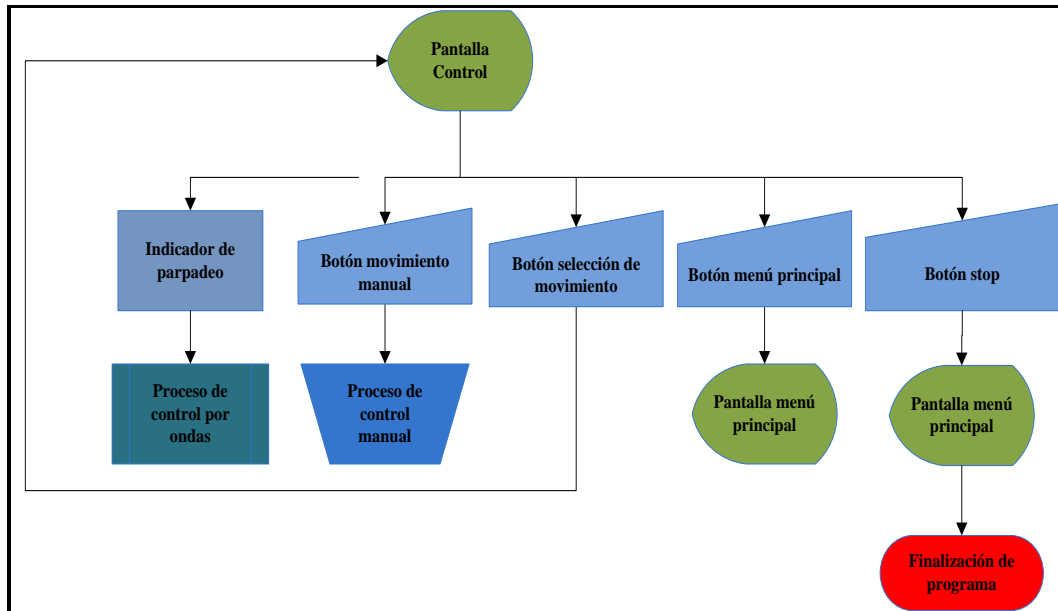


Figura 114. Flujograma de la pantalla (control)

a) *Proceso de control manual*

La pantalla del control manual, funciona de acuerdo al flujograma descrito en la Figura 115, inicia desplegando una subpantalla dentro de “*control*”, en esta se presenta cinco botones y un deslizador.

Cada botón, puede cargar los ángulos de movimiento para el tipo de agarre requerido como: punta, lateral, gancho, cilíndrico y esférico; se utiliza uno a la vez y al presionar nuevamente el botón seleccionado regresa a la posición por defecto “*home*”, dando paso al control “*cierre y apertura manual*” que se describe a continuación.

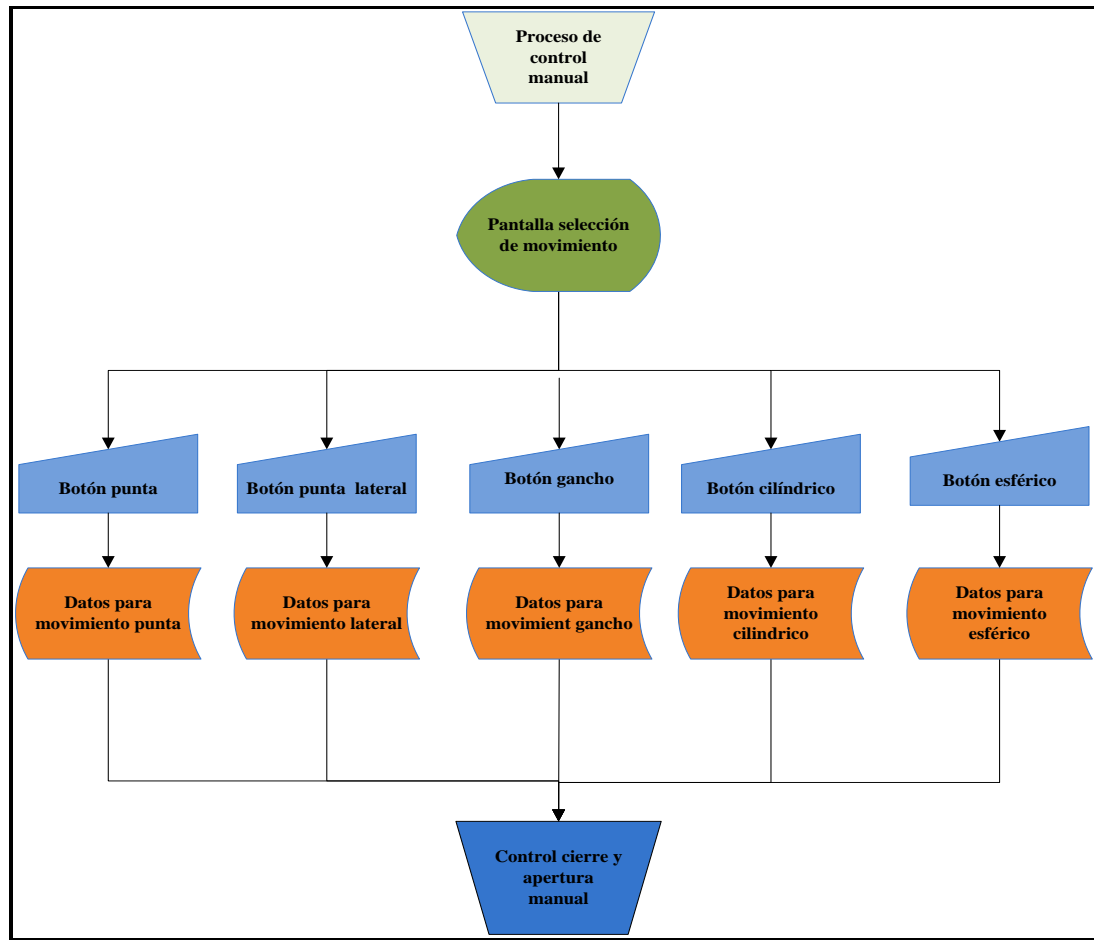


Figura 115. Flujograma del proceso (control manual)

– Control cierre y apertura manual

Para el control del cierre y apertura manual, se realiza de acuerdo al flujograma descrito en la Figura 116; en la cual, el control de apertura y cierre de la mano se realiza con el deslizador, que representa el porcentaje de cierre del movimiento seleccionado (0-100%), mientras se selecciona un incremento porcentual existe un cierre proporcional al porcentaje de salida y viceversa.

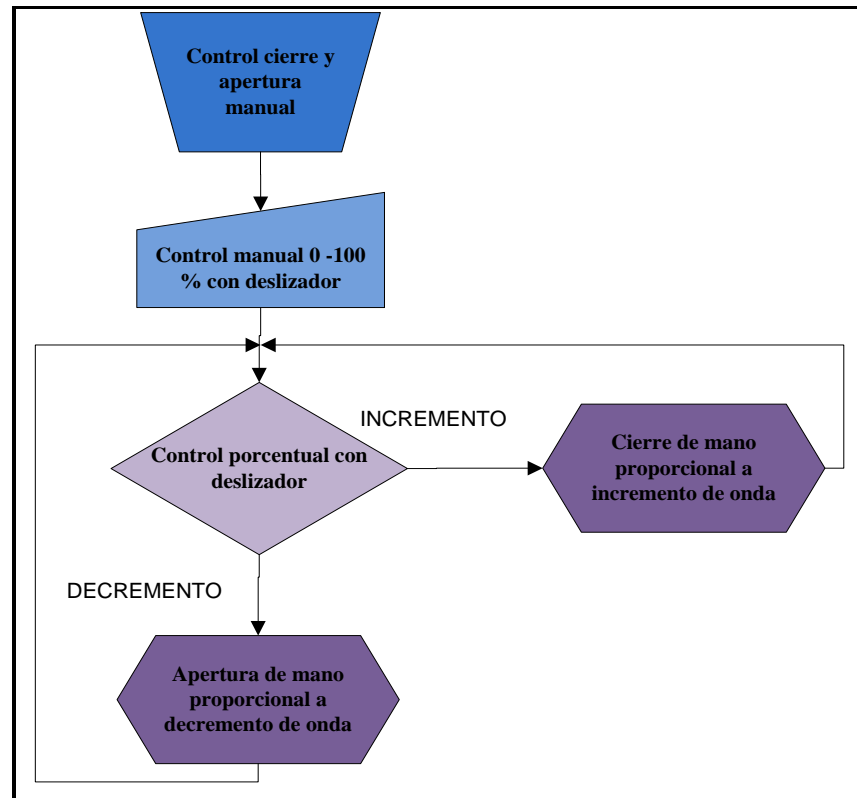


Figura 116. Flujograma para control del cierre y apertura manual

b) *Proceso de control por ondas*

El proceso de control por ondas comprende de tres secciones: la primera, la selección de movimientos; la segunda, la selección de onda para el control y la última, el control de apertura y cierre. Inicia con la presentación de un mensaje *“parpadear para seleccionar movimiento”*, posteriormente comienza con la adquisición de registros de parpadeos dados por el lector, por defecto el proceso home es el primero en desplegarse, como se trata de un movimiento realizado al ejecutarse el programa, no es necesario continuar con el proceso de control del mismo.

Al estar en línea los datos de parpadeo, el usuario debe elegir entre parpadeo suave o fuerte, el primero permite el paso al proceso correspondiente al siguiente movimiento, en este caso punta, si este es el movimiento deseado, se debe realizar el parpadeo fuerte, tres parpadeos de este tipo permite proseguir al proceso de selección de onda de control, en el caso de no desear este movimiento deberá realizar el parpadeo suave, de este modo navegará entre las opciones de movimiento: home, punta, lateral, gancho, cilíndrico y esférico consecutivamente, al llegar al último automáticamente

regresa a la primera opción y continúa de esta forma indefinidamente hasta elegir cualquiera de ellos. La lógica de control que el sistema obedece se puede observar en la Figura 117.

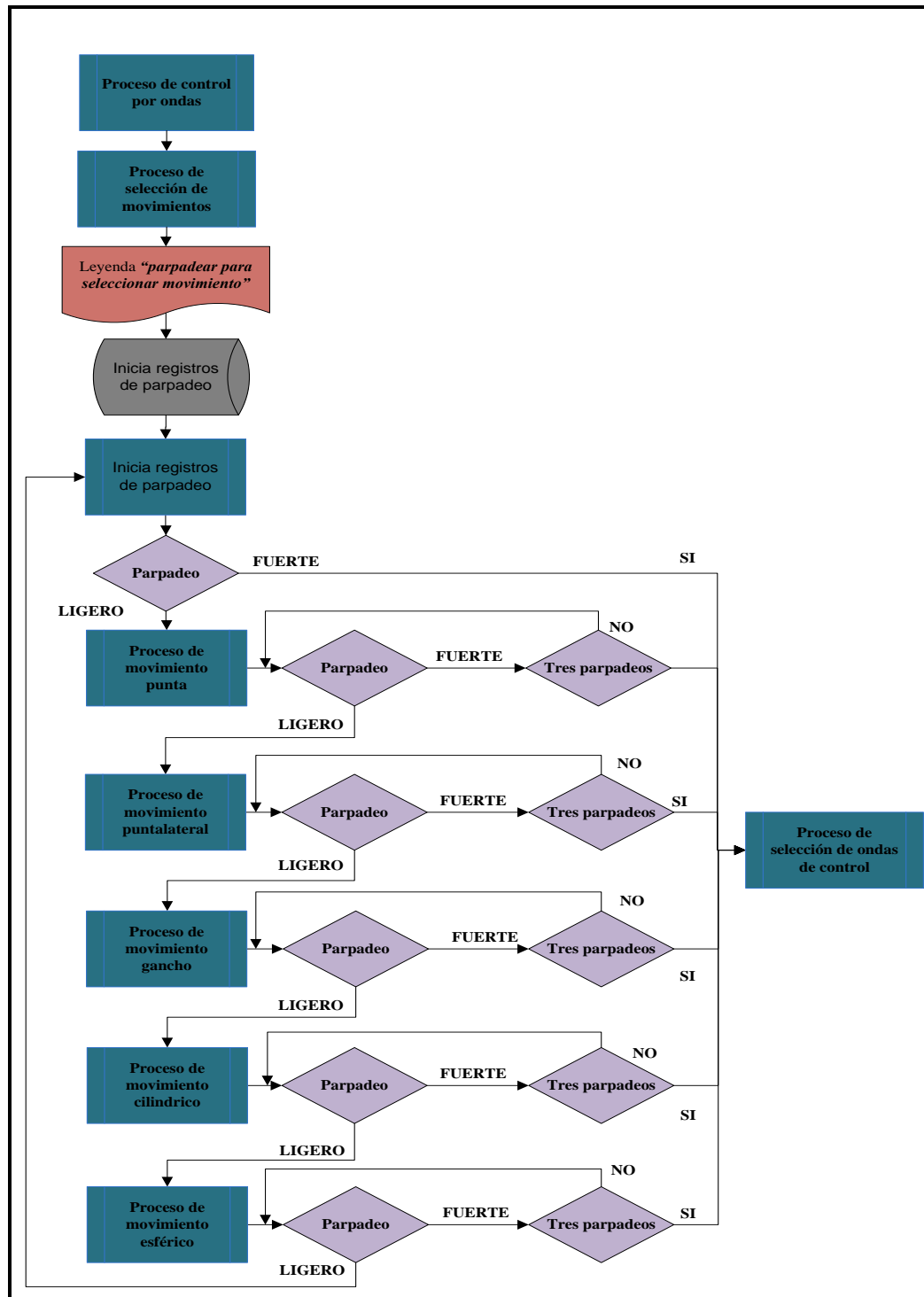


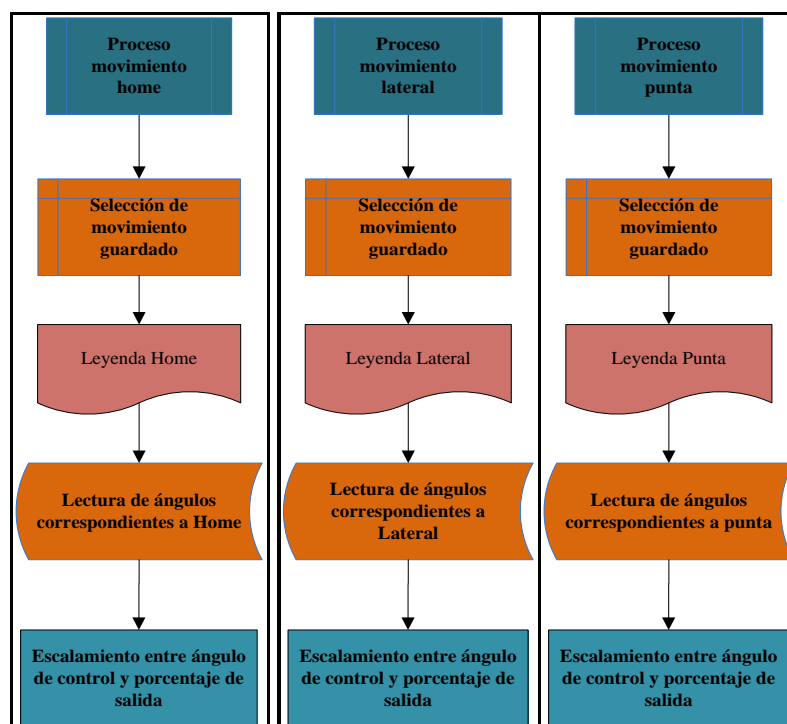
Figura 117. Flujograma del proceso (control por ondas)

– Proceso de movimiento

La programación de este proceso, se realiza en base al flujograma indicado en la Figura 118.

- Proceso de movimiento home, al seleccionar este como el movimiento a ejecutarse se despliega un mensaje *“Home”*.
- Proceso de movimiento punta, al seleccionar este como el movimiento a ejecutarse se despliega un mensaje *“Punta”*.
- Proceso de movimiento lateral, al seleccionar este como el movimiento a ejecutarse se despliega un mensaje *“Lateral”*.
- Proceso de movimiento gancho, al seleccionar este como el movimiento a ejecutarse se despliega un mensaje *“Gancho”*.
- Proceso de movimiento cilíndrico, al seleccionar este como el movimiento a ejecutarse se despliega un mensaje *“Cilíndrico”*.
- Proceso de movimiento esférico, al seleccionar este como el movimiento a ejecutarse se despliega un mensaje *“Esférico”*.

En todos los casos luego del mensaje se realiza la lectura de los ángulos grabados para cada movimiento y el escalamiento respectivo con el porcentaje de salida.



CONTINÚA



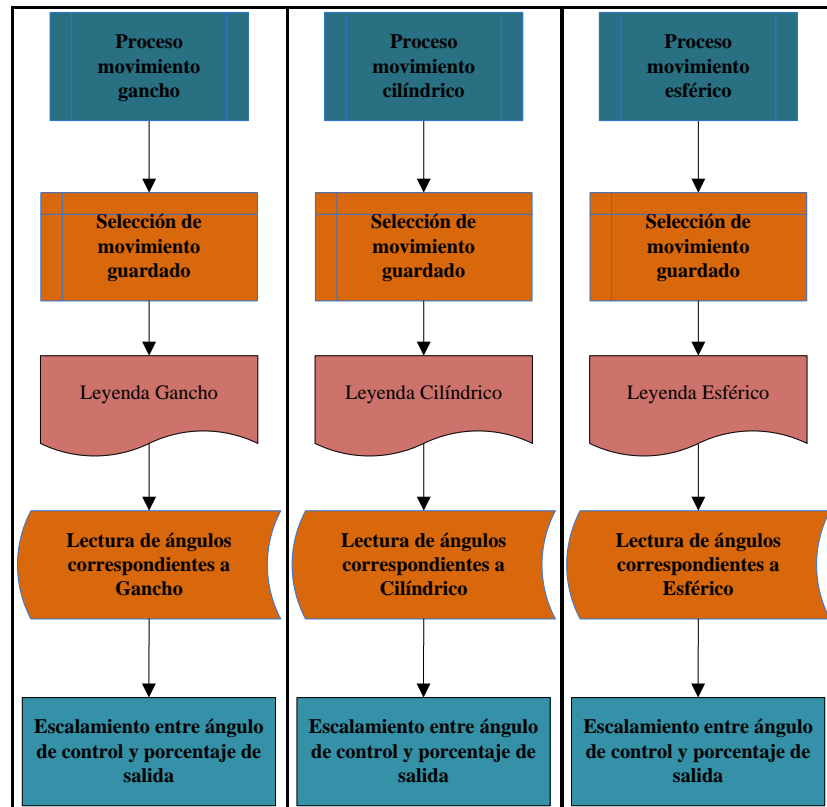


Figura 118. Flujograma del proceso del movimiento

– Proceso de selección de onda de control

El proceso de selección de onda de control, se realiza de acuerdo al flujograma de la Figura 119, al iniciar este proceso se despliega un mensaje *“parpadear para seleccionar onda de control”*, por defecto la primera opción desplegada es atención, el usuario decide entre cambiar el control a meditación mediante un parpadeo suave o pasar al proceso de control por ondas con tres parpadeos fuertes, de la misma forma se procede con meditación.

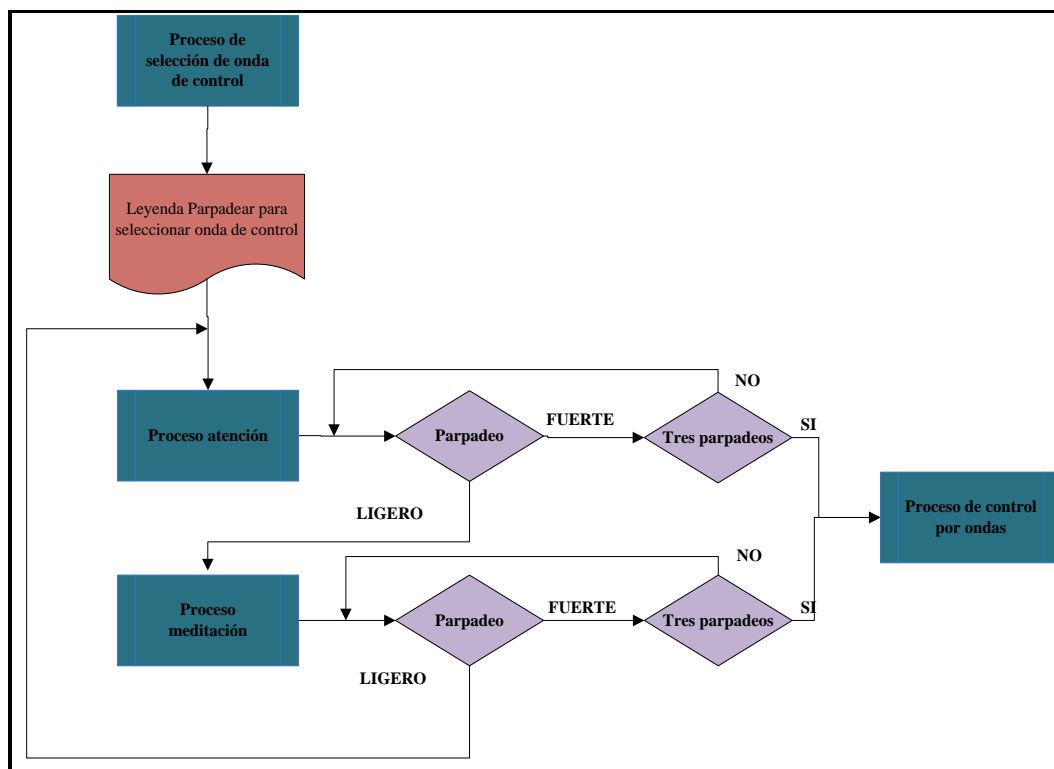


Figura 119. Flujograma del proceso de selección de onda de control

– Proceso de atención y meditación

Se realiza la programación de este proceso de acuerdo al flujograma determinado en la Figura 120.

- Proceso atención: ya seleccionada la atención como onda de control se despliega el mensaje ***“Atención”***.
- Proceso meditación, ya seleccionada la meditación como onda de control se despliega el mensaje ***“Meditación”***.
- En ambos casos luego de desplegar su mensaje, obtiene de la memoria los rangos alto y bajo de funcionamiento, estos fueron guardados previamente en la pantalla de ***“análisis de onda”***, en el caso de no elegir rangos se utiliza el rango total de cada onda.

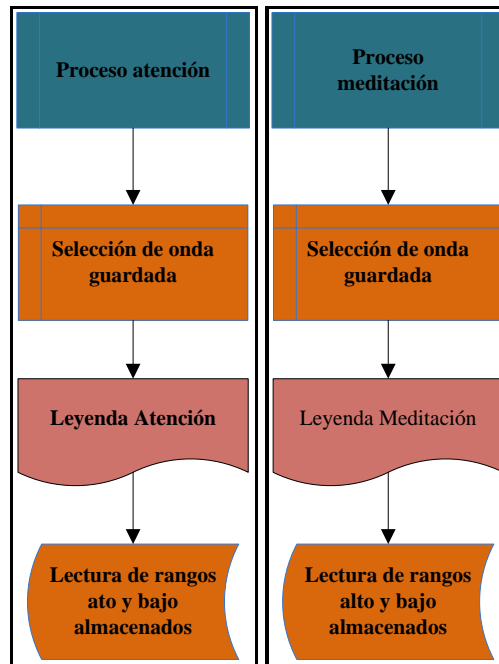


Figura 120. Flujograma del proceso de atención y meditación

– Proceso de control por ondas

El proceso de control por ondas se realiza de acuerdo al flujograma indicado en la Figura 121, iniciado este proceso se presenta un mensaje en la pantalla “*Controlar cierre y apertura*”, posteriormente se cargan los datos del rango bajo y alto que se tomaron de la memoria y que corresponden a la onda seleccionada. Para seguir con el proceso, es necesario un parpadeo suave el cual cambia la adquisición de registros de parpadeo a los de la onda seleccionada, de este modo el usuario puede realizar el control del cierre y apertura de la mano robótica, esto será proporcional al incremento y decremento de la lectura de la onda cerebral que se ha seleccionado y escalando el valor de acuerdo al rango programado.

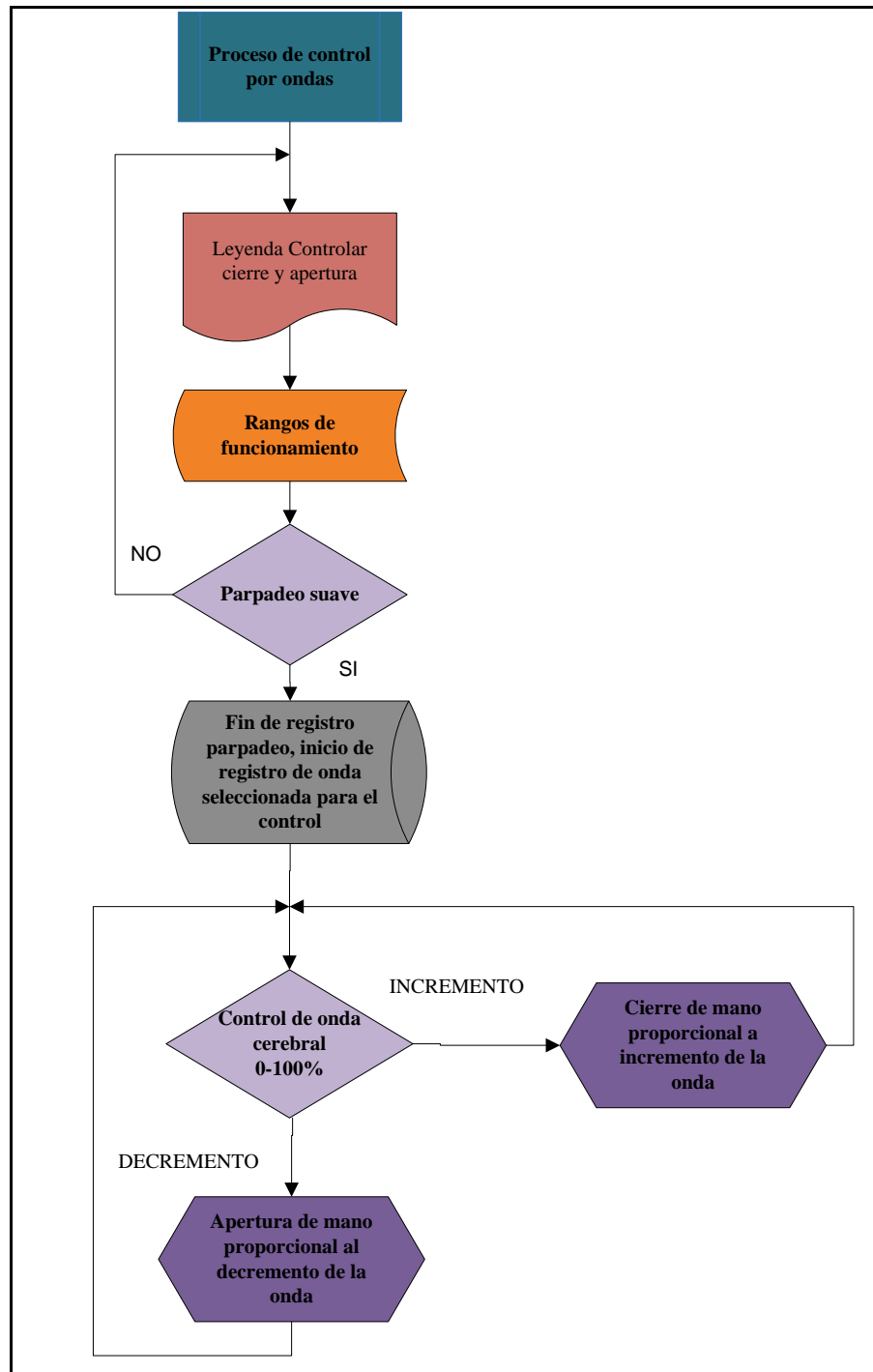


Figura 121. Flujograma para el proceso de control por ondas

3.2. Configuración y programación de señales en LabView

Se describe brevemente las configuraciones previas a la conexión de los distintos dispositivos en LabView y arduino.

3.2.1. Configuración de puertos de comunicación

Para la conexión con el programa se debe configurar dos puertos de comunicación, el primero se utiliza para el módulo de control arduino, el cual comunica la plataforma de control con la computadora y el segundo puerto sirve para el funcionamiento y comunicación del lector de ondas cerebrales (MindWave), éste se conecta a través de la comunicación bluetooth con el conector USB y a la PC.

a) Configuración de puerto del dispositivo MindWave

El dispositivo MindWave de NeuroSky cuenta con un VI el cual permite la interacción del lector con LabView (Figura 122), esto se obtiene al configurar los parámetros de comunicación, como el puerto, la velocidad, los bits de parada, la paridad etc., los cuales deben ser igual en la PC como en LabView para poder lograr una comunicación exitosa.

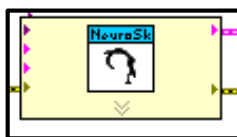


Figura 122. VI NeuroSky

El dispositivo, se configura en el puerto de comunicación (COM 3), puerto descrito en LabView para el uso de MindWave, con la siguiente configuración, 9600 bits por segundo, 8 Bits, sin paridad y 1 bit de parada, la configuración será igual en la PC como en el programa; el VI de configuración de NeuroSky tiene por defecto estos parámetros, excepto el puerto de comunicación, éste puede variar dependiendo de la PC a la cual se conecte (Figura 123).

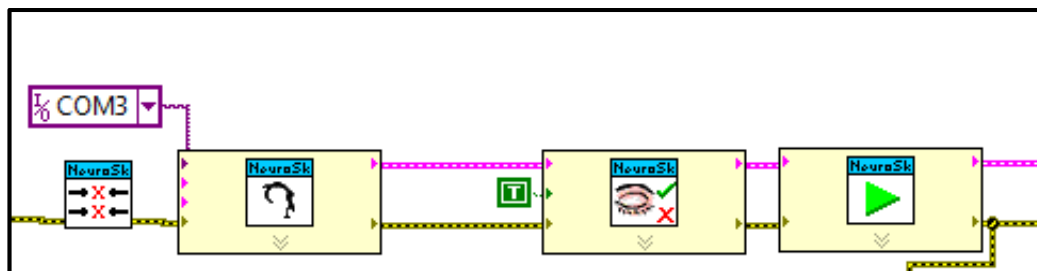


Figura 123. Configuración del VI de NeuroSky

b) *Configuración de puerto para dispositivo arduino*

Para el dispositivo arduino, se debe proporcionar todas las herramientas necesarias para la interacción entre la plataforma y LabView, es necesario cargar la configuración “*LIFA_Base*” en la placa de control (Figura 124), esta librería se puede descargar desde la página principal de arduino, permite acceder a las entradas y salidas de la plataforma y la comunicación total entre arduino y LabView.

```

LIFA_Base AFMotor.cpp AFMotor.h AccelStepper.cpp AccelStepper.h
#include <Servo.h>

/*****
**
** LVFA_Firmware - Provides Basic Arduino Sketch For Interfacing
**
** Written By: Sam Kristoff - National Instruments
** Written On: November 2010
** Last Updated: Dec 2011 - Kevin Fort - National Instruments
**
** This File May Be Modified And Re-Distributed Freely. Original
** Written By Sam Kristoff And Available At www.ni.com/arduino.
**
*****/

```

Figura 124. Programación plataforma arduino

El dispositivo arduino se configura en el puerto de comunicación (COM 15), descrito en LabView para el uso de arduino, a través del VI “*ARDUINO INIT*” (Figura 125), se utiliza los siguientes parámetros: 9600 bits por segundo, 8 Bits, sin paridad y un bit de parada, esta configuración se encuentra predeterminada en el VI de LabView y debe ser igual en el puerto de la computadora.

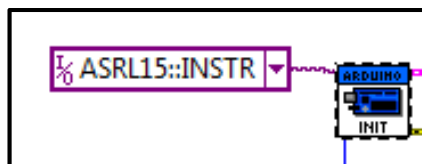


Figura 125. VI interactivo NeuroSky LabView

3.2.2. Análisis y selección de ondas en LabView

Para la adquisición de señales EEG (Electroencefalográficas), se utiliza el lector MindWave de NeuroSky (Ver Figura 25), de esta manera se puede visualizar varios tipos de ondas como las alfa, beta, gamma, theta y delta, como se puede observar en la

Figura 126, éstas ondas son adquiridas y amplificadas por el lector para comunicarse con el software mediante la conexión bluetooth que mantiene con el receptor, el cual se comunica con su software *“App Central for MindWave”*, de esta manera se realiza la comunicación del dispositivo.

Debido a que se requiere de estas señales para el proyecto, es necesario transferirlas a un software, el cual después de una investigación se consideró utilizar LabView de National Instrument, este software cuenta con VI's, que permiten la interacción entre éste y el lector MindWave, los elementos se logran comunicar, de manera que adquieren las ondas cerebrales deseadas, las mismas que son acondicionadas de tal manera que filtra el ruido emitido por diversas señales generadas en el cuerpo humano (Figura 126).

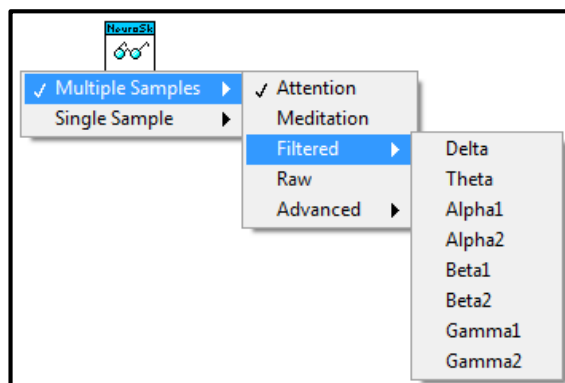


Figura 126. VI adquisición de tipos de ondas

Las señales adquiridas son estimuladas con estados de la mente, por esta razón el VI de LabView contiene señales filtradas como son la de meditación que corresponde a las ondas alfa y la atención que corresponde a las beta, a éstas se adicionan la señal de parpadeo, la cual no es una onda, pero puede ser útil al momento de realizar selecciones. El control se realiza con estas tres señales.

a) ***Onda alfa o meditación***

La onda alfa es adquirida y filtrada, de esta manera se obtiene la señal correspondiente a la meditación para el control del proceso. Esta señal se registra en LabView como una escala de alta y baja meditación registrada desde el 0 al 100 %, siendo el 0 % un estado de distracción completa y el 100 % un estado de meditación profunda; estas señales pueden variar de persona a persona, ya que algunos pueden llegar a controlar su estado de calma y otros no, por lo cual para controlar esta onda es necesario no tomar en cuenta la variación de la señal sino la habilidad del usuario de llegar a valores altos. Con este valor se puede trabajar en un sistema de control, aun así se requiere de más señales para poder controlar el mecanismo (Figura 127).

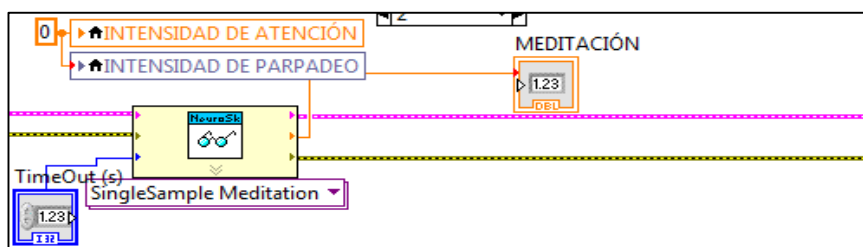


Figura 127. VI adquisición de ondas alfa – meditación

b) ***Onda beta o atención***

Para el control de la mano robótica, se requiere de varias señales, por lo cual se selecciona una de las más controlables que es beta, correspondiente a la atención, al igual que en la meditación, su registro cuenta con una escala de 0 a 100%. Al realizar las pruebas iniciales mediante esta onda, se observa que no es posible generar un nivel alto de meditación y atención al mismo tiempo, por tal motivo se separó la adquisición de cada una de las señales las cuales se escalaron para su uso. (Figura 128).

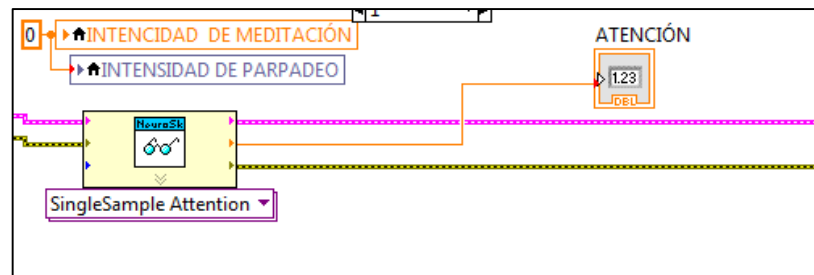


Figura 128. VI adquisición de ondas beta-atención

c) *Parpadeo*

En las pruebas realizadas a esta señal, se observa que tiene mayor intensidad a diferencia de las otras, por lo cual se considera su uso como una señal de selección y confirmación, para el proceso de acondicionamiento de esta señal, no fue igual que las otras, se trata de una señal registrada en base a la intensidad del parpadeo, siendo valores arbitrarios entre 0 a 300 unidades de amplitud, utilizando esta señal como un booleano, en estado de “*TRUE*” con los ojos abiertos y “*FALSE*” con los ojos cerrados, la misma que luego de las pruebas demostró un mejor control. Para el sistema de acondicionamiento de esta señal se requirió crear un subVI, para así lograr registrar con éxito las variaciones (Figura 129).

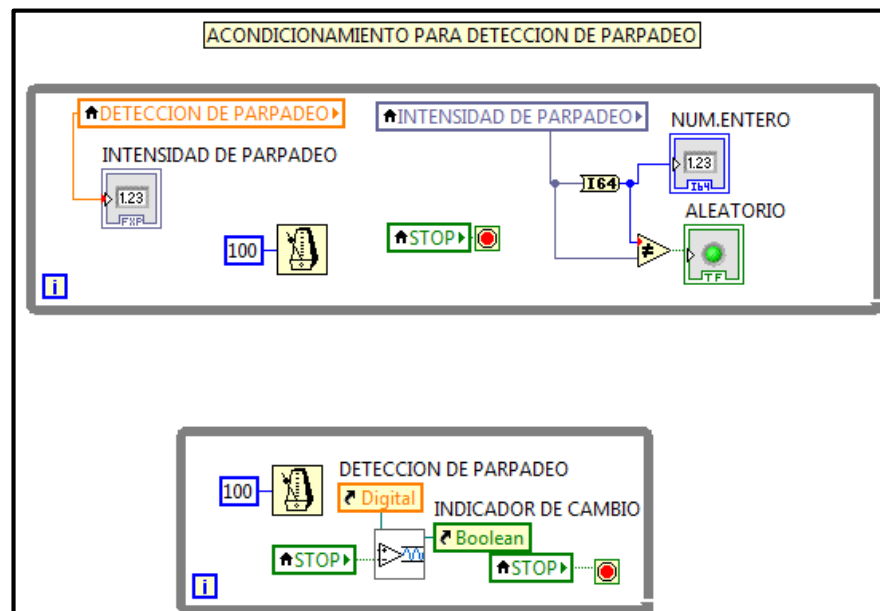


Figura 129. Acondicionamiento de señal para parpadeo

3.2.3. Acondicionamiento de señales

Se necesita de una programación que facilite el uso de las ondas mencionadas para tener un control a la salida, utilizando el parpadeo como una herramienta de selección por su estado (True/ False), se lo utiliza para escoger el movimiento que se desea realizar gracias a las líneas de programa para reconocimiento de parpadeo (Figura 130-Figura 131).

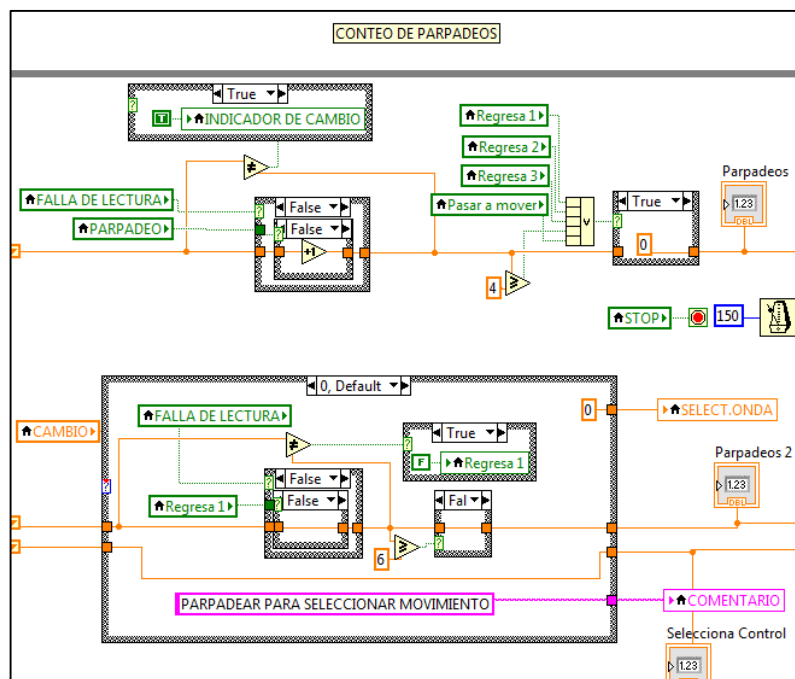


Figura 130. Acondicionamiento de señal de parpadeo

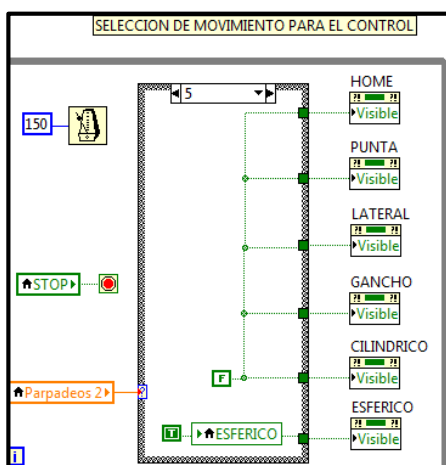


Figura 131. Selección de movimiento

De esta manera se puede seleccionar los diferentes movimientos: lateral, cilíndrico, esférico, punta y gancho, cada movimiento se programa con ángulos de flexión, los cuales se utilizan para la construcción de la mano; de esta manera se puede asegurar que no sobrepasen los ángulos, sea de forma mecánicamente o por software, Se procede a controlar la apertura y cierre de los movimientos, para esto se programa la elección entre la onda atención o meditación, ambas capaces de realizar un control (Figura 132).

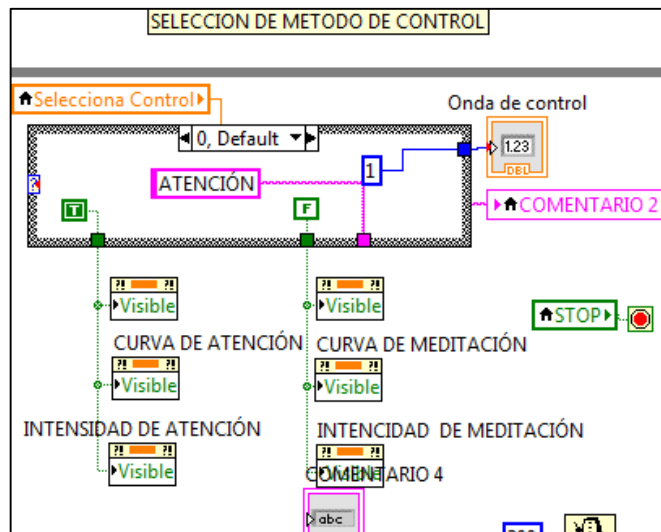


Figura 132. Selección de onda de control

Obtenido el movimiento y la onda que va a controlar la apertura y cierre, se procede a acondicionar la salida. En este punto hay que considerar que la salida de la onda, sea la atención o meditación son inestables, ya que muchos factores a nuestro alrededor influyen en ésta, se puede mejorar con la práctica pero aun así se programó un sistema de promediación y escalamiento (Figura 133), para evitar tomar en cuenta valores demasiados aleatorios y no dañar la estructura de la mano robótica con movimientos bruscos.

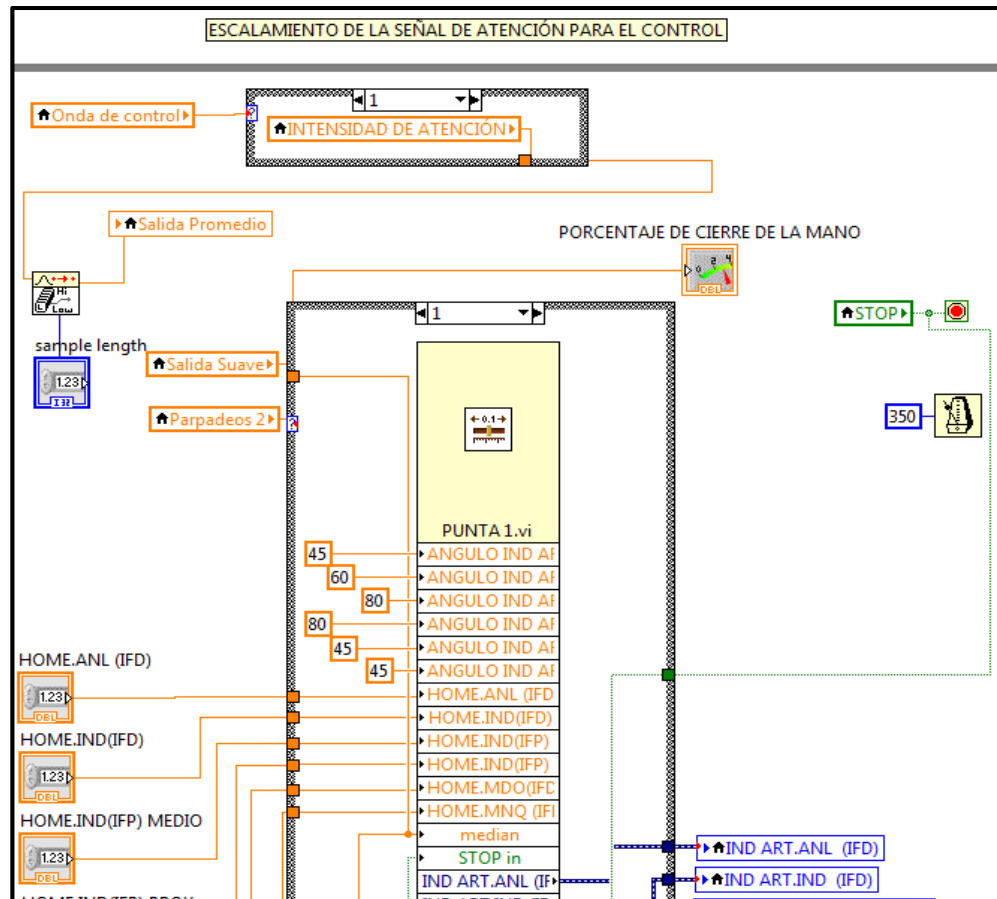


Figura 133. Sistema de escalamiento y promediación

3.2.4. Programación de movimientos controlados mediante ondas cerebrales

Ya configurado el puerto de enlace y acondicionada la señal de trabajo, se realiza la selección de los movimientos y salidas, para lo cual se requiere las ondas de meditación y atención, éstas controlan la apertura y cierre de los diferentes movimientos, los mismos que se programaron tomando como referencia los ángulos de limitación (Ver Tabla 10), los mismos que se dispusieron para que el movimiento de los eslabones, partiendo desde cero a cada uno de los movimientos mencionados; en el subVI de movimientos (Figura 134), se programó los 6 subVI's con los ángulos correspondientes a cada uno de los movimientos, junto con una señal de ingreso de porcentaje de avance el cual es necesario debido a que las ondas se presentan con gran variación en su magnitud y el programa que se creó afina la salida para contar con un control lineal de la mano.

Se realiza la programación de 7 salidas, para el dedo meñique, anular, índice, medio y pulgar, en el caso del pulgar se le designan 2 salidas por sus dos articulaciones conductoras y una auxiliar en el caso de que se requiera; las salidas están programadas para funcionar por la acción de las ondas cerebrales y manualmente.

Para comprobar el cierre de cada una de las falanges (Figura 135), se incluye una serie de líneas de programación que ayudan al movimiento y mejora el funcionamiento del programa, se tomó en cuenta que el programa tanto como la plataforma de control cuenta con más salidas PWM, necesarias para incluir mayor cantidad de actuadores y en si aumentar la cantidad de movimientos.

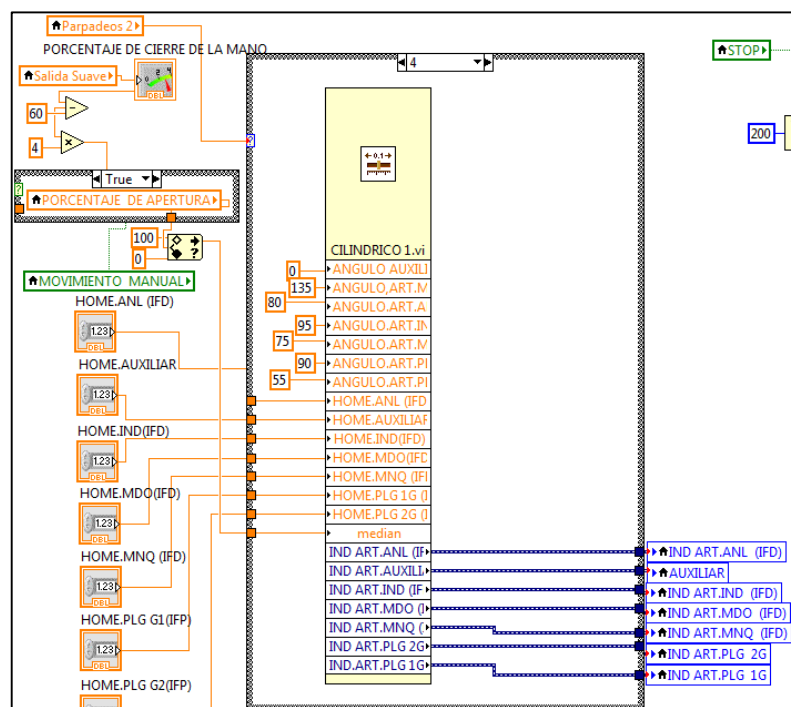


Figura 134. Rango de movimiento

El programa cuenta con una línea de reseteo para la plataforma arduino, evitando que entre en falla y produzca movimientos aleatorios, como se observa en la Figura 135, se encuentra configurada la salida digital 43 para este fin.

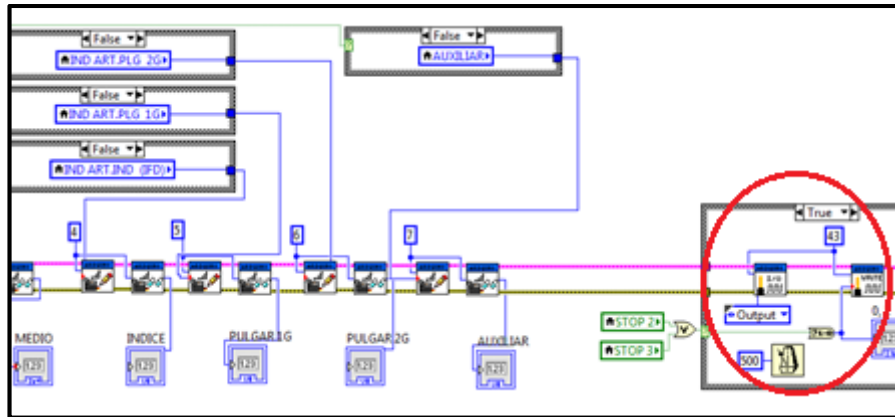


Figura 135. Salida a plataforma de control

3.2.5. Programación para salida de señales

Los ángulos de movimiento de cada eslabón se configura tomando en cuenta los cálculos realizados, estos son ángulos máximos hasta los cuales mecánicamente va a moverse la mano robótica. Al obtener la señal amortiguada se configura las salidas de la plataforma de control en los puertos 2,3,4,5,6,7,8, para los dedos meñique, anular, medio, índice, pulgar 1, pulgar 2 y auxiliar respectivamente (Figura 136).

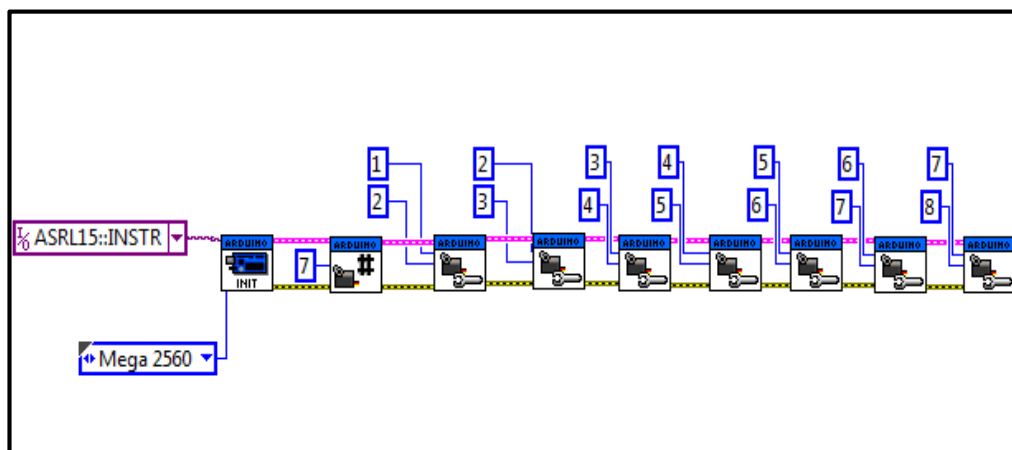


Figura 136. Programación de salidas LabView-arduino

Las salidas se especifica en la Tabla 34, no se utilizan los puertos 0 y 1, éstos son puertos de comunicación para transferencia de datos y salida PWM, ya que generan perturbaciones en su ancho de pulso provocando problemas en el control de mecanismos varios.

Tabla 34.
Configuración de salidas

Puerto PWM arduino	Elemento a controlar
2	Meñique
3	Anular
4	Medio
5	Índice
6	Pulgar base 1
7	Pulgar base 2
8	Auxiliar (canal y servomotor)

3.3. Configuración de pantallas

Se dispone de tres pantallas diferentes, de las cuales se presenta un resumen a continuación y una descripción más detallada en la siguiente sección:

- Menú principal: esta es la pantalla principal, la primera en abrirse cuando se ejecuta el programa y la última en aparecer.
- Control: esta es la pantalla en la cual se ejecuta la selección y control por ondas cerebrales.
- Análisis de ondas: en esta pantalla se practica con las ondas antes programadas y se elige los rangos de trabajo para cada una.

3.3.1. Pantalla (menú principal)

Esta pantalla es la primera que se abre al ejecutarse el programa y la última en cerrarse al detenerlo, cuenta con dos subprogramas los cuales son control y análisis de ondas (Figura 137), además dispone de un botón de parada el cual será capaz de detener el programa de ser necesario, reiniciando la plataforma de control para evitar fallas en el mismo, esto se configuró en la línea de salidas de arduino.



Figura 137. Pantalla menú principal

3.3.2. Pantalla (análisis de onda)

La pantalla análisis de onda permite al usuario practicar con las ondas programadas: meditación, atención y adicionalmente el parpadeo, la finalidad es adquirir habilidad de control sobre sobre estas ondas y en sí en la mano robótica o cualquier mecanismo que se utilice, es necesario porque la práctica permitirá tener un mejor control sobre las ondas (Figura 138).

Dispone de una selección manual para ondas de atención, meditación y parpadeo, en la opción de parpadeo se puede realizar: el parpadeo suave (es un parpadeo ligero semejante a los realizados inconscientemente) y parpadeo fuerte (un parpadeo similar al de una reacción por una flash de cámara); poder diferenciar ambos parpadeos es esencial para el control que se realizará posteriormente. De igual manera la pantalla “*análisis de onda*”, cuenta con un botón para regresar a la pantalla principal o “*STOP*” para detener el programa de ser necesario, éste último desplegando la pantalla “*menú principal*” antes de detenerse.



Figura 138. Pantalla principal prueba

3.3.3. Pantalla (control)

La pantalla control se basa en la selección del movimiento, al ingresar en esta pantalla el programa solicita seleccionar los tipos de movimientos es decir: punta, lateral, cilíndrico, esférico y gancho; se incluyó la posición home, la cual es una posición en la que la mano está abierta, desde esta posición partirán todos los movimientos.

Designado el movimiento el programa solicita seleccionar la onda con la cual se realiza el control sea por atención o meditación, se eligen mediante parpadeos que alternan ambas opciones (Figura 139).



Figura 139. Pantalla de control

La selección del movimiento y la onda de control, se realiza mediante parpadeos, el control de la apertura y cierre de la mano con atención o meditación, de esta forma se tiene un control basado en la utilización de ondas cerebrales, por lo tanto mientras más se concentran o meditan están más cerca del cierre total de la mano, hasta llegar a los ángulos máximos descritos.

La apertura y cierre de la mano será directamente proporcional a la intensidad de la onda atención o meditación, posteriormente este control finaliza cuando el usuario presiona el botón “*seleccionar agarre*”, con esto retorna a la opción de selección del movimiento, cada vez que lo requiera pudiendo así practicar el control constantemente.

3.3.4. Pantalla (calibración de home)

Cuenta con una opción adicional, se la puede ubicar en la pantalla de control movilizándolo el deslizador inferior hacia la izquierda, la calibración del home, es decir el punto desde el cual la mano parte hacia el resto de los movimientos, puede variar en el transcurso de su uso, debido a que las bandas elásticas que extienden a los eslabones seden con el tiempo, esto ayuda a que la mano tenga un home variable, permitiendo modificar su posición de inicio sin que afecte a los ángulos de flexión y extensión (Figura 140).



Figura 140. Pantalla de calibración de home

En cada una de las pantallas se colocó un botón de parada “**STOP**”, para poder detener el proceso en cualquier momento y “**menú**” para regresar al programa principal. Además cuenta con un botón de “**movimiento manual**” (Figura 141), el cual ayuda a mover la mano para comprobar si el movimiento seleccionado es el que se necesita, ya que está programado para realizar cualquier movimiento, siendo necesario cambiar los ángulos descritos en el programa (Ver Figura 133).



Figura 141. Pantalla de movimiento manual

4. Integración sistema de control por ondas cerebrales-mano robótica con arquitectura antropomórfica

Montada la mano en su modular (Ver Figura 106) y realizada la aplicación que permite la obtención de las señales cerebrales mediante el lector, se procede con la conexión de la plataforma de control a los servomotores, los cuales serán conectados con cada hilo nylon para el movimiento del dedo correspondiente.

4.1. Conexión de la mano robótica a servomotores

Para el soporte de la cantidad a utilizar de servomotores, se diseñó una estructura, que permite la fijación de los mismos y el direccionamiento del hilo, a través de tubos entrecruzados como se observa en la Figura 142, Se consideró sobredimensionar la capacidad de anclaje de servomotores, con la intención de que no sea una limitante en el caso de requerir otros adicionales.

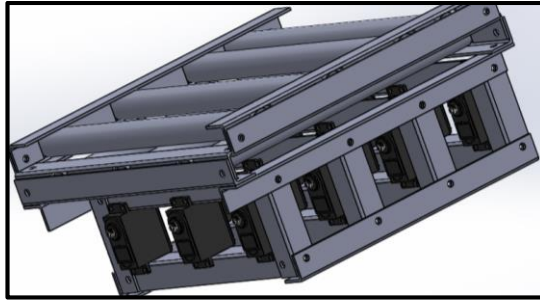


Figura 142. Estructura de servomotor

Una vez anclado los servomotores a la estructura, se diseña una polea que se unirá al eje de cada actuador, en la cual se podrá sujetar el hilo y mediante el giro de la misma, brindará la tensión necesaria para flexionar el dedo conectado (Figura 143).

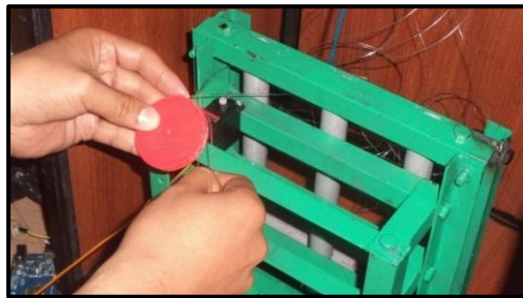


Figura 143. Conexión de poleas a servomotor

En cada polea conectada al servomotor se puede sujetar un hilo de nylon, el cual se encarga de transmitir el movimiento, en el caso de que se requiera unir dos hilos nylon, se diseñó conectores que facilitan la conexión entre ellos, lo cual permite un acople rápido entre el servomotor y la mano robótica (Figura 144).



Figura 144. Conexión de servomotores con mano robótica

4.2. Enlace de comunicación arduino

Se configura el COM 15 como puerto de comunicación, este enlace se realiza entre LabView y la plataforma de control arduino, permitiendo tener un control PWM, En la Figura 145 se observa el VI inicial (1), el cual permite configurar los parámetros correspondientes a la comunicación, el siguiente (2), se encarga de configurar el número de servomotores que se van a utilizar, finalmente el ultimo (3), se encarga de la configuración del servomotor, es decir el puerto de salida y el número que se le asignará a cada uno.

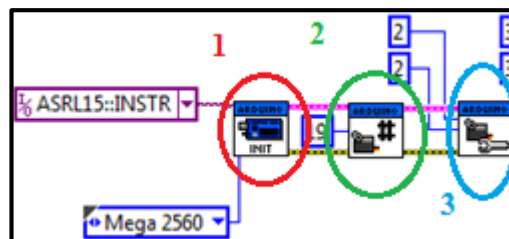


Figura 145. Puerto de enlace arduino

La configuración se realiza con el fin de comunicar la aplicación diseñada, con la plataforma de control arduino, la cual es la conexión directa con la mano robótica, las salidas se distribuyeron tomando en cuenta los puertos designados para cada uno de los dedos (Ver Tabla 34); en la Figura 146 se puede observar el cable blanco, el cual conecta una salida digital con el pin de reseteo, sirve para evitar que el programa se sature y entre en falla, esta salida se encuentra programada como la número 43 de las salidas digitales y mencionada anteriormente (Ver Figura 135).



Figura 146. Puertos de salida en la placa de control

4.3. Conexión de salidas PWM con servomotores de control

La conexión de las salidas de control de arduino a los servomotores, se realiza tomando en cuenta el puerto de comunicación correspondiente a cada dedo (Ver Tabla 34), dejando un servomotor en espera, a éste se lo ha denominado auxiliar, el cual será usado como reemplazo, las salidas se encuentran marcadas con el nombre de la falange designada, los servomotores montados en la estructura diseñada (Figura 147) y conectados a su salida respectiva como se muestra en la Figura 148.

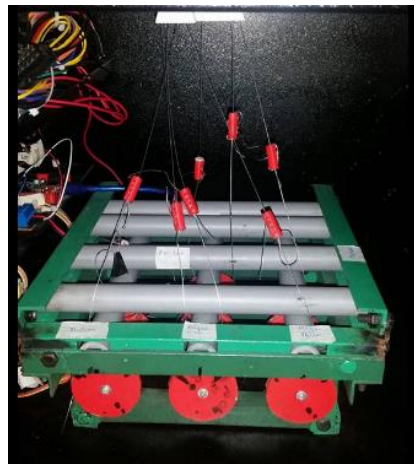


Figura 147. Conexión de salidas PWM a servomotores



Figura 148. Conexión de salidas PWM

Finalizadas las conexiones pertinentes, se procede a energizar todos los equipos y realizar las pruebas respectivas de movimiento (Figura 149).

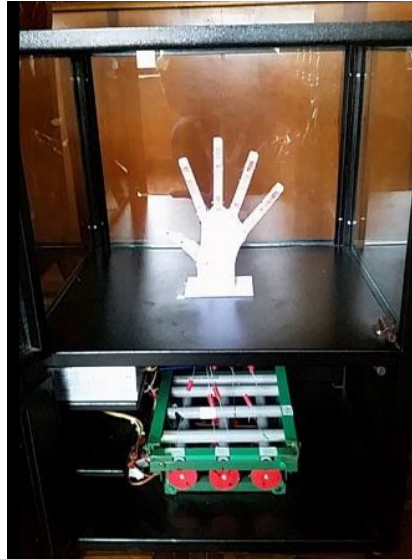


Figura 149. Mano antropomórfica armada

CAPITULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

1. Pruebas mecánicas - eléctricas y de calibración

Para comprobar el correcto funcionamiento del control mediante las ondas cerebrales y la movilidad de la mano robótica, se procede a realizar pruebas de su comunicación y funcionamiento.

1.1. Pruebas de comunicación

Es indispensable realizar pruebas de comunicación entre los dispositivos y la aplicación; la correcta conexión se puede verificar de la misma manera para las plataformas MindWave como para arduino, a continuación se describen los pasos a seguir:

1.1.1. Comunicación MindWave-LabView

Para establecer la comunicación del puerto primero se debe comprobar su conexión en el administrador de dispositivo “AD” en la Figura 150, esto se realiza para evidenciar la correcta instalación de los drivers, de darse el caso que apareciera una advertencia de peligro, se debe proceder con la reinstalación de los mismos.

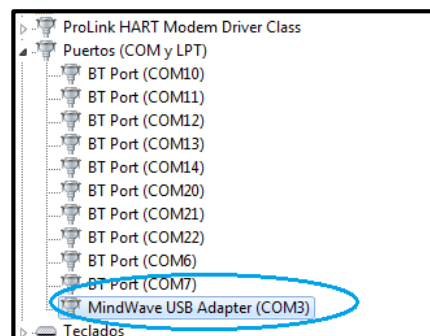


Figura 150. AD (MindWave)

Una vez establecida la comunicación del dispositivo hacia la pc, el siguiente paso es comprobar su conexión con LabView, esto se realiza mediante el programa “**NI-MAX**”; primero abrir el icono ubicado en el escritorio de la pc (Figura 151), una vez arrancado el programa desplegar la pestaña “**My System**”, luego “**Serial & Parallel**”, en la cual se busca el puerto 3 (Figura 152), al ingresar en este puerto es necesario validar la conexión con botón llamado “**Validate**”, el cual desplegará un mensaje de información sobre la pantalla, indicando si se abrió o no la sesión, lo que permite establecer una conexión con los dispositivos externos (Figura 153).

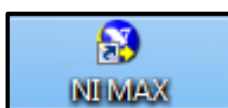


Figura 151. Icono de acceso para programa NI-MAX

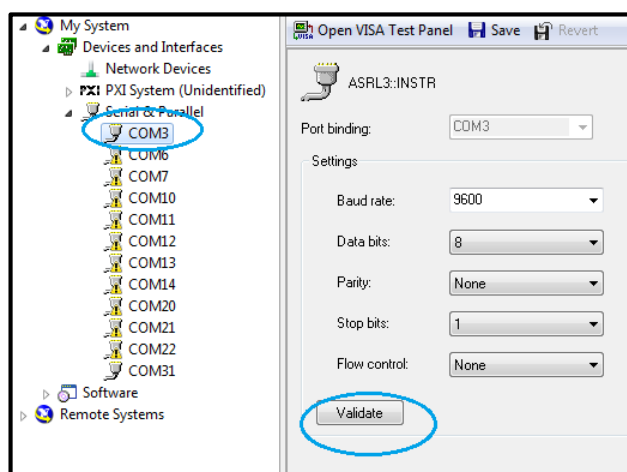


Figura 152. NI-MAX puerto COM 3

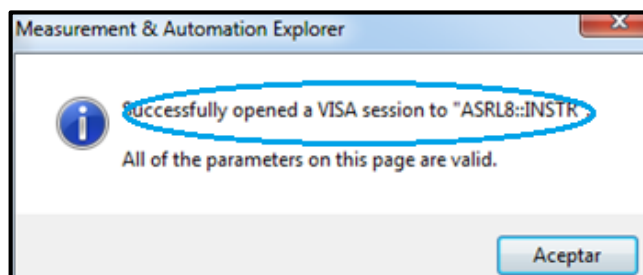


Figura 153. NI-MAX mensaje de sesión

Estos pasos aseguran la comunicación entre el NeuroSky y LabView, si existe algún problema de conexión, el software emitirá un mensaje para notificar del mismo. Adicional se ha colocado en la aplicación una alarma óptica de “Falla de lectura”, para notificar si existe dificultades con el sensor, o por la zona de contacto (Figura 154).



Figura 154. Alarma óptica de falla de lectura

Otra prueba de conexión se realiza ejecutando la aplicación “*menú principal*” (Figura 155), al momento de iniciar la aplicación se enlaza el sensor con LabView, esto se puede observar ya que los led’s del USB MindWave y del lector de ondas, cambian de color de rojo (Figura 156) a azul (Figura 157), lo cual es un indicador de conexión, si uno de los dos se encuentran en rojo la conexión no se ejecutará.



Figura 155. Programa menú principal en ejecución



Figura 156. Sensor y USB MindWave sin conexión



Figura 157. Sensor y USB MindWave con conexión

Realizando todos los pasos se podrá asegurar un intercambio de datos entre el sensor y LabView, si uno de ellos no se cumple, no se lograría el funcionamiento correcto del dispositivo.

1.1.2. Comunicación LabView-arduino

Al igual que con el dispositivo MindWave se debe comprobar la correcta conexión en el “AD” (Figura 158), esto se realiza para corroborar la instalación de los drivers y probar la compatibilidad del sistema operativo.

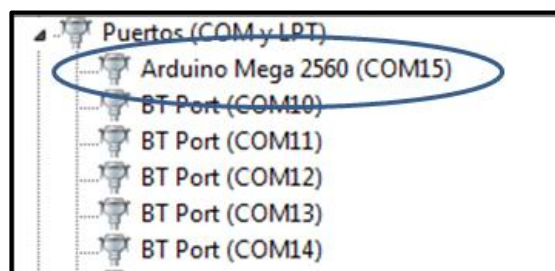


Figura 158. AD (arduino)

Se comprueba la conexión del dispositivo con LabView, esto se efectúa en el programa “*NI-MAX*”; se ejecuta el programa desde el icono ubicado en el escritorio (Ver Figura 151), se despliega la pestaña “*My System*”, luego “*Serial & Parallel*”, se busca y selecciona el puerto deseado (Figura 159) y de la misma forma que la anterior se valida la conexión del puerto con “*Validate*”.

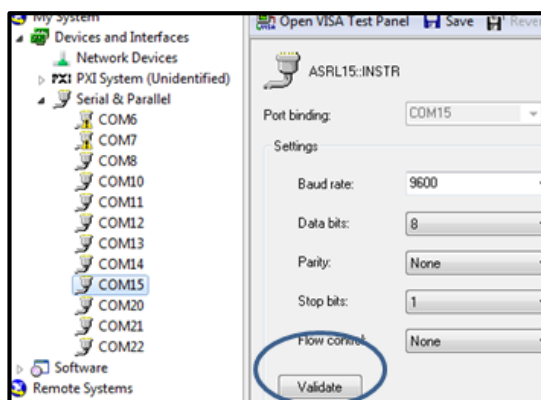


Figura 159. NI-MAX puerto COM 15

Ya ejecutado el programa es necesario comprobar en este punto su conexión, primero se inicia la aplicación “**menú principal**” (Ver Figura 155); al momento que inicia la aplicación se enlaza con la plataforma arduino, cuando no cuenta con una comunicación constante entre el arduino mega y LabView los led’s RX y TX de la placa estarán apagados (Figura 160), mientras que cuando se encuentra vinculado con LabView estos led’s parpadean constantemente (Figura 161).



Figura 160. Arduino mega RX y TX apagados sin conexión

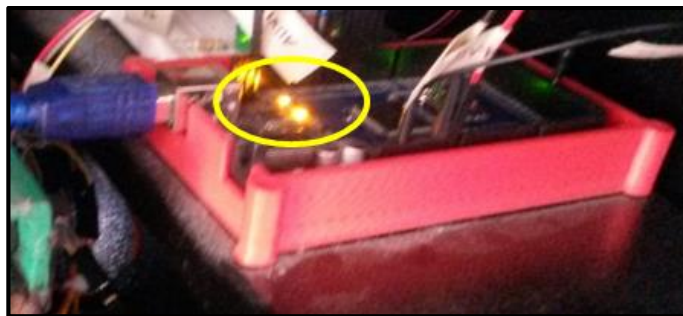


Figura 161. Arduino mega RX y TX encendidos con conexión

Es necesario resetear el módulo, ya que posee una falla de fábrica, la cual afecta a las salidas PWM, para lo cual se colocó un cable que resetea la plataforma antes de finalizar la aplicación.

1.2. Comparación entre ángulos seleccionados y movilizados

Para comprobar la transmisión de movimiento, se midió el ángulo de desplazamiento de las falanges con los ángulos enviados desde LabView a través de los servomotores, de esta manera se obtiene la Tabla 35.

Tabla 35.
Comparación de ángulos, generados y desplegados

Falange /Ángulo	Meñique			Anular			Medio			Índice			Pulgar					
	Articulación	Falanges		Articulación	Falanges		Articulación	Falanges		Articulación	Falanges		Articulación	Falanges				
Programa	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90
Servomotor	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90
Mano	30	59	89	30	58	88	29	59	89	28	57	88	28	57	87	29	58	87

Como describe la Tabla 35, los ángulos enviados por el programa no son los mismos desplazados por las falanges, esto se debe al proceso de transmisión, en el cual la tensión del hilo nylon hace que se produzcan desplazamientos adicionales, al igual que a la retracción de los elásticos que afecta a su movilidad.

1.3. Pruebas de control y calibración de movimientos

A continuación, se describirá el proceso de calibración de home y movimientos manuales de la mano robótica.

1.3.1. Calibración de home

Previo al movimiento de la mano robótica, se debe calibrar la posición home, ya que es la referencia de posicionamiento para los movimientos, se pueda desplazar el punto home programado a otra posición, conservando su ángulo de desplazamiento sin modificación, para lo cual, se debe abrir la aplicación “*menú principal*”, luego la pantalla “**control**”, se procede a movilizar la barra de desplazamiento inferior hacia la izquierda con el mouse, hasta llegar a lo mostrado en la Figura 162.

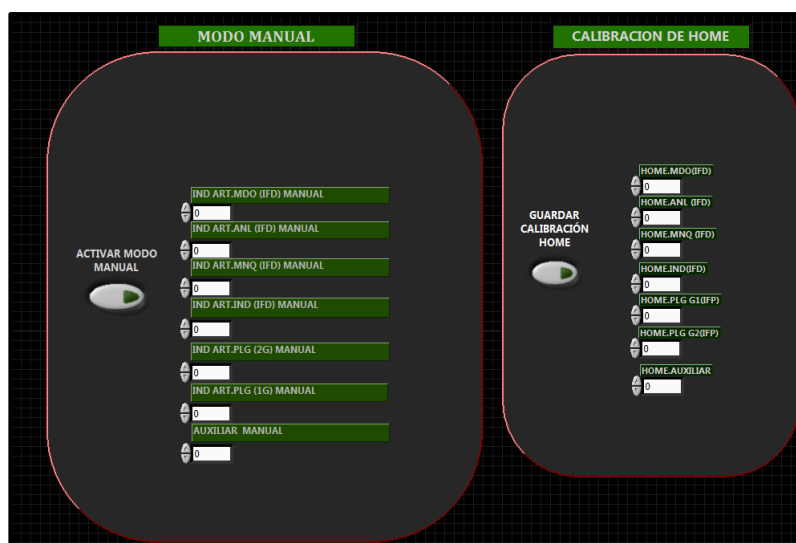


Figura 162. Modo manual y pantalla de calibración

En la Figura 162, se observa la pantalla de movimientos manuales, en esta se debe activar el “*modo manual*”, para colocar cada una de las falanges en las posiciones que se crean convenientes designarlas como home, ya seleccionados los ángulos se procede a presionar el botón “*guardar calibración home*”, inmediatamente aparecen los ángulos seleccionados en modo manual en cada una de las casillas pertenecientes al home, esto significa que los ángulos ya fueron guardados con éxito, ahora se procede

a desactivar los botones “*guardar calibración home*” y “*activar modo manual*” respectivamente, de esta forma se puede movilizar con el mouse a la pantalla de control y retomar la rutina normalmente. Estos ángulos de inicio para movimiento home, se guardan en un registro de LabView para poder utilizarlos en la siguiente ejecución del programa.

1.3.2. Prueba manual y calibración de movimientos

En esta sección se realiza pruebas de movilidad y configuración de movimientos, una vez comprobado que el sistema se moviliza, lo siguiente es configurar los ángulos de desplazamiento, para esto es necesario posicionar manualmente la mano a las posiciones respectivas, a continuación se muestra la posición física de la mano y los ángulos generados por el programa.

a) *Posición home*

Ésta es la base en la cual inician todos los movimientos, obviamente sus ángulos son de 0° en todas las falanges, Éstos ángulos fueron grabados en el SubVI de movimientos (Figura 163), estos serán llamados cuando el programa entre en modo operación.

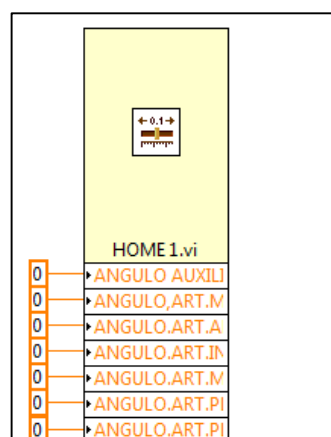


Figura 163. SubVI movimiento home

Luego de grabar los movimientos, se observa que la base o la posición inicial se ubica en los ángulos de 0° para cada falange (Figura 164).



Figura 164. Posición home

b) *Posición punta*

En este movimiento se ha seleccionado los siguientes ángulos (Tabla 36), estos ángulos fueron grabados en el subVI de movimientos (Figura 165), para ser ejecutados cuando el programa lo requiera.

Tabla 36.
Ángulos para el movimiento punta

PUNTA						
	Meñique	Anular	Medio	Índice	(Pulgar) Articulación Carpometacarpiana	Pulgar
Ángulos	0°	0°	0°	85°	60°	40°

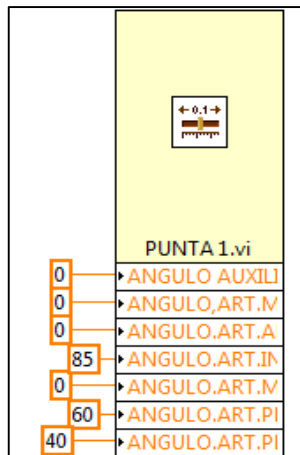


Figura 165. SubVI movimiento punta

Grabado los ángulos, se realizan las pruebas de movilidad con la opción de “*movimientos manuales*”, seleccionar “*punta*” (Figura 166), como se observa cuenta con un control de porcentaje de cierre, el cual desplaza los dedos desde 0 hasta los ángulos designados. En la Figura 167, se observa que la mano parte de la posición home, moviliza el dedo índice lentamente hasta llegar a la ubicación deseada con un ángulo de 85 °; el pulgar gira y se flexiona al mismo tiempo con 60 y 40° respectivamente, hasta que ambos se encuentran en contacto.



Figura 166. Modo manual y pantalla de calibración (Punta)



Figura 167. Movimiento punta

c) *Posición lateral*

Para la posición lateral se ha seleccionado los siguientes ángulos (Tabla 37), estos son grabados en el SubVI de movimientos para ser ejecutados posteriormente (Figura 168).

Tabla 37.
Ángulos para movimiento lateral

LATERAL						
	Meñique	Anular	Medio	Índice	(Pulgar)Articulación Carpometacarpiana	Pulgar
Ángulos	0°	0°	0°	95°	65°	0°

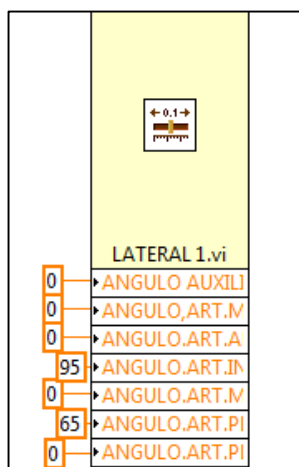


Figura 168. SubVI movimiento lateral

Luego de haberse grabado los movimientos, se debe realizar las pruebas de desplazamiento con la opción “*movimientos manuales*”, seleccionar “*lateral*” (Figura 169); cuenta con un control de porcentaje de cierre, el cual moviliza la mano desde 0 hasta los ángulos designados. Este movimiento consiste en el desplazamiento del dedo índice con un ángulo de flexión de 95° , mientras que el pulgar se flexiona hasta entrar en contacto con la parte lateral del índice con 65 grados, esto se puede observar en la Figura 170.



Figura 169. Modo manual y pantalla de calibración (Lateral)



Figura 170. Movimiento lateral

d) ***Posición gancho***

En este caso se ha seleccionado los ángulos descritos para la posición gancho en la Tabla 38, estos fueron grabados en el SubVI de movimientos para ser ejecutados de requerirse (Figura 171).

Tabla 38.
Ángulos para movimiento gancho

GANCHO						
	Meñique	Anular	Medio	Índice	(Pulgar) Articulación Carpometacarpiana	Pulgar
Ángulos	75°	80°	75°	50°	0°	0°

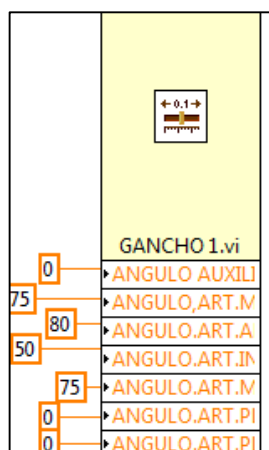


Figura 171. SubVI movimiento gancho

Luego de haberse grabado los movimientos, se realiza las pruebas de desplazamiento con la opción “*movimientos manuales*”, seleccionar “*gancho*”, como se puede observar en la Figura 172 cuenta con un control de porcentaje de cierre, el cual desplaza la mano desde 0 hasta los ángulos designados. En la mano se movilizan el dedo meñique, anular, medio e índice con ángulos de 75 ,80 ,75 y 50° respectivamente como se observa en la Figura 173.



Figura 172. Modo manual y pantalla de calibración (Gancho)



Figura 173. Movimiento gancho

e) *Posición cilíndrica*

Para movimiento cilíndrico se ha seleccionado los siguientes ángulos (Tabla 39), estos fueron grabados en el SubVI de movimientos para ser utilizados como límites de desplazamiento:

Tabla 39.
Ángulos para movimiento cilíndrico

CILÍNDRICO						
	Meñique	Anular	Medio	Índice	(Pulgar) Articulación Carpometacarpiana	Pulgar
Ángulos	75°	80°	135°	95°	90°	55°

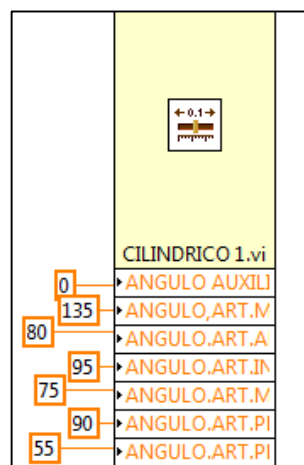


Figura 174. SubVI movimiento cilíndrico

Luego de haberse grabado los ángulos, se realiza las pruebas de desplazamiento con la opción “*movimientos manuales*”, seleccionar cilíndrico (Figura 175), como se observa en la figura cuenta con un control de porcentaje de cierre, este manipula los dedos desde 0 hasta los ángulos designados. Los dedos se movilizan hasta formar un cilindro en el contorno palmar de la mano, éstos se puede observar en la Figura 176.



Figura 175. Modo manual y pantalla de calibración (Cilíndrico)



Figura 176. Movimiento cilíndrico

f) *Posición esférica*

Para poder desplazar la mano robótica a la posición esférica se ha seleccionado los ángulos para este movimiento descritos en la Tabla 40, éstos se grabaron en el SubVI de movimientos (Figura 177) para ser ejecutados:

Tabla 40.
Ángulos para movimiento esférico

ESFÉRICO						
	Meñique	Anular	Medio	Índice	(Pulgar) Articulación Carpometacarpiana	Pulgar
Ángulos	50°	65°	90°	65°	45°	50°

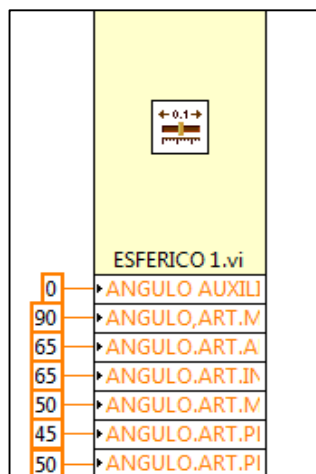


Figura 177. SubVI movimiento esférico

Luego de haber grabado los movimientos se realiza pruebas de desplazamiento con la opción “*movimientos manuales*”, seleccionar esférico, como se observa en la Figura 178, cuenta con un control de porcentaje de cierre, el cual moviliza cada falange desde 0 hasta los ángulos designados. Los dedos se movilizan todos al mismo tiempo hasta formar una forma esférica en el contorno palmar de la mano como se observa en la Figura 179.



Figura 178. Modo manual y pantalla de calibración (Esférico)



Figura 179. Movimiento esférico

2. Pruebas de integración control cerebro-mano robótica con arquitectura antropomórfica

Para la prueba entre el lector cerebral y la mano robótica con arquitectura antropomórfica, se procede con la conexión de los dispositivos de lectura de ondas y control de servomotores con LabView, luego se ejecuta la aplicación “*control*”, en la pantalla selecciona los movimientos mediante parpadeos (Figura 180), seleccionado el movimiento deseado se procede a marcarlo como el movimiento de trabajo, esto se realiza con tres parpadeos fuertes, se encenderá los led’s (Activación 1-2-3) (Figura 181).



Figura 180. Selección de movimientos con parpadeo



Figura 181. Marcado movimiento como movimiento de trabajo

Ya marcado el movimiento lateral, se selecciona la onda de trabajo, sea esta de atención o de meditación, al igual que la anterior esta se marca como la de trabajo mediante 3 parpadeos fuertes, para poder comenzar con el control en base a las ondas cerebrales, es necesario un parpadeo adicional (Figura 182), el posicionamiento de la mano a los ángulos del movimiento lateral se realizan dependiendo del nivel de atención que se preste, es decir mientras más cercano este al 100 % de atención, la mano se acercará más al punto final del movimiento seleccionado, esto también se observar en la escala de *“porcentaje de cierre de la mano”*, además para analizar las tendencias de la onda utilizada se tomará como referencia la gráfica generada por el programa.



Figura 182. Control mediante ondas cerebrales de agarre lateral

Mientras tanto la mano comienza su cierre proporcional a la atención prestada, iniciando desde el home, este movimiento se observa en la Figura 183 donde comienza su cierre hasta posicionarse en los ángulos definidos para esta posición. Al igual que para el cierre de la mano, las ondas son proporcionales al porcentaje de cierre y el ángulo de apertura, hasta su posición final.

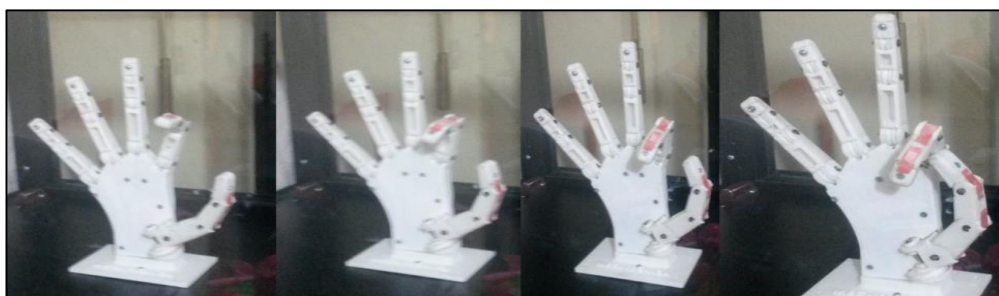


Figura 183. Cierre proporcional de movimiento lateral

3. Prueba general de funcionamiento

En esta sección, se describe el proceso completo que se realiza para poder controlar la mano robótica con arquitectura antropomórfica utilizando el lector de ondas cerebrales.

3.1. Comunicación MindWave, arduino con LabView

Inicia con la conexión de los dispositivos, el cable del modular que conecta la plataforma arduino a la PC (Figura 184), el USB MindWave a la PC (Figura 185); se comprueba que el administrador de dispositivos detecte al lector y la plataforma (Figura 186), el primero en el (COM 15) y el segundo en el (COM 3) esto se puede observar en la Figura 186.



Figura 184. Conexión de la PC al modular



Figura 185. Conexión de la PC al modular

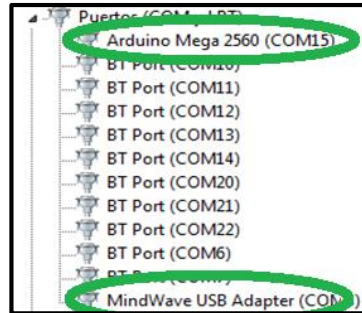


Figura 186. Administrador de dispositivos

Se procede a abrir el programa “*NI-MAX*” de LabView, en éste se comprueba que los dispositivos se encuentren en total conexión con el software y a su vez los reconozca, esto se comprueba presionando la tecla “*Validate*” para cada puerto (Figura 187), como la sesión está abierta aparece un mensaje de sesión exitosa (Figura 188).

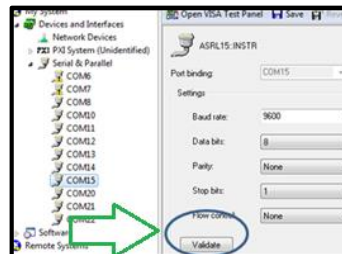


Figura 187. Validando con NI –MAX

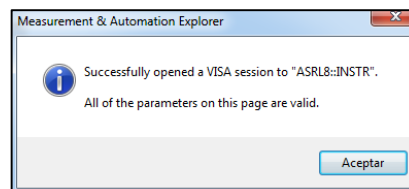


Figura 188. Sesión abierta

Hasta este momento se ha comprobado la conexión con los dispositivos, sin errores ni fallas.

3.2. Apertura de programa y selección de movimiento

En la carpeta “*control por onda cerebrales*”, localizada en el escritorio, abrir el VI “*Menú principal*” (Figura 189), al iniciar este programa si los led’s cambian de rojo a azul (Figura 190 - Figura 191) el dispositivo se encuentra vinculado.

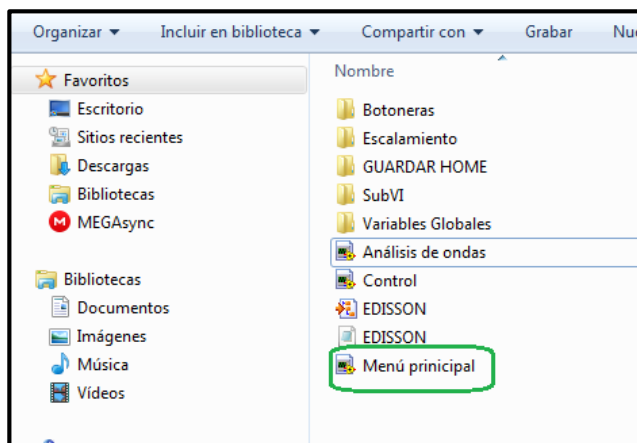


Figura 189. Carpeta en escritorio

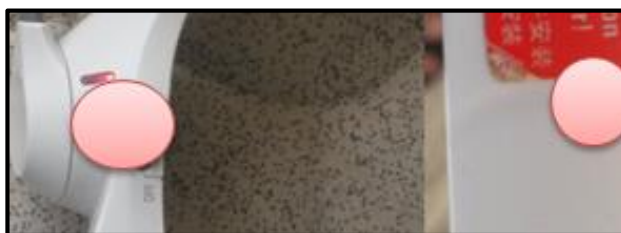


Figura 190. Lector y USB MindWave sin conexión



Figura 191. Sensor y USB MindWave con conexión

La pantalla menú, cuenta con tres opciones como se puede ver en la Figura 192, el modo análisis de ondas, control y stop, en este caso solo se probará aquella que tenga un control directo sobre la mano robótica.



Figura 192. Pantalla principal “Menú principal”

Ingresar a la pantalla de “*análisis de ondas*”, donde se registra los rangos de funcionamiento para éstas, los cuales se designan por el usuario (Figura 193).



Figura 193. Ingreso de rangos de control de ondas cerebrales

Se debe ingresar a la pantalla control (Figura 194), en ésta se escoge un movimiento mediante parpadeos suaves.

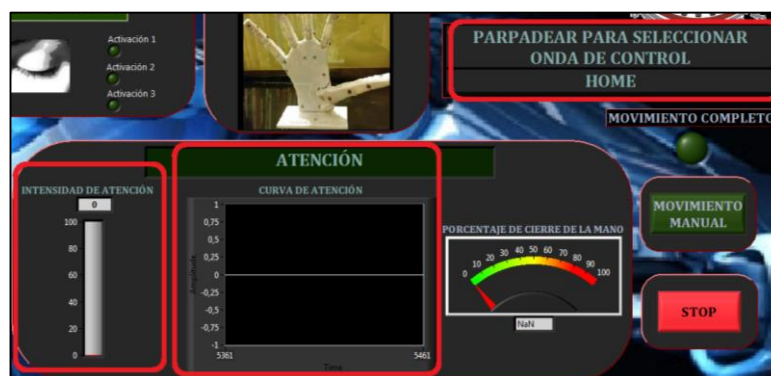


Figura 194. Pantalla control

Se elige un movimiento (Figura 195), para seleccionarlo es necesario parpadear fuerte 3 veces como se ve en la Figura 196, hasta este momento se ha comprobado que el parpadeo funciona perfectamente sin falla, caso contrario se encendería el led “*Falla de lectura*” localizado en la Figura 196, tampoco ha presentado problemas de selección de movimiento, por lo cual hasta esta sección no existe novedades con el proceso de manipulación.



Figura 195. Selección de movimiento

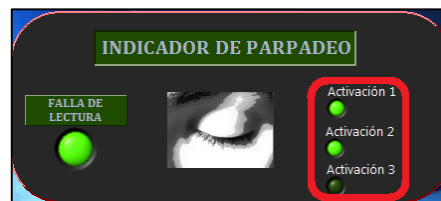


Figura 196. Activación, registro de parpadeos fuertes

3.3. Selección de onda de control

Seleccionado el movimiento a realizar, inmediatamente entra en ejecución la selección de onda de control; a menos que exista algún problema en el proceso, para el control se tienen dos ondas a disposición atención y meditación, se utilizará nuevamente el parpadeo para la selección, en la pantalla superior aparecerá la frase “*Seleccionar onda de control*” (Figura 197) para informar al usuario el proceso que debe realizar.

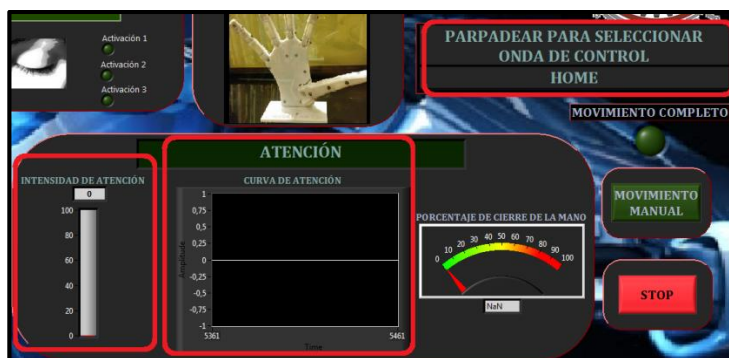


Figura 197. Selección de onda para el control

Hasta este punto el sistema trabaja normalmente, ahora el siguiente paso es el control de la mano mediante las ondas cerebrales. Una vez seleccionada la onda atención o meditación, esta tomará los rangos de control ingresados anteriormente para cada una de ellas, un parpadeo adicional es necesario para poder continuar con la siguiente parte del proceso llamado **“Control cierre-apertura”**.

3.4. Control cierre-apertura con onda cerebral

En este momento el programa registra la variación de la onda seleccionada, sea esta atención o meditación, escalando el valor de registro de la onda de 0 a 100% con el porcentaje de salida, esto permite al usuario controlar el desplazamiento de la mano hacia la posición final, la cual será el movimiento seleccionado.

Al llegar a la posición final del movimiento se encenderá el led llamado **“Movimiento Completo”**, esto significa que la mano ha completado su trayecto totalmente (Figura 198).



Figura 198. Led movimiento completo

La mano se cierra mientras mayor sea la magnitud de la onda utilizada y se abre cuando disminuya, por lo cual la trayectoria seguida hacia el movimiento seleccionado variará según como lo disponga el usuario (Figura 199)

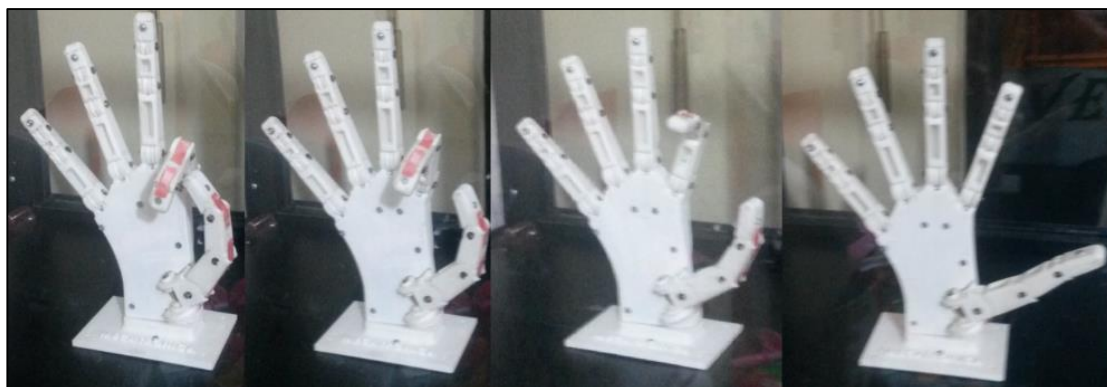


Figura 199. Apertura y cierre de la mano

4. Validación de Hipótesis

En la validación de la hipótesis se utiliza el método del chi cuadrado para el análisis de las tablas descritas a continuación, el estudio de los valores en ellas suponen que son independientes, esto es bajo la hipótesis nula de independencia y la alternativa. Si los valores resultan ser dependientes la hipótesis nula se rechaza, caso contrario se acepta. Los siguientes análisis se realizan en base a las definiciones descritas por (Medwave, 2011).

4.1. Planteamiento de la hipótesis

¿Mediante las ondas cerebrales es posible controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica?

4.2. Planteamiento de la hipótesis alternativa y nula

Hipótesis alternativa (H1): Mediante el uso de ondas cerebrales se puede llegar a controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica.

Hipótesis nula (H0): Mediante el uso de ondas cerebrales no se puede llegar a controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica.

4.3. Designación de variables

Variable dependiente: Control de mano robótica con arquitectura antropomórfica

Variable independiente: Dominio en el uso de ondas cerebrales

4.4. Valores observados

En la Tabla 41 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a nueve personas: seis hombres y tres mujeres; con la selección de cinco diferentes movimientos, selección de dos ondas cerebrales a utilizar y el desplazamiento sobre cada trayectoria de los movimientos punta, lateral, gancho, cilíndrico y esférico. Se analiza la relación de dependencia que existe entre el uso de las ondas cerebrales y el control del prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica.

Tabla 41.
Valores obtenidos en pruebas de control

Dominio en el uso de ondas cerebrales	Control de cierre y apertura de mano robótica con arquitectura antropomórfica	
	Si	No
Si	6	1
No	0	2

4.5. Valor de frecuencias esperadas y observadas

En las tablas Tabla 42 y 43 se muestran las frecuencias observadas y esperadas respectivamente para ser utilizadas en el análisis de la hipótesis nula por el método de chi cuadrado. En la tabla de frecuencias observadas se realiza la suma de las filas y columnas para poder comparar el valor total de personas que tuvieron el dominio o no sobre las ondas cerebrales con las que controlaron o no el cierre y apertura de la mano robótica y determinar la cantidad de personas que lograron controlar la mano con ayuda de las ondas cerebrales. (Medwave, 2011)

Tabla 42.
Valores obtenidos

Dominio en el uso de ondas cerebrales	Control de cierre y apertura de mano robótica con arquitectura antropomórfica		Total
	Si	No	
Si	6	1	7
No	0	2	2
Total	6	3	9

En esta tabla se puede observar las frecuencias esperadas, las cuales se generan del siguiente criterio: “si siete personas de un total de nueve dominan las ondas cerebrales, la misma proporción se debería dar en el interior del grupo de control de la mano robótica”, es decir expresan lo siguiente: si de nueve personas siete controlan las ondas cerebrales; de seis cuantas deberían hacerlo.

Tabla 43.
Valores esperados

Dominio en el uso de ondas cerebrales	Controla el cierre y apertura de mano robótica con arquitectura antropomórfica		Total
	Si	No	
Si	4.67	2.33	7
No	1.33	0.67	2
Total	6	3	9

4.6. Cálculo de chi cuadrado

Para realizar el cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$x^2_{\text{calc}} = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

f_e Frecuencia de valor esperado

f_o Frecuencia de valor observado

Se realiza la sumatoria de los cálculos tomando los valores de cada esperados y observados de cada casilla.

$$x^2_{\text{calc}} = \frac{(6 - 4.67)^2}{4.67} + \frac{(0 - 1.33)^2}{1.33} + \frac{(1 - 2.33)^2}{2.33} + \frac{(2 - 0.67)^2}{0.67}$$

$$x^2_{\text{calc}} = 5.11$$

4.7. Cálculo del grado de libertad y nivel de significancia

Para el cálculo del grado de libertad se utiliza la siguiente ecuación:

$$gl = (\text{numero de filas} - 1) * (\text{numero de columnas} - 1) \quad \text{Ec. 6}$$

$$gl = (2 - 1) * (2 - 1)$$

$$gl = 1$$

El nivel de significancia es la probabilidad de encontrar un valor mayor o igual que el chi cuadrado tabulado, el nivel recomendado en estas definiciones es $p=0.05$.

4.8. Análisis de chi cuadrado mediante tabla

Para obtener el chi cuadrado de la Tabla 44, se utiliza el nivel de significancia y el grado de libertad, tomando el valor donde estos dos intersecan, en este caso:

$$x^2_{\text{tabla}} = 3.8415$$

Tabla 44.
Distribución de Chi Cuadrado x^2

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1
1	16,0274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872

FUENTE: (Instituto de física, 2016)

Para el análisis se utiliza la siguiente condición:

Si ($x^2_{\text{calc}} \leq x^2_{\text{tabla}}$), se acepta la hipótesis nula y se rechaza la alternativa y si ($x^2_{\text{calc}} \geq x^2_{\text{tabla}}$), se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la nula.

Por lo tanto, mediante los cálculos se tiene que:

$$x^2_{\text{calc}} \geq x^2_{\text{tabla}}$$

$$5.11 \geq 3.8415$$

Por esta razón se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo de esta manera que si se puede controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica mediante el uso de ondas cerebrales.

5. Análisis técnico/económico

5.1. Costos por impresión de mano

El prototipado de las diferentes partes de la mano robótica se realizó mediante una impresora 3D de marca Solidoodle S4, en la Tabla 45 se indica los costos de impresión para cada elemento requerido. El precio varía según su dimensión, debido al tiempo de impresión y cantidad de material requerido.

Tabla 45.
Costos de impresión 3D

COSTOS IMPRESIÓN 3D				
DETALLE	CANTIDAD	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL	
IMPRESIÓN 3D DEDO PULGAR	1 UNID	\$ 11,50	\$	11,50
IMPRESIÓN 3D DEDO ÍNDICE	1 UNID	\$ 8,50	\$	8,50
IMPRESIÓN 3D DEDO MEDIO	1 UNID	\$ 11,00	\$	11,00
IMPRESIÓN 3D DEDO ANULAR	1 UNID	\$ 10,00	\$	10,00
IMPRESIÓN 3D DEDO MEÑIQUE	1 UNID	\$ 7,50	\$	7,50
IMPRESIÓN 3D PALMA MANO	1 UNID	\$ 35,00	\$	35,00
IMPRESIÓN 3D BASE MANO	1 UNID	\$ 20,00	\$	20,00
IMPRESIÓN 3D DEDO POLEA	7 UNID	\$ 10,00	\$	70,00
IMPRESIÓN 3D BASE ARDUINO	1 UNID	\$ 15,00	\$	15,00
COSTO TOTAL			\$	188,50

5.2. Costos de elementos de sistemas de control

En la Tabla 46 se puede visualizar los costos de cada elemento requerido para el sistema de control, considerando que el lector de ondas cerebrales no se encuentra de venta en el país para lo cual fue necesaria su importación.

Tabla 46.

Costos de impresión del sistema de control

COSTOS DE SISTEMAS DE CONTROL			
DETALLE	CANTIDAD	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL
SERVOMOTOR MG996r	7 UNID	\$ 22,00	\$ 154,00
ARDUINO MEGA 2560	1 UNID	\$ 70,00	\$ 70,00
LECTOR DE ONDAS CEREBRALES MINDWAVE NEUROSKY	1 UNID	\$ 220,00	\$ 220,00
CABLES COMUNICACIÓN	2 UNID	\$ 3,50	\$ 7,00
COSTO TOTAL			\$ 451,00

5.3. Costos de elementos eléctrico-electrónicos

En la Tabla 47 se indica los costos de los materiales necesarios para las conexiones y los elementos de protección eléctrica para el modulo.

Tabla 47.

Costos de impresión sistema eléctrico-electrónico

COSTOS DE SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO			
DETALLE	CANTIDAD	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	1 UNID	\$ 25,00	\$ 25,00
CIRCUITO IMPRESO (PCB)	2 UNID	\$ 11,00	\$ 22,00
CABLES CONEXIÓN	10 METROS	\$ 2,50	\$ 25,00
PORTA FUSIBLE + FUSIBLE	1 UNID	\$ 2,00	\$ 2,00
INTERRUPTOR	1 UNID	\$ 2,00	\$ 2,00
PARO DE EMERGENCIA	1 UNID	\$ 3,50	\$ 3,50
COSTO TOTAL			\$ 79,50

5.4. Costos de elementos de sistemas mecánicos

En la Tabla 48 se muestran los costos de los materiales requeridos para el ensamblaje de la mano robótica, de igual manera el costo de las estructuras para el anclaje de los servomotores y el modular exhibidor del movimiento.

Tabla 48.
Costos de impresión sistema mecánico

COSTOS DE SISTEMA MECÁNICO			
DETALLE	CANTIDAD	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL
BASE PARA SERVOMOTORES	1 UNID	\$ 60,00	\$ 60,00
ELÁSTICOS	10 UNID	\$ 0,20	\$ 2,00
MODULAR	1 UNID	\$ 150,00	\$ 150,00
HILO NYLON	1 ROLLO	\$ 5,00	\$ 5,00
TORNILLOS 3MM + TUERCA + RODELA	10 UNID	\$ 0,30	\$ 3,00
EJE DE BRONCE 3MM	1 UNID	\$ 3,00	\$ 3,00
COSTO TOTAL			\$ 223,00

5.5. Costo total del proyecto

Mediante la sumatoria de los costos generados en el prototipado de las partes de la mano robótica, al igual que los elementos utilizados en el sistema de control, eléctrico-electrónicos y sistemas mecánicos se determinó el costo general del proyecto, el cual asciende a un total de: \$ 942

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El diseño y construcción del prototipo de mano robótica de tipo antropomórfico, fue posible realizarlo mediante características de la anatomía de la mano humana, lo cual le permitió la imitación de los tipos de agarre punta, lateral, gancho, cilíndrico y esférico, que son controlados en su cierre y apertura mediante ondas cerebrales.

- Por medio de la información de varios tipos de manos robóticas realizadas, se tomó como referencia sus distintos diseños, que sirvieron como aporte para la construcción del prototipo que permite imitar los tipos de agarre mediante el movimiento de sus dedos.
- La emulación de las características antropomórficas de la mano humana en la mano robótica, se alcanzó mediante la relación entre las dimensiones de las falanges, sus grados de libertad y ángulos de movilidad en cada uno de sus dedos, por lo cual fue necesario utilizar una restricción mecánica, es decir que poseen topes físicos que impiden sobrepasar los movimientos especificados.
- La versatilidad del movimiento de las falanges es directamente proporcional a los grados de libertad de cada dedo y éste a su vez con el sistema de transmisión que se utilice.
- Una vez obtenidas las dimensiones de las partes que conformaran la mano robótica con arquitectura antropomórfica, se realizó el modelamiento mediante el software SolidWorks, el cual mediante su interfaz facilitó el diseño, ensamblaje virtual y análisis de esfuerzos en las piezas.
- El diseño asistido por computador (CAD), es una gran ayuda para el diseño y la simulación de las fuerzas en referencia que actúan sobre el mecanismo, de esta manera considerar su rediseñarlo en el caso de necesitarse.
- Obtenido el modelado de las partes que conforman la mano robótica, se procedió con la construcción mediante una impresora 3D con tecnológica FDM, en la cual se utilizó material ABS que proporciona flexibilidad, resistencia y un mejor acabado para la elaboración de las piezas.
- Para la adquisición de las ondas cerebrales, se utilizó el lector MindWave de NeuroSky, el cual es un dispositivo que cumple con los requisitos para obtención de señales del cerebro.

- Por medio de un análisis de los diversos tipos de ondas que genera el cerebro, se seleccionó el uso de la onda alpha (meditación) y beta (atención), las mismas que pueden ser fácilmente generadas por el humano para el control de la mano robótica.
- Las ondas cerebrales de atención y meditación al ser generados por estados mentales son susceptibles a estímulos externos como distracciones, sonidos, sensaciones, olores, etc., lo que pudiera provocar la pérdida de control.
- Las ondas cerebrales no se pueden utilizar directamente, debido a que estas son inestables, por lo cual es necesario su acondicionamiento por hardware o software para generar estabilidad proporcional en cada una de ellas.
- Se utilizó el software LabView para la elaboración de la aplicación de control, el cual es compatible con el lector de ondas cerebrales permitiendo analizarlas y emitir las órdenes que serán enviadas mediante el dispositivo arduino hacia los servomotores logrando de ésta manera el movimiento del mecanismo.
- La calibración de tiempos de ejecución interna del programa, es clave para un correcto intercambio de datos, pues esta debe ir a la par de la velocidad de transmisión de ondas dada por el lector.
- La pantalla “*análisis de onda*” de la aplicación permite al usuario practicar con las señales de meditación, atención y adicionalmente el parpadeo, logrando adquirir la habilidad de control sobre estas ondas y en la mano robótica o cualquier mecanismo que se utilice.
- La aplicación permite calibrar el rango alto y bajo de la amplitud de onda de atención y meditación, para el control de apertura de los dedos de la mano robótica; permitiéndole al usuario lograr maniobrar con mayor facilidad.
- La selección del tipo de agarre y onda cerebral de meditación o atención, se realizan en la pantalla “*control*” de la aplicación del software LabView,

mediante el parpadeo débil para el cambio y parpadeo fuerte para confirmación en el menú interactivo.

- El control de la apertura y cierre del tipo de agarre seleccionado, se lo realiza mediante la intensidad del tipo de onda cerebral elegida entre atención y meditación, siendo el 100% la máxima y el 0% un estado de desconcentración.
- En la pantalla “*control*” de la aplicación, se puede ejecutar el movimiento manual de cada dedo, lo cual puede utilizarse como una herramienta de posicionamiento y de esta manera lograr la ubicación y calibración del punto de home como referencia para los movimientos.
- Se puede seleccionar y ejecutar el movimiento de los tipos de agarre de manera manual en la pantalla “*control*” de la aplicación, variando el porcentaje de apertura y cierre, mediante un control virtual “*pointer slide*”.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar un subprograma de falla de lectura, para evitar el ingreso de valores aleatorios mediante el lector MindWave de NeuroSky, que se producen al momento de no registrar datos.
- Al trabajar con el lector MindWave de NeuroSky, en un programa de LabView que contiene varios subVI's ejecutándose, se presenta dificultad para iniciar la conexión consecutivamente, por lo cual se recomienda en el proceso de conexión utilizar una espera “timer” que retrase esta parte del programa.
- Se debe cerrar los ojos para para lograr una magnitud elevada en la meditación, debido a que cualquier distracción visual evita el incremento de esta onda cerebral.
- La práctica y constancia son necesarias para un mejor control de las ondas, por lo cual se recomienda realizar pruebas en la pantalla “*análisis de onda*” previo a su uso.

- Se recomienda realizar pruebas de adquisición de ondas cerebrales en un medio libre de perturbaciones, para obtener resultados óptimos.
- La plataforma de control arduino mega presenta un defecto que es producido al usar frecuentemente salidas PWM, el intercambio de datos con la computadora se corrompe y ejecuta movimientos erráticos, siendo necesario resetear el circuito de manera manual, por lo cual es necesario configurar una de sus salidas digitales para restablecer el circuito de manera automática cada vez que se detenga el programa.
- El circuito de conexión para el control de servomotores, debe estar referenciado para evitar que el ruido produzca movimientos erráticos en los actuadores y de esta manera fracturas en el prototipo por golpes.
- Al momento de una falla en LabView, es recomendable cerrar el programa y verificar su conexión con “*NI-MAX*”.
- Al realizar un prototipado se recomienda utilizar el filamento de material ABS, esto se debe a que el PLA pese a ser de menor costo es demasiado rígido y las piezas tienden a fracturarse con golpes moderados.
- Se sugiere el uso de lubricante en los ejes de cada falange, para reducir el esfuerzo en los servomotores.
- Se recomienda utilizar un hilo nylon de un espesor mínimo de 0.6 mm, para evitar que sufra deformaciones por la fuerza de operación.
- Se recomienda el uso de conectores de hilos para el proceso de transmisión de movimiento con poleas para facilitar la unión entre ellos.
- Para el cambio de las bandas elásticas, se aconseja estirarlas para reducir la dilatación con el primer uso.

- Ante cualquier falla o error en el circuito electrónico, obstrucciones en el movimiento, esfuerzos en los actuadores, etc., es necesario oprimir el botón ***“paro de emergencia”*** para evitar cualquier posible daño hasta verificar completamente su conexión y movilidad adecuada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, H. (2009). *Yo creo mi futuro*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.yocreomifuturo.com/?p=1644>
- Arduino. (2007). *SmartProjects*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.arduino.cc>.
- Aviles, O., Leon, P., & Calle, G. (2005). *Diseño y construcción de un dedo para grippers roboticos* (Vol. Scientia et Technica Año XI).
- Banduc, M. T. (24 de 05 de 2012). Biomecánica y fisiología.
- Binaurales, S. (7 de Mayo de 2012). *Sonidos Binaurales*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.sonidosbinaurales.com/ondas-cerebrales/>
- Borri, D. C. (28 de 04 de 2011). Ergonomía II.
- Brainwave, L. (2013). *Brainwave Laboratories*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://brainwavelaboratories.com/las-ondas-cerebrales-vision-general/>
- Butterfass M, J., Liu, h., & Hirzinger, G. (1998). DLR-hand II: Next generation of a 83ulio83ous robot hand. *IEEE International Conference on Robotic & Automotation*, 2081-2086.
- Candelas Herías, F. A., & Corrales Ramón, J. (20 de Septiembre de 2007). *Universidad de Alicante*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.aurova.ua.es:8080/proyectos/dpi2005/docs/publicaciones/pub09-ServoMotores/servos.pdf>
- Carletti, E. J. (2007). *Servos: Características Básicas*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm
- Carroza, M. (2006). Design of a cybernetic hand for perception and action. *Biological Cybernetic*, 95, 629-644.
- Changoluisa Romero, D. P., & Escalante Viteri, F. J. (2012). *Biblioteca Digital de la Escuela Politecnica Nacional*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de http://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11167&shelfbrowse_itemnumber=44658#holdings
- Digita2. (2013). *Prototipado Rapido*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.protorapido.es/que.pdf>
- EMOTIV. (2011). *EMOTIV Corporation*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <https://www.emotiv.com/epoc/>

- EPSA. (2005). El Servomotor. España. Obtenido de <http://www.info-ab.uclm.es/labeledec/solar/electronica/elementos/servomotor.htm>
- Escobar, C. (13 de Mayo de 2013). *El Material de Impresion ABS y sus Características*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102832135-el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas>
- Escribano, M. (2010). *Eterna Unidad Infinita*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://eternaunidadinfinita.blogspot.com/2010/09/universo-tao.html>
- Flores, É. A. (13 de 04 de 2010). ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DISEÑO DE UN MECANISMO DE CUATRO BARRAS. México D. F. Bogotá.
- Garcia, F., Martinez, J., Saltaren, R., Guerrero, A., & Lopez, J. (2001). “Diseño mecatronico de un dedo antropomorfo Parte I: Mecánica. *Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena*.
- Hoppenfeld, S. (1985). *Exploración Física de la Columna Vertebral y las Extremidades* (20a ed. ed.). México D. F. *Instituto de fisica*. (Agosto de 2016). Recuperado el 11 de Febrero de 2017, de http://labrad.fisica.edu.uy/docs/tabla_chi_cuadrado.pdf
- Jaramillo, A. F. (1996). *PSICOTECNOLOGIA*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://sicotecnologia.com/cerebro.htm>
- Lajara Vizcaino, J., & Pelegri Sebastia , J. (2007). *LABVIEW. Entorno grafico de programación*. Recuperado el 20 de Enero de 2017, de http://books.google.com.ec/books?id=ZYAYyO8CmiIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Larsen, E. A. (2011). *MSc in Computer Science, Norwegian University of Science and Technology*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:440513/FULLTEXT01.pdf>
- Lasluisa Garcés, N. D. (2015). *Repositorio de la Fuerzas Armadas*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de Espe-L: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10575/1/T-ESPEL-MEC-0069.pdf>
- Li-Ren, L., & Han Pang, H. (1998). NTU Hand: A New Design of Dexterous Hand. *Transactions of the ASME*, 120, 282-292.
- Lovchik, C., & Diftler, M. (1999). The Robot Hand: A 83ulio83ous robot hand for space. *IEEE International Conference on Robotic & Automation*, 907-912.

- Lynxmotion. (2005). *User Manual SSC-32 Ver 2.0*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://sindyskinless.com/ssc-32.pdf>
- Martinez, O. (28 de Septiembre de 2009). *Slideshare*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de Ondas Alpha Beta Theta Delta:
<http://www.slideshare.net/Oscaritomartinez/ondas-alfa-beta-theta-delta-presentation>
- Marzo, R. A., & Abad, F. J. (30 de Septiembre de 2013). *RIUNET*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/32734/Memoria.pdf?sequence=1>
- Mason, M., & Salisbury, J. (1985). Robot Hands and the Mechanic of Manipulation. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 31(9), 879-880.
- Medwave. (11 de Diciembre de 2011). *Medwave*. Recuperado el Febrero de 10 de 2017, de <http://www.medwave.cl/link.cgi/Medwave/Series/MBE04/5266>
- Melo, J. L. (04 de Junio de 2015). *Ergonomía desde el punto de vista de la Higiene y seguridad Industrial*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de
<https://ergonomia-y-cibernetica.wikispaces.com/file/view/Antropometria+y+Ergonomia.pdf>
- Mott, R. (2009). Resistencia de Materiales. En R. L. Mott, *Resistencia de Materiales*. México D. F.: Pearson Educación.
- Nachon, H. (2009). *ANATOMIA Y FISIOLOGIA DEL SISTEMA OSEO*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://hnncbiol.blogspot.com/2008/01/sistema-oseo.html>
- National Instrument. (2010). *NI LabView Interface for Arduino Toolkit*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <https://es.scribd.com/document/92534841/NI-LabVIEW-Interface-for-Arduino-Toolkit>
- National Instrument. (2011). *NeuroSky LabView Controlador*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-19690?prevContainerType=2020&prevContainerID=74524>
- National Instruments. (2014). *LabView Custom Controls*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de Indicator and types:
http://www.inele.ufro.cl/apuntes/LabView/Manuales/Introduccion%20_A%20_Labview%20_Entorno.pdf
- NeuroSky. (2014). *Products Markets*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de
<http://neurosky.com/products-markets/eeg-biosensors/algorithms/>

- ProtoRapido. (2016). *Que es el prototipado Rapido*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.protorapido.es/que.pdf>
- Quiñonez, P. (2015). *Cirujia de la Mano*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://es.slideshare.net/kruverpulgar/cirugia-mano>
- Romero Perez, M. A. (2011). *Analisis cinematico e implementacion de una mano robotica servo-articulada*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Energia Mecánica y Eléctrica, México D. F. Obtenido de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8137/TESIS%20PRMA.pdf?sequence=1>
- Rouviere, H., & Delmas, A. (2005). *Anatomía humana descriptiva, topográfica y funcional* (10 ed.). Elsevier, 11 edición.
- Sanchez, S. (22 de Julio de 2015). *Descubriendo los plásticos de la impresión 3D*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>
- Stratasys. (2017). *Impresoras 3D*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>
- Taylor, C., & Schwarz, R. (1955). *The Anatomy and Mechanic of the Human Hand. Artificial Limbs*, 2, 22-35.
- Torres, F., & Sanchez, C. (2014). *Adquisición y análisis de señales cerebrales utilizando el dispositivo*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21351/1/MATCH'14_09_Torres%20et%20al.pdf
- Velásquez Sánchez, A., Merchán Cruz, E., Hernández Gómez, L., & Urriolagoitia Calderón, G. (octubre-diciembre de 2007). RANGO DE MOVILIDAD Y FUNCIÓN DESCRIPTIVA DEL DEDO ÍNDICE. *CIENTÍFICA*, 11(4), 177-188. Recuperado el 12 de Septiembre de 2016, de <http://www.redalyc.org/pdf/614/61411404.pdf>
- Veliz, W., Vera, J., & Valdivieso. (12 de Septiembre de 2011). *Aplicación de visión con LabVIEW*. Recuperado el 31 de Enero de 2017, de http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/REVISTA_CICYT/Articulo/20.pdf

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los Sres. **EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA Y DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA.**

En la ciudad de Latacunga, a los **24 días del mes de febrero del 2017.**

APROBADO POR:

Ing. Marco Singaña
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hállo
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO